



**CALIDAD DEL AIRE  
EN LA  
CIUDAD DE MÉXICO**

**Informe**  
**2009**





# PRESENTACIÓN

---

El Gobierno del Distrito Federal trabaja permanentemente para garantizar a sus habitantes el derecho a gozar de un ambiente adecuado para su desarrollo, salud y bienestar. En el cumplimiento de este derecho, en los últimos 20 años hemos liderado la instrumentación de programas para reducir la concentración de los contaminantes en el aire ambiente, en coordinación con las autoridades del Estado de México y del Gobierno Federal.

Además de la coordinación permanente con otras dependencias, es nuestra convicción el fomentar entre los habitantes de la ciudad su participación en la solución de los problemas que ambientalmente nos aquejan y con ello mejorar nuestra calidad de vida.

La Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, a través del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT), ha realizado puntualmente durante 24 años la tarea no solo de vigilar el estado de la calidad del aire, sino también la de mantener permanentemente informada a la población sobre su condición y los riesgos de su deterioro. El trabajo que realizamos en el SIMAT sin duda contribuye a la protección de la salud pública, a garantizar el derecho a la información, a evaluar el avance de las políticas de gestión y a conocer más sobre el origen y las causas del problema de la contaminación atmosférica.

Es por esto que me complace presentar el Informe 2009 de Calidad del Aire en la Ciudad de México. En el encontrarán información sobre la situación actual de la calidad del aire, los resultados del primer año de monitoreo de la visibilidad, el nivel de cumplimiento de la normatividad nacional e internacional, las tendencias actualizadas de los principales contaminantes del aire e información detallada sobre las causas e impacto de la contaminación en nuestra ciudad.

La Secretaria del Medio Ambiente  
Martha Delgado Peralta



**Ciudad  
México**  
*Capital en Movimiento*



Secretaría del  
Medio Ambiente

Jefatura de Gobierno del Distrito Federal

Secretaría del Medio Ambiente

Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire

Dirección de Monitoreo Atmosférico

Subdirección de Análisis

Subdirección de Meteorología

Subdirección de Monitoreo

Subdirección de Sistemas



**CALIDAD DELAIRE  
EN LA  
CIUDAD DE MÉXICO**

# Informe

20009



Coordinación editorial

Guadalupe Granados Gutiérrez e Ivalu Loya Moreno

Ilustraciones

Mónica Jaimes Palomera e Ivalu Loya Moreno

Diseño editorial y de portada

Ivalu Loya Moreno

D.R. © 2010

Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal  
Plaza de la Constitución, N° 13er. Piso Col. Centro, C.P. 06068, Del.  
Cuauhtémoc, México, D.F., [www.sma.df.gob.mx](http://www.sma.df.gob.mx)

Los compendios en archivos electrónicos que forman parte de esta publicación, así como la publicación en formato electrónico están protegidos bajo la licencia Creative Commons 2.5 Atribución No comercial / Licenciamiento Recíproco.



Impreso y hecho en México  
*Printed and made in Mexico*

9	RESUMEN EJECUTIVO
15	ANTECEDENTES
20	CUMPLIMIENTO DE LAS NORMAS OFICIALES MEXICANAS
32	LACALIDAD DELAIRE EN LA CIUDAD DE MÉXICO Y LAS NORMAS INTERNACIONALES
44	EL CLIMA
56	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA CONTAMINACIÓN DELAIRE
84	TENDENCIA DE LA CALIDAD DELAIRE
98	ACTIVACIÓN DEL PROGRAMA DE CONTINGENCIAS AMBIENTALES ATMOSFÉRICAS
112	LA VISIBILIDAD
130	DEPÓSITO ATMOSFÉRICO Y LLUVIA ÁCIDA
145	GLOSARIO
149	ANEXOS
177	REFERENCIAS



Fotografía: Archivo Dirección de Monitoreo Atmosférico

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

#### Dirección de Monitoreo Atmosférico

Armando Retama Hernández, Guadalupe Granados Gutiérrez.

#### Subdirección de Análisis

Cristina Ortuño Mojica, Mónica Jaimes Palomera, Rocío Carmona Mártir, Gabriela Domínguez Lima, Xóchitl Loretto Carmona, Elizabeth Manríquez Peñaloza, Laura E. Ocampo Trejo, Nora O. Ocampo Trejo, Elizabeth Reyes Zárate, Juan Manuel Arriaga Cosío, Alejandro Gallardo Pérez, Samuel López Venegas, Arturo Navarrete Miranda, Eduardo Preciado Martínez, Ángel Sánchez Martínez.

#### Subdirección de Meteorología

Alfredo Alfonso Soler, Marco G. Hernández Hernández, José Ávalos Torres, Fernando Lara García, Arturo Pérez Sesma.

#### Subdirección de Monitoreo

Olivia Rivera Hernández, Miguel Sánchez Rodríguez, Arturo Galicia Zepeda, Jorge J. Domínguez Ochoa, Beatriz Martínez Hernández,

Norma Rebeca Ríos Mejía, Alfonso López Medina, Alejandro Campos Díaz, César Gabriel Abad Mendoza, Raúl Jesús Amador Calderón, Julio César Argueta Rodríguez, Alfredo Bermúdez Alvarado, Juan Manuel Campos Díaz, Salvador Cervantes Garduño, Eloy Contreras Sánchez, José Gabriel Elías Castro, Eugenio Rafael López Arredondo, Ricardo Alberto Pérez Hernández, Adrián Pérez Narváez, José Martín Suástegui Nolasco, Fernando Alonso Vega Bernal.

#### Subdirección de Sistemas

Alejandro Ríos Mejía, José Luis del Río Jáuregui, Manuel Pineda Escamilla, Mauricio Hernández Mote, Jorge Cornejo Martínez, Leyda Castro Rodríguez, Ivalu Loya Moreno, Paloma Macías Hernández, Enrique Arce Rosas, Fernando Delgadillo Gómez, Ramón Gaona Díaz, Christian Pérez Romero, Edgar Piedras Camacho, Edgar Rojas Ruiz, Víctor Valdez Espinoza.

#### Administración

Margarita Barrientos Contreras, Lourdes González Mora, Francisco J. Serrano Vázquez, José Luis Cruz Fernández.

#### Dirección de Programas de Calidad del Aire e Inventario de Emisiones

Jorge Sarmiento Rentería, Patricia Camacho Rodríguez.

Agradecemos el apoyo y la colaboración del Dr. Humberto Bravo Álvarez, el Dr. Rodolfo Sosa Echeverría y su equipo del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, a la Subdirección de Macromedición y Control de Redes del Sistema de Aguas de la Ciudad de México, a la Fuerza Aérea Mexicana, al Aeropuerto Internacional Benito Juárez Ciudad de México, al Servicio Meteorológico Nacional coordinado por el M. en C. Felipe Adrián Vázquez Gálvez.

De la misma manera, agradecemos todo el apoyo y la colaboración que de manera desinteresada nos han brindado las personas e instituciones y que a lo largo de estos años nos han permitido realizar el monitoreo de la calidad del aire.



La presencia de contaminantes en la atmósfera de las grandes ciudades tiene una estrecha relación con las fuentes de emisión, el terreno y la meteorología de la región. En el caso de la Ciudad de México, factores como las condiciones fisiográficas, el clima de la cuenca, el desarrollo urbano e industrias y el consumo de energía, influyen en el deterioro de la calidad del aire, la cual a pesar de la instrumentación de medidas integrales y los esfuerzos realizados por las autoridades, continúa presentando condiciones desfavorables en la mitad de los días del año.

### Cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas

En 2009 se mantuvo el cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de salud ambiental para los contaminantes dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), monóxido de carbono (CO) y plomo (Pb). Sin embargo, la Ciudad de México mantiene el incumplimiento de la NOM para ozono y partículas suspendidas.

En el caso del ozono, la NOM especifica dos indicadores, uno para el promedio horario con una concentración de 0.110 ppm y otro para el promedio de 8 horas con una concentración de 0.080 ppm para el quinto máximo. En 2009 la concentración de ozono superó ambos indicadores. Tan solo, en la estación Pedregal la concentración horaria máxima fue de 0.198 ppm, muy por encima del valor de la norma, en el resto de las estaciones se reportaron frecuentemente concentraciones que superaban el valor límite. La estación Pedregal registró la mayor frecuencia de excedencias con un total de 287 horas durante el año. El total de días con concentraciones por encima de la norma fue de 181 días. En el caso del indicador de 8 horas, en 2009 se registró un valor para el quinto máximo de 0.124 ppm, el cual supera el valor límite de 0.080 ppm propuesto en la norma.

En el caso de las partículas suspendidas, la norma establece criterios para las fracciones de partículas suspendidas totales (PST), partículas suspendidas menores a 10 micrómetros ( $\text{PM}_{10}$ ) y partículas menores a 2.5 micrómetros ( $\text{PM}_{2.5}$ ). Las concentraciones reportadas en 2009 no cumplen con lo especificado en la NOM para ninguna de las tres fracciones.

### La calidad del aire en la Ciudad de México y las normas internacionales

En los últimos años la evidencia científica revela que los efectos en la salud asociados a la contaminación del aire se observan a concentraciones más bajas de lo que se pensaba, lo que ha motivado que la Organización Mundial de la Salud (OMS) redefina los límites para la protección de la salud pública y que varios países revisen sus estándares de calidad del aire.

Por la importancia que tiene la protección de la salud pública es necesario evaluar en el contexto de la evidencia científica la situación de la calidad del aire en la Ciudad de México. La evaluación de la información obtenida en 2009 empleando los valores guía recomendados por la OMS, revela que en la Ciudad de México sólo el monóxido de carbono y el plomo cumplen con el estándar propuesto. Por su parte, cuando se compara con los estándares de los Estados Unidos, que es una referencia inmediata de un país que presta particular atención a la calidad del aire, se observa que sólo el monóxido de carbono y el plomo cumplen con los estándares de calidad del aire vigentes.

### El clima

Las condiciones de calidad del aire están directamente relacionadas con las condiciones del clima. Los factores meteorológicos que se presentan a nivel local y regional pueden definir los niveles de contaminación. El año 2009 se caracterizó por el incremento de la temperatura y el retraso de la temporada de lluvias. Además el número de inversiones térmicas disminuyó a 81 en comparación con 2008 que registró 103. Los meses con mayor número de inversiones fueron abril y diciembre, por el contrario en el mes de septiembre no se presentó ninguna, aunque registró el promedio mensual más alto de precipitación pluvial con 218 milímetros. En cuanto a la tendencia histórica de la precipitación, de 2007 a 2009 se presentó un decremento paulatino en el promedio anual, afectando principalmente al sur y poniente de la ciudad.

En el caso de la radiación solar, durante la época seca-caliente (marzo-mayo) de 2009 se registraron los valores máximos del Índice de Radiación Ultravioleta (IUV), donde se observaron valores con la condición EXTREMADAMENTE ALTA, principalmente entre las 12:00 y 15:00 horas.

## Distribución espacial y temporal de la contaminación del aire

Las emisiones de los contaminantes primarios como el dióxido de azufre, el dióxido de nitrógeno, el monóxido de carbono y las partículas suspendidas, provienen principalmente de la quema de combustibles, donde los vehículos y la industria tienen la mayor contribución. Las concentraciones más altas suelen registrarse donde se ubica la zona industrial (norte y oriente) y las principales vialidades (centro).

Durante 2009, en la época seca-fría (noviembre-febrero) se registraron las mayores concentraciones de estos contaminantes, no así para el caso del ozono que registró los peores episodios en la época seca-caliente. En el caso de las partículas menores a 2.5 micrómetros, las mayores concentraciones se presentaron de enero a mayo.

En el caso del análisis por día de la semana, se observó que durante 2009 los días jueves, viernes y sábado registraron las concentraciones promedio más altas de la mayoría de los contaminantes. Para ozono el sábado registró el promedio más alto, mientras que, para partículas suspendidas y óxidos de nitrógeno el jueves.

## Tendencia de la calidad del aire

La gestión ambiental, dedicada a disminuir la contaminación del aire, puede ser evaluada conociendo la tendencia histórica y la disminución de las concentraciones de los contaminantes. En este contexto, la tendencia es evaluada a través del *índice de la media anual relativa*, el cual indica que de 1989 a 2009 todos los contaminantes mantienen una tendencia decreciente. El plomo y el dióxido de azufre son los que presentaron el mayor decremento del período con 97 y 89%, respectivamente. El monóxido de carbono tuvo una disminución efectiva del 79%, en dióxido de nitrógeno fue de 34%, en ozono de 33% y para los óxidos de nitrógeno fue de 13%. En cuanto a las partículas se observó una disminución de 66 y 43% para  $PM_{10}$  y PST, respectivamente. En el caso de  $PM_{2.5}$  se observó una disminución de 10% durante el período 2004-2009.

A pesar de esta tendencia general a la baja, en el último año se presentaron incrementos del índice en ozono y partículas. De 2008 a 2009 el ozono presentó un

incremento de 0.1%, las PST reportaron un incremento de 5.4%, para  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  el incremento fue de 4.6% y 3.7%.

### Activación del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas

Las concentraciones máximas de ozono y partículas durante 2009 dieron lugar a la activación del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas en su fase de precontingencia en dos ocasiones, ambas favorecidas por la influencia de factores meteorológicos.

En las primeras semanas de febrero, un sistema de alta presión sobre la región central del país provocó inversiones térmicas, intensa radiación solar, cielo despejado y viento débil, esta combinación de factores permitió que el 13 de febrero se reportara el peor episodio de contaminación por ozono del año, alcanzando un máximo de 0.198 ppm (180 puntos IMECA) en el suroeste de la ciudad y manteniendo la precontingencia durante tres días.

Por otra parte, las intensas lluvias que se presentaron a finales del mes de octubre en la ciudad, provocaron que en la Sierra de Guadalupe se registraran deslaves e inundaciones. En los siguientes días la tierra arrastrada y depositada por la lluvia fue levantada por el paso de los vehículos y por las actividades de limpieza, por lo que el 3 de noviembre la estación Xalostoc registró una concentración de  $248 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $PM_{10}$  con la que se activó la segunda precontingencia que tuvo una duración de tres días. Esta precontingencia fue de carácter regional.

### Visibilidad en la Ciudad de México

En 2009 inició el monitoreo del deterioro de la visibilidad en la Ciudad de México. La disminución de la visibilidad es una característica de ciudades contaminadas. Estudios a nivel mundial, demuestran que existe una asociación entre la disminución de la visibilidad y las concentraciones de partículas y algunos contaminantes gaseosos.

En la Ciudad de México la disminución de la visibilidad se asocia con el incremento en la concentración de partículas, dióxido de nitrógeno y la humedad relativa. Du-

rante la mayor parte del año la condición de visibilidad es “mala”, es decir, menor a 10 km. El mes de mayo registró la peor condición de visibilidad provocada por la condición de estabilidad atmosférica responsable también de las altas concentraciones de ozono y aerosoles.

### Depósito atmosférico y lluvia ácida

La mayor cantidad de precipitación en 2009 se registró en el sur y poniente de la ciudad, donde se ubica la extensión más importante de bosques naturales del Distrito Federal. Además de recibir la mayor cantidad de lluvia, estas zonas son las que registran el mayor número de episodios con lluvia ácida. El valor de pH más ácido se registró en la estación Ecoguardas Ajusco (EAJ) con un valor de 4.9. En cuanto a los sulfatos y nitratos, principales responsables de la acidez en el agua de lluvia, la estación Ex Convento Desierto de los Leones (EDL) registró un depósito total de sulfatos de 26.4 kilogramos por hectárea, mientras que el depósito total de nitratos fue mayor en la estación San Nicolás Totolapan (SNT), con 28.2 kilogramos por hectárea. Estos valores son superiores a los registrados en algunos lugares de Estados Unidos y Canadá.



La contaminación ambiental puede ser entendida como un producto inevitable del progreso, como una consecuencia no deseable del desarrollo industrial y como resultado de la masiva intervención humana en los ecosistemas. No obstante, a pesar de la severidad con la que se presentan los problemas ambientales en países como México y en regiones específicas como la Ciudad de México y su zona metropolitana, no siempre existe una conciencia de su presencia y de sus consecuencias. (Lezama, 2001).

Los contaminantes del aire son compuestos tóxicos que provocan un daño directo a la salud humana aun en concentraciones que podrían parecer ínfimas. Algunos de ellos no son detectados por los sentidos, lo que hace que su exposición pase desapercibida. Sus efectos pueden ser inmediatos o de largo plazo, deteriorando la calidad de vida y disminuyendo la expectativa de vida de los habitantes de la Ciudad de México. Actualmente, no existen soluciones inmediatas para combatir la contaminación del aire sin perjudicar la economía ni las actividades diarias de la ciudad, la mayoría de las medidas de control son de carácter restrictivo por lo que su instrumentación requiere de planeación previa, coordinación con otras dependencias o niveles de autoridad y de la participación ciudadana.

La gestión de la calidad del aire es una actividad transversal que afecta los aspectos más importantes de la vida diaria de la ciudad: transporte, industria, vivienda, desarrollo urbano, desarrollo rural, tecnología y consumo energético. A pesar de los

esfuerzos realizados para disminuir la contaminación del aire, continúa como uno de los retos ambientales más serios que enfrentan los habitantes y las diferentes administraciones que han gobernado e instrumentado políticas públicas en la Ciudad de México.

### El Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México

El Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) es el instrumento con el que se evalúa la calidad del aire en la Ciudad de México y su área metropolitana. La operación del SIMAT está a cargo de la Dirección de Monitoreo Atmosférico adscrita a la Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y en 2009 operó 48 estaciones en las que se miden diferentes parámetros de calidad del aire (Figura i).

### Financiamiento

La operación del SIMAT fue financiada en su totalidad por la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, que durante el ejercicio fiscal 2009 asignó 2.6 millones de pesos, provenientes de recursos fiscales, para la adquisición de refacciones, accesorios, consumibles y servicios de mantenimiento.

Durante 2009, el SIMAT continuó recibiendo el apoyo del Departamento de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México para el



Figura i Componentes del SIMAT.

análisis fisicoquímico de las muestras de depósito húmedo recolectadas en la REDDA.

### Situación del SIMAT en 2009

El año 2009 fue un año particularmente difícil para la operación del SIMAT debido a cuatro aspectos relevantes: la devaluación del peso frente al dólar en el mes de febrero, la epidemia del virus AH1N1 que paralizó casi en su totalidad las actividades de la ciudad durante los meses de abril y mayo, una temporada de lluvias caracterizada por frecuentes tormentas eléctricas y la desaparición de la Compañía de Luz y Fuerza del Centro en el mes de octubre. Estas situaciones provocaron retrasos en el programa de compras, reducción de contratos de servicios, ajustes presupuestales, disminución en el número de refacciones y consumibles de importación, cierre de escuelas y edificios públicos en donde se ubican algunas estaciones, daños eléctricos en los equipos de medición y problemas en el suministro de energía eléctrica. En la Tabla i se pro-

porciona información detallada sobre la operación del SIMAT durante 2009.

En el caso particular de la estación Metro Insurgentes (MIN) los recurrentes actos de vandalismo contra la estación, las líneas de comunicación y la operación de los analizadores, obligó a la Dirección de Monitoreo Atmosférico a suspender definitivamente su operación.

Las obras de construcción que se realizaron en los alrededores de la estación Tultitlán (TLI), en el municipio de Coacalco en el Estado de México, provocaron que se suspendiera temporalmente la operación del monitor de  $PM_{10}$ , ya que las emisiones de polvos provocadas por el desarrollo de las obras de construcción a menos de 500 metros de la estación, interferían con la medición del contaminante. El monitoreo de  $PM_{10}$  estuvo suspendido desde noviembre de 2007 hasta el 8 de diciembre de 2009.

En el caso de la estación Chapingo (CHA), la huelga de los trabajadores del Colegio de Postgraduados

Tabla i Estaciones con problemas de operación durante 2009 (Continúa en la siguiente página).

Zona	Estación	Clave	Subred	Parámetro	Fecha inicial	Fecha final	Motivo	
Noroeste	Camarones	CAM	RAMA	$PM_{2.5}$	12/mar/2009	14/abr/2009	Falla en el aire acondicionado	
				$PM_{2.5}$	30/jun/2009	17/nov/2009	Retraso en la entrega de refacciones	
				$PM_{2.5}$	28/dic/2009	04/feb/2010	Falla de energía en la zona	
	Instituto Mexicano del Petróleo	IMP	RAMA	CO	01/jul/2009	21/dic/2009	Retraso en la entrega de refacciones	
				REDMET	WSP, WDR	20/abr/2009	—	Retraso en la entrega de refacciones
					TMP, RH	23/mar/2009	25/mar/2010	Retraso en la entrega de refacciones
	Tacuba	TAC	RAMA	$O_3$ , $NO_x$ , CO, $SO_2$	21/sep/2009	22/dic/2009	Retraso en la entrega de refacciones	
				REDMET	WSP, WDR	27/jun/2009	—	Retraso en la entrega de refacciones
					TMP Y RH	01/jul/2009	—	Retraso en la entrega de refacciones
	Tultitlán	TLI	RAMA	$PM_{10}$	05/nov/2007	08/dic/2009	Obras de construcción en la zona	
Vallejo	VAL	RAMA	CO, $SO_2$	01/jul/2009	17/dic/2009	Retraso en la entrega de refacciones		

## ANTECEDENTES

Zona	Estación	Clave	Subred	Parámetro	Fecha inicial	Fecha final	Motivo
Noreste	Acolman	ACO	RAMA	O <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub>	06/ago/2009	23/dic/2009	Retraso en la entrega de refacciones
				PM <sub>2.5</sub>	06/ago/2009	23/dic/2009	Retraso en la entrega de refacciones
	Aragón	ARA	RAMA	SO <sub>2</sub>	01/jul/2009	03/feb/2010	Retraso en la entrega de refacciones
	Chapingo	CHA	RAMA	O <sub>3</sub>	02/mar/2009	30/may/2009	Huelga
				WSP, WDR, TMP, RH	14/mar/2009	26/may/2009	Huelga
			REDMET	WSP, WDR, TMP, RH	18/sep/2009	—	Retraso en la entrega de refacciones
	La Villa	LVI	RAMA	PM <sub>10</sub>	03/sep/2009	05/nov/2009	Retraso en la entrega de refacciones
				SO <sub>2</sub>	04/sep/2009	21/dic/2009	Retraso en la entrega de refacciones
	Los Laureles	LLA	RAMA	SO <sub>2</sub>	01/jul/2009	13/abr/2009	Retraso en la entrega de refacciones
	San Juan de Aragón	SJA	RAMA	PM <sub>2.5</sub>	06/ago/2009	18/nov/2009	Retraso en la entrega de refacciones
	Villa de las Flores	VIF	RAMA	PM <sub>10</sub>	07/ago/2009	18/nov/2009	Retraso en la entrega de refacciones
				NO <sub>x</sub> , CO	07/ago/2009	22/dic/2009	Retraso en la entrega de refacciones
			REDMET	SO <sub>2</sub>	07/ago/2009	22/dic/2009	Retraso en la entrega de refacciones
WSP, WDR				07/ago/2009	25/mar/2010	Retraso en la entrega de refacciones	
			TMP, RH	07/ago/2009	24/mar/2010		
Suroeste	Cuajimalpa	CUA	RAMA	O <sub>3</sub>	01/jul/2009	02/feb/2010	Retraso en la entrega de refacciones
				REDMET	WSP, WDR	01/jul/2009	25/mar/2010
				TMP, RH	01/jul/2009	25/mar/2010	Retraso en la entrega de refacciones
	Pedregal	PED	REDMET	WSP, WDR	03/sep/2009	—	Retraso en la entrega de refacciones
				TMP	03/sep/2009	24/mar/2010	Retraso en la entrega de refacciones
				RH	13/abr/2009	24/mar/2010	Retraso en la entrega de refacciones
	Plateros	PLA	RAMA	PM <sub>10</sub>	04/may/2009	—	Obras de construcción en la zona
Tlalpan	TPN	RAMA	O <sub>3</sub>	30/jun/2009	15/ene/2010	Retraso en la entrega de refacciones	
			REDMET	WSP, WDR	30/jun/2009	—	Retraso en la entrega de refacciones
			REDMET	TMP, RH	30/jun/2009	24/mar/2010	Retraso en la entrega de refacciones
Sureste	Tláhuac	TAH	REDMET	WSP, WDR	01/sep/2009	—	Retraso en la entrega de refacciones
				REDMET	TMP, RH	01/sep/2009	27/mar/2010
	Taxqueña	TAX	RAMA	PM <sub>10</sub>	18/ago/2009	13/nov/2009	Retraso en la entrega de refacciones
				NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , CO	18/ago/2009	18/dic/2009	Retraso en la entrega de refacciones
				O <sub>3</sub>	17/ago/2009	18/dic/2009	Retraso en la entrega de refacciones

Tabla i Estaciones con problemas de operación durante 2009 (Continúa de la página anterior).

y de la Universidad Autónoma de Chapingo impidió el acceso al personal técnico operativo del SIMAT responsable de realizar el mantenimiento de los equipos. La huelga inició el 18 de noviembre de 2008 y concluyó hasta el 29 de febrero de 2009.

### Nuevos productos

El instrumento de difusión más importante del SIMAT es el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA), que es una herramienta confiable, sencilla y oportuna de información y prevención. El IMECA se encuentra disponible en diversos medios para que la población tome decisiones informadas para proteger su salud. En enero de 2009 la Dirección de Monitoreo Atmosférico, presentó el nuevo sitio Web del Sistema de Monitoreo Atmosférico (<http://www.sma.df.gob.mx/simat2>), el cual ofrece un espacio adecuado para la difusión de la información de la calidad del aire a través una interfase interactiva amigable y en un lenguaje simple. El sitio incorpora información revisada y mejorada con diferentes niveles de complejidad tomando en

consideración los conocimientos y la formación de los grupos mayoritarios entre los usuarios. Hace uso de nuevas herramientas de programación y animación para ofrecer una mejor experiencia al visitar la página. Incluye animaciones que explican fenómenos complejos como la formación del ozono, la lluvia ácida y las inversiones térmicas. Además incorpora una sección en idioma inglés para la difusión del IMECA.

Por otra parte, en enero de 2009 se instaló una cámara fotográfica en el sur de la ciudad en la ladera del Ajusco. La cámara permite obtener imágenes en alta resolución cada 10 minutos de la Ciudad de México que son desplegadas en el sitio Web para su visualización. Estas permiten a la población observar el vínculo que existe entre la contaminación del aire y su impacto directo en la atmósfera. Además de generar información que será empleada en el análisis cuantitativo del deterioro de la visibilidad y contribuir a sensibilizar a los ciudadanos sobre el problema de la contaminación al ofrecer una imagen dinámica.



# CUMPLIMIENTO DE LAS NORMAS OFICIALES MEXICANAS

---



La Ley General de Salud en su Título Séptimo Capítulo IV de los efectos del ambiente en la salud, refiere en su Artículo 116 que son las autoridades sanitarias quienes establecerán las normas, tomarán medidas y realizarán actividades tendientes a la protección de la salud humana ante los riesgos y daños provocados por las condiciones del ambiente. En este sentido, las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de Salud Ambiental son instrumentos regulatorios de la Secretaría de Salud que tienen como propósito contribuir a que se cumplan los objetivos de mejoramiento de la calidad del aire en el territorio nacional.

El Gobierno del Distrito Federal está obligado a observar el cumplimiento de estas normas y además instrumentar las acciones necesarias para el control de la contaminación, de conformidad con las atribuciones establecidas en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en su Artículo 112 del Título Cuarto Capítulo II. Por lo anterior, en esta sección se describe el avance del Gobierno del Distrito Federal en el cumplimiento de la normatividad en materia de salud ambiental en la Ciudad de México y su área metropolitana durante el año 2009.

### Dióxido de azufre

Norma Oficial Mexicana: 0.130 ppm promedio de 24 horas; 0.030 ppm promedio anual.  
Cumplimiento de la Norma en la Ciudad de México: SI

El dióxido de azufre se produce durante la combustión de compuestos que contienen azufre. Los combustibles fósiles y la quema de biomasa son las principales fuentes de emisión en la Ciudad de México. Aun cuando no se ha cuantificado con precisión, se sabe que las emisiones volcánicas y los incendios forestales contribuyen a la producción de este contaminante. El dióxido de azufre es un gas incoloro fácilmente soluble en agua. Su oxidación da origen a la formación de ácido sulfúrico y sulfuroso, los cuales son precursores de las partículas y la lluvia ácida.

La única ruta de exposición del ser humano es la inhalación. Su solubilidad en sustancias acuosas facilita su absorción en las membranas mucosas de la nariz y el tracto respiratorio superior, sin embargo,



Fotografía de la página anterior: Imagen obtenida por la Hazecam el día 17 de enero de 2010 a las 17:30. Las condiciones de visibilidad permiten apreciar con claridad el centro y poniente de la Ciudad de México, con las montañas de la Sierra de Guadalupe como fondo. El punto más alto es el Cerro Tres Padres, que tiene una altura aproximada de 3000 metros y se encuentra a una distancia de 37 kilómetros del lugar de donde se tomó la imagen. Detrás de las montañas de la sierra se distinguen algunos picos localizados en el Estado de Hidalgo a más de 60 kilómetros. En la imagen se pueden observar algunos de los edificios simbólicos de la ciudad como el World Trade Center, la Torre Mayor, la Torre de PEMEX y el edificio de la Rectoría de la UNAM. Este día se caracterizó por vientos intensos y una baja humedad relativa.

cuando la penetración se extiende hacia las regiones bajas del sistema respiratorio los efectos se acentúan. El efecto máximo de este contaminante se observa en los primeros minutos posteriores a la exposición. Además, la exposición prolongada a este contaminante puede producir daño al epitelio en las vías respiratorias. Los asmáticos son un grupo particularmente sensible, generalmente responden de manera similar que los sujetos normales con desarrollo de broncoconstricción pero a concentraciones menores (Organización Mundial de la Salud, 2006a).

Desde 2003 los niveles de este contaminante no superan los valores de la NOM-022-SSA1-1993 (Secretaría de Salud, 1994a). En 2009 se mantuvo el cumplimiento de los indicadores de la NOM en todas las estaciones, el valor máximo para el promedio de 24 horas se observó en las estaciones Tlalnepantla (TLA) y Tultitlán (TLI) con 0.052 ppm. El valor máximo del promedio anual se registró en la estación Tlalnepantla con 0.011 ppm. Tanto el promedio de 24 horas como el promedio anual se encuentran por debajo de 0.130 ppm y 0.030 ppm, respectivamente (Anexo B).

## Dióxido de nitrógeno

Norma Oficial Mexicana: 0.210 ppm, promedio horario.

Cumplimiento de la Norma en la Ciudad de México: SI

Los óxidos de nitrógeno incluyen varias especies que contienen oxígeno y nitrógeno, sin embar-

go, desde el punto de vista de la salud humana el dióxido de nitrógeno es el más importante. El dióxido de nitrógeno es un fuerte oxidante y reacciona fácilmente con el agua para formar ácido nítrico y óxido nítrico. Este contaminante se produce durante la combustión pero en menores cantidades que el monóxido de nitrógeno (óxido nítrico), la mayor parte del dióxido de nitrógeno se genera por la oxidación del monóxido de nitrógeno en presencia de radicales orgánicos (Finlayson-Pitts y Pitts, 1986). En la tropósfera, este contaminante juega un papel importante en la producción fotoquímica del ozono y su presencia regula las concentraciones de ozono durante el día.

Además de los efectos que produce en la salud, el dióxido de nitrógeno puede absorber parte de la radiación solar y junto con las partículas suspendidas es responsable de la disminución de la visibilidad, es precursor de la lluvia ácida y también juega un papel importante en el cambio climático global. Junto con el óxido nítrico es un regulador de las capacidades oxidativas en la tropósfera al controlar el desarrollo y destino de los radicales, incluyendo el radical hidroxilo.

La principal ruta de exposición en los seres humanos es durante la respiración. Una gran parte del dióxido de nitrógeno se remueve en la nasofaringe, sin embargo, durante la realización de ejercicio puede alcanzar regiones más bajas del sistema respiratorio. Algunos estudios han demostrado que el dióxido de nitrógeno o algunos de sus derivados químicos, pueden permanecer dentro de los pulmones por períodos prolongados de tiempo. Se ha observado también la presencia de óxido nítrico y

Aun cuando las concentraciones de dióxido de nitrógeno se mantienen dentro del límite de la NOM, es un importante precursor del ozono, de la lluvia ácida y contribuye directamente al deterioro de la visibilidad.

nitroso o sus sales en la sangre u orina después de una exposición al dióxido de nitrógeno.

En varios estudios experimentales de toxicología humana de corta duración, se han observado efectos agudos tras la exposición a concentraciones de dióxido de nitrógeno mayores a  $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (0.339 ppm) durante una hora. El nivel más bajo de exposición a dióxido de nitrógeno que ha mostrado un efecto directo en la función pulmonar de los asmáticos es de  $560 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (0.380 ppm), no obstante, los estudios realizados sobre la capacidad de respuesta bronquial en los asmáticos parecen indicar que aumenta con niveles superiores a  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  equivalente a 0.136 ppm (Organización Mundial de la Salud, 2006a).

En la Ciudad de México, desde 2006 las concentraciones de dióxido de nitrógeno se mantienen dentro de los valores recomendados por la NOM-023-SSA1-1993 (Secretaría de Salud, 1994b). En 2009 la estación Tacuba (TAC) registró el valor máximo con 0.211 ppm el día 9 de enero de 2009 a las 10:00 horas. Debido a que la NOM permite que el valor de 0.210 ppm se exceda sólo una vez al año, el valor registrado en Tacuba no limita el cumplimiento de la NOM (Anexo B).

### Monóxido de carbono

Norma Oficial Mexicana: 11.0 ppm promedio móvil de 8 horas.

Cumplimiento de la Norma en la Ciudad de México: SI

En la Ciudad de México, las concentraciones de monóxido de carbono se mantienen dentro del límite de la NOM desde 2001 y en 2009 se registraron las concentraciones más bajas desde 1986.

El monóxido de carbono es un gas incoloro producto de la combustión incompleta de los combustibles fósiles, es emitido también de manera natural por las plantas, la actividad microbiana, la oxidación del metano y otros hidrocarburos. Las emisiones naturales del monóxido de carbono en la Ciudad de México no se cuantifican en los inventarios de emisiones, ya que son despreciables frente a la magnitud de las emisiones antropogénicas. A pesar de esto, a nivel global la contribución de las fuentes naturales es similar a las antropogénicas (Finlayson-Pitts y Pitts, 1986).

La única vía de exposición es durante la respiración. El monóxido de carbono se absorbe fácilmente a través de los pulmones y se difunde atravesando la membrana alveolar. El intercambio de monóxido de carbono entre el aire inhalado y la sangre es controlado por mecanismos físicos (masa, transporte y difusión) y fisiológicos (ventilación alveolar).

Una vez absorbido se difunde a través del plasma, atraviesa la membrana de las células sanguíneas en donde el monóxido de carbono se une a la hemoglobina formando carboxihemoglobina. Este enlace

reduce la capacidad de intercambio del oxígeno e interfiere con la liberación de oxígeno en los tejidos. El monóxido de carbono puede cruzar la placenta en mujeres embarazadas y provocar problemas en el feto (Fierro *et al.*, 2001).

La mayor parte de la población está expuesta a bajas concentraciones de monóxido de carbono, por lo que los niveles de carboxihemoglobina son menores al 2%. Sin embargo, las personas que permanecen mucho tiempo en calles o avenidas pueden presentar efectos asociados a la exposición continua al contaminante. Los conductores también

están expuestos a concentraciones elevadas de monóxido de carbono en el interior de sus vehículos, cuando el tránsito es lento o nulo se incrementa la exposición al contaminante.

Desde 2001 las concentraciones de monóxido de carbono se mantienen en cumplimiento de la NOM-021-SSA-1993 (Secretaría de Salud, 1994c). En 2009, el máximo del contaminante se registró en la estación Merced (MER) con 5.2 ppm y el mínimo en la estación Pedregal (PED) con una concentración de 2.3 ppm (Anexo B).

## Ozono

Norma Oficial Mexicana: 0.110 ppm promedio horario; 0.080 ppm en el quinto máximo anual.

Cumplimiento de la Norma en la Ciudad de México: NO

El ozono es un contaminante que no es emitido directamente por fuentes primarias, se produce a partir de una serie de reacciones complejas en la atmósfera, activadas por la energía transferida a las moléculas de dióxido de nitrógeno proveniente de la luz solar. La concentración del ozono depende de varios factores: intensidad de la radiación solar, convección atmosférica, altura de la capa de inversión térmica, concentración y la proporción de los compuestos orgánicos volátiles y los óxidos de nitrógeno.

La principal ruta de exposición al ozono es por inhalación, sin embargo, por su gran reactividad se

ha sugerido que puede afectar los conductos lacrimales y en algún grado la piel (Rojas *et al.*, 2000; Valacchi *et al.*, 2004). Durante la inhalación, el ozono se absorbe principalmente en la parte superior del tracto respiratorio y las vías aéreas conductoras intratorácicas, en hombres adultos se absorbe alrededor del 75% (Bush *et al.*, 1996; Sarangapani *et al.*, 2003; Wiester *et al.*, 1996; Pryor 1992). Cuando la respiración se da por vía oral, aumenta el ingreso del contaminante a los pulmones. De acuerdo con Bush *et al.* (1996) la altitud, la edad y el género influyen en la fisiología de las vías aéreas y en el tejido de la superficie de las vías aéreas conductoras, esto provoca que la absorción sea mayor en los niños y las mujeres.

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (Organización Mundial de la Salud, 2006a) la exposición de corto plazo al ozono provoca efectos agudos, mientras que la exposición continua a niveles elevados provoca efectos crónicos. Los efectos agudos del ozono se observan en el sistema respiratorio y en el sistema cardiovascular, en el sistema respiratorio incluyen la alteración de la función pulmonar y de los mediadores inflamatorios, el agotamiento de las defensas antioxidantes en las vías aéreas, el incremento en la sensibilidad en las vías aéreas en individuos sanos y asmáticos, y cambios en la función pulmonar. Las personas con asma y rinitis alérgica son más susceptibles a alteraciones temporales en la función respiratoria.

En el sistema cardiovascular se ha encontrado evidencia de que la exposición previa al ozono puede provocar una disminución en el indicador *HRV* (*heart rate variability*), el cual es un factor de riesgo para problemas cardíacos. La evidencia sobre los efectos crónicos del ozono es consistente e indica que la

En 2009 las concentraciones de ozono rebasaron en el 49% de los días, el valor límite horario que establece la NOM, esto significa una disminución del 2% con respecto a 2008.

exposición crónica al ozono induce cambios significativos en las vías aéreas al nivel de los bronquiolos terminales y respiratorios.

En la Ciudad de México los niveles de ozono reportan concentraciones que exceden frecuentemente los valores establecidos por la NOM-020-SSA-1993 (Secretaría de Salud, 2002) así como las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS). En 2009 los niveles de ozono excedieron

los dos indicadores de la NOM. Con respecto al valor límite para el promedio horario de 0.110 ppm, en todas las estaciones se superó este límite y la concentración máxima se registró en la estación Pedregal (PED) con un valor de 0.198 ppm el día 13 de febrero a las 17:00 horas. De acuerdo con la NOM el valor límite para el promedio horario no debe superarse a lo largo del año, sin embargo, en 2009 la estación Pedregal (PED) registró la mayor frecuencia con 287 horas, mientras que la estación

Entidad	Estación	Clave	Horas que exceden la NOM de 1 h (NOM= 0.110 ppm)	Máximo anual horario (NOM= 0.110 ppm)	Quinto máximo anual de 8 h (NOM= 0.080 ppm)	Cumple la NOM
Distrito Federal	Azcapotzalco	AZC	162	0.164	0.111	No
	Cerro de la Estrella	CES	32	0.129	0.085	No
	Coyoacán	COY	165	0.167	0.107	No
	Cuajimalpa	CUA	93	0.177	Datos insuficientes	No
	Iztacalco	IZT	169	0.185	0.113	No
	Lagunilla	LAG	81	0.167	0.099	No
	Merced	MER	78	0.177	0.096	No
	Pedregal	PED	287	0.198	0.124	No
	Plateros	PLA	169	0.180	0.116	No
	Santa Úrsula	SUR	229	0.180	0.114	No
	Tacuba	TAC	156	0.179	Datos insuficientes	No
	Taxqueña	TAX	24	0.167	Datos insuficientes	No
	Tláhuac	TAH	137	0.164	0.109	No
	Tlalpan	TPN	38	0.155	Datos insuficientes	No
UAM Iztapalapa	UIZ	213	0.178	0.114	No	
Estado de México	Acolman	ACO	16	0.145	Datos insuficientes	No
	Chalco	CHO	41	0.153	0.095	No
	Chapingo	CHA	24	0.136	Datos insuficientes	No
	ENEP Acatlán	EAC	111	0.165	0.105	No
	San Agustín	SAG	23	0.146	0.084	No
	Tlalnepantla	TLA	104	0.162	0.104	No
	Xalostoc	XAL	46	0.166	0.098	No

Tabla 1.1 Evaluación del cumplimiento de los indicadores de la Norma Oficial Mexicana para ozono por estación de monitoreo durante 2009.

San Agustín (SAG) reportó la menor frecuencia con 23 horas. En la Tabla 1.1 se indican los resultados de la evaluación del cumplimiento de la NOM por estación.

Con respecto al indicador de 8 horas (0.080 ppm para el quinto máximo anual) todas las estaciones superaron el valor de la NOM. Destaca el caso de la estación Pedregal (PED) en donde se registró el valor máximo con 0.124 ppm, para el quinto máximo anual (Tabla 1.1).

### Partículas suspendidas

Las partículas suspendidas son una mezcla compleja de componentes con diversas características químicas y físicas. Esta complejidad junto con la potencialidad que tienen para causar daños varía con el tamaño, composición, fuentes y características físicas. Las partículas se presentan en el aire ambiente en una gran variedad de formas, tamaños, origen y composición. Las partículas más grandes pueden permanecer en suspensión algunos minutos y recorrer distancias cortas, mientras que las más pequeñas permanecen en suspensión por períodos

La exposición a partículas suspendidas representa el mayor riesgo para la salud humana y sus efectos van desde simples problemas respiratorios hasta la muerte prematura.

de días hasta semanas y pueden recorrer grandes distancias.

Las partículas pueden ser emitidas directamente por las fuentes de emisión o producirse de la transformación de gases y vapores en el aire ambiente. Las partículas originadas por el polvo del suelo, las generadas por los procesos de trituración y las emitidas en el humo de los escapes, se conocen como partículas primarias. Las partículas producidas por transformaciones químicas en la atmósfera se conocen como partículas secundarias.

La inhalación de las partículas suspendidas puede provocar diferentes daños en la salud de la población expuesta. Varios estudios epidemiológicos asocian a las partículas menores a 10 micrómetros

( $PM_{10}$ ) y menores a 2.5 micrómetros ( $PM_{2.5}$ ) con daños que incluyen la mortalidad prematura, problemas respiratorios crónicos, visitas a salas de emergencia y admisiones hospitalarias, agravación del

asma, síntomas respiratorios agudos y una disminución en la función pulmonar. Al igual que en el caso de otros contaminantes criterio, los grupos más afectados son los adultos mayores, los niños y las personas con enfermedades previas. Los adultos mayores son más sensibles a los daños por las partículas porque sus reservas fisiológicas han disminuido con la edad y tienen una mayor incidencia de condiciones cardiorespiratorias, mientras que en los niños el sistema respiratorio se encuentra en desarrollo y permanecen más tiempo en exteriores. Los individuos con problemas cardíacos, respiratorios y los asmáticos son más sensibles a los daños por las partículas. Las partículas más pequeñas representan un mayor riesgo para la población, ya que su tamaño permite que penetren fácilmente



Fotografía: Roberto Muñoz Cruz

hasta regiones profundas en el tracto respiratorio y contienen una gran proporción de metales tóxicos, compuestos orgánicos de gran toxicidad y ácidos.

Una gran cantidad de estudios han demostrado la asociación entre la morbilidad y mortalidad diaria y la contaminación atmosférica por partículas suspendidas, incluyendo exacerbaciones de asma, incremento en los síntomas respiratorios y cardíacos, decremento en la función pulmonar, incremento en el uso de medicamentos e incremento en la admisión hospitalaria. Se ha reportado que incluso a bajas concentraciones se pueden incrementar los riesgos de bronquitis y otras enfermedades respiratorias. Sintomatología como tos crónica, bronquitis y otras enfermedades pulmonares podría estar asociada al incremento de los niveles de partículas suspendidas y muy específicamente de las partículas menores a 2.5 micrómetros (Cortez, 2002). Múltiples estudios realizados en Europa (29 ciudades) y en los Estados Unidos (20 ciudades) notificaron efectos de mortalidad a corto plazo de 0.62 y 0.46%, respectivamente, por exposición a  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{PM}_{10}$  como media de 24 horas. Con base en un análisis de la OMS que considera datos de 2000 a 2005, México presenta

promedios anuales de  $\text{PM}_{10}$  similares a otras ciudades de Latinoamérica, como Guatemala, La Habana, Quito y Rio de Janeiro. El promedio anual de las concentraciones de  $\text{PM}_{10}$  en las ciudades seleccionadas de América Latina osciló entre 30 y  $129 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , comparativamente, en Europa y América del Norte la media anual osciló entre 15 y  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Organización Mundial de la Salud, 2006b).

### Partículas suspendidas totales (PST)

Norma Oficial Mexicana:  $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$  promedio de 24 horas.

Cumplimiento de la Norma en la Ciudad de México: NO

En 2009, con excepción de la estación UAM Iztapalapa (UIZ), las concentraciones de partículas suspendidas totales superaron el valor de  $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para el valor del percentil 98 establecido en la NOM-025-SSA1-1993 (Secretaría de Salud, 2005). La concentración máxima se registró en la estación Xalostoc (XAL) localizada en el municipio de Ecatepec de

Entidad	Estación	Clave	Valor percentil 98 (NOM= $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Cumple la NOM
Distrito Federal	Cerro de la Estrella	CES	226	No
	Merced	MER	396	No
	Pedregal	PED	256	No
	UAM Iztapalapa	UIZ	202	Sí
Estado de México	Tlalnepantla	TLA	238	No
	Xalostoc	XAL	769	No

Tabla 1.2 Evaluación del cumplimiento de los indicadores de la Norma Oficial Mexicana para partículas suspendidas totales por estación de monitoreo durante 2009 (Nota: las concentraciones están reportadas a condiciones locales de presión y temperatura).

Entidad	Estación	Clave	Valor percentil 98 (NOM= 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Valor promedio anual (NOM= 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Cumple la NOM
Distrito Federal	Cerro de la Estrella	CES	91	56.1	No
	Lomas	LOM	91	44.4	Sí
	Merced	MER	101	59.3	No
	Pedregal	PED	68	39.9	Sí
	Secretaría de Hacienda	SHA	94	53.1	No
	UAM Iztapalapa	UIZ	87	50.8	No
Estado de México	La Presa	LPR	125	68.7	No
	Nezahualcóyotl Sur	NTS	90	54.3	No
	Tlalhepantla	TLA	105	62.7	No
	Xalostoc	XAL	247	105.6	No

Tabla 1.3 Evaluación del cumplimiento de los indicadores de la Norma Oficial Mexicana para partículas menores a 10 micrómetros ( $\text{PM}_{10}$ ) por estación de monitoreo durante 2009 (Nota: las concentraciones están reportadas a condiciones locales de presión y temperatura).

Morelos, Estado de México, con un valor para el percentil 98 de  $769 \mu\text{g}/\text{m}^3$  el día 9 de noviembre (Tabla 1.2).

### Partículas menores a 10 micrómetros ( $\text{PM}_{10}$ )

Norma Oficial Mexicana:  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  promedio de 24 horas;  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  promedio anual.  
Cumplimiento de la Norma en la Ciudad de México: NO

En el caso de las partículas menores a 10 micrómetros ( $\text{PM}_{10}$ ) la Ciudad de México continúa en incumplimiento de los límites definidos en la NOM-025-SSA1-1993 (Secretaría de Salud, 2005). Sólo las estaciones de Lomas (LOM) y Pedregal (PED), localizadas en el Distrito Federal, reportaron el cumplimiento de los valores límite. En el resto de las estaciones el problema de contaminación dista

mucho de resolverse, como puede verse en la Tabla 1.3. En aquellas estaciones en donde las concentraciones no exceden el valor del percentil 98 se supera el valor para el promedio anual. Las estaciones Xalostoc (XAL) y La Presa (LPR), ambas en el Estado de México, son las que reportan las mayores concentraciones para ambos indicadores.

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

Norma Oficial Mexicana:  $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$  promedio de 24 horas;  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  promedio anual.  
Cumplimiento de la Norma en la Ciudad de México: NO

En todas las estaciones de monitoreo las concentraciones promedio de 24 horas no superaron el indicador de  $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (percentil 98) establecido en la NOM-025-SSA1-1993 (Secretaría de Salud, 2005), sin

embargo, si excedieron el valor del promedio anual de  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . El promedio anual más alto se registró en la estación Xalostoc (XAL), en el Estado de México, con  $26.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; mientras que la menor concentración se registró en la estación Pedregal (PED), en el Distrito Federal, con  $18.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Tabla 1.4).

Plomo

Norma Oficial Mexicana:  $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  promedio trimestral.  
 Cumplimiento de la Norma en la Ciudad de México: SI

El plomo (Pb) es un componente poco abundante en la corteza terrestre, se emite a la atmósfera

de manera natural en las erupciones volcánicas, el aerosol marino, los incendios forestales y el polvo del suelo. Los procesos de fundición, la quema de combustibles fósiles y el uso de gasolinas con plomo son las principales fuentes antropogénicas de este contaminante. El plomo es un metal de gran toxicidad, su presencia en el aire ambiente está asociada con efectos graves a nivel neurológico, el retraso en el aprendizaje y alteraciones de la conducta.

Desde el año 1993 la concentración de plomo en el aire ambiente de la Ciudad de México no rebasa el límite de la NOM-026-SSA1-1993 (Secretaría de Salud, 1994d). En 2009 la estación Tlalnepantla (TLA) ubicada en el noroeste de la ciudad reportó la concentración más alta con  $0.134 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como promedio trimestral, muy por debajo del valor de la NOM de  $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Anexo B).

Entidad	Estación	Clave	Valor percentil 98 (NOM= $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Valor promedio anual (NOM= $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Cumple la NOM
Distrito Federal	Coyoacán	COY	44	19.8	No
	Merced	MER	52	22.4	No
	Pedregal	PED	39	18.5	No
	UAM Iztapalapa	UIZ	48	20.6	No
Estado de México	San Agustín	SAG	34	19.3	No
	Tlalnepantla	TLA	44	21.3	No
	Xalostoc	XAL	58	26.0	No

Tabla 1.4 Evaluación del cumplimiento de los indicadores de la Norma Oficial Mexicana para partículas menores a 2.5 micrómetros ( $\text{PM}_{2.5}$ ) por estación de monitoreo durante 2009 (Nota: las concentraciones están reportadas a condiciones locales de presión y temperatura).





# LACALIDADDELAIREENLACIUDADDEMÉXICO YLASNORMASINTERNACIONALES

---



En los últimos 15 años se ha producido un avance en la investigación científica sobre los efectos de la contaminación del aire en la salud y en la actualidad es ampliamente aceptado que la exposición a la contaminación del aire urbano está asociada con una amplia gama de efectos agudos y crónicos, que van desde leves perturbaciones fisiológicas hasta la muerte prematura por enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Cohen *et al.*, 2004).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que a nivel mundial alrededor de 1500 millones de personas viven en áreas con niveles peligrosamente elevados de contaminación del aire (Chelala, 1999). Más de dos millones de muertes prematuras se pueden atribuir cada año a los efectos de la contaminación del aire en espacios abiertos urbanos y en espacios cerrados, y más de la mitad ocurre en poblaciones de países en desarrollo (Organización Mundial de la Salud, 2006b).

Dependiendo de la edad, género, estado de salud, condición física y nivel socioeconómico, los efectos negativos de la contaminación del aire en la salud humana pueden ser evidentes o asintomáticos, aun en condiciones en las que aparentemente no exis-

ten molestias puede existir un daño subclínico. La evidencia científica indica que los aumentos menores de algunos contaminantes pueden provocar incrementos pequeños, pero cuantificables, en las visitas a salas de emergencia, en admisiones hospitalarias y casos de muerte. Los efectos de la contaminación del aire en la salud pueden ilustrarse a través de una pirámide (Figura 2.1), en la cual el pico superior representa los efectos más severos que afectan a un menor número de individuos, mientras que en la base se encuentran los efectos más comunes que se pueden presentar en una mayor cantidad de personas, como la dificultad para respirar y otras molestias respiratorias. En esta pirámide es posible identificar que la contaminación del aire puede influir negativamente en la calidad de vida, mucho antes de que los individuos tengan la necesidad de visitar al médico (Organización Mundial de la Salud, 2006a).

Los daños por la exposición a la contaminación del aire normalmente se definen con base en la susceptibilidad individual de las personas. Los grupos sensibles suelen ser la población infantil, los adultos mayores y las personas con enfermedades crónicas. Sin embargo, la susceptibilidad no sólo se determina por características como la edad, el estado de



Fotografía de la página anterior: Imagen obtenida por la Hazecam el día 15 de enero de 2010 a las 17:20. Corresponde a un día lluvioso donde el sol encontraba a la izquierda de la imagen, en el lado derecho se observan nubes y lluvia, esta combinación produjo un arco iris, el cual es una demostración espectacular que se produce cuando la luz del sol entra en las gotas de lluvia donde es reflejada y dispersada en un espectro de colores que va del rojo al violeta. En la figura se puede apreciar también un tenue arco iris secundario, este se forma por una reflexión doble de la luz en las gotas de lluvia, generalmente es más tenue y los colores se encuentran invertidos con respecto al arco iris primario.



Figura 2.1 Pirámide de los efectos en la salud por la contaminación atmosférica, en ella se muestra el grado de severidad de los eventos de salud asociados a la contaminación del aire (Adaptado de: Organización Mundial de la Salud, 2006a).

salud, la alimentación y la genética, sino también por factores ambientales, incluyendo las características de la exposición, las condiciones de vivienda y el medio ambiente de zonas económicamente desfavorecidas (Organización Mundial de la Salud, 2006a). Las zonas urbanas se caracterizan por la presencia de contaminación atmosférica vinculada al uso de vehículos, a la actividad industrial, a los servicios y en menor escala a las actividades domésticas. La alta densidad de población provoca que un gran número de personas estén potencialmente expuestas y por lo tanto, el número de individuos en riesgo de desarrollar efectos leves es mayor.

La mayor parte de la evidencia que vincula los efectos en la salud humana con los niveles de contaminación proviene de los campos de la epidemiología y la toxicología. Los estudios epidemiológicos ana-

lizan las causas que determinan una enfermedad o los factores de riesgo que hacen más probable que una persona enferme. También valoran los factores protectores o terapéuticos (como los fármacos) que contribuyen a prevenir la enfermedad o mejorar el estado de salud. Por otra parte, los estudios toxicológicos evalúan los efectos nocivos de agentes químicos y físicos en los sistemas biológicos y determinan la magnitud del daño en función de la exposición de los organismos vivos a dichos agentes.

Un gran número de elementos de prueba aportados por la toxicología provienen de estudios de inhalación con exposición controlada, en donde los individuos son sometidos a concentraciones conocidas de uno o varios contaminantes. Generalmente se usan animales, sin embargo, cuando se realizan en humanos se emplean voluntarios que son sometidos a concentraciones que no comprometen su salud. En comparación con los estudios epidemiológicos, los resultados de los estudios toxicológicos pueden conducir a una mejor evaluación de los mecanismos biológicos y de la relación dosis-respuesta. Además, permiten conocer los efectos de la exposición a un contaminante en particular, para valorar los mecanismos de acción individual, o de una mezcla de varios contaminantes y así obtener una mejor aproximación de la exposición real (Organización Mundial de la Salud, 2006a).

La evaluación del impacto de la contaminación del aire en la salud, permite a las autoridades ambientales y de salud conocer el efecto de una política, programa o proyecto en la salud de las personas. Tiene como objetivo analizar la posible mejora en la salud pública que se podría esperar de la reducción de la contaminación del aire. Para el desarrollo de un análisis cuantitativo la Organización Mundial de la Salud (Organización Mundial de la Salud, 2006a;

Instituto Nacional de Ecología, 2010) propone los siguientes pasos (Figura 2.2):

1. Determinar el nivel de exposición a un contaminante especificando el tiempo y grado de exposición.
2. Identificar los impactos en la salud de la población. Los impactos comunes a analizar incluyen visitas a salas de emergencia por enfermedades respiratorias y cardiovasculares, bronquitis crónica y muerte, entre otros.
3. Especificar la función dosis-respuesta empleando principalmente los resultados de estudios epidemiológicos, cuantificando el por-

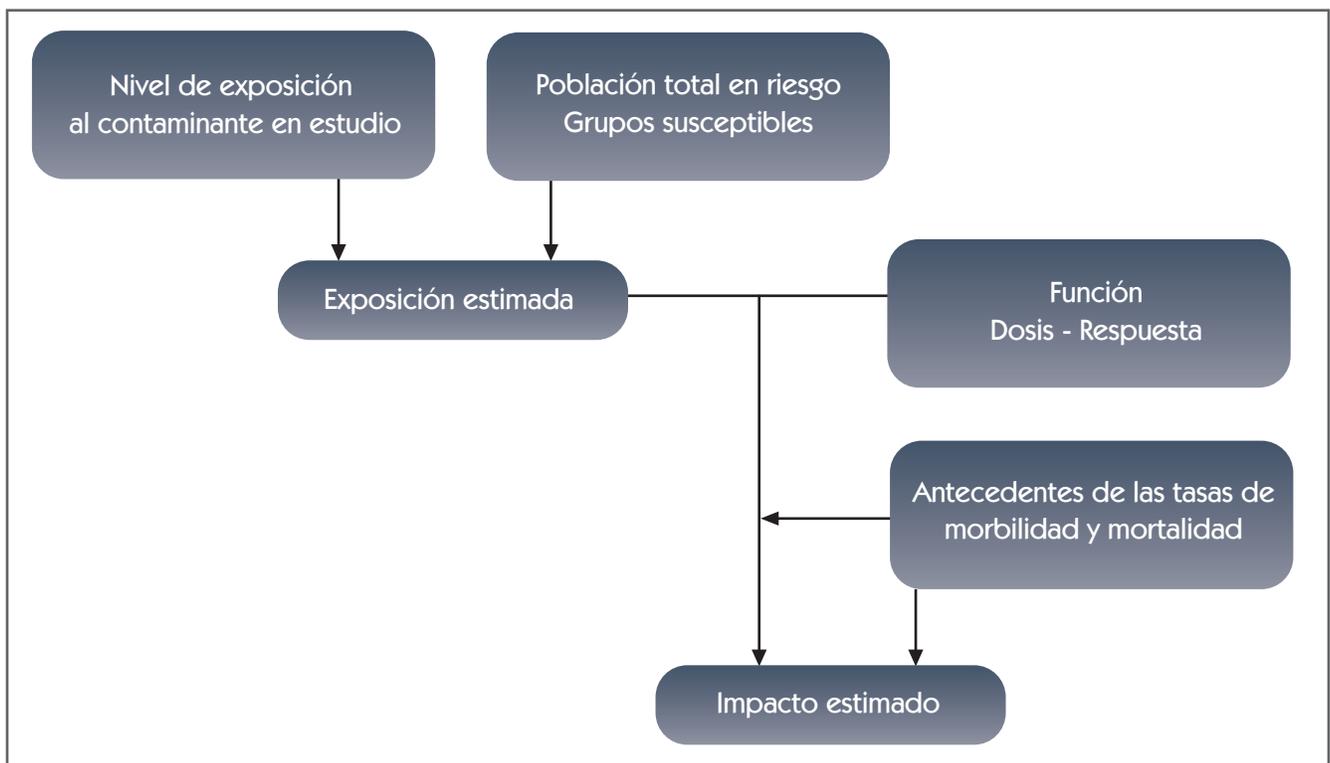
centaje de cambio de incidencia o prevalencia de una enfermedad o la muerte asociada con el nivel de exposición a la contaminación.

4. Determinar la situación actual de los impactos estimando la frecuencia (en incidencia o prevalencia) de los impactos seleccionados en el paso 2.

5. Calcular el impacto en la salud por exposición integrando la información obtenida de las etapas anteriores.

Actualmente el uso de normas de calidad del aire se ha convertido en la piedra angular de los programas de gestión ambiental, cuyo papel adoptado

Figura 2.2 Diagrama de flujo de las principales etapas para evaluar el impacto de la contaminación del aire en la salud (Adaptado de: Organización Mundial de la Salud, 2006a; Riojas, 2009).



y aplicado por las autoridades consiste en definir el nivel de contaminación del aire aceptable para una región o país, en beneficio de la salud humana y el medio ambiente (Organización Mundial de la Salud, 2006a).

Los países que cuentan con programas de calidad del aire desarrollan procedimientos para proponer, promulgar y revisar periódicamente sus normas de calidad del aire. Las autoridades deben asegurar que las normas reflejan el avance científico sobre los daños de la contaminación en la salud pública y el medio ambiente, deben actualizarse con fundamento en principios científicos sólidos y facilitar el proceso de decisión sobre el nivel de riesgo aceptable. La creación o actualización de las normas debe dar respuesta a las siguientes preguntas:

- ¿Cuáles son los contaminantes y las características que deben ser reguladas?
- ¿Cuáles son los efectos adversos para la salud de la población?
- ¿Quiénes deben ser protegidos de estos efectos?
- ¿Qué nivel de riesgo es aceptable para la población?
- ¿Cómo afecta la incertidumbre de los datos en la toma de decisiones?
- ¿Qué tan probable será cumplir con las normas propuestas y cuál sería el costo?

El desarrollo o revisión de una norma o estándar de calidad del aire es un proceso que se realiza en dos etapas. En la primera se evalúa la evidencia científica de los daños de la contaminación en la salud,

los avances en la tecnología para el monitoreo y el estado del conocimiento de los procesos físicos y químicos que dan origen a los contaminantes. En la segunda etapa se valora la factibilidad para su implementación tomando en cuenta aspectos político-administrativos y la realidad socioeconómica de la región (Korc *et al.*, 2000).

El costo-beneficio de la contaminación es una consideración financiera que también debe tomarse en cuenta durante el proceso de elaboración y revisión de normas, sin embargo, cuando los niveles de contaminación están muy por encima de los valores aceptables y comprometen seriamente la salud pública, esta evaluación puede pasar a un segundo plano. Actualmente la mayoría de los análisis indican que los efectos sobre la mortalidad dominan los costos económicos de la contaminación (Organización Mundial de la Salud, 2006a; Korc *et al.*, 2000).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ofrece guías de calidad del aire que orientan el desarrollo de estándares para minimizar los efectos de la contaminación del aire en la salud humana. Las guías de la OMS y los estándares de calidad del aire de cualquier país tienen el mismo propósito, proteger la salud humana y el medio ambiente, la diferencia entre ellas es que las primeras son sólo recomendaciones y no tienen un marco legal que las respalde, sin embargo, pueden ser adoptadas de forma normativa en cualquier ciudad del mundo.

Los avances en la medicina y en los instrumentos de medición han permitido mejorar los estudios para conocer los efectos de la contaminación del aire. La evidencia científica reciente demuestra que los efectos en la salud se pueden observar a concentraciones bajas, esto ha motivado la disminución de los límites para los estándares de calidad del aire en países desarrollados.

	1971	1972	1978	1979	1980	1982	1985	1987	1988	1990
Revisión OMS		Cráterios de calidad y guías para contaminantes atmosféricos de zonas urbanas.						Primera emisión de las guías de calidad del aire para Europa.		
Revisión US EPA	Se promulga el estándar de O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , CO y material particulado (PST).		Se promulga el estándar de Pb.	Revisión del estándar de O <sub>3</sub> y se establecen criterios para la revisión del estándar de PST.	Entre 1978 y 1980 se revisa el estándar de CO manteniendo los mismos valores de 1971.		Primera revisión del estándar de NO <sub>2</sub> . Se decide mantener el estándar primario de CO y revocar el estándar secundario.	Primera revisión del estándar de material particulado donde se decide cambiar los indicadores de PST a PM <sub>10</sub> .	EPA propone "no" revisar el estándar de SO <sub>2</sub> y mantener los valores de 1971.	Entre 1980 y 1990 se realiza la primera revisión del estándar de Pb.
Revisión NOM						Se establecen los primeros lineamientos para evaluar la calidad del aire para O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , CO, PM <sub>10</sub> , PST y Pb				

Tabla 2.1 Cronología comparativa de la revisión y actualización de las recomendaciones de la OMS, la US EPA y las NOM.

En 2005 la OMS publicó su más reciente guía de calidad del aire que incluye nuevas recomendaciones para ozono, partículas suspendidas, dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre. Por otra parte, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés) en conformidad con sus requerimientos legislativos realiza cada cinco años una revisión cuidadosa de sus estándares de calidad del aire, mediante un proceso de revisión crítica de la evidencia científica, tecnológica, administrativa, económica y legal, a fin de determinar la permanencia o actualización de los mismos. A la fecha la US EPA cuenta con nuevos valores

Estudios recientes indican que los efectos en la salud por la contaminación atmosférica se pueden observar a concentraciones menores que los límites vigentes en las NOM.

para los estándares de ozono, plomo, dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre.

En 1994 la Secretaría de Salud publicó oficialmente en México las primeras Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de salud ambiental tomando como guía los estándares vigentes de los Estados Unidos, desde entonces únicamente se han hecho modificaciones a la NOM-021-SSA1-1993 de monóxido de carbono en 1994, a la NOM-020-SSA1-1993 de ozono en 2002 y en 2005 a la NOM-025-SSA1-1993 de partículas suspendidas. La Tabla 2.1 ofrece una descripción cronológica comparativa de la revisión

1994	1996	1997	2000	2002	2005	2007	2008	2009	2010
		Actualización de las guías para Europa.	Actualización de las guías para Europa (O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , material particulado, CO y otros).		Actualización global para O <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> .				
Segunda revisión del estándar de SO <sub>2</sub> . EPA decide "no" revisar el estándar de CO y mantener los valores.	Segunda revisión del estándar de NO <sub>2</sub> .	Segunda revisión del estándar de O <sub>3</sub> y PM <sub>10</sub> . Se incluye el estándar para PM <sub>2.5</sub> .				Tercera revisión del estándar de O <sub>3</sub> .	Segunda revisión del estándar de Pb. Se incluye un nuevo límite.	Cuarta revisión del estándar de O <sub>3</sub> (en proceso).	Tercera revisión del estándar de NO <sub>2</sub> y SO <sub>2</sub> .
Se publican oficialmente las normas de salud ambiental para O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , CO, PM <sub>10</sub> , PST y Pb. El límite de CO se modifica.				Se revisa y modifica la norma de O <sub>3</sub> .	Se revisa y modifica la norma de PM <sub>10</sub> y PST. Se incluyen límites de PM <sub>2.5</sub> .				

y actualización de las recomendaciones de la OMS, los estándares de la US EPA y las NOM.

En comparación, los valores recomendados por la OMS y la US EPA son menores que los valores vigentes en las NOM en prácticamente todos los contaminantes criterio. Esto se explica porque desde la última revisión de las NOM, los resultados de estudios científicos alrededor del mundo han demostrado que los efectos en la salud se pueden observar a concentraciones por debajo de los valores vigentes en las normas nacionales. En consecuencia, esta nueva evidencia científica deberá tomarse en consideración para la revisión futura de los límites, de tal manera que garanticen una protección adecuada a todos los grupos de la población.

En la Ciudad de México se ha logrado disminuir de manera exitosa la concentración en el aire ambiente de la mayoría de los contaminantes, con excepción del ozono y las partículas suspendidas. Desde hace varios años los niveles de dióxido de azufre, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno y plomo, se encuentran por debajo de los límites de la NOM. Sin embargo, cuando estos niveles de contaminación se evalúan empleando los criterios propuestos recientemente por la OMS o la US EPA, es posible obtener una idea más clara de las condiciones de riesgo para la salud pública. Por lo anterior, en esta sección se presentan los resultados de dicha evaluación empleando los estándares de calidad del aire de la US EPA publicados en la página electrónica del *National Ambient Air Quality Standards (NAAQS)*

y los valores propuestos por la OMS en sus documentos *Air quality guidelines for Europe 2000* y *Air quality guidelines global update 2005*.

### Ozono

El ozono es el principal responsable del deterioro de la calidad del aire en la Ciudad de México, sin embargo, sus niveles han descendido gradualmente desde 1992, cuando se reportaron las máximas concentraciones de este contaminante. A pesar de esto sus concentraciones superan con frecuencia los límites de la NOM en prácticamente toda la ciudad.

Lo anterior se puede observar en la Tabla 2.2, donde se indica que en 2009 las concentraciones de ozono excedieron los límites de la NOM, tan solo el indicador para el promedio de 1 hora se rebasó en 530 horas. Los límites propuestos por la OMS y la US EPA son más estrictos que los vigentes en México, por lo que en 2009 las concentraciones registradas en la ciudad prácticamente duplican los valores recomendados por ambos organismos.

### Dióxido de nitrógeno

De acuerdo con la OMS entre 2000 y 2005 la Ciudad de México ocupó la segunda posición a nivel mundial con la concentración más alta de dióxido de nitrógeno (Organización Mundial de la Salud, 2006a). Sin embargo, en los años posteriores a 2005 la concentración del contaminante ha disminuido de forma gradual. Las concentraciones registradas en 2009 mantuvieron el cumplimiento de la NOM, aun cuando se registró una hora con una concentración de 0.211 ppm, puesto que la NOM permite que el valor promedio de 1 hora de 0.210 ppm se exceda una vez en un año.

A pesar de esta reducción, cuando los valores de 2009 se comparan con las concentraciones recomendadas por la OMS y la US EPA (Tabla 2.3), la Ciudad de México no cumple con ninguno de estos estándares. Una situación similar se observa al comparar el número de excedencias para la concentración promedio de una hora, en donde la OMS establece un valor límite de 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , en el periodo considerado esta concentración se excedió en 31 ocasiones.

Tabla 2.2 Evaluación del cumplimiento de los valores recomendados por la OMS, la US EPA y la NOM para ozono durante 2009.

	OMS	US EPA	NOM	
	Máximo promedio 8 h	Promedio trianual del 4° máximo 8 h	Máximo promedio 1 h	5° máximo anual 8 h
Valor recomendado	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.075 ppm	0.110 ppm	0.080 ppm
Ciudad de México 2009	*221 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.136 ppm	0.198 ppm	0.124 ppm
Cumple	NO	NO	NO	

\* Equivalencia con base en condiciones locales de presión (582 mmHg) y temperatura (18°C).

Tabla 2.3 Evaluación del cumplimiento de los valores recomendados por la OMS, la US EPA y la NOM para dióxido de nitrógeno durante 2009.

	OMS		US EPA		NOM
	Máximo promedio 1 h	Promedio anual	Promedio anual	Promedio trianual del percentil 98	Máximo promedio 1 h
Valor recomendado	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.053 ppm	0.100 ppm	0.210 ppm
Ciudad de México 2009	*311 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	*52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.035 ppm	0.149 ppm	0.211 ppm
Cumple	NO		NO		SI

\* Equivalencia con base en condiciones locales de presión (582 mmHg) y temperatura (18°C).

### Dióxido de azufre

El dióxido de azufre es uno de los contaminantes que se mantiene dentro de la norma en la Ciudad de México desde 2003, aun cuando el análisis de la OMS reporta que entre 2000 y 2005, México ocupó la tercera posición a nivel mundial con las concentraciones más altas de este contaminante.

En su más reciente revisión, la OMS propuso la creación de un estándar para la protección de la salud contra los efectos agudos de este contaminante, adicional al estándar de 24 horas, proponiendo un valor de 500  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para un promedio de 10 minutos. En junio de 2010, la US EPA revocó los estándares que había mantenido en 40 años y estableció un

nuevo estándar de exposición. De acuerdo con los resultados de 2009 las concentraciones de dióxido de azufre de la Ciudad de México exceden los valores recomendados por la OMS y la US EPA (Tabla 2.4). En el caso de los promedios de 10 minutos, el valor de la OMS se superó en 18 ocasiones con un máximo de 1053  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

### Monóxido de carbono

El monóxido de carbono es un contaminante que desde el año 2001 no excede la NOM de 11.0 ppm para el promedio de 8 horas. Al comparar con los límites de la OMS y la US EPA, tampoco fueron rebasados, aun cuando el límite de la US EPA como

Tabla 2.4 Evaluación del cumplimiento de los valores recomendados por la OMS, la US EPA y la NOM para dióxido de azufre durante 2009.

	OMS		US EPA	NOM	
	Promedio 10 minutos	Máximo promedio 24 h	Promedio trianual del percentil 99	Máximo promedio 24 h	Promedio anual
Valor recomendado	500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.075 ppm	0.130 ppm	0.030 ppm
Ciudad de México 2009	*1053 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	*107 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.153 ppm	0.052 ppm	0.011 ppm
Cumple	NO		NO	SI	

\* Equivalencia con base en condiciones locales de presión (582 mmHg) y temperatura (18°C).

Tabla 2.5 Evaluación del cumplimiento de los valores recomendados por la OMS, la US EPA y la NOM para monóxido de carbono durante 2009.

	OMS		US EPA		NOM
	Máximo diario 8 h	Máximo promedio 1 h	Máximo diario 8 h	Máximo promedio 1 h	Máximo diario 8 h
Valor recomendado	10 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	30 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	9.0 ppm	35.0 ppm	11.0 ppm
Ciudad de México 2009	*4667 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	*8078 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	5.2 ppm	9.0 ppm	5.2 ppm
Cumple	SI		SI		SI

\* Equivalencia con base en condiciones locales de presión (582 mmHg) y temperatura (18°C).

promedio de 8 horas es el más estricto (Tabla 2.5). De hecho en 2009 se registraron las concentraciones más bajas desde 1986. En el caso del indicador máximo horario, en la Ciudad de México no se registran concentraciones mayores a 30.0 ppm desde 1998.

#### Partículas menores a 10 micrómetros ( $\text{PM}_{10}$ )

Las partículas suspendidas están asociadas a una gran variedad de daños a la salud y están relacionadas directamente con la mortalidad. Los nuevos hallazgos científicos han motivado que se propongan límites cada vez más estrictos para las diferentes fracciones de partículas suspendidas. En la última revisión de la OMS se propusieron límites

más estrictos para  $\text{PM}_{10}$ . Las concentraciones límite propuestas para los indicadores de 24 horas y anual corresponden a menos de la mitad de los valores límite descritos por la NOM. Al evaluar los resultados de 2009 para la Ciudad de México se observa que las concentraciones de  $\text{PM}_{10}$  exceden considerablemente los valores propuestos por la OMS y la US EPA (Tabla 2.6).

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

Al igual que en el caso de  $\text{PM}_{10}$ , existe evidencia importante sobre la asociación entre el incremento en la morbi-mortalidad y el incremento en la concentración de  $\text{PM}_{2.5}$ . Para estos contaminantes no

Tabla 2.6 Evaluación del cumplimiento de los valores recomendados por la OMS, la US EPA y la NOM para partículas menores a 10 micrómetros durante 2009.

	OMS		US EPA	NOM	
	Percentil 99 24 h	Promedio anual	Promedio trianual del 2° máximo 24 h	Promedio anual	Percentil 98 24 h
Valor recomendado	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Ciudad de México 2009*	287 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	106 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	169 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	106 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	247 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Cumple	NO		NO	NO	

\* Las concentraciones de  $\text{PM}_{10}$  para la Ciudad de México están reportadas a condiciones locales de presión (582 mmHg) y temperatura (18°C).

Tabla 2.7 Evaluación del cumplimiento de los valores recomendados por la OMS, la US EPA y la NOM para partículas menores a 2.5 micrómetros durante 2009.

	OMS		US EPA		NOM	
	Percentil 99 24 h	Promedio anual	Promedio trianual del Percentil 98 24 h	Promedio trianual	Percentil 98 24 h	Promedio anual
Valor recomendado	25 µg/m <sup>3</sup>	10 µg/m <sup>3</sup>	35 µg/m <sup>3</sup>	15 µg/m <sup>3</sup>	65 µg/m <sup>3</sup>	15 µg/m <sup>3</sup>
Ciudad de México 2009*	58 µg/m <sup>3</sup>	26 µg/m <sup>3</sup>	43 µg/m <sup>3</sup>	21 µg/m <sup>3</sup>	58 µg/m <sup>3</sup>	26 µg/m <sup>3</sup>
Cumple	NO		NO		NO	

\* Las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> para la Ciudad de México están reportadas a las condiciones locales de presión (582 mmHg) y temperatura (18°C).

se ha identificado un umbral por debajo del cual no se presenten daños a la salud, esto ha motivado que los límites para la protección de la salud pública sean cada vez más bajos. Las concentraciones límite propuestas por la OMS y la US EPA son considerablemente más bajas que las vigentes en la NOM, tanto para el indicador de exposición aguda como el indicador de exposición crónica. Los niveles de PM<sub>2.5</sub> en la Ciudad de México no superan el valor del indicador de 24 horas, pero desde que se inició el monitoreo de este contaminante sus concentraciones superan el valor del indicador anual de la NOM. En comparación con los estándares de la US EPA y la OMS, los niveles de PM<sub>2.5</sub> en 2009

superan significativamente los indicadores para la protección de la salud pública (Tabla 2.7).

### Plomo

La eliminación del plomo en las gasolinas permitió reducir significativamente la concentración de este contaminante en el aire ambiente durante la primera mitad de la década de los 90. Desde 1993 los niveles de plomo no superan el valor límite recomendado por la NOM en la Ciudad de México. En 2009 los niveles de plomo fueron menores que los recomendados por la OMS y la US EPA (Tabla 2.8).

Tabla 2.8 Evaluación del cumplimiento de los valores recomendados por la OMS, la US EPA y la NOM para plomo (Pb) durante 2009.

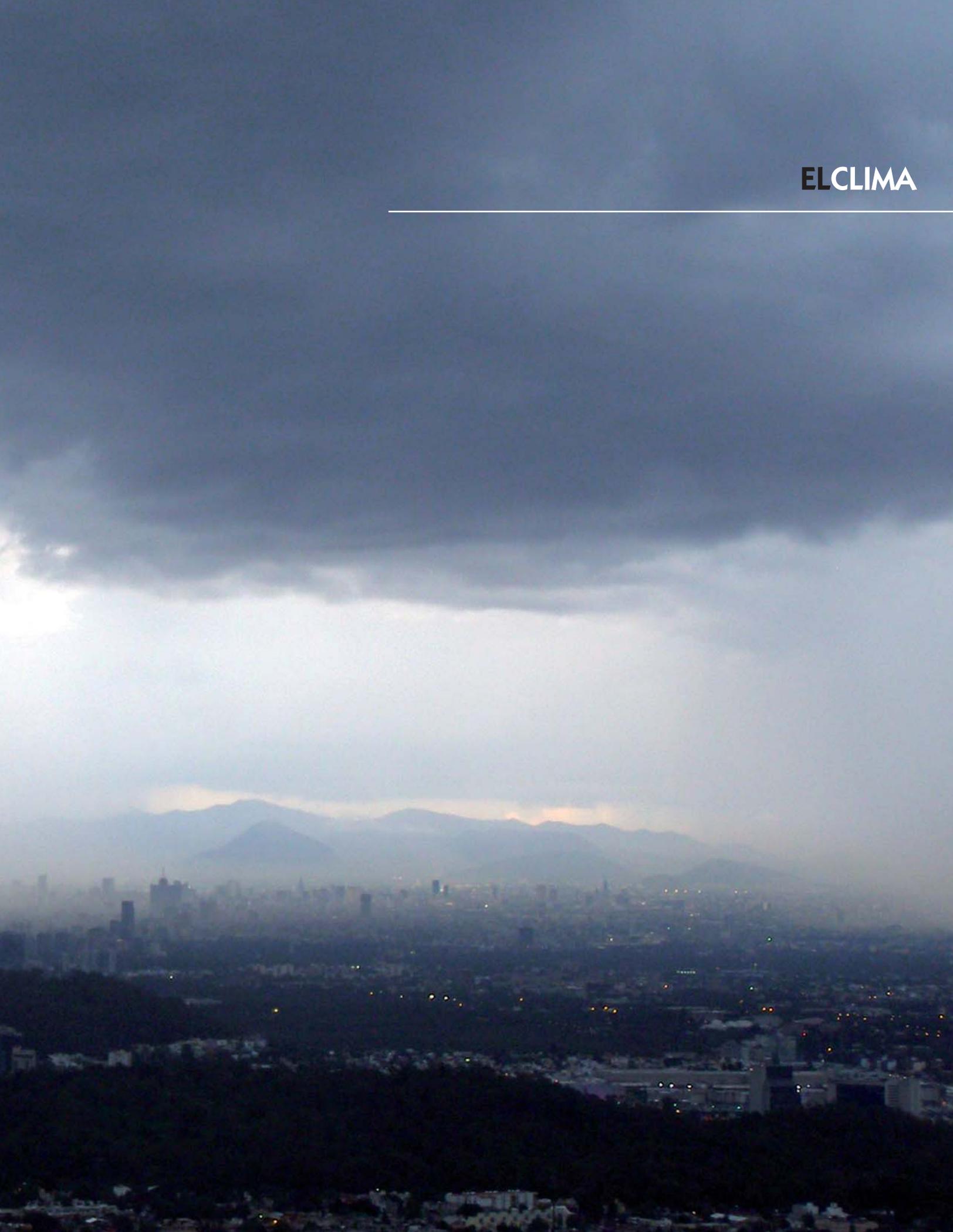
	OMS	US EPA		NOM
	Promedio anual	Promedio de cualquier periodo de tres meses en tres años	Máximo promedio móvil trimestral	Máximo promedio trimestral
Valor recomendado	0.5 µg/m <sup>3</sup>	0.15 µg/m <sup>3</sup>	0.15 µg/m <sup>3</sup>	1.5 µg/m <sup>3</sup>
Ciudad de México 2009*	0.068 µg/m <sup>3</sup>	0.138 µg/m <sup>3</sup>	0.132 µg/m <sup>3</sup>	0.134 µg/m <sup>3</sup>
Cumple	SI	SI		SI

\* Las concentraciones de Pb para la Ciudad de México están reportadas a las condiciones locales de presión (582 mmHg) y temperatura (18°C).



**ELCLIMA**

---



**E**l término clima se emplea para identificar las condiciones meteorológicas generales de un territorio o lugar específico. Cuando se dice que un lugar tiene clima caluroso, inmediatamente se asocia con temperaturas que hacen transpirar con facilidad o que obligan a usar prendas ligeras, mientras que un clima lluvioso se asocia con una precipitación abundante durante el año. El comportamiento anual de parámetros como la temperatura, humedad relativa, precipitación, viento, nubosidad y sus distintas combinaciones, observados en un período de varios años, definen el clima de una región.

Además de las variables meteorológicas, el clima es determinado también por características orográficas locales y accidentes geográficos ubicados a cientos de kilómetros. Por ejemplo, la Sierra Madre Oriental tiene un impacto en el flujo de las masas de aire frío, que afectan las costas del Golfo de México durante la temporada invernal. Las montañas impiden que las masas de aire polar alcancen la cuenca del Valle de México ocasionando que el efecto de los *nortes* se limite sólo a la zona costera.

El movimiento del aire en la región de la meseta central, en donde se localiza la cuenca del Valle de México, está determinado principalmente por la orografía. Durante la noche cuando el aire se enfría se vuelve denso y pesado, fluye por las laderas

de las montañas y forma una brisa de montaña. La velocidad del viento dependerá de la diferencia de temperaturas, por lo que es mayor en la madrugada y poco antes del amanecer. Durante las primeras horas del día las laderas de la montaña se calientan antes que el suelo del valle, provocando que se invierta el flujo y el viento se mueva lenta y ascendentemente por las laderas. A medida que avanza el día el aire caliente asciende por diferencia de densidad y es sustituido por aire proveniente del fondo del valle, formando así una circulación del viento que puede favorecer la remoción de los contaminantes emitidos en la zona urbana.

Durante la noche el flujo del viento es del tipo montaña-valle, donde el viento desciende hacia el centro desde las montañas. En las horas diurnas la dirección se invierte soplando desde el valle hacia las montañas, con una componente dominante de norte a sur. Cuando la velocidad del viento tanto horizontal como vertical es baja (menor a 1 m/s) el transporte de los contaminantes ocurre desde el norte y el centro hacia la zona montañosa del surponiente de la ciudad, donde las montañas constituyen una barrera física que dificulta la salida de los contaminantes y permite su acumulación.

La interacción entre los sistemas atmosféricos de gran escala (varios cientos de kilómetros) y los



Fotografía de la página anterior: Imagen obtenida por la Hazecam el día 19 de junio de 2009 a las 20:00. La imagen ofrece una bella vista de un día con lluvia sobre la ciudad, en un primer plano se observa el sur de la ciudad en una ligera penumbra, una enorme nube oscura cargada de agua se desplaza desde el sur, surcando el cielo lentamente y creando un camino en medio de la tormenta permitiendo ver con claridad el centro de la ciudad y al fondo la Sierra de Guadalupe, mientras el resto de la ciudad desaparece bajo la tormenta.

factores meteorológicos locales, determinan la velocidad del viento y la estabilidad atmosférica, provocando el estancamiento o dispersión de la contaminación del aire. La temporada más adversa para la ventilación en la cuenca se concreta a la temporada invernal y parte de la primavera. En este período las inversiones térmicas se presentan casi a diario, durante el invierno predominan las inversiones de superficie, mientras que en la primavera las de subsidencia (descenso del aire desde capas superiores de la tropósfera). En el invierno es común que se presenten altos niveles de partículas suspendidas, en cambio, en la primavera los días largos y soleados favorecen la formación del *smog* fotoquímico provocando altas concentraciones de ozono y partículas finas, entre otros contaminantes.

Las latitudes entre las que se ubica el territorio nacional lo hacen vulnerable a las masas de aire polar, húmedo o seco, pero también a las masas de aire tropical cargadas con un importante contenido de humedad. Las masas de aire polar se presentan regularmente durante los meses de noviembre a marzo y se asocian con los frentes fríos y sus manifestaciones vinculadas al descenso de la temperatura, las nevadas y los *nortes* en la costa del Golfo de México. Las masas de aire tropical se manifiestan con abundante nubosidad y precipitación en los meses del verano y principios del otoño. Los sistemas meteorológicos tropicales son los que afectan con mayor frecuencia la región centro y sur del país, dentro de los que destacan los huracanes, las ondas y tormentas tropicales.

Durante los meses de marzo a mayo la meseta central es afectada por masas de aire con bajo

contenido de humedad proveniente de zonas continentales, que con frecuencia se trata de sistemas de alta presión que inducen estabilidad atmosférica en la región centro del territorio, provocando que en estos meses se registren las mayores temperaturas.

En términos generales, el clima de la Ciudad de México es templado subhúmedo con lluvias en el verano (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2005). La temperatura promedio anual oscila alrededor de los 16°C, el viento dominante es de noreste a suroeste, cuenta con dos temporadas bien definidas: la seca, que por el régimen térmico se divide en seca-caliente (marzo a mayo) y seca-fría (noviembre a febrero), y la temporada de lluvias que comprende los meses de junio a octubre.

## Temperatura

La temperatura ambiente es el factor principal que regula el clima de una región, ya que sus valores dependen directamente de la radiación solar y de la interacción con la atmósfera y la superficie terrestre. En la Ciudad de México, el régimen térmico se encuentra dentro de los límites de comodidad ambiental definidos entre 15 y 16°C como promedio anual, principalmente en la planicie de la cuenca y el piemonte, mientras que en las áreas cercanas a las montañas, la temperatura oscila entre 12 y 14°C (Jáuregui, 2000).

En el sur de la ciudad, donde se encuentra la mayor extensión de cubierta vegetal, la temperatura es más fresca con respecto a la zona centro donde la temperatura se incrementa debido al calentamiento

En el centro de la ciudad se registran temperaturas más altas que en los alrededores, a este fenómeno se le conoce como "isla de calor" y es provocado principalmente por el tipo de suelo de cada zona.

to del suelo, las construcciones, al tráfico vehicular y a la limitación de la circulación del viento ocasionada por la altura de las edificaciones (Secretaría del Medio Ambiente, 2006b). A este incremento de la temperatura en un área específica con respecto de los alrededores se le conoce como *isla de calor* y suele presentarse sólo en ciertas horas del día.

En la Ciudad de México la temperatura también varía en función de las temporadas climáticas, los valores máximos suelen presentarse en los meses de la temporada seca-caliente, mientras que los valores mínimos en los meses de la temporada seca-fría. En la última década las temperaturas máximas

han oscilado entre 30 y 35°C, y las mínimas entre -3.6 y 1.7°C.

### Inversiones térmicas y estabilidad atmosférica

La estabilidad de la atmósfera es determinada por el comportamiento vertical de la temperatura, que puede ocasionar inversiones térmicas en cualquier nivel de la tropósfera. En condiciones normales o de inestabilidad la temperatura del aire desciende con la altura, de tal forma que por cada 100 metros de altitud la temperatura disminuye poco menos de un grado centígrado (Secretaría del Medio Ambiente,

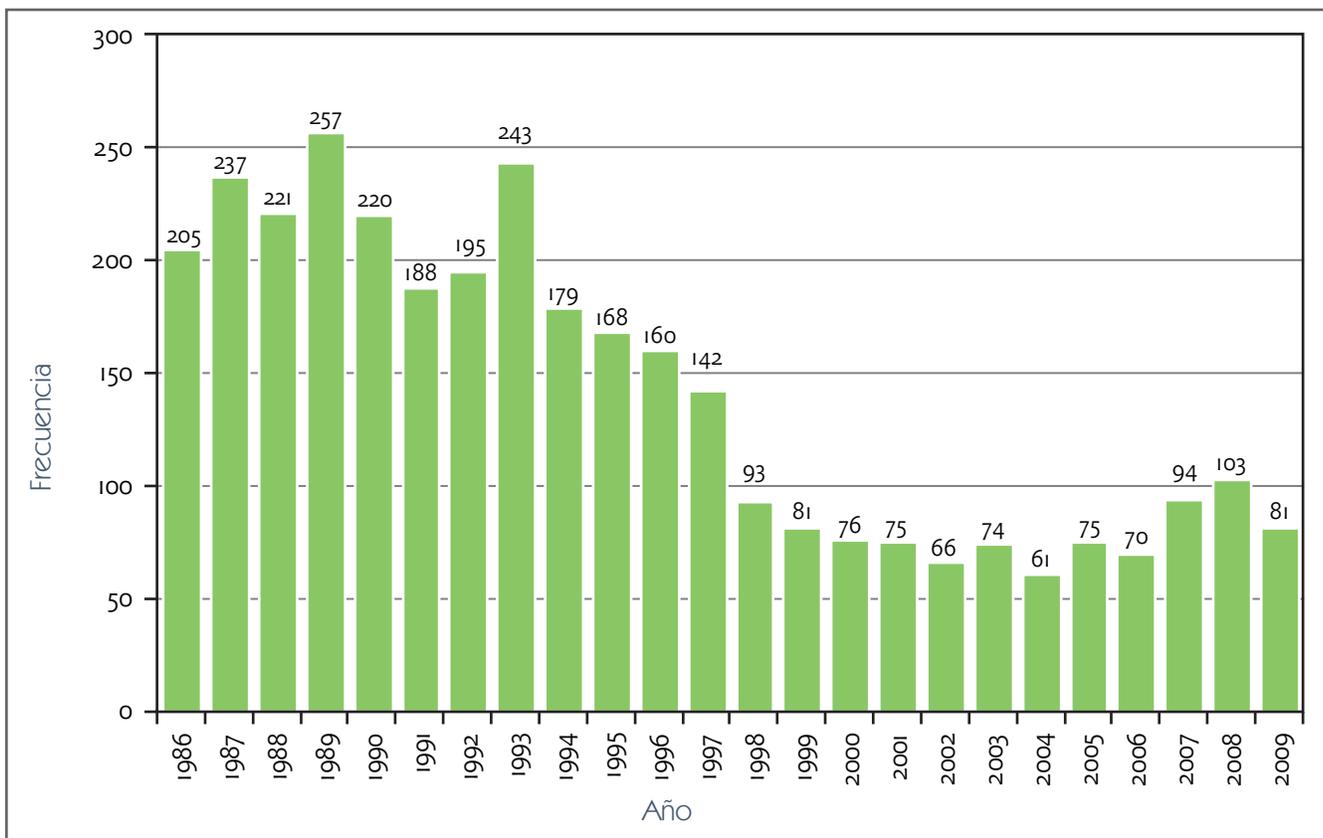


Figura 3.1 Frecuencia anual de inversiones térmicas de superficie en la Ciudad de México 1986-2009 (elaborada con información del Servicio Meteorológico Nacional).

2005) y el aire es menos denso, es decir, el aire asciende con facilidad y el proceso de dispersión de contaminantes es más efectivo. Por el contrario, cuando la temperatura del aire se mantiene o se incrementa con la altura, algunas regiones de la atmósfera se estabilizan de modo que cuando la estabilidad es mayor, el régimen vertical de la temperatura se invierte ocasionando una inversión térmica.

Durante una inversión térmica el aire que se encuentra cerca de la superficie es más frío y denso que en regiones superiores de la atmósfera, provocando una barrera que limita la dispersión de contaminantes. En la Ciudad de México la frecuencia

de inversiones ha disminuido considerablemente desde 1989, cuando se registraron 257 eventos. En 2008 se registró un total de 103 inversiones térmicas y durante 2009 sólo se registraron 81 (Figura 3.1). Esta disminución está directamente relacionada con los cambios en la estructura de los sistemas meteorológicos de gran escala y con la modificación de los patrones locales del clima, principalmente por la influencia del efecto de las *islas de calor*. Asimismo, la disminución que se observa desde 1998 se debe también al cambio de lugar donde se realizaba el radiosondeo con el que se determina la existencia de una inversión térmica; antes de marzo de 1998 se realizaba en el Aeropuerto Internacional de la

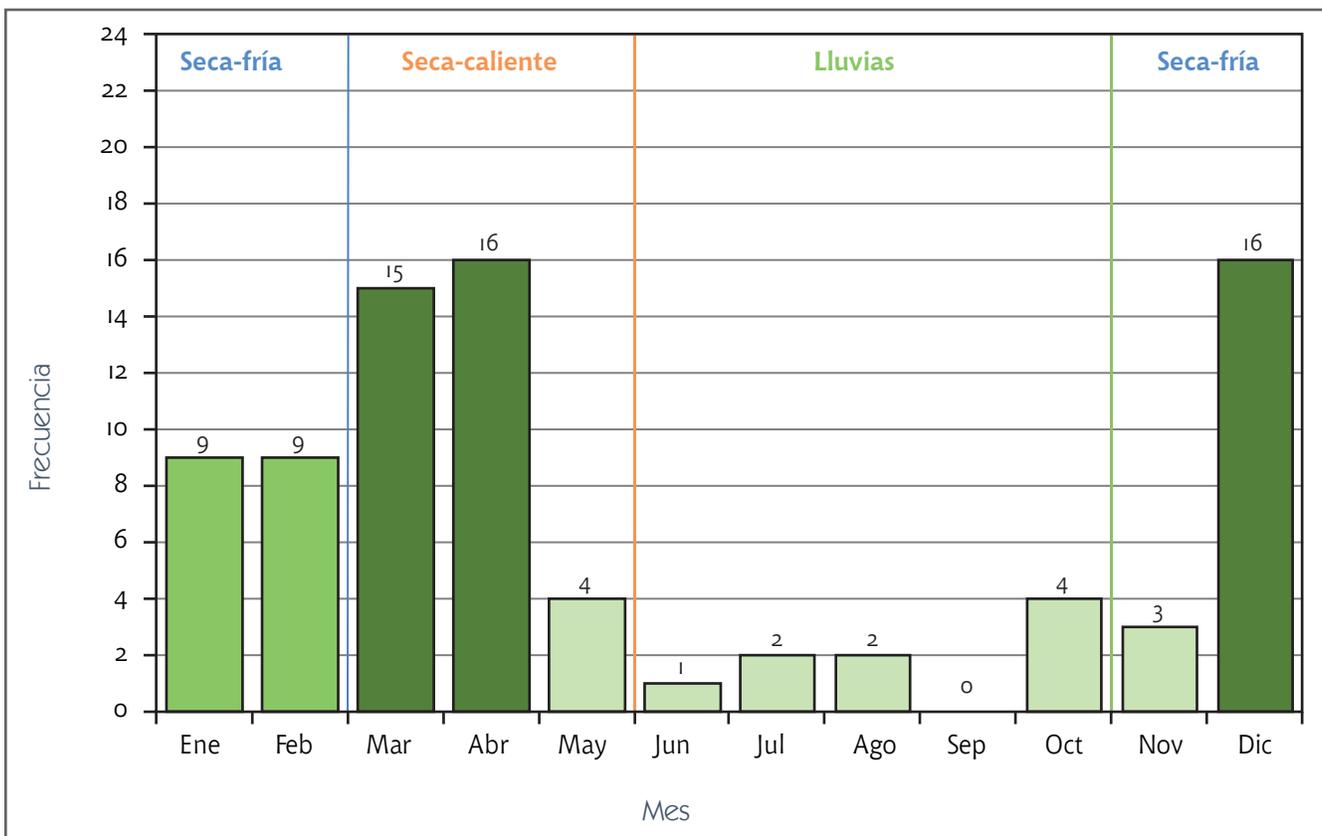


Figura 3.2 Frecuencia mensual de inversiones térmicas de superficie durante 2009 en la Ciudad de México (elaborada con la información del Servicio Meteorológico Nacional).

Ciudad de México y a partir de abril se realiza en las instalaciones del Servicio Meteorológico Nacional ubicado en Tacubaya.

Las condiciones de estabilidad se observan principalmente en los meses de la temporada seca, razón por la cual se registra el mayor número de inversiones entre los meses de diciembre y abril. Por el contrario, la presencia de humedad y masas de aire tropical provocan inestabilidad atmosférica y por consiguiente un menor número de inversiones. La frecuencia mensual de inversiones térmicas durante 2009 indica que los meses de diciembre y abril registraron el mayor número de eventos, con 16 cada uno. El mes de septiembre no registró ninguna inversión, lo cual se asocia con las condiciones de inestabilidad que provocaron las lluvias durante todo el mes (Figura 3.2).

### Humedad relativa y precipitación pluvial

La humedad en el ambiente es la cantidad de vapor de agua presente en el aire y está directamente asociada con los sistemas meteorológicos provenientes de la región tropical. Estos sistemas se desarrollan para formar fenómenos como depresiones, ciclones, tormentas tropicales y huracanes, los cuales se definen por su alto contenido de humedad, nubosidad y abundantes precipitaciones.

Al igual que los cambios de temperatura definen las temporadas climáticas en frías o calurosas, la humedad determina si son húmedas o secas. En la Ciudad de México la incidencia de mayor humedad relativa y precipitaciones se asocia con la presencia de vientos alisios con alto contenido de humedad,

principalmente desde finales de mayo y hasta octubre (Secretaría del Medio Ambiente, 2005).

La temporada de lluvias comprende los meses de junio a octubre, donde las inversiones térmicas disminuyen notablemente debido a la inestabilidad atmosférica ocasionada por la presencia de sistemas de baja presión y la incursión de masas de aire tropical húmedo, procedentes del Mar Caribe, Golfo de México y Océano Pacífico.

En los últimos tres años el promedio anual de precipitación presenta un decremento gradual que no se había observado en años anteriores, no obstante, estos promedios no son menores al reportado en 1996.

La extensión de nubosidad que se genera de los sistemas mencionados, ayuda a que la radiación solar disminuya y por consiguiente disminuya la intensidad de las reacciones

fotoquímicas para la formación de ozono. En términos generales, la precipitación se asocia con mejores condiciones de calidad del aire, ya que la lluvia funciona como un mecanismo de limpieza conocido como *lavado atmosférico*. Sin embargo, el agua de lluvia en combinación con los óxidos de nitrógeno y los óxidos de azufre puede formar ácidos que afectan principalmente a la vegetación (Secretaría del Medio Ambiente, 2006a).



SIMAT, Ciudad de México.

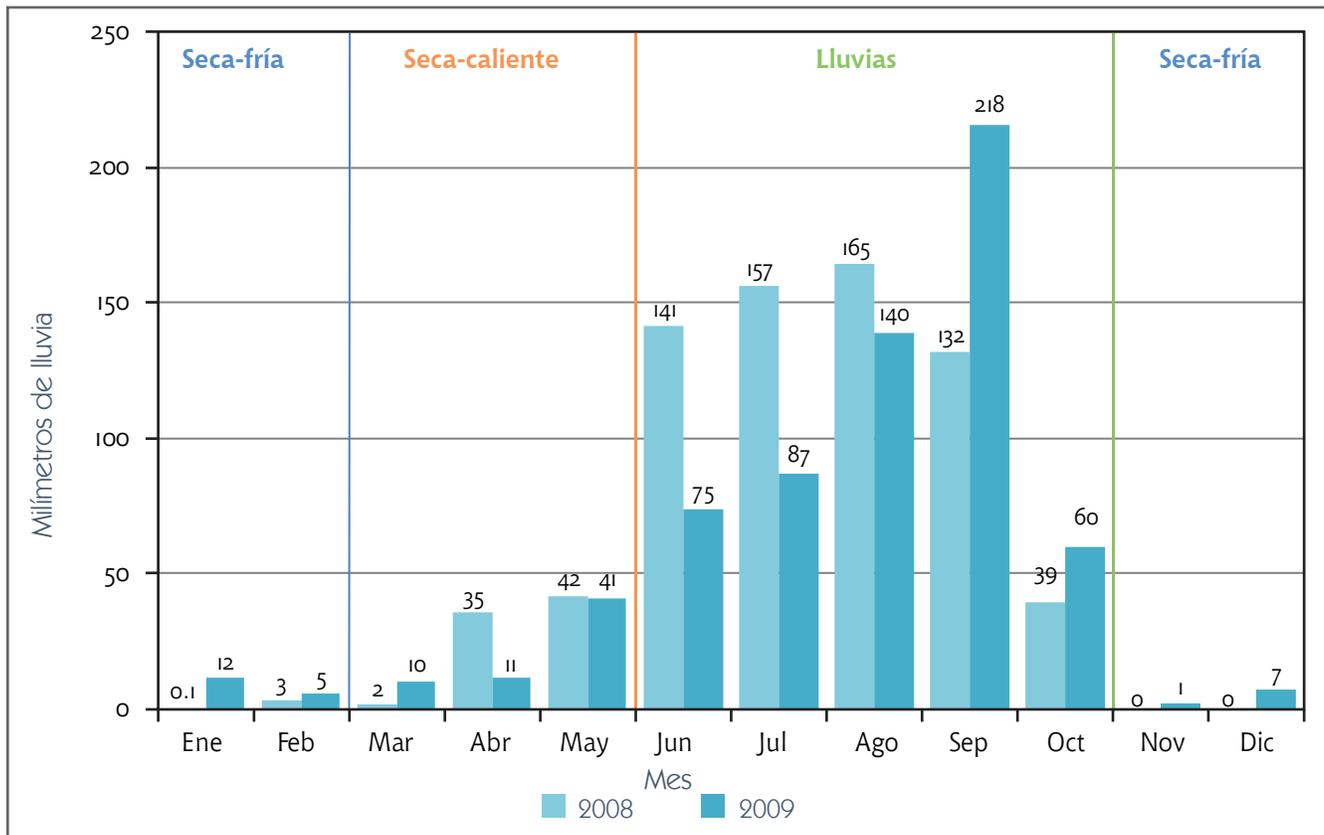


Figura 3.3 Promedio mensual de la precipitación pluvial en la Ciudad de México 2009. En la figura se compara la información con la registrada en 2008 (elaborada con información del Sistema de Aguas de la Ciudad de México).

La Figura 3.3 presenta de forma comparativa los promedios mensuales de precipitación durante 2008 y 2009. Se observa que los meses de 2009 correspondientes a la temporada de lluvias presentan promedios mensuales mayores a 50 milímetros (mm). El mes de septiembre registró el promedio máximo con 218 mm. En el caso de la temporada seca no superó 15 mm con excepción del mes de mayo. En los meses de junio y julio, en comparación con 2008, se registró una menor cantidad de precipitación, lo cual se asocia a que persistieron masas de aire con bajo contenido de humedad provenientes del Mar Caribe y del Golfo de México, retrasando así la temporada de lluvias.

En términos de la tendencia histórica, la Figura 3.4 muestra que el promedio de precipitación pluvial presenta una disminución paulatina en los tres últimos años, sin embargo, aún no se compara con los promedios registrados en 1996. Durante 2009 se reportó una precipitación promedio acumulada de 666 mm, de los cuales 580 mm corresponden a la temporada de lluvias.

En cuanto a la distribución espacial de la precipitación, la Figura 3.5 indica que el área que recibió la mayor cantidad de precipitación durante 2009 es el poniente de la ciudad donde se ubica la zona montañosa, cuya influencia se manifiesta de dos formas:

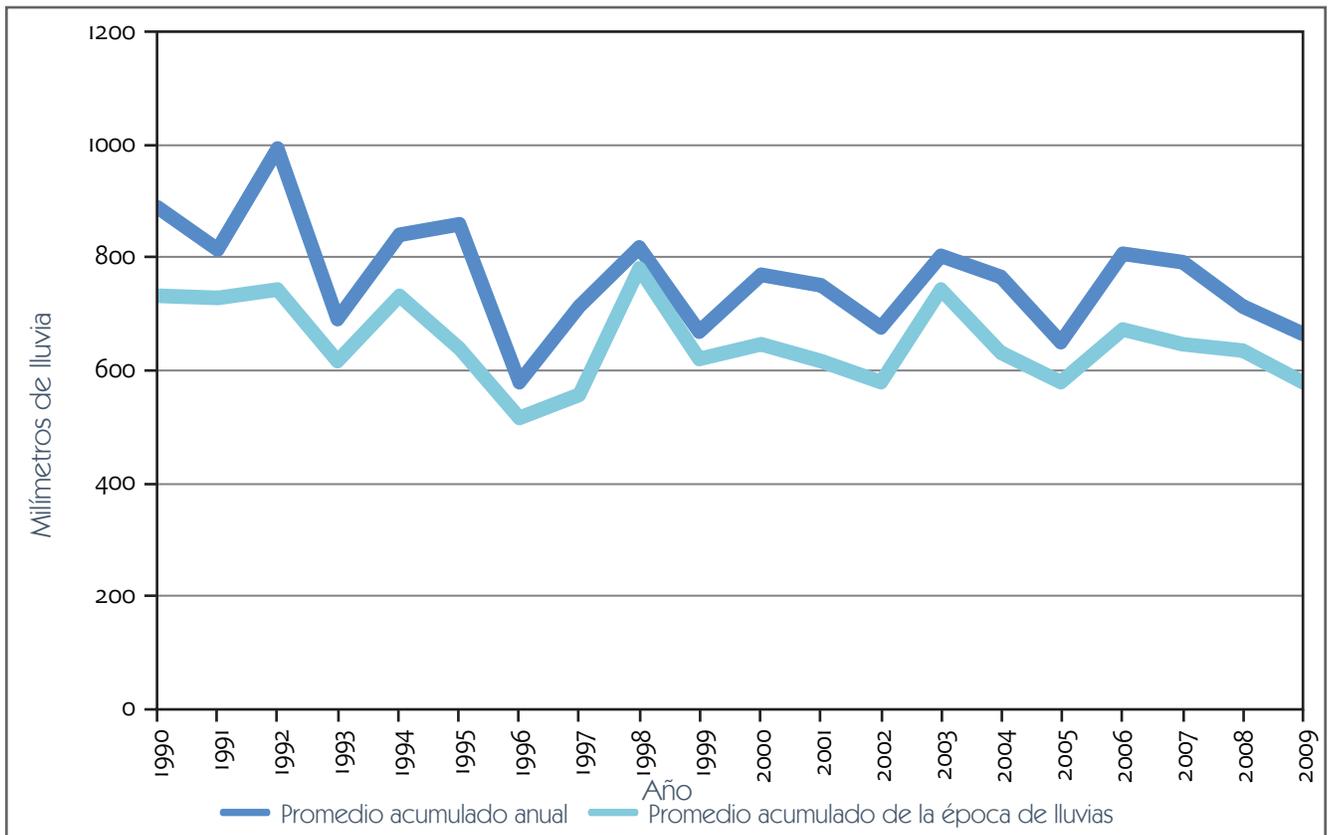


Figura 3.4 Tendencia histórica de la precipitación pluvial en la Ciudad de México desde 1990 (elaborada con información del Sistema de Aguas de la Ciudad de México).

la primera, ocurre cuando el aire húmedo llega a la montaña y esta ocasiona que se eleve, formando nubosidad, para luego dar paso a la precipitación; la segunda tiene que ver con la formación de nubosidad en otras zonas del valle, misma que es arrastrada hacia la zona montañosa donde se limita su circulación. Esta nubosidad puede fortalecerse debido al proceso de ascenso de aire ya mencionado.

### Radiación solar

El sol es la fuente principal de la energía necesaria para que se lleven a cabo los principales procesos

que realizan los seres vivos, desde los más básicos hasta los más complejos, desde el organismo más simple hasta el más evolucionado, a fin de asegurar que la cadena de la vida no se vea interrumpida. De igual manera, la radiación es el motor que propicia todas las manifestaciones atmosféricas, al generar el movimiento de los sistemas meteorológicos causados por las diferencias de temperatura en las distintas regiones del planeta. Estas diferencias de temperatura modifican la densidad del aire, lo que a su vez se manifiesta como diferencias de presión, obligando a que el aire se mueva de altas a bajas presiones, dando origen a la circulación general de la atmósfera.

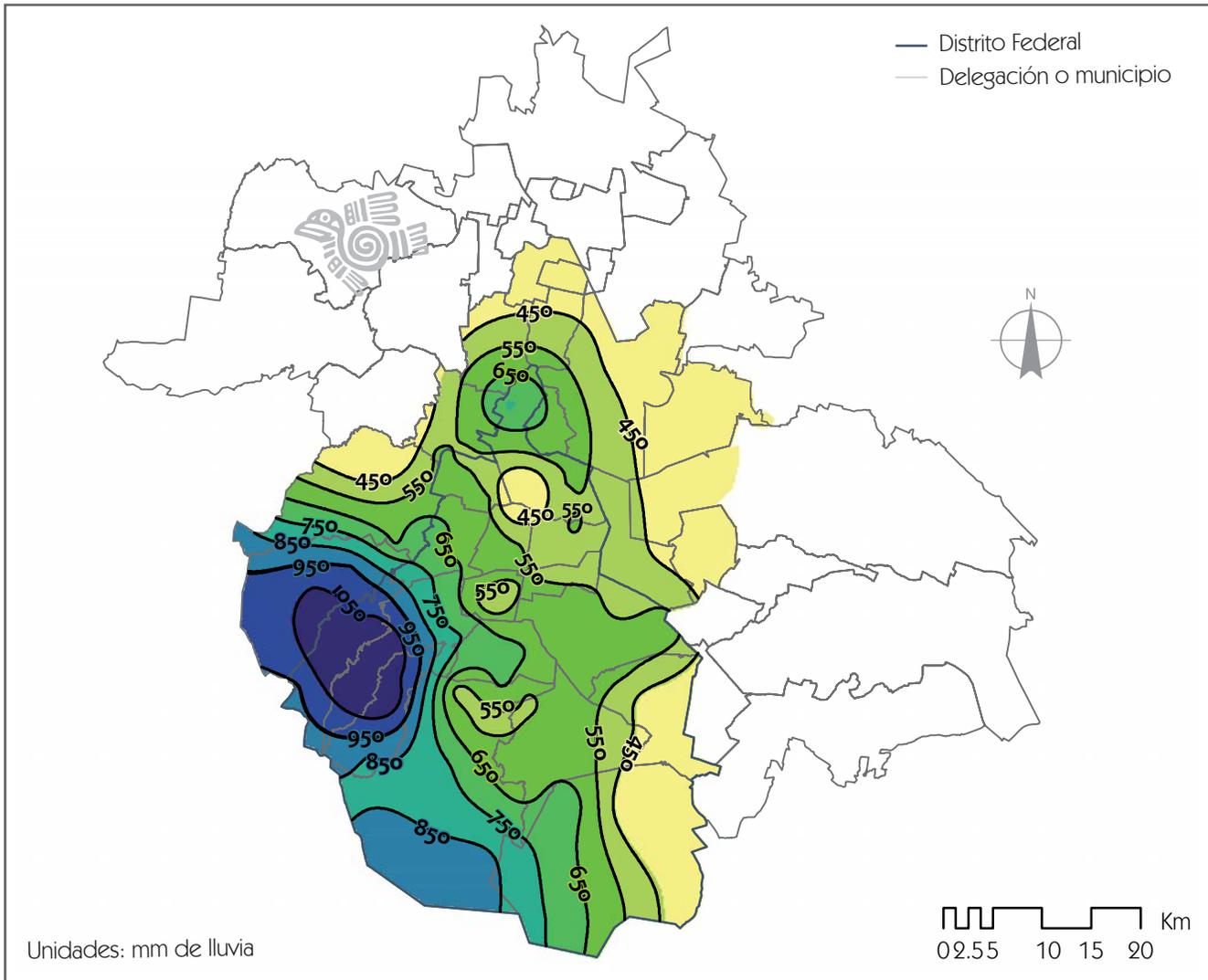


Figura 3.5 Distribución espacial de la precipitación pluvial dentro del Valle de México (elaborado con información del Sistema de Aguas de la Ciudad de México).

Sin embargo, así como la radiación solar es origen fundamental de vida, también puede ser dañina para la misma. La porción de la radiación que corresponde al ultravioleta (UV) puede ser benéfica o muy nociva para la salud. Para el ser humano, una dosis adecuada es favorable por que ayuda a producir la vitamina D necesaria para fijar el calcio

en el cuerpo. Por el contrario, una exposición exagerada puede causar cáncer en la piel, cataratas e inhibición del sistema inmunológico.

Debido a la posición geográfica y la altura en la que se encuentra, la Ciudad de México recibe una intensa radiación durante todo el año. El núme-

ro de horas con radiación solar efectiva se define como fotodía, que es de hasta 13 horas en el verano y de 11 horas durante el invierno.

En la Ciudad de México, la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET) cuenta con un conjunto de sensores que miden la radiación solar y en función de los datos registrados, se emite cada hora el Índice de Radiación Ul-

travioleta (IUV), con el propósito de comunicar a la población el riesgo de una exposición excesiva.

Cuanto mayor sea el valor del índice, mayor daño produce la radiación y se necesita de un menor tiempo para sufrir quemaduras en la piel sin protección.

La radiación solar se presenta a lo largo del fotodía, es decir desde la salida y hasta la puesta del sol, no obstante, las horas con mayor riesgo por radiación ultravioleta

Entre las 12:00 y las 15:00 horas se registran los valores más altos de radiación solar. En los meses de marzo a mayo se registran con mayor frecuencia debido a que prevalecen los días con cielo despejado.

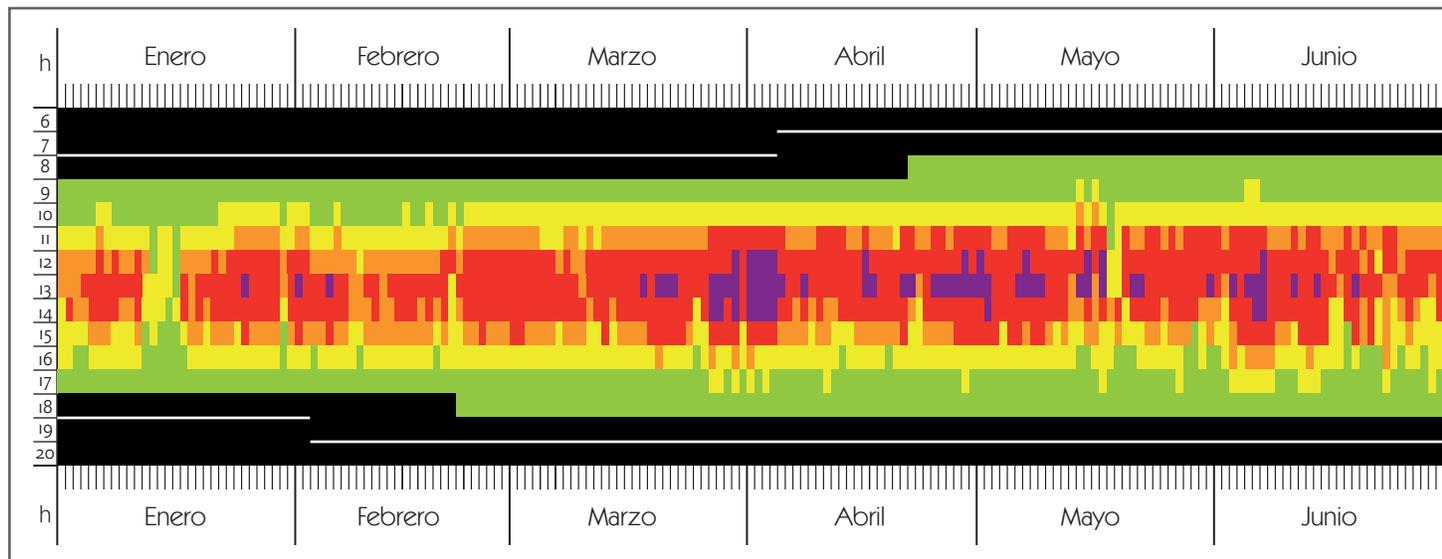
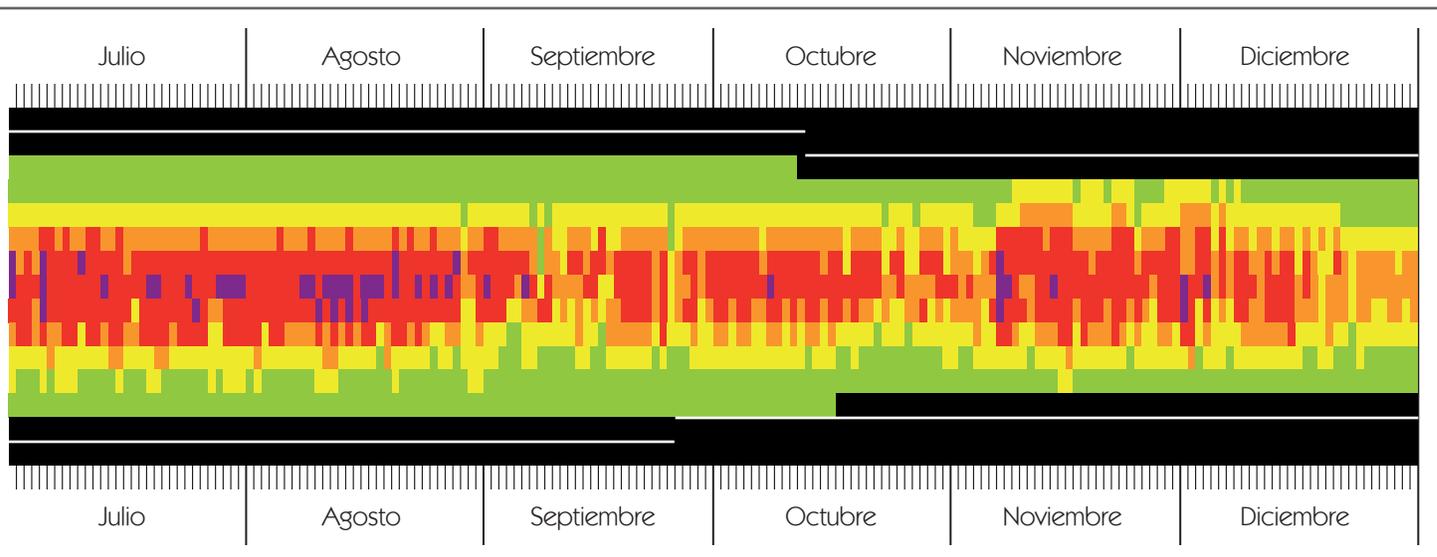


Figura 3.6 Comportamiento del índice de radiación solar ultravioleta (IUV) durante 2009. Cada celda representa el valor máximo una exposición de 22 minutos es suficiente para producir daño. El color morado corresponde a una condición EXTREMADAMENTE

leta son las comprendidas entre las 12:00 y las 15:00 horas. Durante la temporada seca-caliente se registran los valores máximos del índice UV (condición EXTREMADAMENTE ALTA), esto se debe a que la temporada se caracteriza por cielo despejado y días más largos. En el verano también se presentan estas condiciones pero en menor número de horas debido a la presencia de nubosidad, en contraste, los meses de diciembre y enero, caracterizados por días más cortos registran menos radiación. La Figura 3.6 presenta la situación del índice UV a lo largo del año 2009.

Los daños provocados por la radiación solar muchas veces no son perceptibles, sin embargo, son acumulativos. Una exposición repetida a la radiación puede provocar daños graves a la piel y los ojos, en el largo plazo (Anexo F). En la Ciudad de México no es común el uso de protección contra los efectos y daños de la radiación ultravioleta entre la población. Sin embargo, los registros de la intensidad de la radiación indican que los niveles que inciden sobre la ciudad representan un riesgo grave para la misma.



del IUV para cada hora, a lo largo del año. El color rojo corresponde a una condición ALTA e implica que para la piel morena clara ALTA e indica que se requiere de una exposición de 16 minutos para producir daño en la piel morena clara.



# DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

---



De acuerdo con el Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio de la ZMVM 2008 (Secretaría del Medio Ambiente, 2010), el consumo anual de energía de la Ciudad de México y su área metropolitana se estima en 576 petajoules, de los cuales más del 95% provienen de la quema de combustibles fósiles. El 60% de esta energía es requerida por el transporte, el 24% por la industria, el 13% para uso residencial y los servicios consumen el 3% restante. Esta demanda energética genera anualmente 6704 toneladas de dióxido de azufre, 1,568 millones de toneladas de monóxido de carbono, 188 087 toneladas de óxidos de nitrógeno, 24 296 toneladas de partículas menores a 10 micrómetros y 5499 toneladas de partículas menores a 2.5 micrómetros ( $PM_{2.5}$ ).

Debido a que el transporte y la industria consumen la mayor parte de la energía, tienen una mayor contribución de emisiones directas a la atmósfera provenientes del uso de combustibles. Al año se consumen aproximadamente 3522 millones de metros cúbicos de combustible, de los cuales 7.246 millones corresponden a gasolina Magna, 0.797 millones a gasolina Premium, 0.201 millones al *diesel* industrial, 3507 millones de metros cúbicos de gas

natural y 4.244 millones de metros cúbicos de gas LP (Secretaría del Medio Ambiente, 2010).

Se estima que en el Distrito Federal y su zona conurbada existen 4.5 millones de vehículos automotores, de los cuales alrededor de 3.7 millones son vehículos particulares y menos del 7% está dedicado al transporte público de pasajeros. El 95% de la flota vehicular utiliza gasolina como combustible, el 4% *diesel* y los vehículos restantes utilizan gas LP y en menor cantidad gas natural. De acuerdo con la Encuesta Origen Destino 2007 (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2007), en la Ciudad de México y su zona metropolitana en un día hábil se realizan 21.9 millones de viajes, de los cuales 58.4% se originan en el Distrito Federal y 41.3% en el Estado de México. Alrededor de 14.8 millones de viajes se realizan en transporte público y 6.8 millones en transporte privado, el resto en transporte mixto. En el Distrito Federal se realizan alrededor de 12.8 millones de viajes de los cuales el 83% se realizan en el interior del Distrito Federal y 17% viajan del Distrito Federal hacia el Estado de México. En los municipios conurbados del Estado de México se realizan 9.1 millones de viajes, de los cuales el 75.7% se realizan dentro de los municipi-



Fotografía de la página anterior: Imagen obtenida por la Hazecam el día 16 de enero de 2010 a las 16:30. La distribución de la contaminación del aire en la ciudad no es uniforme, la contaminación se mueve junto con la masa de aire en la que se encuentra. En esta imagen se puede observar como los vientos limpian la contaminación de izquierda a derecha arrastrando la contaminación fuera de la ciudad. Durante la tarde del día 16 de enero los vientos soplaban con una intensidad de 4 m/s y una dirección de poniente a oriente, a la izquierda de la imagen se observa el cielo limpio y transparente, mientras que del lado derecho se puede ver como la bruma de contaminación es desplazada hacia el noreste.

pios y 24.3% se mueve de los municipios hacia el Distrito Federal. Los vehículos generan en conjunto 3306 toneladas de dióxido de azufre, 1.552 millones de toneladas de monóxido de carbono, 154 919 toneladas de óxidos de nitrógeno, 3902 toneladas de  $PM_{10}$  y 2849 toneladas de  $PM_{2.5}$ .

De las 328 mil industrias manufactureras del país, el 16% (aproximadamente 50 000) se ubican en la Ciudad de México y el área metropolitana, sin embargo, el inventario sólo registra 5146 industrias (Secretaría del Medio Ambiente, 2010). La industria genera anualmente 3375 toneladas de dióxido de azufre, 6961 toneladas de monóxido de carbono, 20 094 toneladas de óxidos de nitrógeno, 4986 toneladas de  $PM_{10}$  y 859 toneladas de  $PM_{2.5}$ . La mayor parte de

*El transporte y la industria tienen la mayor demanda de energía, esta proviene principalmente de los combustibles fósiles. En consecuencia su contribución de emisiones directas a la atmósfera es mayor.*

la industria se concentra en las delegaciones Azcapotzalco, Gustavo A. Madero, Iztacalco, Iztapalapa, y en los municipios de Naucalpan, Tlalnepantla y Ecatepec (Figura 4.1).

Dióxido de azufre

De acuerdo con el inventario de emisiones, anualmente se generan 6704 toneladas de dióxido de azufre, los vehículos aportan 3306 toneladas y la industria contribuye con 3375 toneladas. El 67% de las emisiones se generan en el Estado de México y el 33% en el Distrito Federal (Figura 4.2). Las mayores concentraciones del contaminante se registran en el noroeste en las estaciones de monitoreo Tlalnepantla (TLA), Villa de la Flores (VIF) y Tulti-

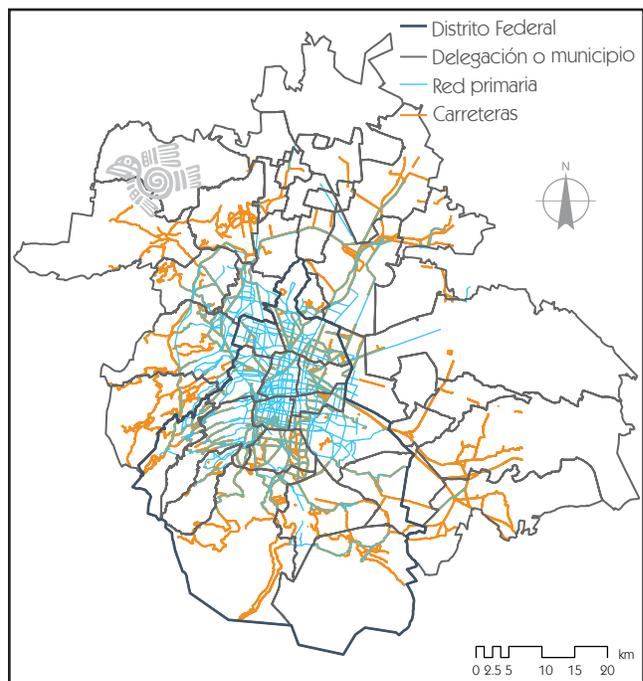
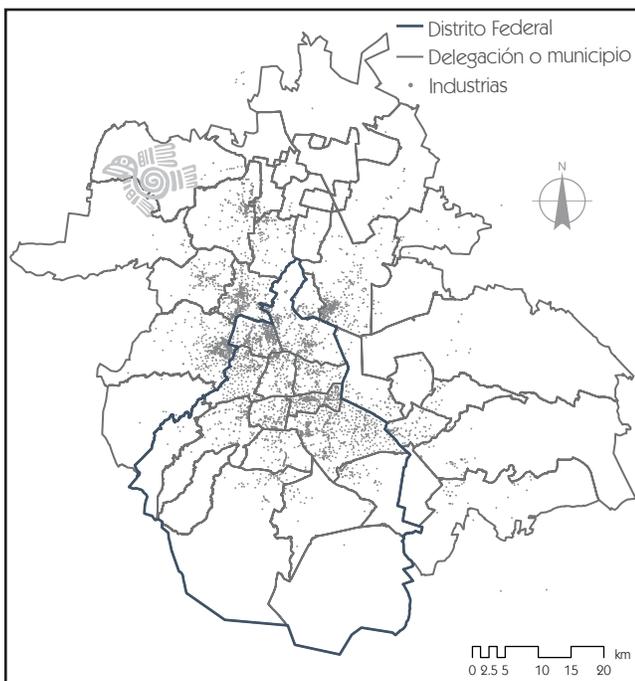


Figura 4.1 Distribución de la industria y las vialidades en la Ciudad de México y su área metropolitana.

tlán (TLI), todas localizadas en el Estado de México (Figura 4.3).

## Monóxido de carbono

Anualmente se emiten 1.57 millones de toneladas de monóxido de carbono en la ciudad y el 99% es generado por fuentes móviles (Secretaría del Me-

dio Ambiente, 2010). Los autos particulares emiten el 41%, seguidos por los taxis y las motocicletas con 12% y 10%, respectivamente.

La mayor cantidad de emisiones de monóxido de carbono se observa a lo largo de calles y avenidas. En las áreas con la mayor densidad de vialidades se emite la mayor cantidad del contaminante (Figura

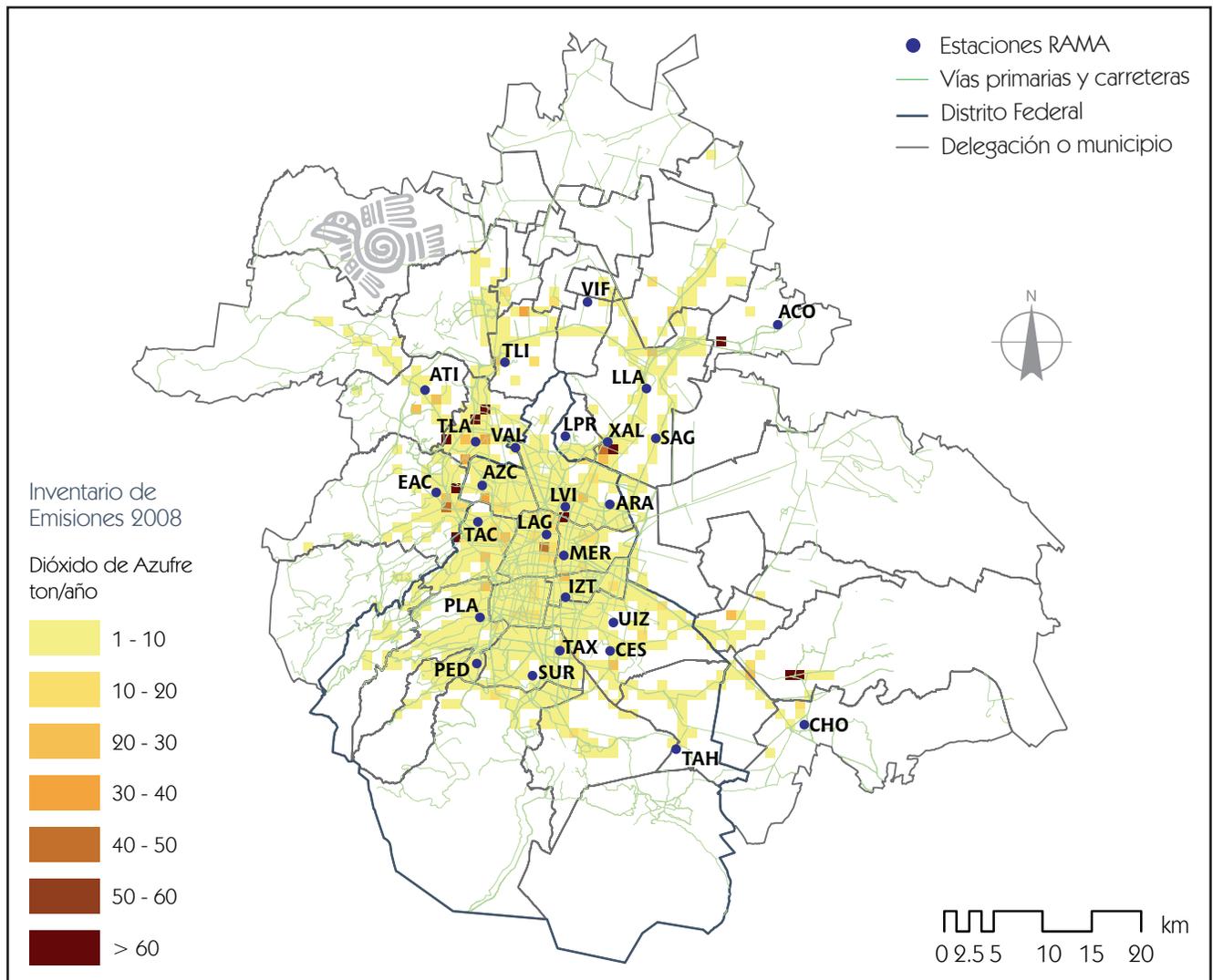


Figura 4.2 Inventario de emisiones de dióxido de azufre en la Ciudad de México y su área metropolitana. Cada celda representa la estimación anual de emisiones de las fuentes ubicadas en un área de 2 km<sup>2</sup>.

4.4). El Distrito Federal genera el 46% de las emisiones, mientras que el Estado de México produce el 54%. Las demarcaciones en donde se registra la mayor cantidad de emisiones son las delegaciones Cuauhtémoc, Benito Juárez, Miguel Hidalgo, Gustavo A. Madero, Venustiano Carranza y Azcapotzalco en el Distrito Federal, y los municipios de Tlalnepantla, Naucalpan y Ecatepec en el Estado

de México. Las estaciones Merced (MER), Laguni-lla (LAG) y Tacuba (TAC), registran los promedios anuales más altos del contaminante (Figura 4.5).

Óxidos de nitrógeno

De acuerdo con el inventario de emisiones los vehículos que circulan por la ciudad emiten el 82% de

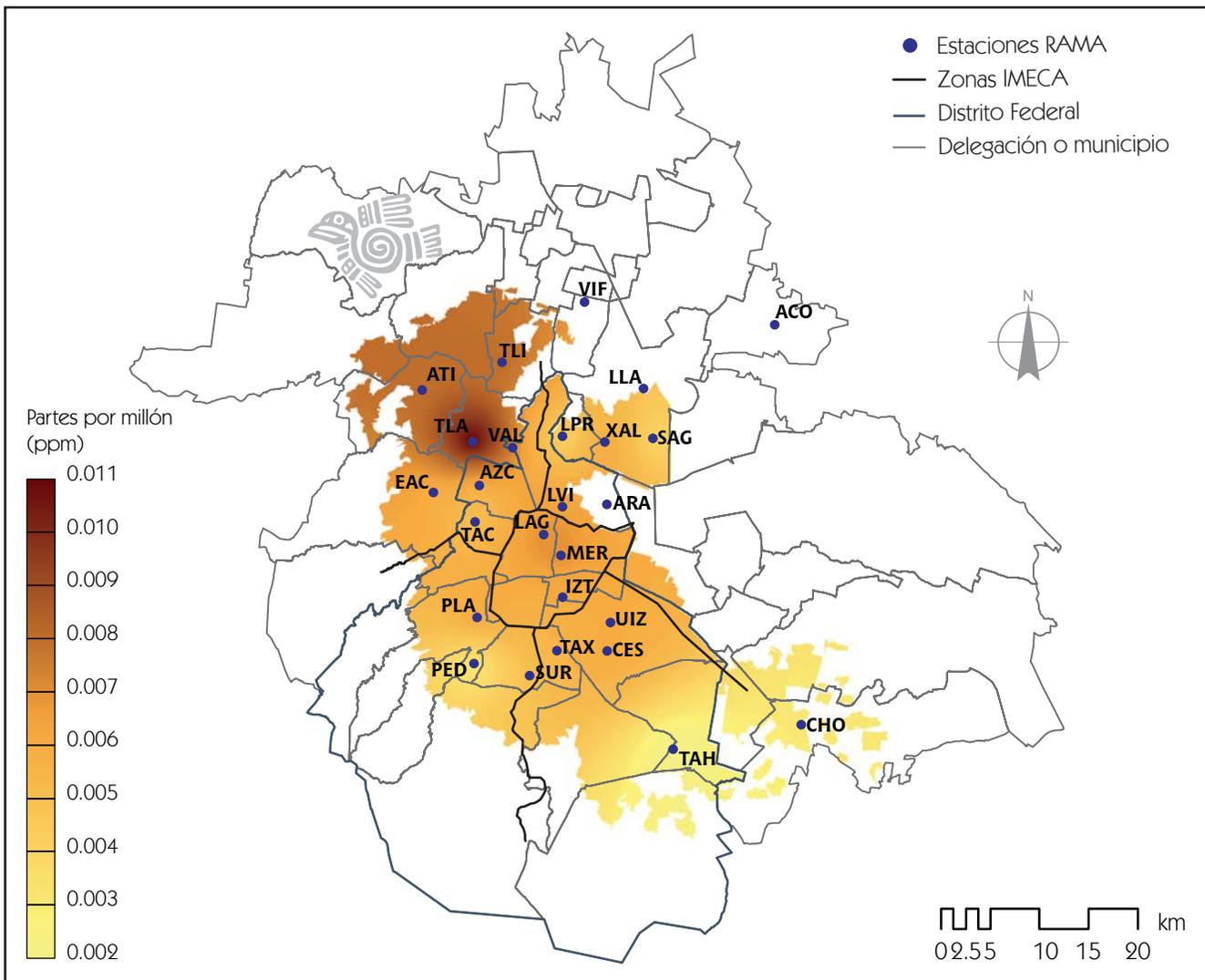


Figura 4.3 Distribución espacial de la concentración promedio anual de dióxido de azufre durante 2009 en el área de cobertura.

las 188 087 toneladas de óxidos de nitrógeno que se generan anualmente en la zona metropolitana, los autos particulares aportan el 32% del total, los autobuses y taxis participan con el 12% y 11%, respectivamente, y el 27% restante otros vehículos. La generación de energía contribuye con el 5.8% del total de las emisiones y el resto de la industria

aporta sólo el 5.2% (Secretaría del Medio Ambiente, 2010).

En el Distrito Federal se genera el 52% de las emisiones, mientras que los municipios conurbados del Estado de México aportan el 48%. Los vehículos son la principal fuente de emisión por

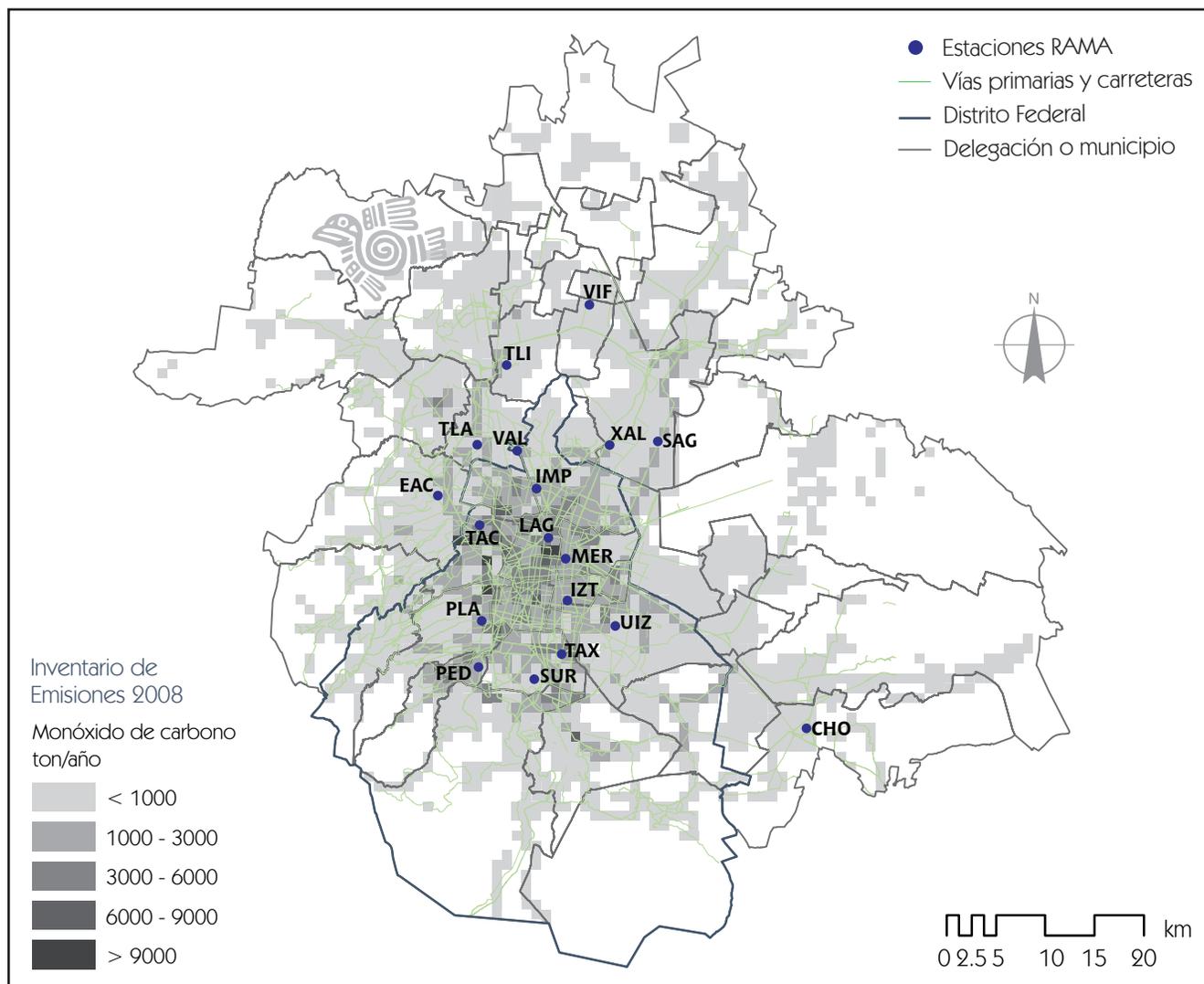


Figura 4.4 Inventario de emisiones de monóxido de carbono en la Ciudad de México y su área metropolitana. Cada celda representa la estimación anual de emisiones de las fuentes ubicadas en un área de 2 km<sup>2</sup> y su distribución corresponde con las principales vialidades.

lo que la distribución espacial de las emisiones corresponde con la distribución de las vialidades en la ciudad. El mayor volumen de emisiones se observa en las delegaciones en donde se encuentra el mayor número de vialidades y tránsito (Figura 4.6).

A diferencia del monóxido de carbono, la distribución espacial de la concentración de óxidos de nitrógeno indica que la mayor concentración se registra en la estación Xalostoc (XAL) y le siguen las estaciones Merced (MER), Lagunilla (LAG), Tlalnepantla (TLA) y ENEP Acatlán (EAC). Por el contrario, las

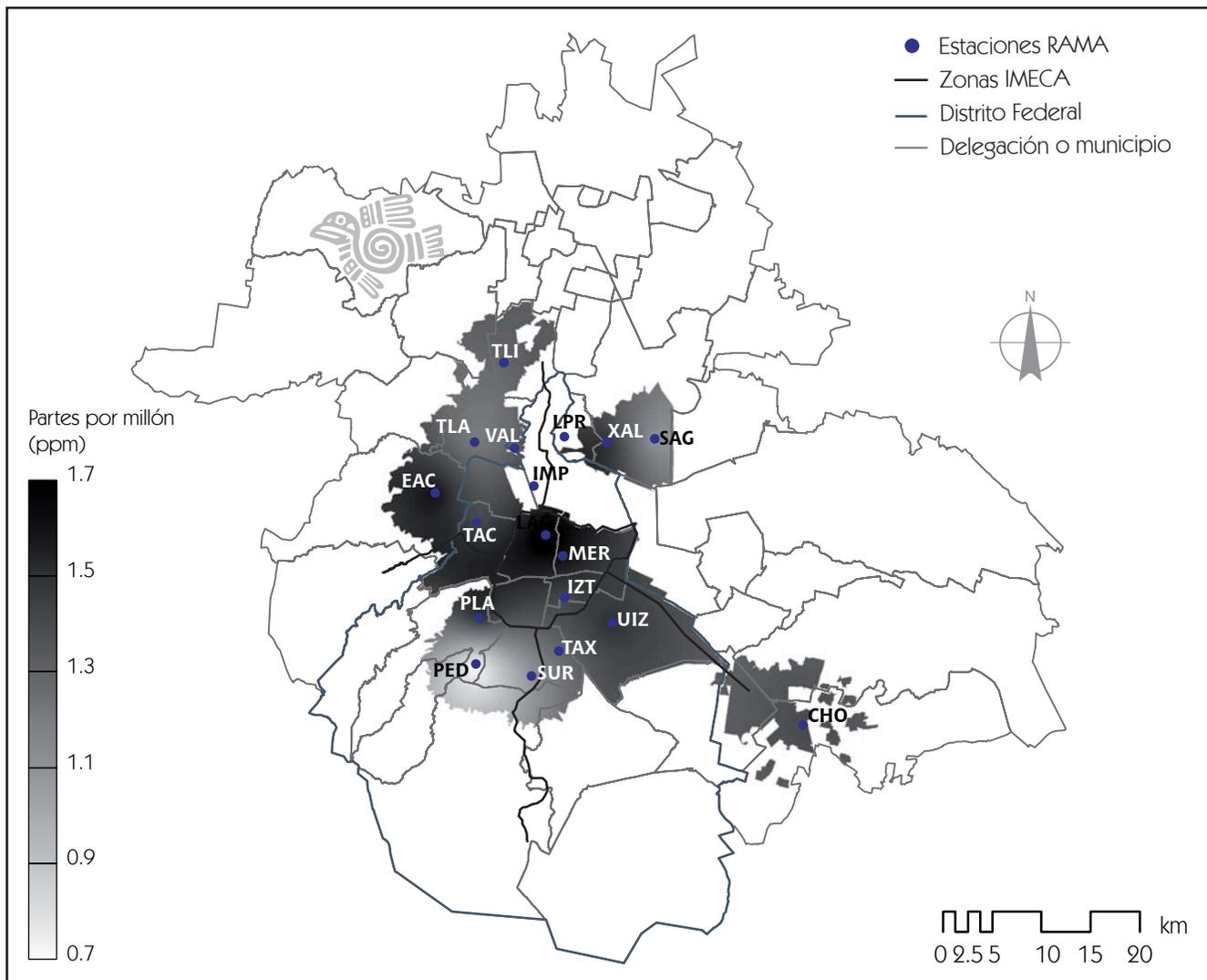


Figura 4.5 Distribución espacial de la concentración promedio anual de monóxido de carbono durante 2009 en el área de cobertura. Las estaciones Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), Vallejo (VAL) y Villa de las Flores (VIF) no se consideraron en la interpolación debido a la falta de información para este año y en la figura se observa con un espacio vacío la cobertura de estas estaciones que abarcan la delegación Gustavo A. Madero y parte de Azcapotzalco.

## DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

estaciones localizadas al sur de la ciudad reportan los valores mínimos del contaminante (Figura 4.7).

Partículas menores a 10 micrómetros

Anualmente se generan 24 mil toneladas de partículas menores a 10 micrómetros ( $\mu\text{m}$ ) de origen

primario, el 21% proviene de las vialidades sin pavimentar, el sector de productos minerales no metalúrgicos contribuye con el 6% y las fuentes móviles aportan el 16% (Secretaría del Medio Ambiente, 2010). El inventario de emisiones considera para sus estimaciones únicamente la concentración de partículas primarias, sin embargo, en la Ciudad

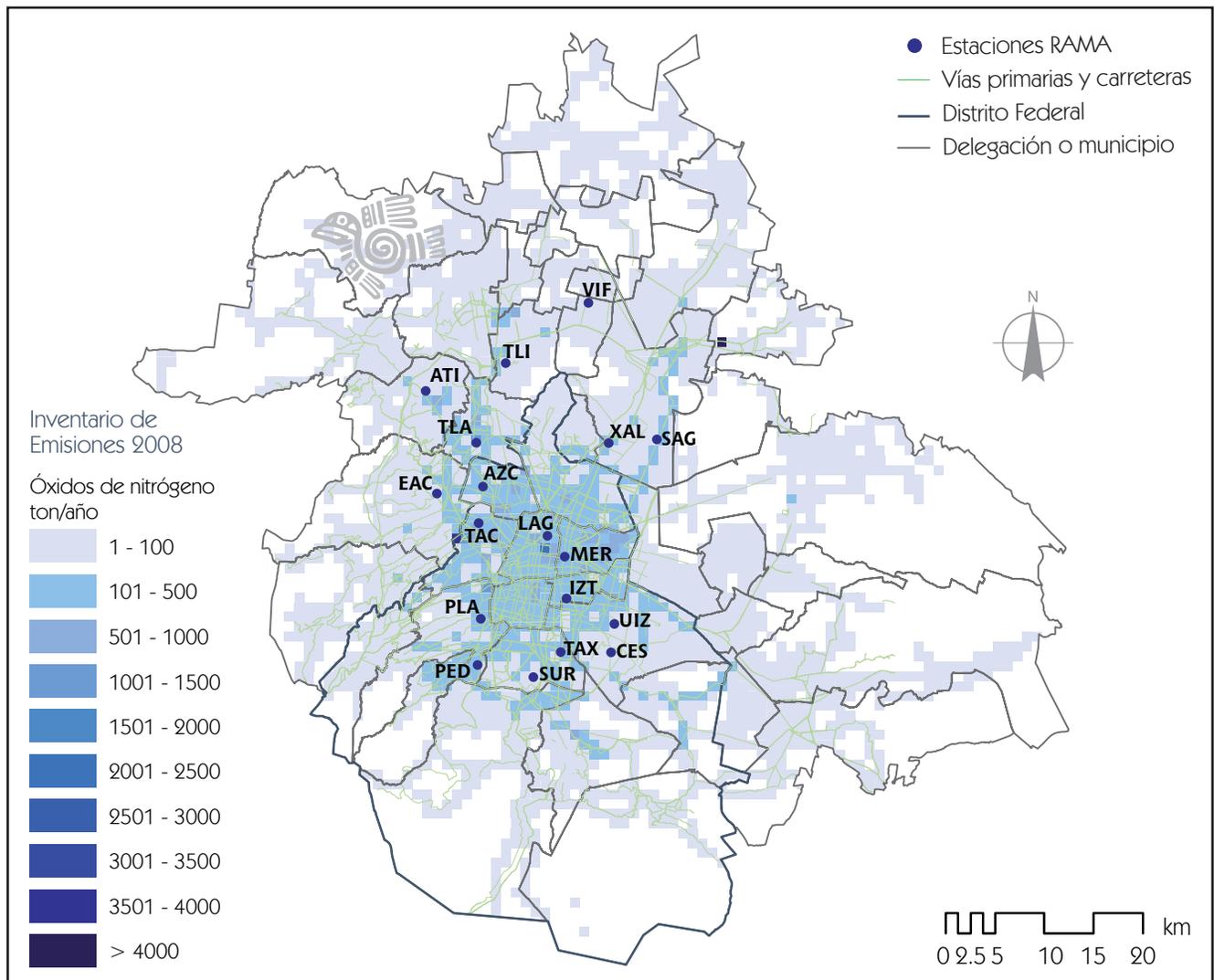


Figura 4.6 Inventario de emisiones de óxidos de nitrógeno en la Ciudad de México y su área metropolitana. Cada celda representa la estimación anual de emisiones de las fuentes ubicadas en un área de 2 km<sup>2</sup>. La celda de color intenso localizada en la esquina superior derecha en el municipio de Acolman corresponde a la termoeléctrica “Valle de México”.

de México existe una contribución importante de partículas secundarias producidas de la transformación o reacción de gases como el dióxido de azufre, los óxidos de nitrógeno e hidrocarburos. Otra fuente de partículas se atribuye al viento, ya que debido a este pueden ser transportadas grandes distancias provenientes de otras regiones, no obstante, es difícil estimar su contribución y origen. En la Figura

4.8 se muestra la distribución de las fuentes primarias de partículas en la Ciudad de México.

La mayor cantidad de emisiones se observa en el norte de la ciudad, principalmente en las regiones en donde se concentra la industria; mientras que la resuspensión de polvos y la emisión directa de partículas en los humos de los vehículos provocan que

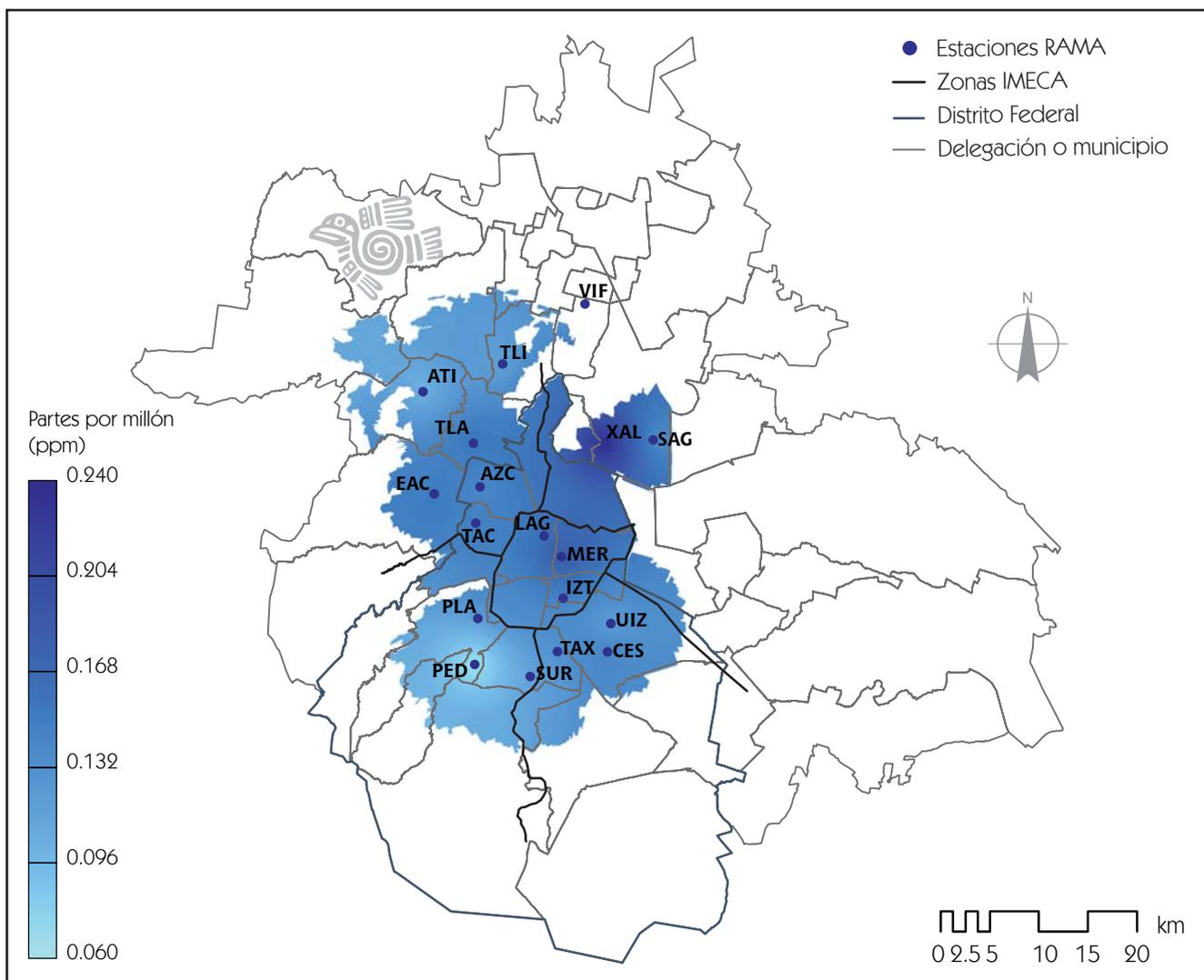


Figura 4.7 Distribución espacial de la concentración promedio anual de óxido de nitrógeno durante 2009 en el área de cobertura.

la distribución de las fuentes se asocia con la distribución de las vialidades de la zona urbana. Por lo anterior, en el norte y centro de la ciudad regularmente se registran las mayores concentraciones del contaminante (Figura 4.9) y durante 2009 las estaciones Xalostoc (XAL) y La Presa (LPR), ambas en el Estado de México, reportaron las concentraciones más altas.

## Ozono

El ozono existe de manera natural en el aire ambiente y su concentración aumenta a medida que se incrementa la altitud, y aunque bajo algunas condiciones meteorológicas se podría presentar la intrusión de ozono estratosférico en la tropósfera, el ozono es un contaminante secundario y no tiene

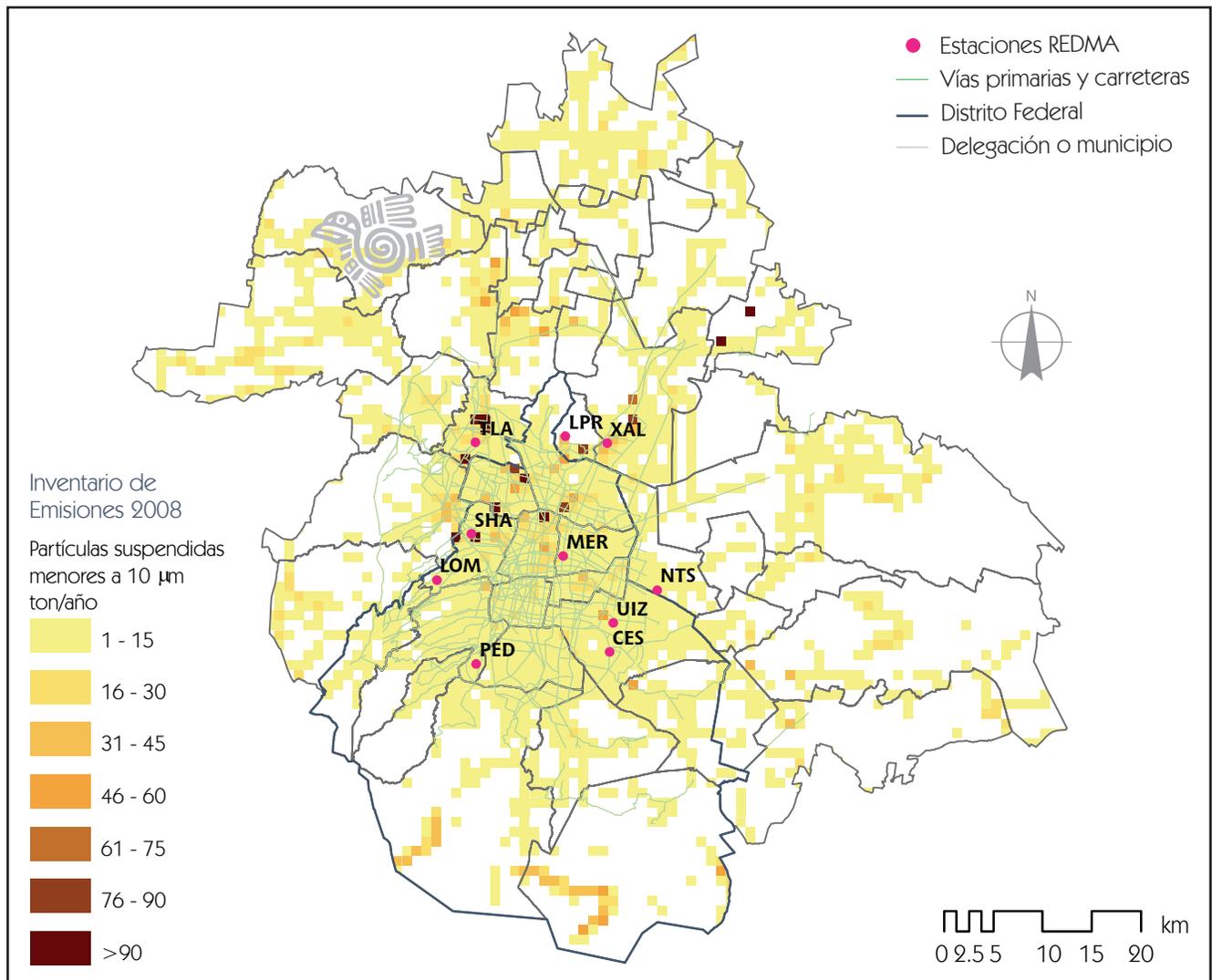


Figura 4.8 Inventario de emisiones de partículas menores a 10  $\mu\text{m}$  en la Ciudad de México y su área metropolitana. Cada celda representa la estimación anual de emisiones de las fuentes ubicadas en un área de 2 km<sup>2</sup>.

fuentes significativas de emisión directa, por lo que la mayor parte proviene de las reacciones fotoquímicas entre los hidrocarburos y los óxidos de nitrógeno. La distribución espacial del contaminante se muestra en la Figura 4.10, en ella se puede observar que las mayores concentraciones se presentan en las estaciones de monitoreo localizadas en el suroeste de la ciudad.

### Distribución temporal

Los cambios en los patrones del clima de la cuenca a lo largo del año tienen un impacto en la dispersión de los contaminantes y en consecuencia en la calidad del aire de la ciudad. El comportamiento estacional de la contaminación del aire está vinculado a la presencia o ausencia de lluvias, ya que la

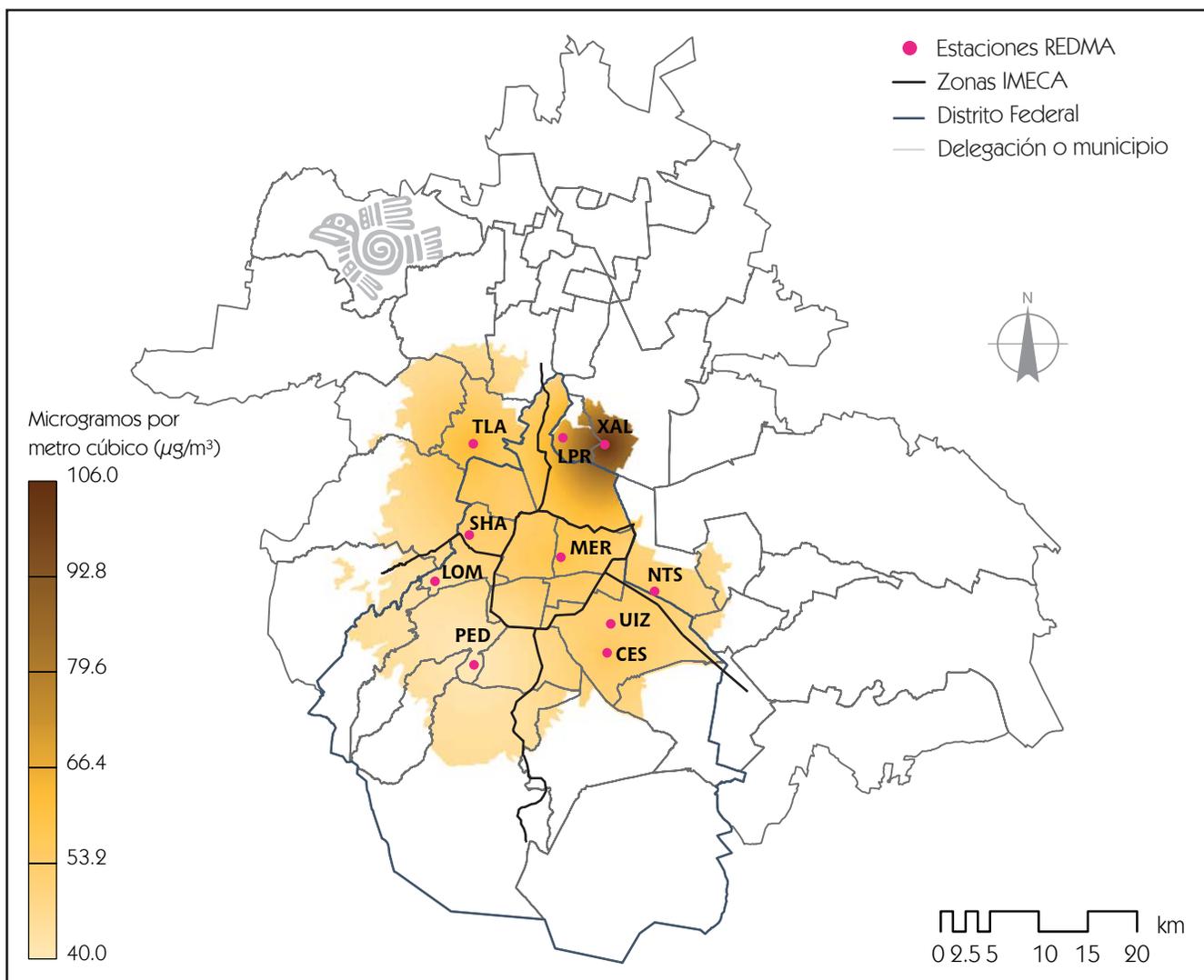


Figura 4.9 Distribución espacial de la concentración promedio anual de partículas menores a  $10 \mu\text{m}$  durante 2009 en el área de cobertura.

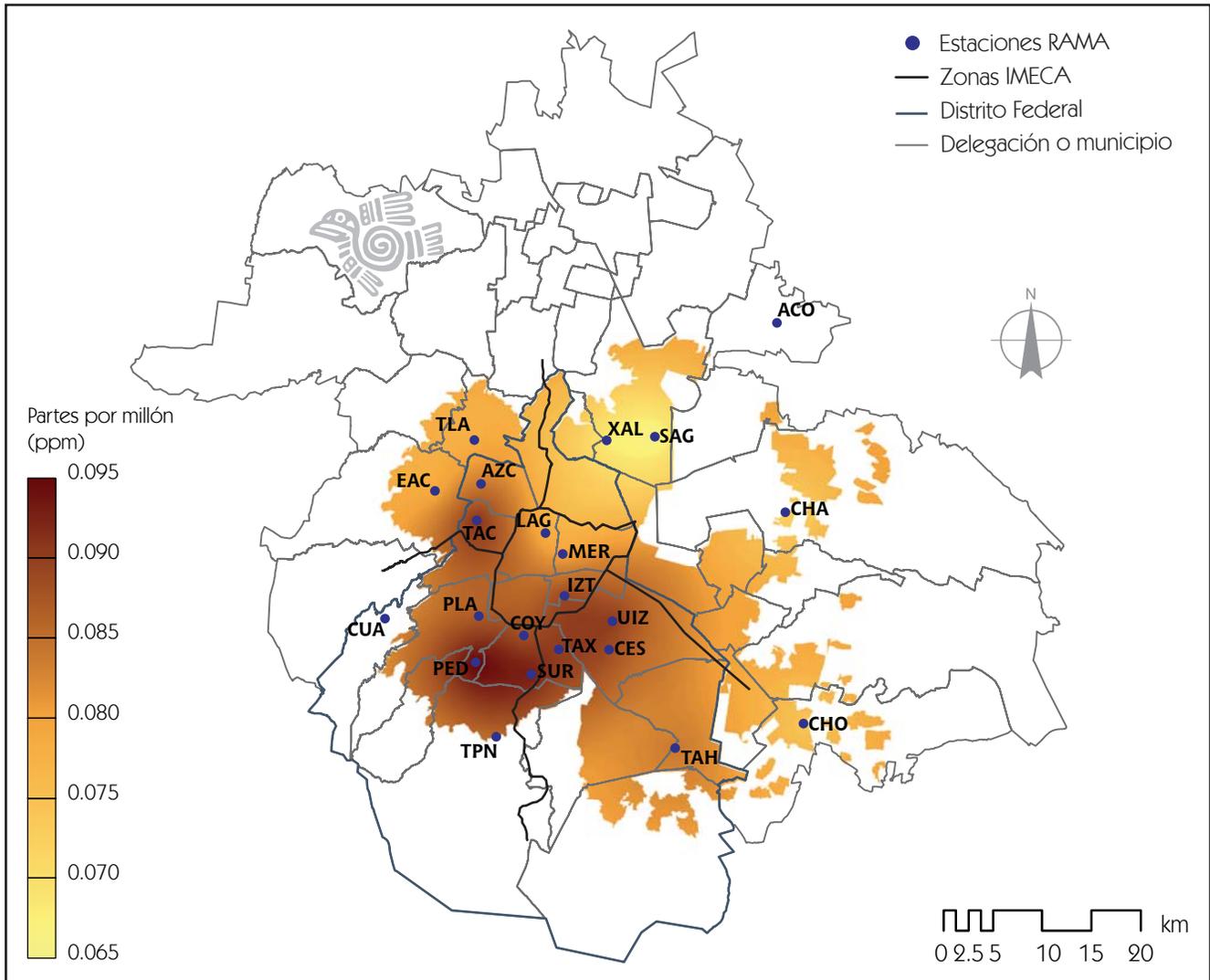


Figura 4.10 Distribución espacial de la concentración promedio anual de ozono durante 2009 en el área de cobertura.

precipitación remueve una cantidad significativa de contaminantes mediante procesos de depósito húmedo, disminuyendo su concentración en el aire.

De acuerdo con el Servicio Meteorológico Nacional, 2009 fue un año caracterizado por un retraso en la temporada de lluvias, una disminución en la precipitación pluvial y un incremento en la temperatura.

Asimismo, la continuación de grandes obras viales durante el primer semestre de 2009 fue otro factor que influyó en el comportamiento temporal de la contaminación del aire. Al concluir algunas obras, la mitigación de las emisiones de polvos originadas por las actividades propias de las obras, los problemas de movilidad asociados al cierre o reparación de las vialidades primarias, las mejoras en la movilidad y los incrementos en la velocidad, contri-

buyeron de manera directa en la reducción de los niveles de contaminación. Sin embargo, durante el primer trimestre de 2009 algunas obras aún se encontraban en ejecución o en la fase de conclusión, por lo que no se descarta una asociación entre el incremento, durante dicho período, de las concentraciones de los contaminantes primarios y las obras entonces en progreso.

Dióxido de azufre

En la Figura 4.11 se puede observar el comportamiento de la concentración promedio mensual del contaminante. Los meses de enero y febrero repor-

taron los valores promedio máximos del año con valores de 0.009 y 0.010 ppm, respectivamente. Los meses de mayo y septiembre, reportaron la menor concentración promedio con valores de 0.004 y 0.003 ppm, respectivamente. Durante el resto del año no se observa una diferencia significativa en las concentraciones mensuales del contaminante.

En comparación con 2008, las mayores diferencias en la concentración del contaminante se observaron en los meses de febrero y diciembre. En febrero de 2009 la concentración de dióxido de azufre fue 0.010 ppm, que representa un incremento de 0.003 ppm con respecto al mismo mes en 2008

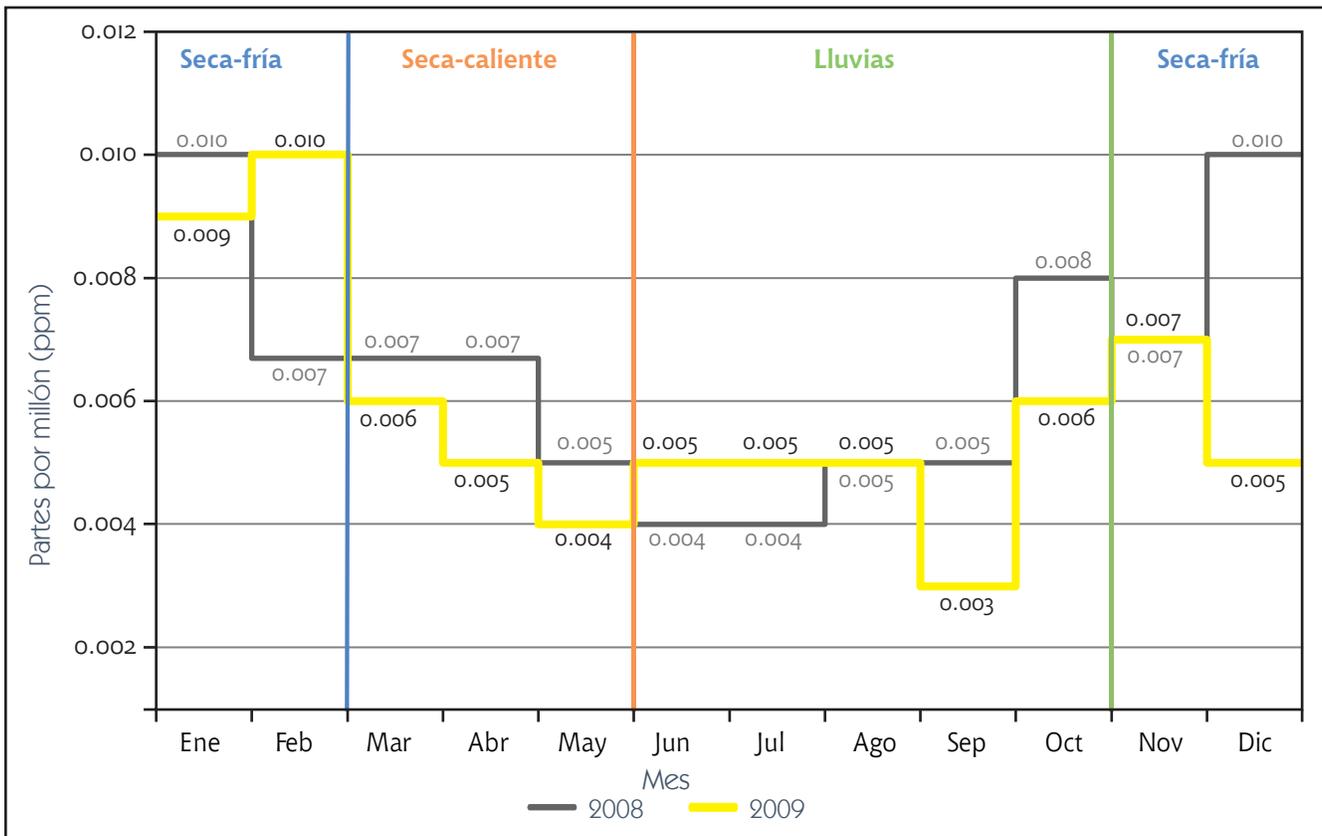


Figura 4.11 Concentración promedio mensual de dióxido de azufre para los años 2008 y 2009.

cuando fue de 0.007 ppm, mientras que diciembre de 2009 registró una disminución del 50% con respecto al promedio reportado en 2008 que fue de 0.010 ppm.

En cuanto al comportamiento del promedio diario las concentraciones máximas del contaminante se observaron en los meses de enero, febrero, abril y noviembre, mientras que en el resto del año sólo superaron ocasionalmente las 0.015 ppm (Figura 4.12). La componente estacional muestra que en la época seca-fría se presentan las concentraciones más altas, ya que son frecuentes las concentraciones superiores a 0.200 ppm en algunas horas.

## Monóxido de carbono

La concentración de monóxido de carbono depende fundamentalmente de las emisiones vehiculares y las condiciones de dispersión de los contaminantes. La formación de inversiones térmicas y/o la ausencia de vientos durante las horas con mayor tránsito vehicular favorecen el incremento en la acumulación del contaminante, por lo anterior, los meses de enero y febrero registran mayores concentraciones que el resto del año. Durante los meses que corresponden a la temporada de lluvias, la atmósfera es inestable y favorece la dispersión provocando una disminución importante en las concentraciones de

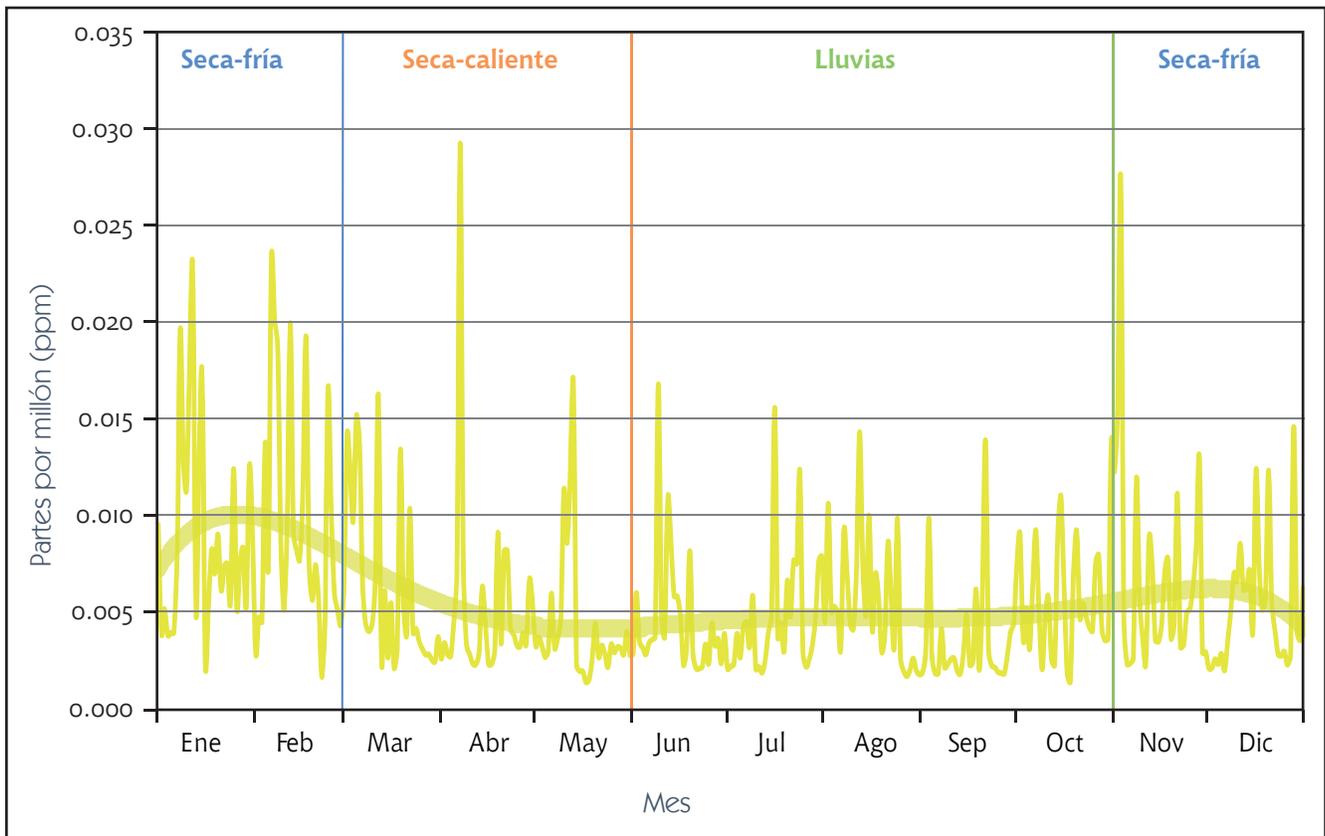


Figura 4.12 Serie de tiempo de la concentración promedio diaria de dióxido de azufre en la Ciudad de México. En la gráfica se indica el componente estacional con una línea suavizada obtenida a partir de una función polinomial.

monóxido de carbono en el aire ambiente, además de remover gran parte de los contaminantes por el efecto de lavado de la lluvia.

En 2009 los meses de enero y diciembre registraron el mayor promedio mensual con 2.06 ppm y 1.87 ppm, respectivamente. El mes de agosto reportó el promedio más bajo con 0.095 ppm. En la Figura 4.13 se presenta el valor promedio para cada mes, donde se observa una disminución consistente en la concentración del contaminante en comparación con los resultados de 2008. La mayor disminución se observó en el mes de diciembre de 2009 con una concentración 21% menor que la registrada en

el mismo mes durante 2008. En la figura 4.14 se observa que las concentraciones máximas diarias se registraron en la época seca-fría.

#### Óxidos de nitrógeno

Al igual que el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno tienen como fuente principal las emisiones vehiculares, por lo que comparten un patrón anual similar (Figura 4.15 y 4.16). Las concentraciones máximas de este contaminante se asocian con las condiciones desfavorables para la dispersión, esto provoca que en los meses de enero y febrero se registren las mayores concentraciones de óxidos

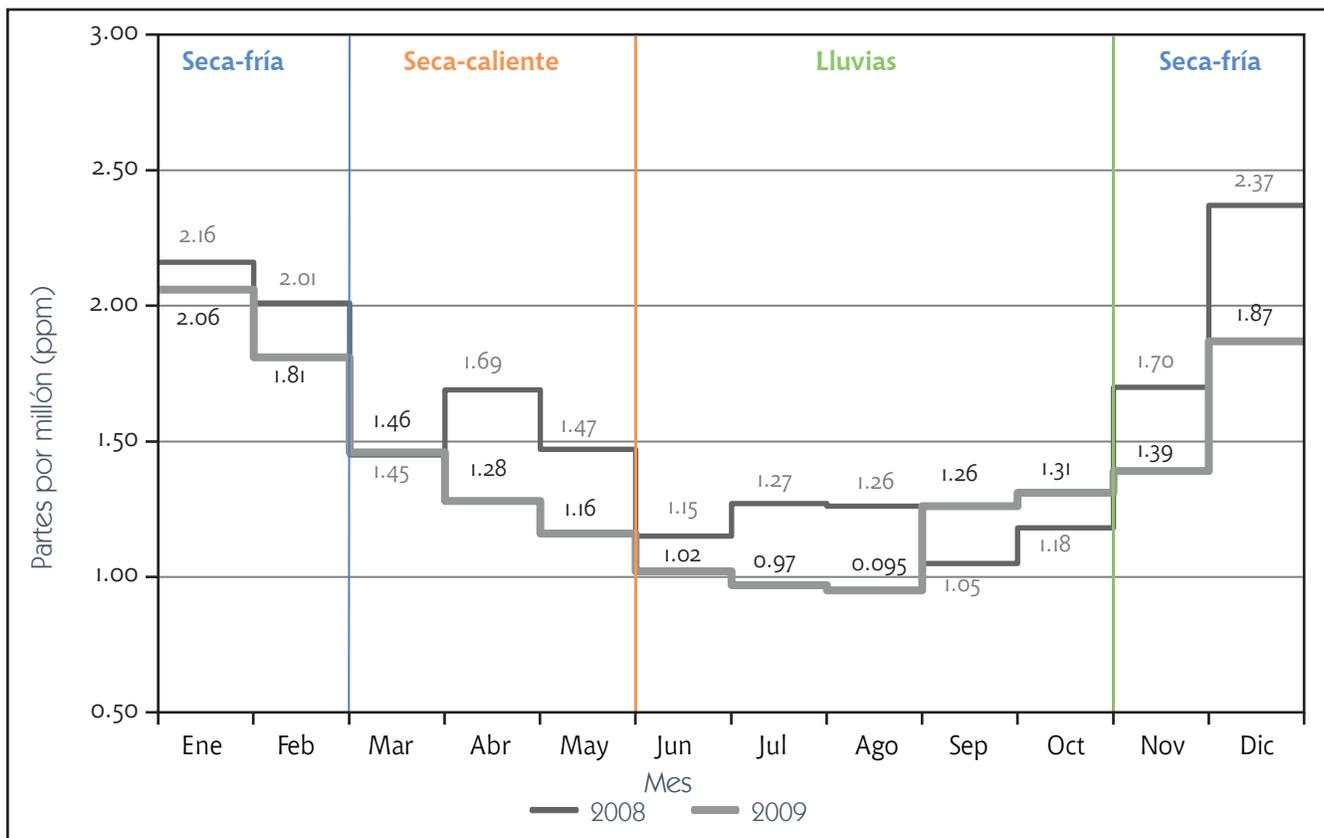


Figura 4.13 Concentración promedio mensual de monóxido de carbono para los años 2008 y 2009.

de nitrógeno. Los óxidos de nitrógeno reaccionan fácilmente con la humedad del aire y son removidos eficientemente por procesos de depósito húmedo. La lluvia y el incremento de humedad en el ambiente, propios de los meses de la temporada de lluvia, contribuyen a que se registren las menores concentraciones del contaminante. La mayor concentración promedio se registró durante el mes de enero con 0.214 ppm, seguida del mes de febrero con 0.191 ppm. El mes de agosto registró el menor promedio con 0.091 ppm. En términos generales las concentraciones promedio en 2009 fueron menores a las reportadas en 2008, el mes de diciembre registró la mayor diferencia con un valor de 0.052

ppm que equivale a una disminución de 22 % con respecto a la concentración de diciembre de 2008.

## Ozono

El ozono generalmente reporta concentraciones máximas entre los meses de marzo a mayo durante la temporada seca-caliente, la cual se ha referido como la temporada de ozono. En 2009 el mes de febrero resultó atípico en el comportamiento del ozono, pues durante este mes la región central de la República Mexicana estuvo bajo la influencia de un sistema de alta presión durante tres semanas continuas, provocando la presencia de inver-

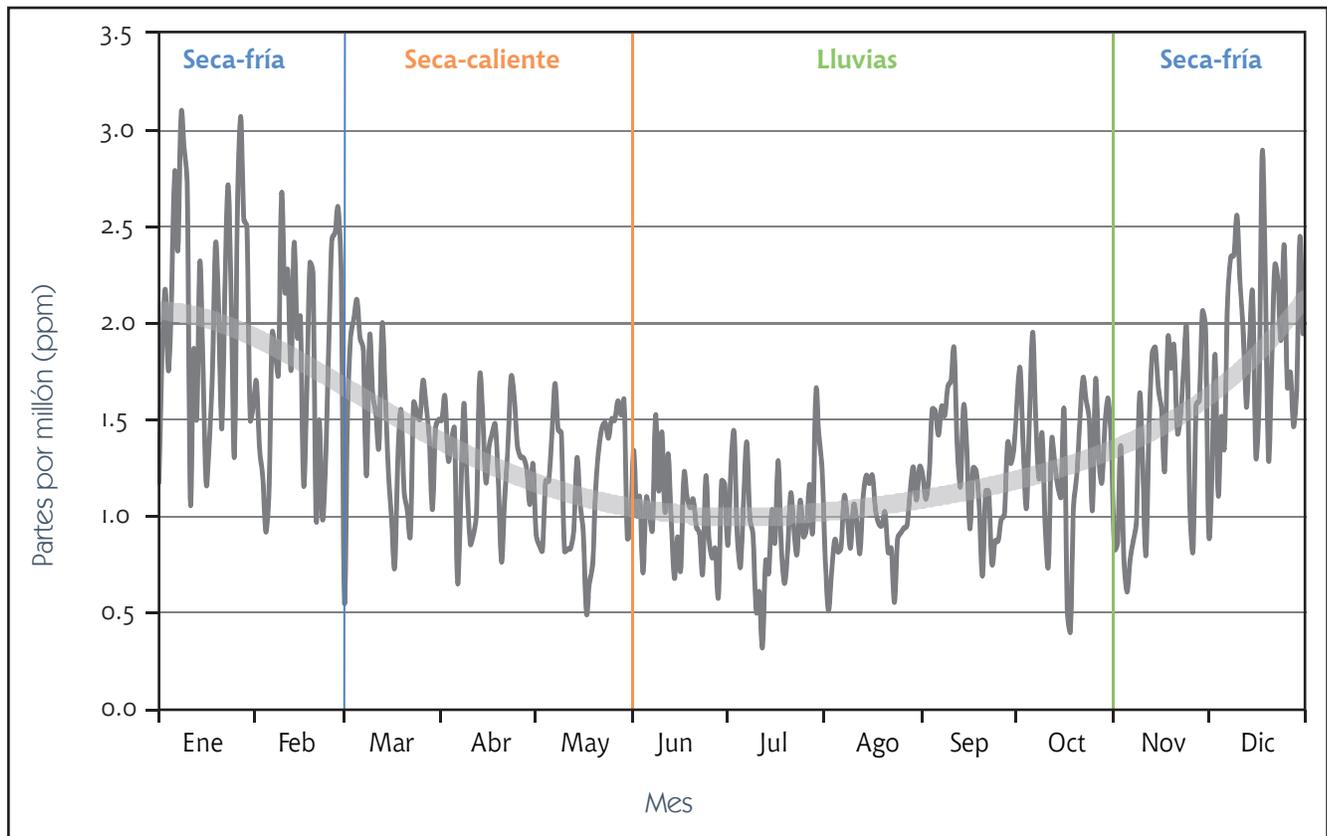


Figura 4.14 Serie de tiempo de la concentración promedio diaria de monóxido de carbono en la Ciudad de México. En la gráfica se indica el componente estacional con una línea suavizada obtenida a partir de una función polinomial.

siones de subsidencia. Este fenómeno propició el estancamiento de las masas de aire durante varios días y una pobre dispersión de los precursores de ozono. La falta de nubosidad asociada al sistema de alta presión permitió una intensa radiación. Esta combinación de factores provocó el peor episodio de contaminación de 2009 por ozono, alcanzando máximos de 0.198 ppm, 0.196 ppm y 0.179 ppm los días 13, 14 y 15 de febrero, respectivamente, y en consecuencia la activación de la Fase de Precontingencia del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA) en el Valle de México, la cual se mantuvo durante tres días consecutivos. El incremento inusual de las concentraciones de

ozono tuvo un impacto en la distribución temporal del contaminante “adelantando” la temporada de ozono con respecto al año 2008 (Figura 4.17).

El retraso en la temporada de lluvias influyó también en el comportamiento temporal del ozono en los meses de junio a octubre. Como ya se ha mencionado, la lluvia tiene un efecto de “lavado” en la atmósfera removiendo una cantidad significativa de contaminantes a través de mecanismos de depósito húmedo o por la dispersión asociada a una atmósfera inestable, provocando la disminución de precursores y del ozono en el aire ambiente. Esto se puede ver en las Figuras 4.17 y 4.18, en donde

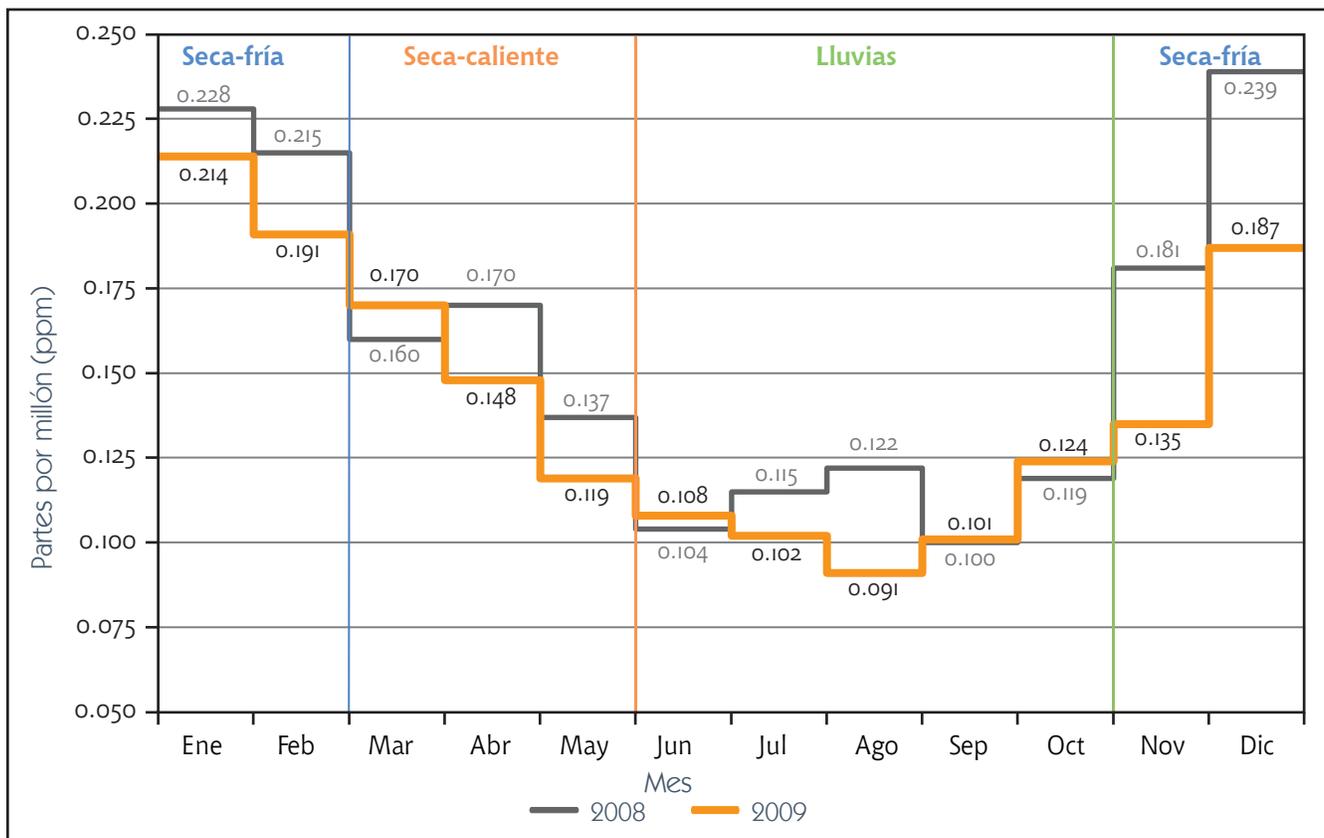


Figura 4.15 Concentración promedio mensual de óxido de nitrógeno para los años 2008 y 2009.

se observa que la falta de lluvia provocó un incremento de las concentraciones mensuales del ozono durante los meses de junio a octubre (Figura 4.17) con respecto a 2008, y una débil componente estacional del contaminante (Figura 4.18).

Partículas menores a 10 y 2.5 micrómetros

Las bajas temperaturas durante las primeras horas de la mañana y la presencia de inversiones térmicas de superficie o de subsidencia junto con la cantidad de emisiones, son los principales factores que determinan la concentración de las partículas sus-

pendidas a lo largo del año. Durante el invierno son frecuentes las inversiones térmicas de superficie, esto favorece el estancamiento de una capa de aire frío que se encuentra directamente sobre el suelo y que puede tener un espesor de 100 a 500 metros. El aire que se encuentra dentro de esta capa es más denso y pesado que el aire que se encuentra sobre ella, impidiendo el movimiento vertical del mismo y por lo tanto la dispersión de los contaminantes. Los gases y partículas emitidos por los vehículos y la industria se acumulan gradualmente dentro de esta capa de aire frío, incrementando progresivamente las concentraciones de los contaminantes mientras

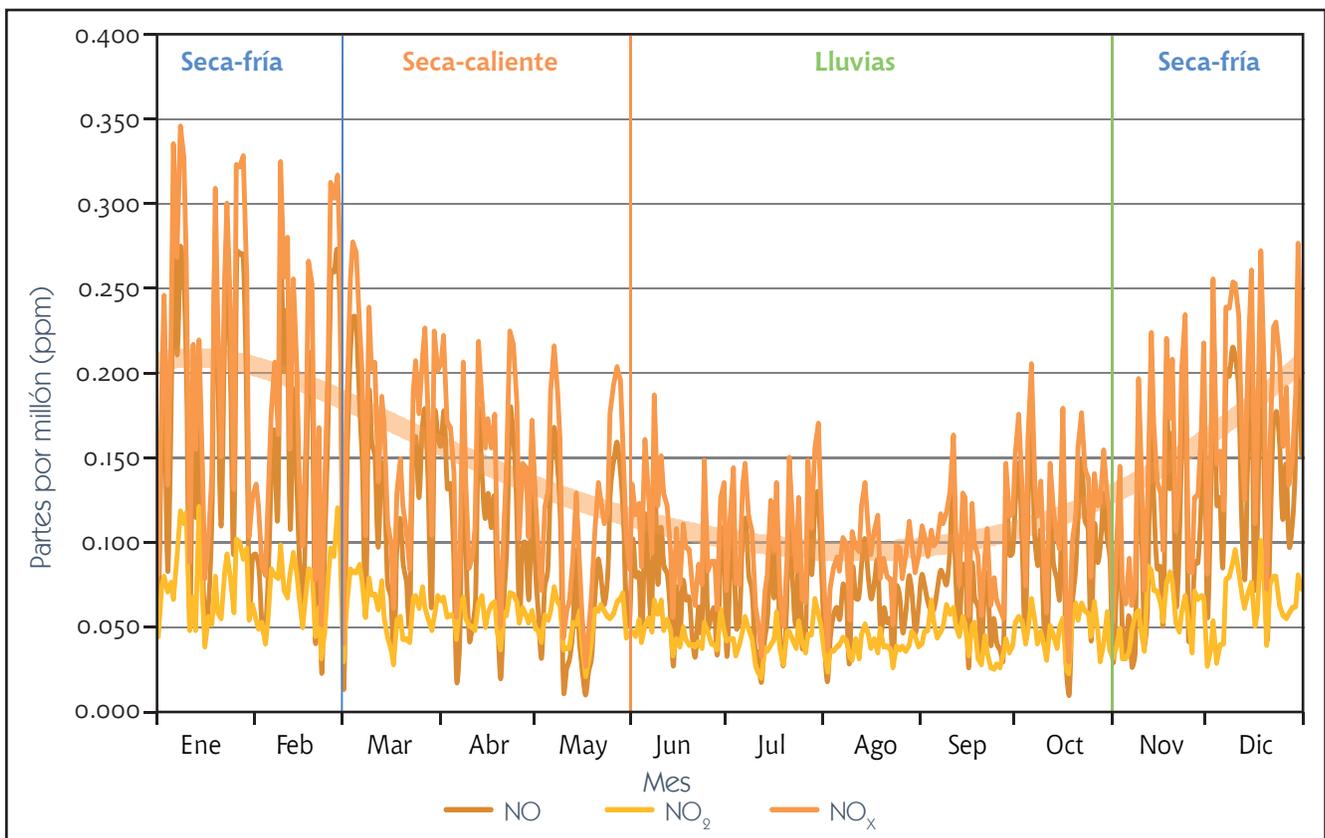


Figura 4.16 Serie de tiempo de la concentración promedio diaria de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) y monóxido de nitrógeno ( $\text{NO}$ ) en la Ciudad de México. En la gráfica se indica el componente estacional de los óxidos de nitrógeno con una línea suavizada obtenida a partir de una función polinomial.

dura la inversión. Es por esto que durante los meses más fríos se registran concentraciones más altas en comparación con el resto del año.

Las  $PM_{2.5}$  representan un porcentaje importante de la concentración de  $PM_{10}$ . Las  $PM_{2.5}$  primarias son emitidas principalmente por los vehículos a *diesel* y las secundarias se forman en la atmósfera de la reacción entre los gases como el dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, pero también de reacciones químicas que involucran a los compuestos orgánicos volátiles y radicales, dando origen a lo que se conoce como aerosoles orgánicos secundarios. Los aerosoles orgánicos secundarios son partículas con

diámetros menores a  $1 \mu m$  y se producen generalmente por reacciones fotoquímicas en la atmósfera. Es por esta razón que en los días en que el ozono registra altas concentraciones es frecuente observar también una disminución en la visibilidad asociada al incremento de las partículas secundarias.

La influencia del clima se puede observar en el comportamiento de la concentración de las partículas menores a  $10 \mu m$  (Figura 4.19) y de las partículas menores a  $2.5 \mu m$  (Figura 4.20). En ambos casos los máximos de las concentraciones se registraron en los meses correspondientes a la temporada fría y los mínimos durante la temporada de lluvias. Para

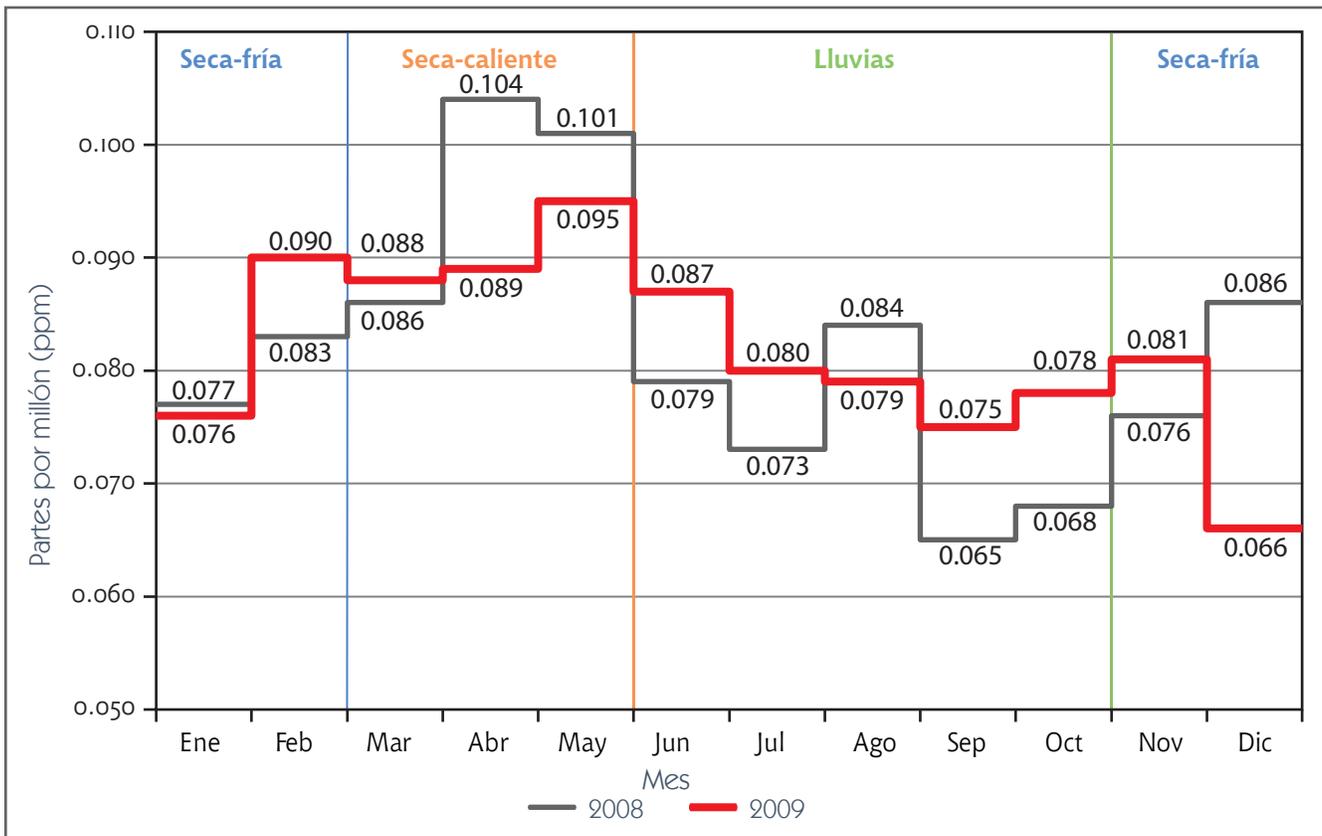


Figura 4.17 Concentración promedio mensual de ozono para los años 2008 y 2009.

$PM_{10}$ , los meses de enero y febrero reportaron las concentraciones máximas con 70 y 71  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente; septiembre reportó el promedio más bajo con 29  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . En el caso de  $PM_{2.5}$  también los meses de enero y febrero reportaron las concentraciones máximas con 34 y 31  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente; durante los meses de agosto y septiembre se reportó el promedio mensual más bajo con 17  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

El índice de la calidad del aire

Cuando hablamos de la calidad del aire nos referimos a qué tan saludable o segura es la atmósfera para el ser humano, basándonos en los resultados

de la medición de la concentración de los contaminantes criterio. Para comunicar el estado de la calidad del aire a la población, suelen emplearse índices o indicadores que permiten interpretar de manera sencilla e inmediata los riesgos para la salud. En la Ciudad de México se usa el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA). Cuando éste supera los 100 puntos se dice que la calidad del aire es MALA e indica que los niveles de algún contaminante exceden los límites de la NOM y representan un riesgo para la salud de niños, adultos mayores y personas con enfermedades respiratorias o cardiovasculares. Cuando el IMECA se encuentra por debajo de los 100 puntos se dice que la calidad del

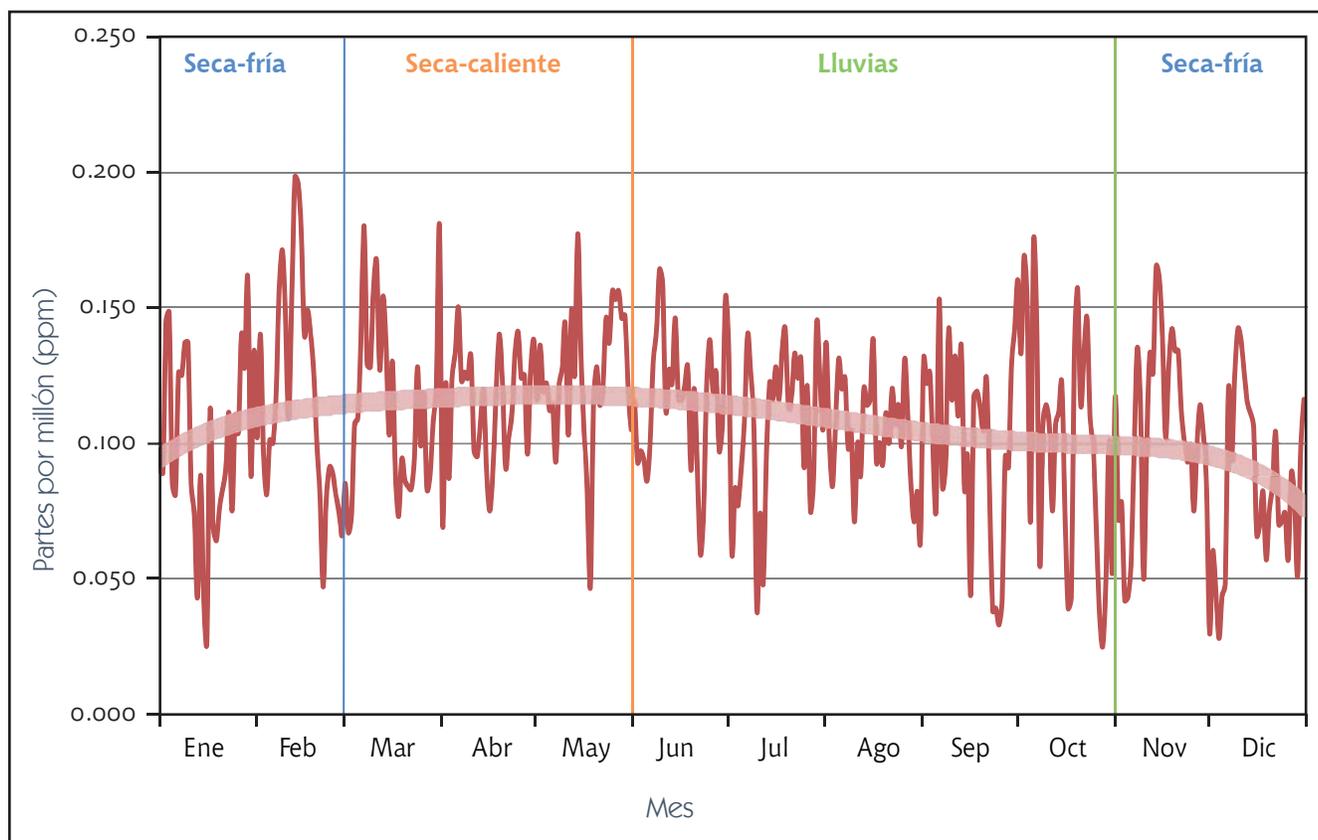


Figura 4.18 Serie de tiempo de la concentración máxima diaria de ozono en la Ciudad de México. En la gráfica se indica el componente estacional con una línea suavizada a partir de una función polinomial.

aire es REGULAR y cuando es menor a 50 puntos la calidad del aire es BUENA. La condición REGULAR es preventiva y tiene el propósito de informar a personas que son excepcionalmente sensibles a la contaminación, ya que para algunos contaminantes no se conoce el umbral de riesgo y algunos individuos pudieran presentar molestias aun a concentraciones por debajo de lo propuesto por la NOM.

En la Ciudad de México el ozono y las partículas suspendidas son los contaminantes criterio respon-

El IMECA es la herramienta de difusión con la que se comunican los riesgos a la salud provocados por la contaminación atmosférica en la Ciudad de México.

sables del deterioro de la calidad del aire durante la mayor parte del año. En el caso del ozono, durante 2009 se registraron 180 días con un índice superior a 100 puntos, cinco días menos que en 2008 cuando se registraron 185 días. Los meses con la peor calidad del aire fueron abril, mayo y junio, con más del 60% de los días con una calidad del aire MALA o MUY MALA. Los meses más limpios fueron diciembre, enero y agosto, con más del 54% de días con una condición BUENA o REGULAR. La escasez de lluvias en los meses de junio y julio propició que se registraran varios días

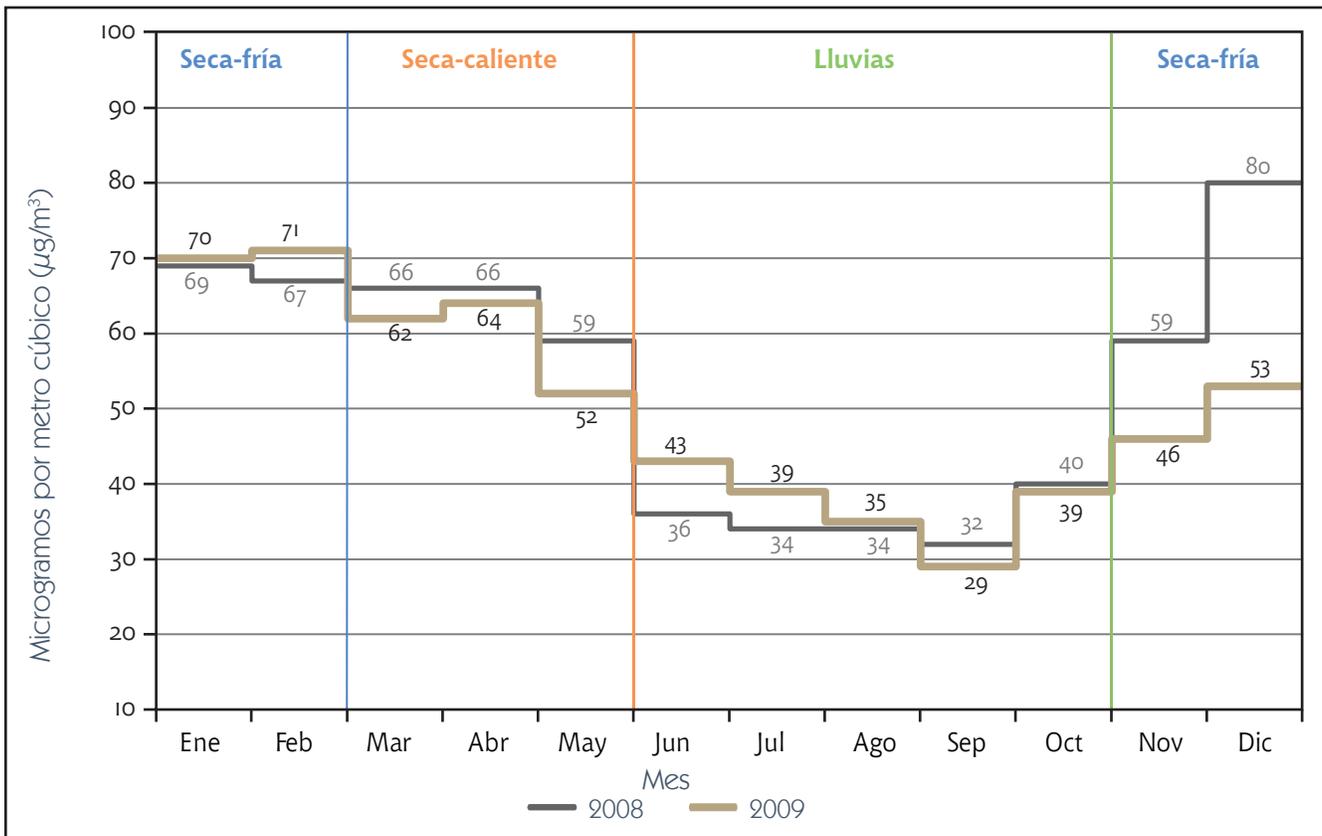


Figura 4.19 Concentración promedio mensual de partículas menores a 10 micrómetros para los años 2008 y 2009.

con una calidad del aire MALA, situación que contrasta con lo observado en años anteriores (Figura 4.21). En 2009 se registraron 10 días con valores mayores a 150 puntos IMECA que corresponde a una calidad del aire MUY MALA, y que representa un riesgo para la salud de la población en general. El valor máximo se registró el 13 de febrero a las 17:00 y fue de 180 puntos IMECA en la estación Pedregal (PED) en el suroeste del Distrito Federal.

En el caso de  $PM_{10}$  se registraron 76 días con un índice mayor a 100 puntos, de los cuales cuatro alcanzaron niveles por encima de 150 puntos (Figura 4.22). Comparativamente, durante 2008 se regis-

traron 75 días. La estación Xalostoc (XAL), localizada en la zona noreste en el municipio de Ecatepec, Estado de México, registró el valor más alto con 164 puntos IMECA el día 3 de noviembre, estos niveles activaron por segunda vez en el año la Fase de Precontingencia del PCAA, la cual se mantuvo hasta el día 5 de noviembre cuando el valor del índice descendió por debajo de los 150 puntos. Los meses de enero, febrero y diciembre reportaron el mayor número de días por encima de los 100 puntos IMECA con 14, 11 y 18 días, respectivamente.

Para  $PM_{2.5}$  se registraron un total de 105 días con valores mayores a 100 puntos, de los cuales 12 alcan-

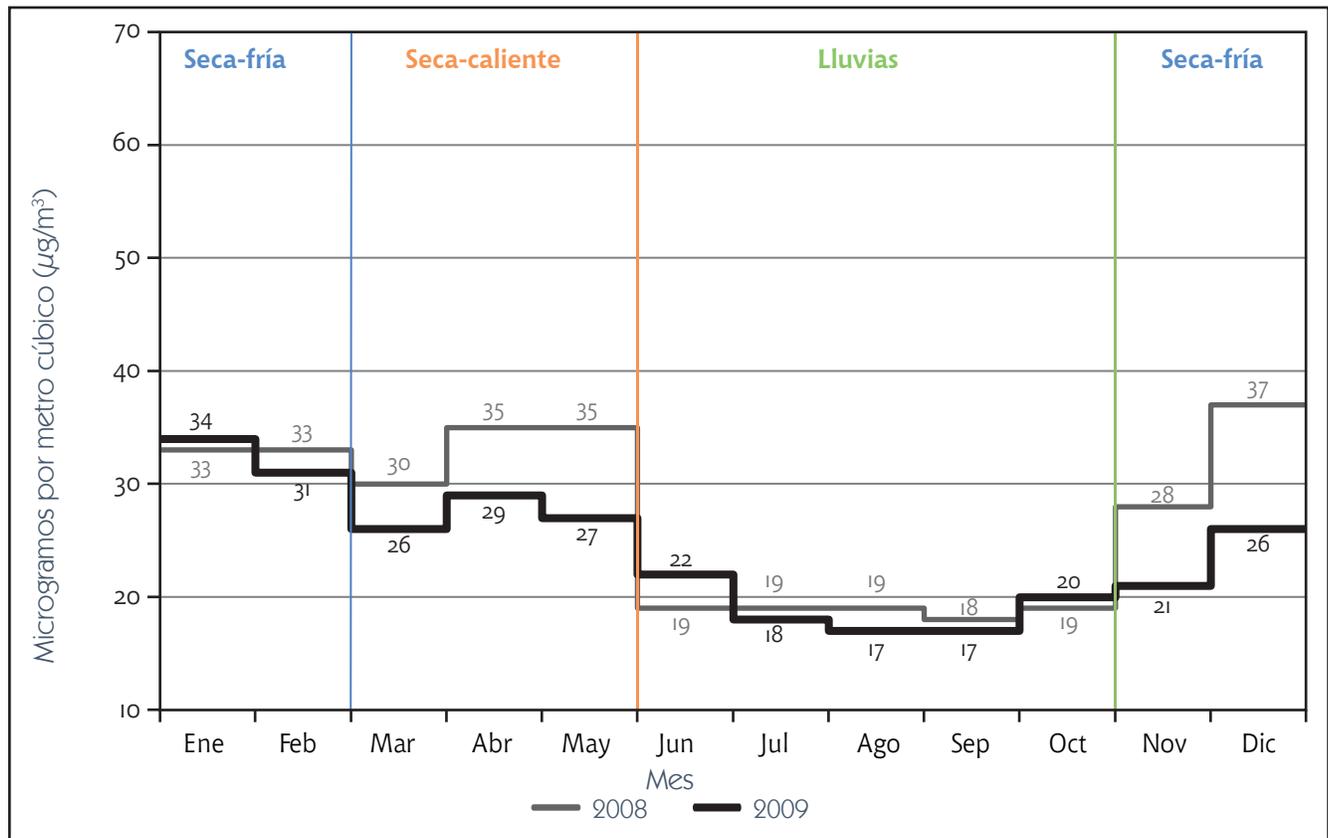
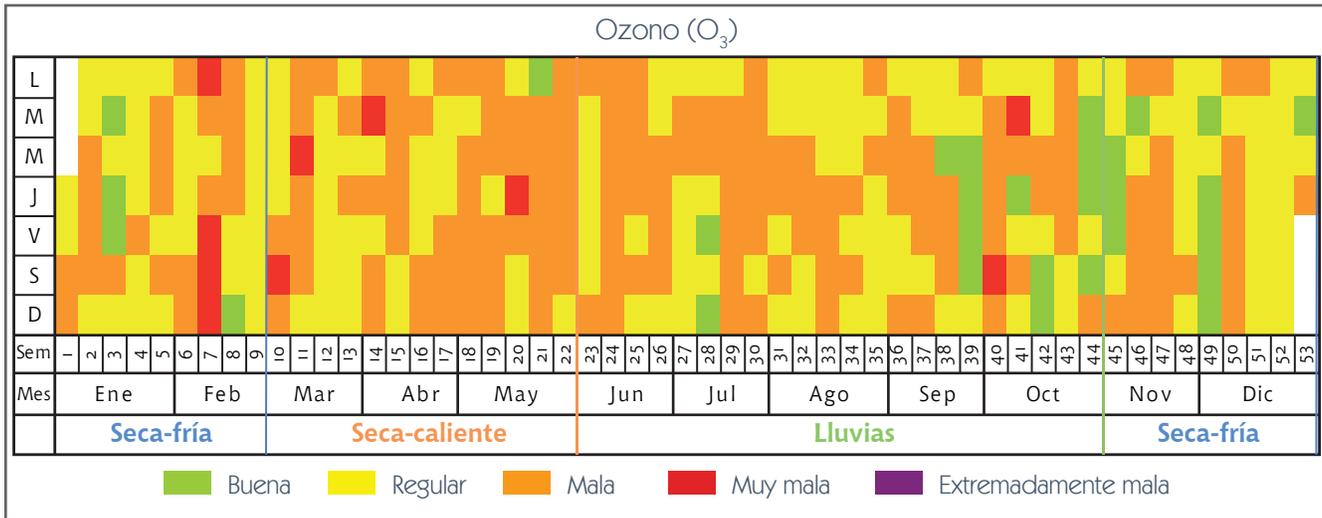


Figura 4.20 Concentración promedio mensual de partículas menores a 2.5 micrómetros para los años 2008 y 2009.



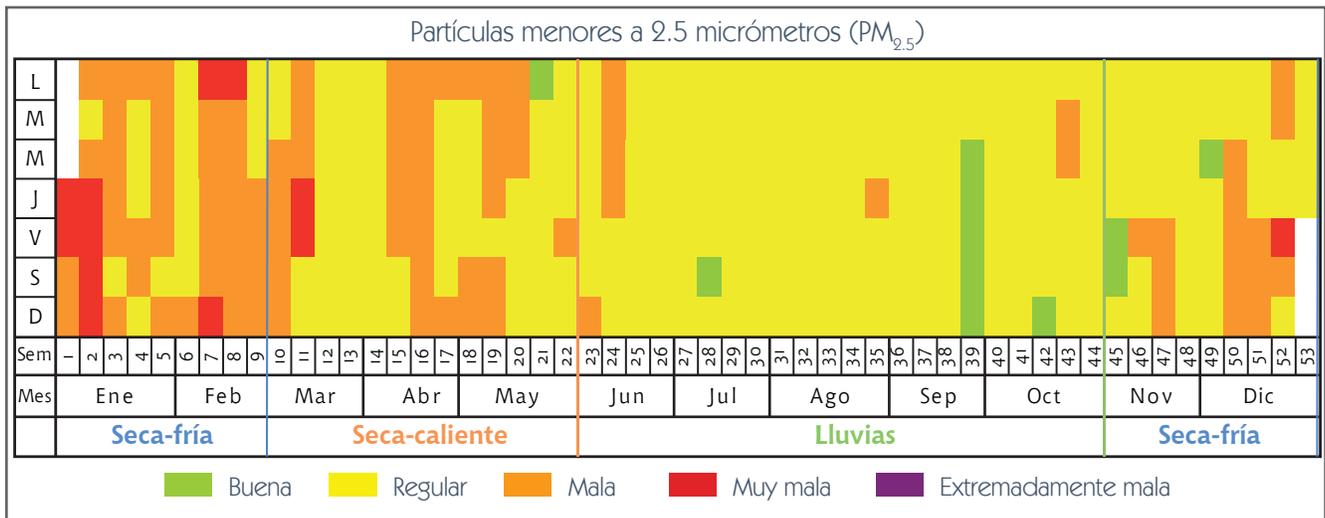


Figura 4.23 Mosaico de la calidad del aire para  $PM_{2.5}$  en la Ciudad de México durante 2009. Cada celda representa el estado de la calidad del aire reportado por día de la semana de acuerdo con las categorías del IMECA.

La contaminación del aire por día de la semana

Con respecto al comportamiento de la contaminación del aire por día de la semana (Figura 4.24), se observa que el dióxido de azufre presentó el promedio más alto el martes con 6.5 ppb, seguido del jueves con 6.4 ppb y el sábado presentó el promedio más bajo con 5.1 ppb. En el caso del monóxido de carbono, el viernes se mantuvo como el día con mayores concentraciones del contaminante con 1.51 ppm y el mínimo se registró en domingo con 1.10 ppm. Para los óxidos de nitrógeno, el día jueves se reportó la mayor concentración con un promedio de 157 ppb, mientras del domingo reportó la menor concentración con 88 ppb.

En los días sábado y domingo se reportó la concentración máxima de ozono con promedios de 83.6

y 86.1 ppb, respectivamente, mientras que el lunes es el día en el que el promedio de los máximos de ozono registró su valor más bajo con 78.8 ppb.

Durante 2009 el análisis por día de la semana indica que las concentraciones más altas de la mayoría de los contaminantes se presentaron en los días jueves, viernes y sábado.

En el caso de las partículas suspendidas, el jueves fue el día más sucio con promedios máximos de  $53.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $PM_{10}$  y  $25.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $PM_{2.5}$ , y el domingo fue el día con

la menor concentración promedio de la semana con 42.6 y 22.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , respectivamente.

En cuanto al número de excedencias a la NOM por día de la semana, las concentraciones de ozono excedieron la NOM con mayor frecuencia los jueves y sábado, con 31 y 29 días, respectivamente. Por su parte, las  $PM_{10}$  tuvieron la mayor frecuencia de excedencias el martes con 9 días y las  $PM_{2.5}$  el jueves con solo dos días (Figura 4.25). De forma

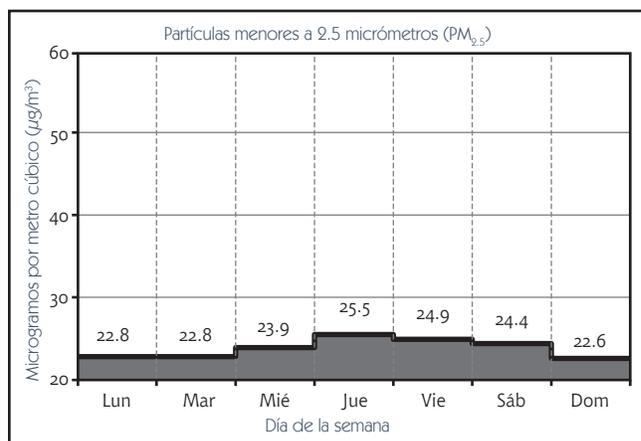
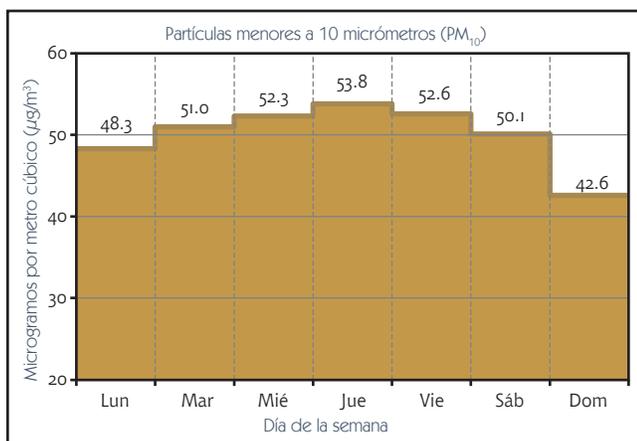
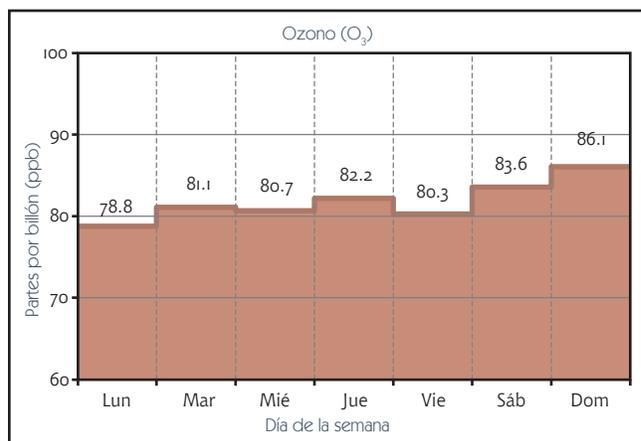
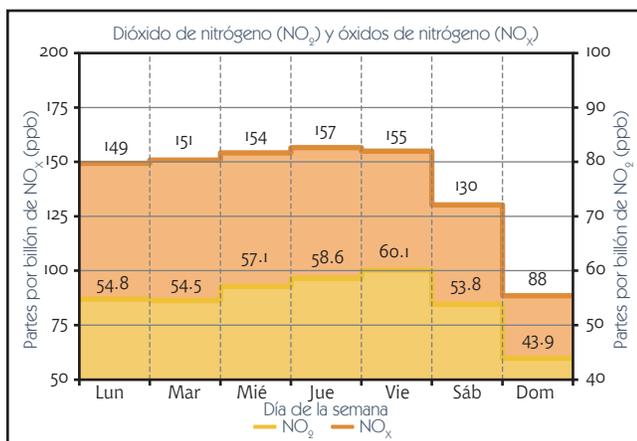
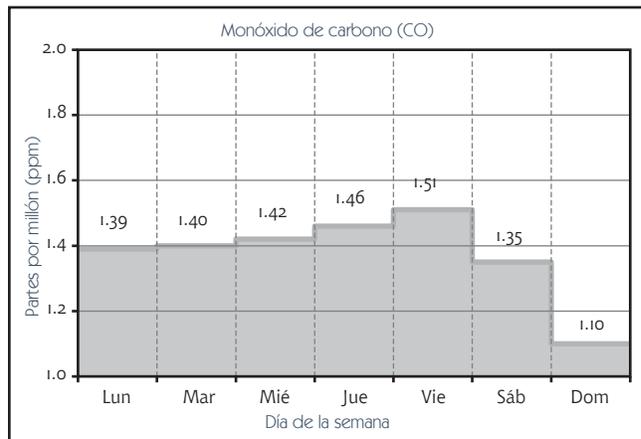
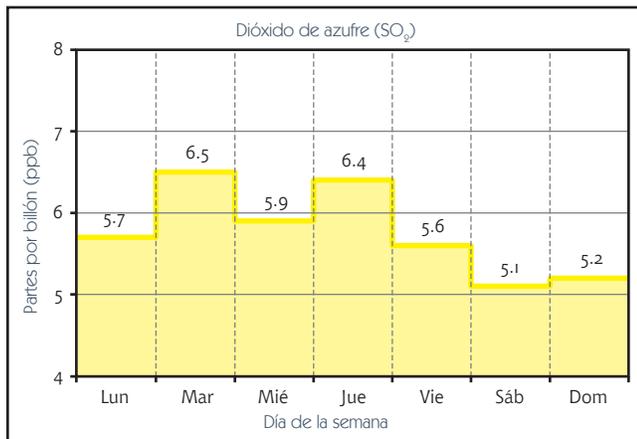


Figura 4.24 Concentración promedio por día de la semana para dióxido de azufre, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, ozono, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, en 2009.

## DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

comparativa, durante 2008 el ozono presentó la mayor frecuencia de excedencias el sábado y el miércoles con 33 y 32 días, respectivamente; mien-

tras que las  $PM_{10}$ , el viernes con 9 días y las  $PM_{2.5}$  el jueves y sábado con 6 días cada uno.

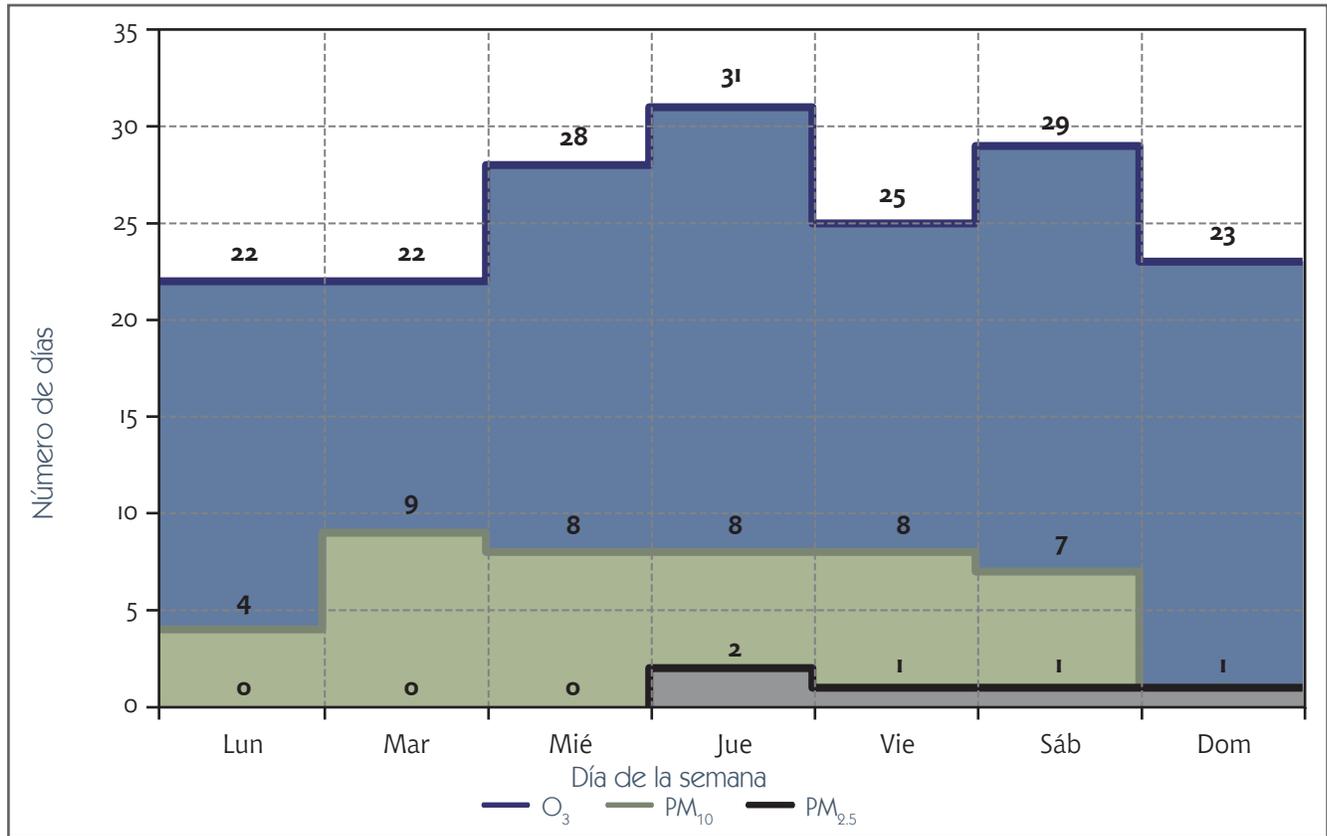


Figura 4.25 Número de excedencias a los límites de la NOM de ozono,  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  por día de la semana durante 2009.





# TENDENCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE

---



La gestión de la calidad del aire tiene por objeto el diseño y la aplicación de estrategias y políticas públicas integrales, las cuales contribuyen a disminuir la concentración de contaminantes en el aire ambiente en el mediano y largo plazo. La aplicación de políticas de gestión erróneas que no tomen en consideración los procesos atmosféricos, el crecimiento de la ciudad, la transformación de la infraestructura urbana y los cambios tecnológicos, puede provocar un incremento en la concentración de los contaminantes o generar un nuevo problema de contaminación.

Actualmente, el principal instrumento para la gestión de la calidad del aire en la Ciudad de México es el Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 2002-2010 (PROAIRE II), el cual propone un conjunto de medidas coordinadas y orientadas a reducir principalmente las concentraciones de ozono y partículas suspendidas. El PROAIRE II representa la continuidad en la gestión integral de la calidad del aire iniciada en 1990, con la publicación del Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México 1990-1994 (PICCA). Este último se distinguió por ser el

primer plan sistemático de mediano plazo que involucró a las autoridades de los tres niveles de gobierno, agencias internacionales y científicos para el diseño de estrategias, la evaluación de resultados e incorporación de nuevas tecnologías para reducir la contaminación atmosférica (Comisión de Derechos Humanos del Distrito Federal, 2008; Comisión Ambiental Metropolitana, 2003; Secretariado Técnico Intergubernamental, 1990).

La eficacia de los programas de gestión de la calidad del aire se puede evaluar indirectamente, conociendo la tendencia y la disminución efectiva de las concentraciones ambientales durante su período de implementación. La evaluación de los programas de gestión de la calidad del aire se realiza con el monitoreo de largo plazo. El comportamiento de la calidad del aire en su contexto histórico permite identificar los resultados de una acción o de un programa, con los que se define una tendencia. La tendencia es el comportamiento general que indica la dirección en que se mueven las concentraciones de un contaminante en un período de tiempo. Una tendencia descendente de un contaminante indica una disminución en su concentración y por lo tanto una mejora en la calidad del aire. En cambio,



Fotografía de la página anterior: Imagen obtenida por la Hazecam el día 30 de diciembre de 2009 a las 9:30. Las inversiones térmicas de superficie son frecuentes durante los meses de diciembre y enero, las cuales son provocadas por la presencia de las montañas y el enfriamiento del suelo durante la noche. La capa cercana al suelo es de aire frío, denso y pesado, atrapado bajo una capa de aire ligeramente más caliente que impide que el aire frío se eleve. La capa de aire frío atrapa toda la contaminación que se genera durante la mañana impidiendo que se disperse, los gases y las partículas contienen compuestos que absorben y dispersan la luz e impiden que veamos a través de ella. Gracias a estos contaminantes es fácil distinguir la altura de la capa, por encima de ella se puede observar un cielo azul con nubes blancas.

una tendencia ascendente indica un incremento en la concentración del contaminante y por lo tanto un deterioro de la calidad del aire. Por otro lado, se dice que no hay tendencia cuando la variabilidad de las concentraciones no permite detectar un cambio en el comportamiento o cuando el cambio en las concentraciones no es significativo.

En este informe se evalúa la tendencia de los contaminantes empleando el *índice de la media anual relativa* que representa la tasa porcentual de cambio del promedio anual móvil con respecto al promedio de 1989, justo antes de la entrada en vigor del primer programa para mejorar la calidad del aire. El índice se evalúa mes a mes para observar la ten-

dencia como una serie de tiempo, donde el punto de partida corresponde a la concentración promedio anual de 1989 y se le asigna un valor de 100%. Cualquier punto de la línea de tendencia mayor al 100% indica un aumento en la concentración del contaminante, mientras que un valor menor representa una disminución.

Monóxido de carbono, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno

El monóxido de carbono y el dióxido de azufre presentaron un incremento en su concentración a principios de la década de los 90. Entre 1992 y 1993 la

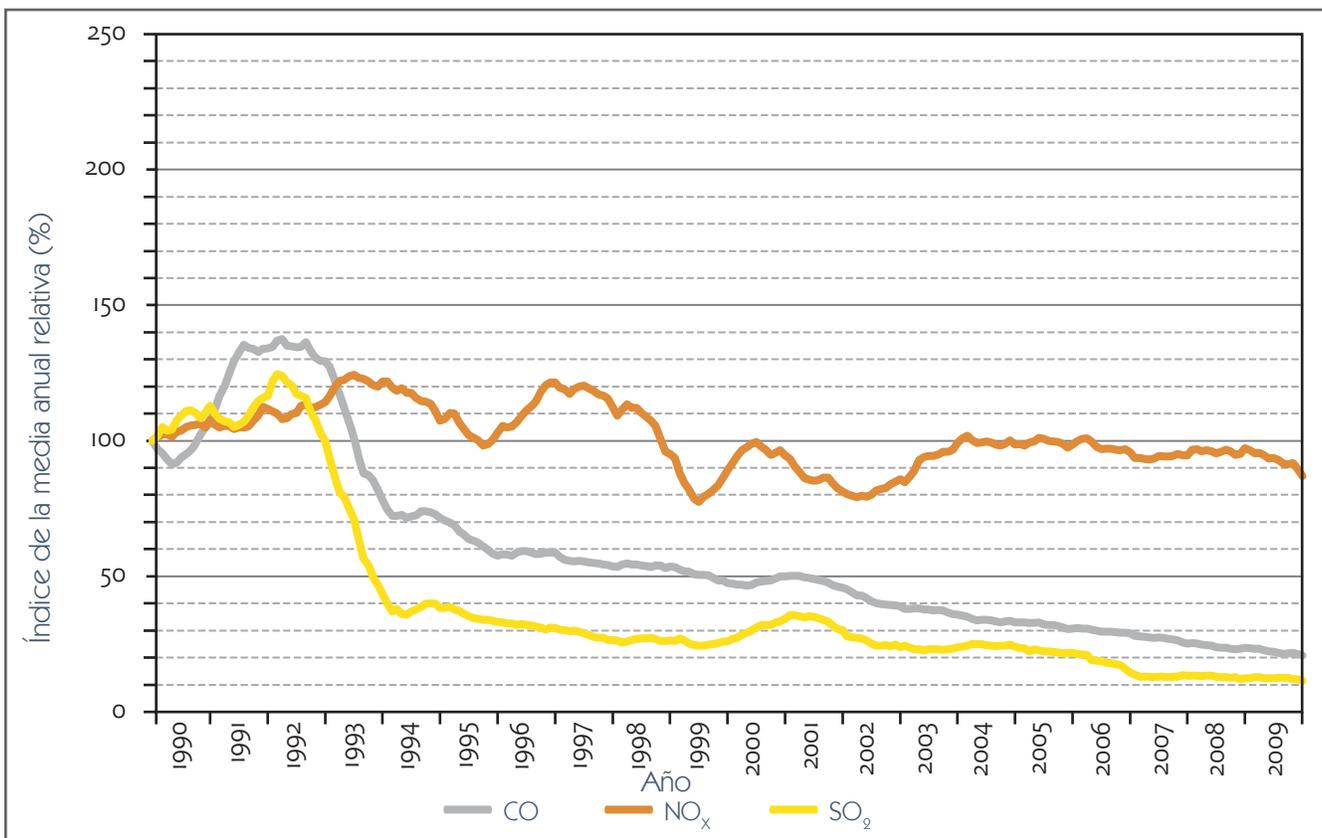


Figura 5.1 Tendencia del monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) en el aire ambiente de la Ciudad de México, 1990-2009.

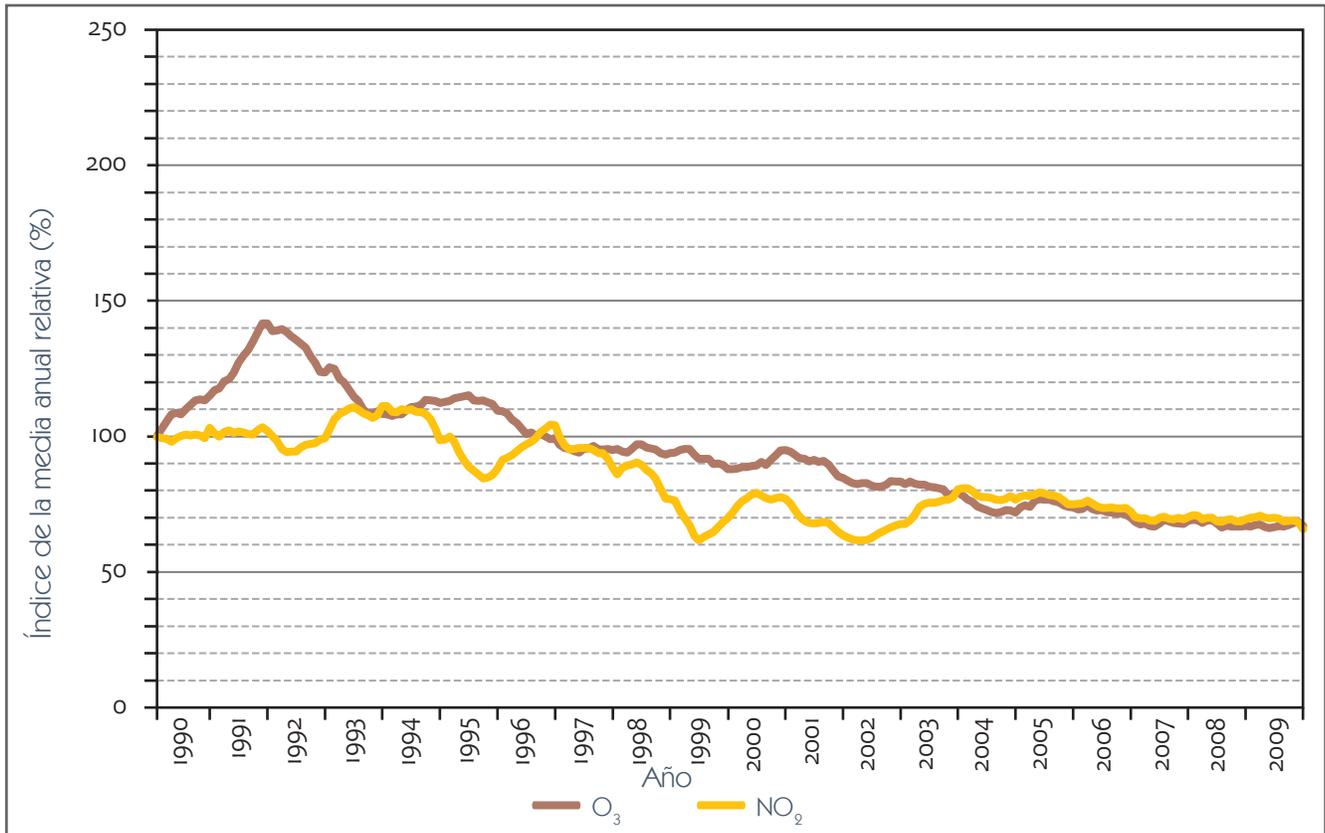


Figura 5.2 Tendencia del ozono (O<sub>3</sub>) y dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en el aire ambiente de la Ciudad de México, 1990-2009.

tendencia se invierte y se observa una disminución importante en ambos contaminantes alcanzando un valor de 44% para dióxido de azufre y 78% para monóxido de carbono. A partir de 1994, la tendencia decreciente se ha registrado de manera paulatina pero continua (Figura 5.1).

En 2009 los valores del índice de dióxido de azufre y monóxido de carbono disminuyeron hasta 11 y 21%, respectivamente. Esto significa una reducción acumulada, desde 1989 a la fecha, de 89% para el dióxido de azufre y de 79% para monóxido de carbono. La disminución entre diciembre de 2008 y diciembre de 2009 fue de 1.0% para

dióxido de azufre y de 2.8% para monóxido de carbono.

En el caso de los óxidos de nitrógeno se observa una variabilidad considerable entre 1990 y 2003. En consecuencia la línea de tendencia muestra un comportamiento fluctuante con ciclos de varios años. No obstante, a partir de 2004 se aprecia un patrón estable con una tendencia definida pero sin cambios importantes. En diciembre de 2009 los óxidos de nitrógeno alcanzaron un índice de 87%, lo que representa una disminución de 13% en comparación con lo obtenido en 1989. La reducción de diciembre de 2008 a diciembre de 2009 fue de 10.3%.

### Ozono y dióxido de nitrógeno

El ozono y el dióxido de nitrógeno conservan un patrón descendente a través de los años, a pesar de la dificultad que implica reducir los contaminantes de origen secundario. La reducción en las concentraciones de ozono ha sido prácticamente continua desde 1992, alcanzando un índice de 66% en 2009. No obstante, entre diciembre de 2008 y diciembre de 2009 se observó un aumento de 0.1%. La línea de tendencia del dióxido de nitrógeno presenta un comportamiento decreciente con fluctuaciones importantes entre 1990 y 2003. En diciembre de 2009 se alcanzó un índice de 66%, lo que equivale a una

disminución del 34% en la concentración promedio de dióxido de nitrógeno con respecto a 1989. El decremento logrado de diciembre de 2008 a diciembre de 2009 fue de 3.8% (Figura 5.2).

### Partículas suspendidas y plomo

Las partículas suspendidas totales registraron un incremento importante en 1991, esta situación se revierte en los años siguientes hasta alcanzar una tasa de cambio de 77% en 1993, lo que indica una reducción de 23% con respecto a 1989. A partir de 1994 las partículas suspendidas totales presentan un

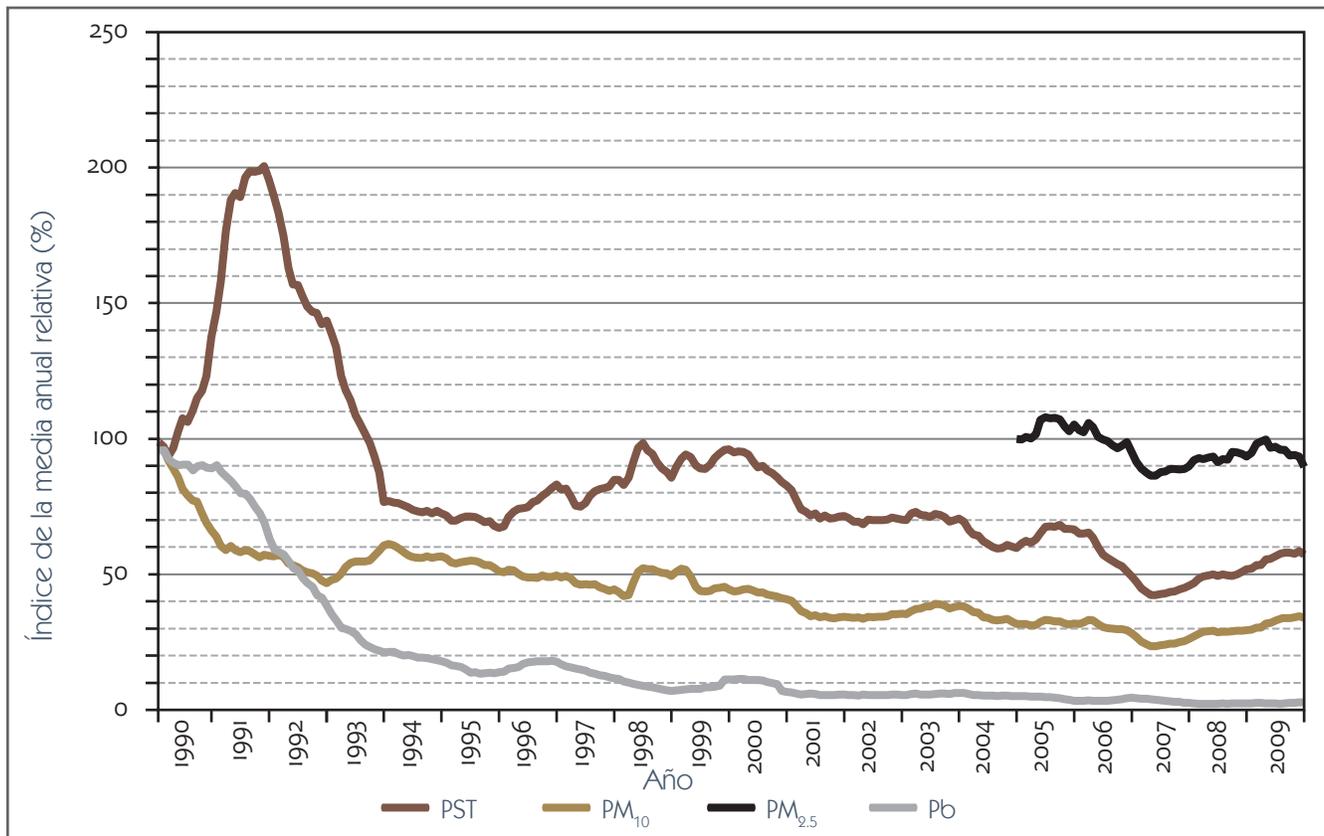


Figura 5.3 Tendencia de las partículas suspendidas totales (PST), partículas menores a 10 micrómetros (PM<sub>10</sub>), partículas menores a 2.5 micrómetros (PM<sub>2.5</sub>) y plomo (Pb) en el aire ambiente de la Ciudad de México, 1990-2009.

comportamiento fluctuante con tendencia decreciente. Los valores mínimos de la línea de tendencia se alcanzaron en 2007 con 42%, desde entonces han aumentado hasta llegar a 57% en diciembre de 2009. En el último año, la concentración de partículas suspendidas totales se incrementó 5.4% con respecto al año anterior (Figura 5.3).

Las partículas menores a 10 micrómetros registran una disminución progresiva hasta alcanzar la tasa de cambio mínima de 23% en 2007 y a partir de entonces se incrementan gradualmente hasta obtener un índice de 34% en diciembre de 2009. Entre diciembre de 2008 y diciembre de 2009 se presentó un aumento promedio de 4.6%.

En el caso de las partículas menores a 2.5 micrómetros la tendencia se analiza con respecto al promedio anual de 2004, ya que debido al corto período de evaluación no es posible identificar una tendencia clara. Es importante mencionar que las partículas menores a 2.5 micrómetros presentaron un incremento en las concentraciones a partir de 2007, que tan solo de diciembre de 2008 a diciembre de 2009 fue de 3.7%.



Fotografía: Mónica Jaimes Palomera

El plomo ha disminuido en forma continua desde 1990. En diciembre de 2009, las concentraciones en el aire ambiente obtuvieron un índice de 2.9%, que significó una disminución de 97% con relación a 1989. No obstante, entre diciembre de 2008 y diciembre de 2009, la concentración de plomo presentó un incremento de 0.5% (Figura 5.3).

### La gestión de la calidad del aire en la Ciudad de México

El modelo de planeación ambiental en el Distrito Federal se fundamenta en la implementación de programas sectoriales y específicos de gestión ambiental, que buscan compatibilizar el desarrollo económico y la protección de los recursos naturales. En este contexto, la Agenda Ambiental de la Ciudad de México 2007-2012, es el marco de planeación vigente donde se integran las políticas públicas de materia ambiental que derivan de las estrategias propuestas en el Programa General de Desarrollo del Distrito Federal 2007-2012.

La Agenda Ambiental reúne los compromisos del Plan Verde de la Ciudad de México, instrumento multisectorial de largo alcance que conduce al desarrollo sustentable. Dentro de estos compromisos se encuentra la mejora de la calidad del aire, para lo cual se establecen estrategias transversales y acciones integrales con el propósito de revertir su deterioro, tomando en consideración la relación existente entre la emisión y la concentración de contaminantes en el aire ambiente.

La gestión de la calidad del aire en la Ciudad de México es un proceso cíclico e interactivo que involucra el control de emisiones, el monitoreo atmosférico y los mecanismos para la evaluación y seguimiento de medidas. La disminución en la con-

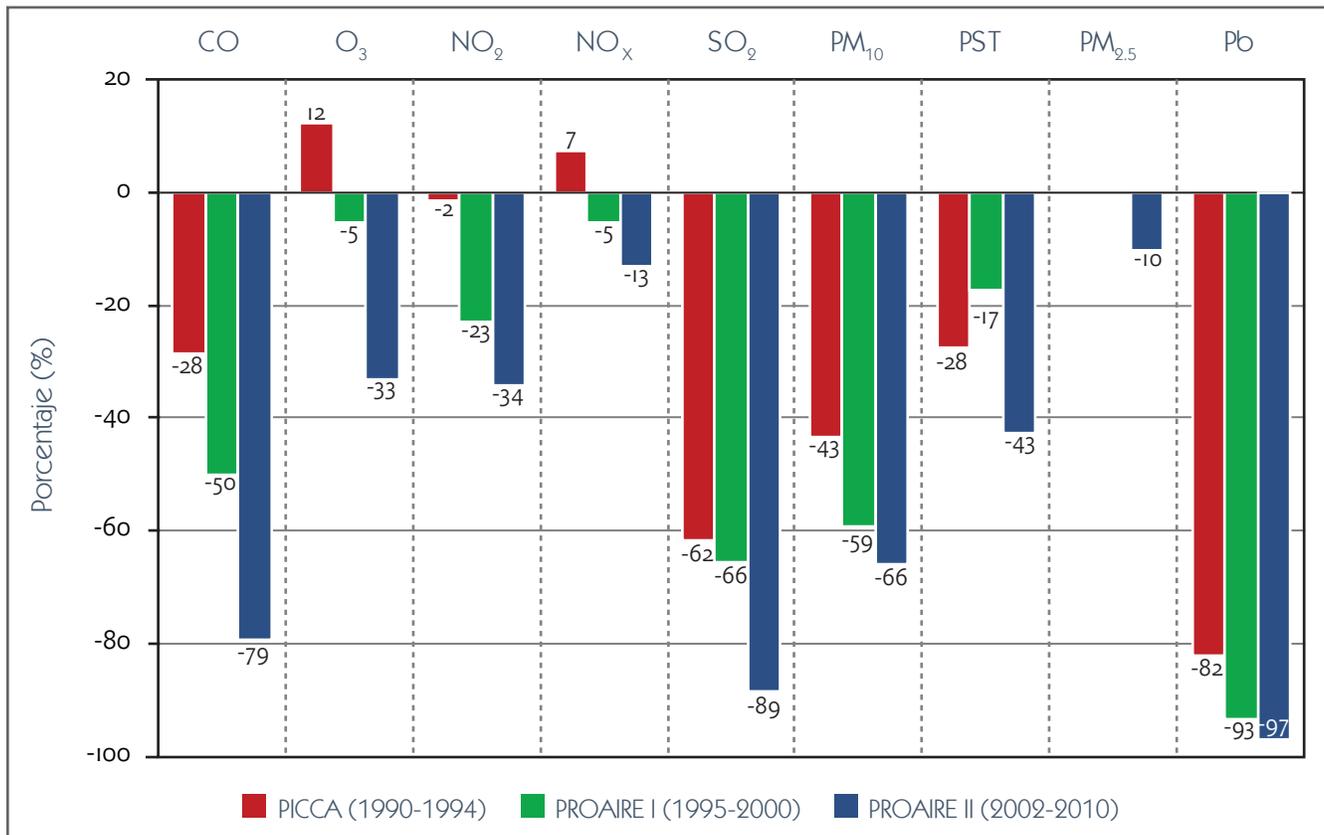


Figura 5.4 Porcentaje de reducción efectiva de la concentración de los contaminantes al instrumentar los programas para mejorar la calidad del aire, tomando como base la concentración promedio anual de 1989 y su actualización a 2009.

centración de contaminantes en el aire ambiente es el mejor indicador de la eficacia de los programas de gestión. En la Figura 5.4 se muestra la reducción efectiva de los contaminantes durante la aplicación de los tres programas para mejorar la calidad del aire, tomando como base la concentración promedio anual de 1989, con excepción de las partículas menores a 2.5 micrómetros, que toman como base la concentración promedio anual de 2004.

Las medidas establecidas en el PICCA (1990-1994) permitieron una reducción de 82% en la concentración del plomo, de 62% en la concentración de

dióxido de azufre, de 43% en la concentración de partículas menores a 10 micrómetros y de 28% en la concentración de monóxido de carbono y partículas suspendidas totales. Sin embargo, los resultados fueron modestos en la disminución de ozono y óxidos de nitrógeno.

Los logros más importantes del PROAIRE I (1995-2000) se obtuvieron para monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, ozono y partículas menores a 10 micrómetros, con reducciones de 22, 21, 17 y 16%, respectivamente. Los óxidos de nitrógeno, el plomo y el dióxido de azufre también disminu-

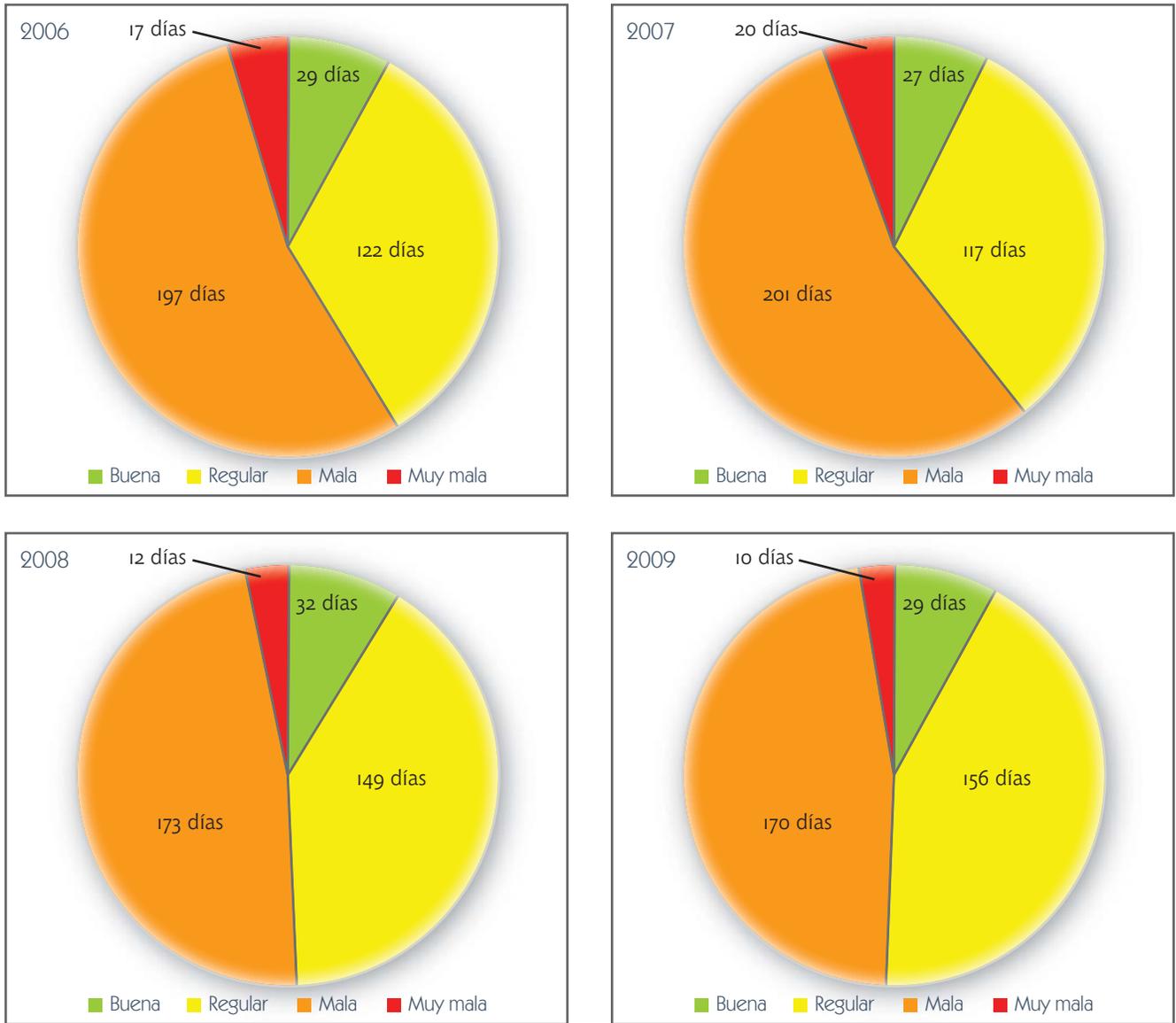


Figura 5.5 Distribución de los días por condición de calidad del aire en la Ciudad de México, con respecto a ozono.

ron aunque en menor proporción, en tanto que las partículas suspendidas totales presentaron un incremento del 11%, luego de la reducción alcanzada durante el PICCA.

El PROAIRE II (2002-2010) se distingue por los resultados en todos los contaminantes evaluados. Las

reducciones de mayor importancia se obtuvieron para monóxido de carbono, ozono, partículas suspendidas totales y dióxido de azufre. El plomo, el dióxido de azufre, el monóxido de carbono y las partículas menores a 10 micrómetros, son los contaminantes que presentan la mayor tasa de cambio con respecto al año base y son el resultado acu-

mulado de la continuidad en la gestión ambiental desde 1990.

El ozono, que actualmente representa uno de los mayores riesgos para la salud, alcanzó una reducción acumulada del 33% con respecto a 1989. La disminución de mayor importancia se obtuvo gracias a las acciones implementadas en el PROAIRE II. En los últimos años se ha visto una reducción importante en el número de días con calidad del aire MALA y MUY MALA, y han aumentado los días con calidad del aire REGULAR. El número de días con calidad del aire BUENA, se ha mantenido prácticamente estable, dada la dificultad para disminuir las concentraciones bajas (Figura 5.5).

#### Las acciones de gestión de la calidad del aire durante 2009

Los logros alcanzados mediante la aplicación de los tres programas de gestión de la calidad del aire han sido importantes, sin embargo, aún falta mucho para lograr el cumplimiento de las normas de protección de la salud. Las estrategias implementadas en 2009 dan continuidad a los esfuerzos para resolver el problema de la contaminación atmosférica en la Ciudad de México y su zona metropolitana.

El Programa de Verificación Vehicular Obligatoria, continúa como una de las acciones de mayor impacto en la mejora de la calidad del aire. El programa se revisa y actualiza año con año con el propósito de hacerlo más eficaz y estricto. En este año se aprobó el uso de un nuevo sistema que garantiza un proceso de verificación vehicular más

preciso, seguro y confiable (Secretaría del Medio Ambiente, 2009a).

El Programa Integral de Reducción de Emisiones Contaminantes (PIREC) se creó para propiciar la sustitución del convertidor catalítico inoperante y el mantenimiento del motor de los vehículos. El convertidor es un dispositivo eficiente para el tratamiento de los gases de combustión, no obstante, un convertidor que ha terminado su vida útil puede incrementar las emisiones contaminantes. En el periodo de octubre de 2008 a julio de 2009 se sustituyeron 26 736 convertidores y el beneficio ambiental fue de 12 525 toneladas de contaminantes que dejarán de emitirse anualmente (Secretaría del Medio Ambiente, 2009a).

La implementación de los programas de gestión para reducir los contaminantes del aire ha tenido sus mayores beneficios en los contaminantes plomo, dióxido de azufre y monóxido de carbono al tener una reducción efectiva de 97, 89 y 79%, respectivamente.

La movilidad vial, por otra parte, se ha convertido en uno de los principales problemas que afectan la vida diaria de la ciudad, con un impacto no solamente en la economía y la calidad de vida, sino también en la contaminación local y global. De acuerdo con el 3<sup>er</sup> Informe de Labores de la Secretaría de Obras y Servicios 2008-2009, una de las estrategias instrumentadas por el Gobierno del Distrito Federal para atenuar este problema y enfrentar la crisis económica del país, es la implementación de un programa de infraestructura con un enfoque integral y una visión metropolitana.

Las principales actividades de la Secretaría de Obras y Servicios en los últimos años se han orientado a la ampliación y mejoramiento de la infraestructura vial y del transporte, lo que eventualmente contribuirá a mejorar la calidad del aire. No obstante, es posible que el incremento de obras en los últimos años haya favorecido el aumento de los niveles de

partículas suspendidas, debido a las emisiones fugitivas del polvo proveniente de los materiales de construcción y al incremento en las emisiones por la disminución de la velocidad del tránsito y el cierre de vialidades primarias (Figura 5.3).

Las obras viales de mayor importancia se realizaron en el Eje Troncal Metropolitano, Sistema Vial Poniente, Circuito Interior (Circuito Bicentenario), Sistema Vial Norte, Sistema Vial Oriente, Eje Central (Corredor cero emisiones) y avenida Tláhuac (Línea 12 del Sistema de Transporte Colectivo Metro) (Secretaría de Obras y Servicios, 2009; Secretaría del Medio Ambiente, 2008).

Por otra parte y con el propósito de fomentar una nueva cultura de movilidad no motorizada, en mayo de 2007 se puso en marcha el Programa *Muévete en Bici* y tan solo en el período de octubre de 2008 a septiembre de 2009, se organizaron 71 paseos dominicales y 11 ciclones familiares, en los cuales se sumaron más de 800 mil asistentes. También, inició el Programa de Transporte Escolar (PROTE) en agosto de 2008 en su modalidad voluntaria y a partir del 24 de agosto de 2009 en su fase obligatoria, con el cual se pretende abatir la generación de contaminantes del aire y agilizar la circulación en vialidades del Distrito Federal. Se estima que los beneficios ambientales y sociales derivados de este programa se incrementarán en la medida en que se incorpore la participación de más centros escolares (Secretaría del Medio Ambiente, 2009a; Secretaría del Medio Ambiente, 2008).

El Programa de Acción Climática de la Ciudad de México reporta avances importantes en otras acciones, como la aplicación de la Norma para el

Aprovechamiento de Energía Solar (NADF-008-AMBT-2005), que ha permitido la instalación de más de 7000 metros cuadrados de colectores solares en la Ciudad de México y una disminución en el consumo de combustibles fósiles. La implementación del Programa de Vivienda Sustentable por el Instituto de Vivienda del Distrito Federal en coordinación con la Secretaría del Medio Ambiente, ha permitido la construcción de 1294 viviendas que incluyen calentamiento solar de agua e iluminación eficiente (Secretaría del Medio Ambiente, 2008; Secretaría del Medio Ambiente, 2009a).

En julio de 2009, la Comisión Ambiental Metropolitana continuó con la reducción en los niveles de activación del Programa para Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA), como medida orientada a proteger la salud pública y reforzar los programas regionales que permitan mantener la tendencia descendente en las concentraciones de ozono y partículas suspendidas (Secretaría del Medio Ambiente, 2009a).

La escasez de lluvia, junto con el intenso desarrollo de obras de ampliación y mejoramiento de la infraestructura vial tuvieron una influencia en la tendencia de las partículas suspendidas en los últimos dos años.

Finalmente, se autorizaron por parte del Fideicomiso Ambiental los recursos para la elaboración del nuevo Programa para Mejorar la Calidad del Aire 2011-2020 (PROAIRE III). La elaboración de este programa

deberá concluirse en julio de 2010 y contendrá acciones que permitan disminuir la emisión de contaminantes criterio, tóxicos y de gases de efecto invernadero (Secretaría del Medio Ambiente, 2009a).

### Hoy No Circula Sabatino

En los últimos años se ha detectado un incremento en las concentraciones de ozono en el aire ambien-

te los días sábado. Este fenómeno se conoce como *efecto de fin de semana* (Stephens et al., 2008) y se refiere a la reducción mínima o incremento que experimenta la concentración de ozono durante los sábados y domingos en la Ciudad de México, a pesar de la reducción significativa en la emisión de sus precursores (óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono e hidrocarburos).

El monitoreo de la calidad del aire en años recientes indica que el sábado es uno de los días de la

En los últimos años los días sábado y domingo registran las concentraciones máximas de ozono y el mayor número de excedencias a la NOM, este fenómeno está relacionado con el “efecto de fin de semana”.

semana en que se excede con mayor frecuencia el límite de la NOM para el promedio de una hora (0.110 ppm). Un resultado similar se observa cuando se emplean otros indicadores, como el valor del promedio de 8 horas de la NOM, el número de horas con excedencias a la NOM o el valor de la concentración máxima.

En 2009, los resultados del monitoreo de la calidad del aire para ozono indican que los jueves, sábado y miércoles son los días de la semana con mayor

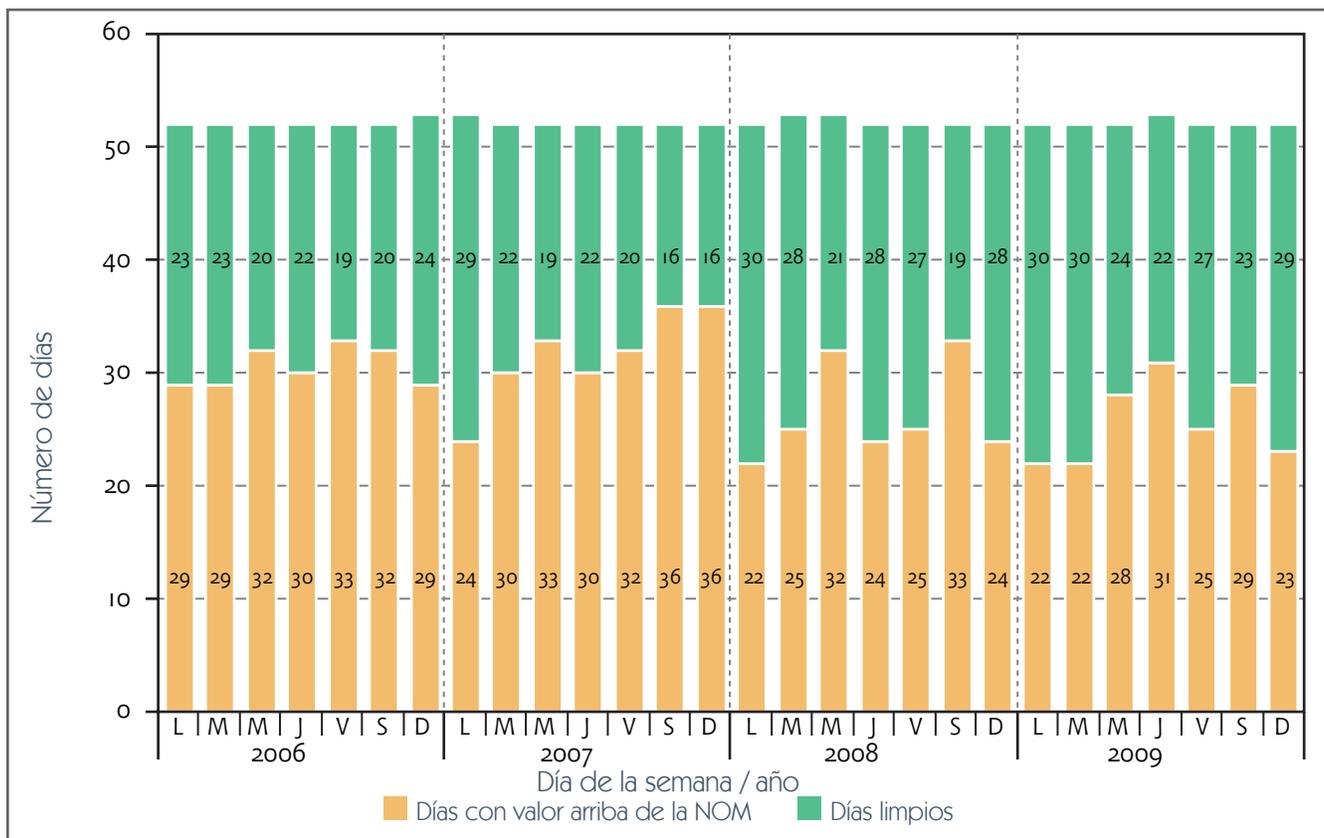


Figura 5.6 Evaluación del cumplimiento de la NOM de ozono (0.110 ppm, promedio de 1 hora) por día de la semana, 2006-2009.

número de excedencias a la NOM (Figura 5.6). En este contexto, desde julio de 2008 la Secretaría del Medio Ambiente junto con la Comisión Ambiental Metropolitana, instrumentaron el programa Hoy No Circula Sabatino (HNCS), el cual restringe la circulación al 20% de los vehículos de uso particular en los días sábados para mejorar el flujo del tránsito y reducir las emisiones de contaminantes precursores del ozono (Secretaría del Medio Ambiente, 2007a). Además se considera que el programa se debe complementar con otras medidas para evitar inducir más viajes o recorridos más largos (Instituto de Aire Limpio, 2007).

A un año de la instrumentación del programa los resultados han sido favorables para la calidad del aire. Al comparar el período de julio de 2008 a junio de 2009 con respecto al período de julio de 2007 a junio de 2008, es decir, un año antes de implementar el programa y un año con el programa, se observó en los sábados una disminución en el número de días con calidad del aire MALA y MUY MALA, y un aumento en el número de días con

calidad del aire REGULAR (Figura 5.7). Esta disminución en las concentraciones de ozono representó una reducción de 13.5% en el número de sábados con excedencias al límite de la NOM de 0.110 ppm.

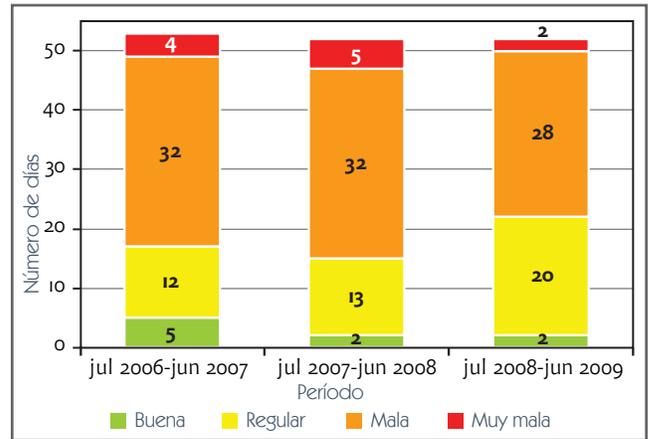


Figura 5.7 Comparativo de la calidad del aire por ozono durante los días sábados desde julio de 2006 hasta junio de 2009. En el período que va del 1 de julio de 2008 al 30 de junio de 2009, se observa una reducción en el número de días en los que la calidad del aire supera el valor de la NOM para el promedio de 1 hora (0.110 ppm).





# ACTIVACIÓN DEL PROGRAMA DE CONTINGENCIAS AMBIENTALES ATMOSFÉRICAS

---



Desde finales de los años 80, el ozono y las partículas suspendidas son los contaminantes responsables del deterioro de la calidad del aire de la Ciudad de México. Sus concentraciones exceden con frecuencia los valores recomendados por las normas oficiales mexicanas de salud ambiental. La complejidad en sus procesos de formación, la variedad de fuentes de emisión de precursores, la escasa información sobre la química atmosférica en la ciudad y las condiciones fisiográficas de la cuenca, dificultan el diseño de políticas efectivas que reduzcan los niveles de estos contaminantes en el corto plazo.

En condiciones de estabilidad atmosférica los niveles de ozono y partículas pueden alcanzar concentraciones que comprometen la salud, no solo de los grupos sensibles sino también de la población en general. El Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA) es un recurso preventivo para evitar daños directos a la salud pública y atenuar el impacto económico indirecto provocado por la contaminación atmosférica, como ausentismo escolar y laboral, atención médica de enfermedades respiratorias o cardiovasculares, visitas a salas de emergencia e incrementos en la mortalidad. El

PCAA se activa cuando, en cualquiera de las estaciones del SIMAT, los niveles de ozono o partículas superan los umbrales de cualquiera de las fases de activación, ya sea de forma individual o combinada (Gobierno del Distrito Federal, 2008a).

En julio de 2008 se publicó la más reciente modificación del “Decreto por el que se expide el Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas” (Gobierno del Distrito Federal, 2008a), que establece nuevos valores para la activación de cada una de las diferentes fases. En este documento se decretó que en 2011 el valor de activación de la Fase de Precontingencia será de 150 puntos IMECA, por lo que cada año a partir de julio de 2008 se reducirán 5 puntos al valor de activación hasta alcanzar dicho valor. También para las Fases I y II se propone una reducción en un proceso similar, el cual se puede observar a detalle en la Figura 6.1.

El seguimiento de los eventos extremos que activan cualquiera de las fases del PCAA es un indicador directo del desempeño de las políticas de gestión. Aun cuando existe escasa información pública sobre los daños en la morbi-mortalidad durante episodios extremos de contaminación, los hallazgos en



Fotografía de la página anterior: Imagen obtenida por la Hazecam el día 13 de febrero de 2009 a las 17:00. El día 13 de febrero de 2009 se activó la Fase de Precontingencia en la ciudad cuando el ozono alcanzó una concentración de 0.198 ppm, equivalentes a 180 puntos IMECA. La visibilidad resulto severamente afectada durante ese episodio por la acumulación de partículas finas primarias, aerosoles orgánicos e inorgánicos secundarios. Algunos aerosoles se generan de algunas reacciones fotoquímicas, otros por reacciones de oxidación y otros por interacciones físicas entre los contaminantes gaseosos. Las pequeñas partículas presentes en los aerosoles dispersan la luz eficientemente, disminuyendo la cantidad de luz que es reflejada por los objetos distantes, los que aparecen difusos o simplemente no se alcanzan a observar.

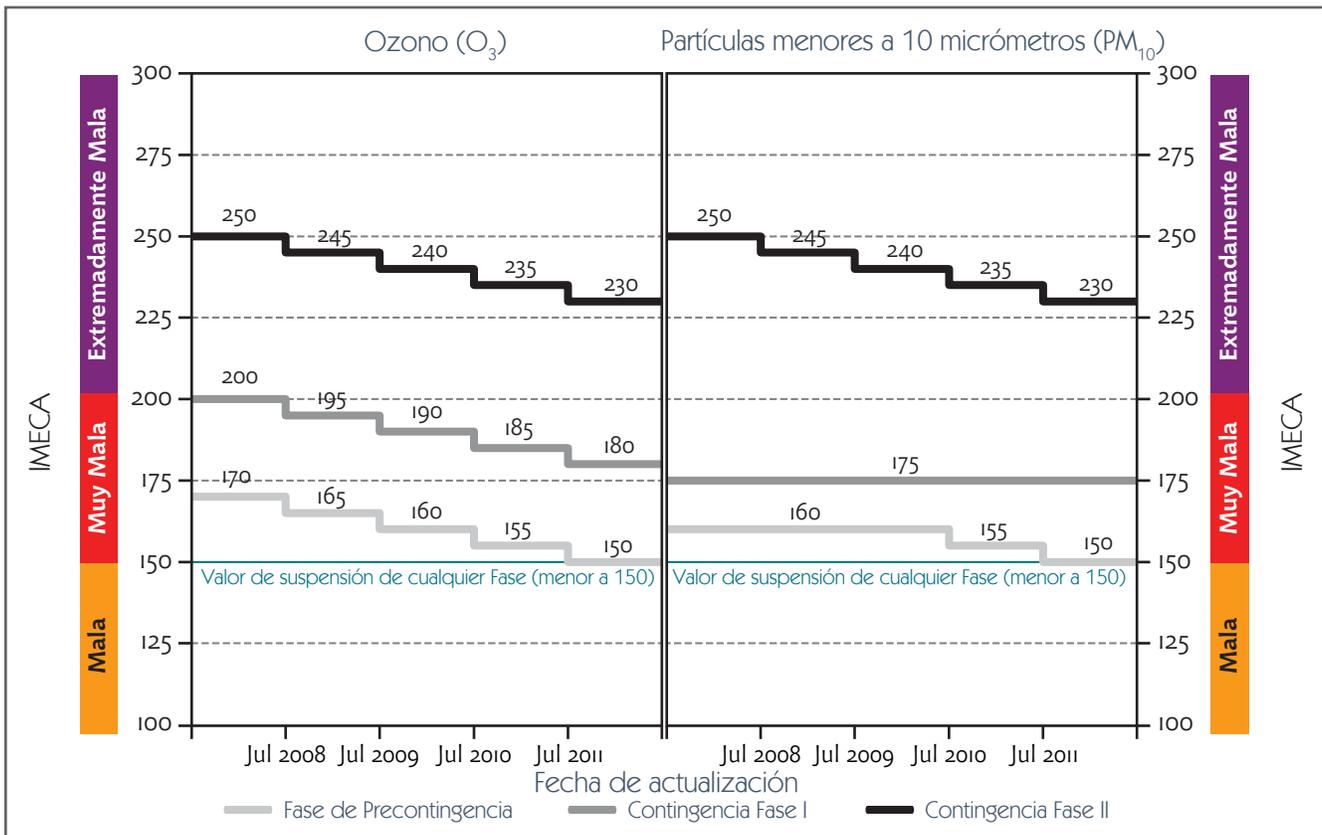


Figura 6.1 Programa de reducción en los valores de las fases de activación del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas para ozono y PM<sub>10</sub>.

otros países indican que a estos niveles se podrían producir daños severos, tanto en individuos sensibles a la contaminación como en individuos sanos.

Durante 2009 se registraron 14 días con valores mayores a 150 puntos, que de acuerdo con el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA) corresponden a una calidad del aire MUY MALA. En diez de estos casos el deterioro de la calidad del aire fue a causa de las concentraciones de ozono y en cuatro por PM<sub>10</sub>. En dos ocasiones los niveles superaron los umbrales de la Fase de Precontingencia, la primera ocurrió el 13 de febrero cuando el ozono alcanzó una concentración equivalente

a 180 puntos IMECA (0.198 ppm) y la segunda el 3 de noviembre cuando las PM<sub>10</sub> alcanzaron una concentración equivalente a 164 puntos IMECA (248 µg/m<sup>3</sup>). El umbral para ozono era de 165 puntos IMECA y para PM<sub>10</sub> de 160 puntos, en las fechas respectivas.

Activación de la Fase de Precontingencia por ozono: 13 febrero de 2009

Durante gran parte del mes de febrero la región central del país estuvo bajo la influencia de sistemas de alta presión que predominaron en la región

centro-suroeste del país (Figura 6.2), situación que mantuvo condiciones de estabilidad atmosférica, cielo despejado y viento débil, tanto en superficie como en las capas bajas de la tropósfera. Por otra parte, a pesar de que durante la semana del 9 al 13 de febrero se observó sobre el Golfo de México el frente frío número 33, las temperaturas máximas en la Ciudad de México oscilaron entre 22 y 28 °C.

El viernes 13 de febrero se registraron dos sistemas de alta presión, uno localizado entre el estado de Zacatecas y la meseta central y el otro sobre el Golfo de México. Durante la mañana se registraron tres inversiones térmicas, la primera a nivel de superficie, que se disipó a las 9:30 horas, la segunda a 500 metros, que se disipó a las 11:30 horas y la tercera a 1500 metros, que se disipó hasta las 15:00 horas. Aunado a lo anterior, a lo largo del día se mantuvo un cielo despejado, vientos escasos e intensa radiación, adicionalmente, se observó un incremento en el tránsito vehicular, por tratarse de

En la Precontingencia del 13 de febrero las condiciones de cielo despejado, viento escaso, intensa radiación y estabilidad atmosférica, evitaron la dispersión de los contaminantes precursores del ozono.

viernes de quincena y víspera del día del amor y la amistad. El tránsito vehicular, la falta de nubosidad y la intensa estabilidad atmosférica proporcionaron condiciones favorables para la producción de *smog* fotoquímico.

En la secuencia de la Figura 6.3 se puede observar el comportamiento del ozono en función de los vientos en la ciudad. Vientos ligeros de superficie favorecieron el lento arrastre de la contaminación desde el norte y centro hacia el sur de la ciudad a partir de las 11:00 horas. Alrededor de las 15:00 horas la concentración de ozono había rebasado los 100 puntos IMECA (0.110 ppm) en todas las estaciones del centro y sur, con la concentración máxima en la estación Iztacalco (IZT). El calentamiento de la superficie propició un ligero incremento en la velocidad del viento y un desplazamiento en dirección hacia las montañas del suroeste, sin embargo, la velocidad del viento no fue suficiente para dispersar la contaminación. A las

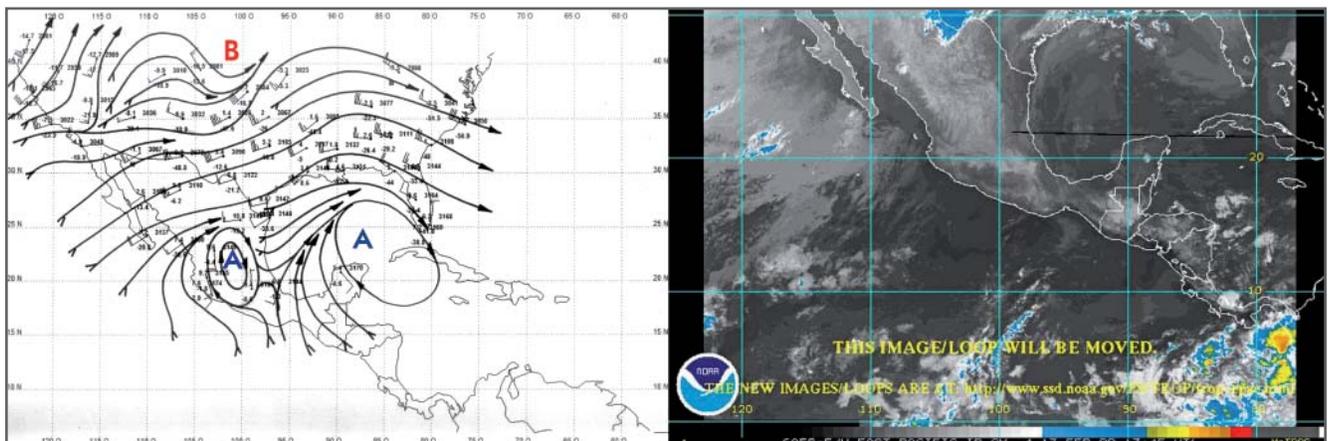


Figura 6.2 Condiciones atmosféricas e imagen satelital de la República Mexicana – 13 de febrero de 2009. La influencia de un sistema de alta presión provoca la escasa presencia de nubes en el centro del país (Fuente: NOAA – GOES).

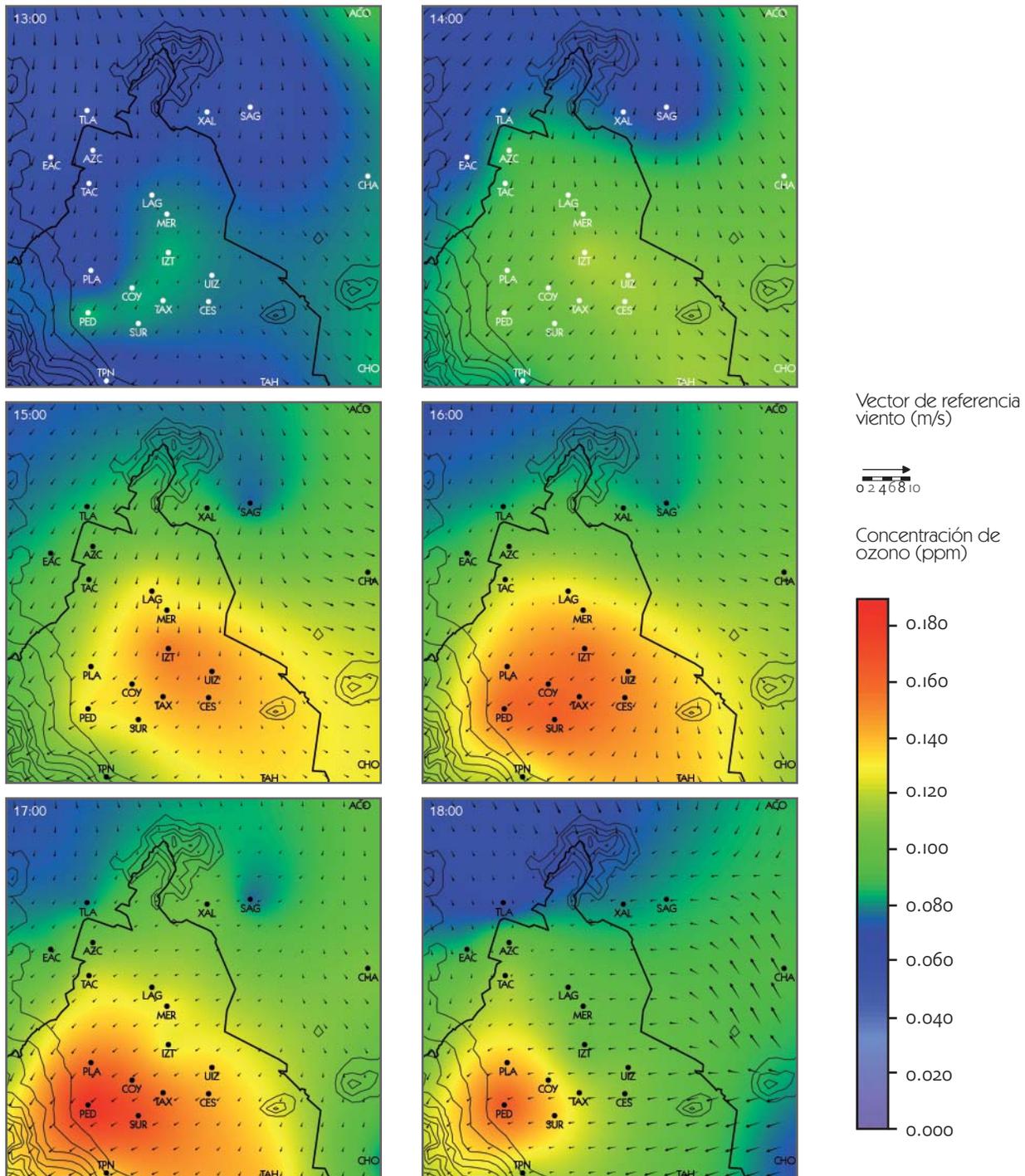


Figura 6.3 Secuencia de la distribución espacial del ozono durante el día 13 de febrero de las 13:00 a las 18:00 horas. La concentración reportada a las 17:00 horas de 0.198 ppm (180 puntos IMECA) en la estación Pedregal (PED) motivó la activación de la Fase de Precontingencia.

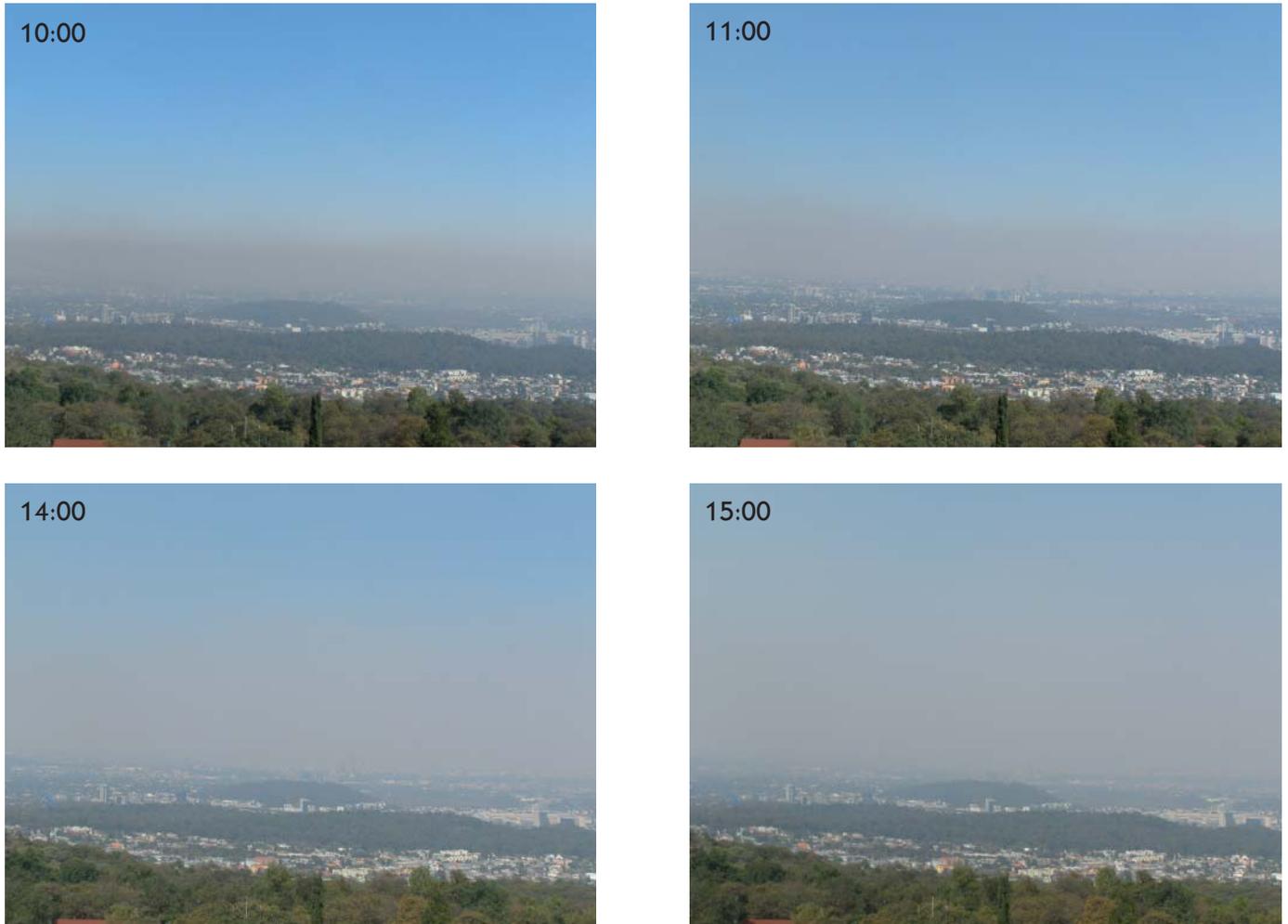
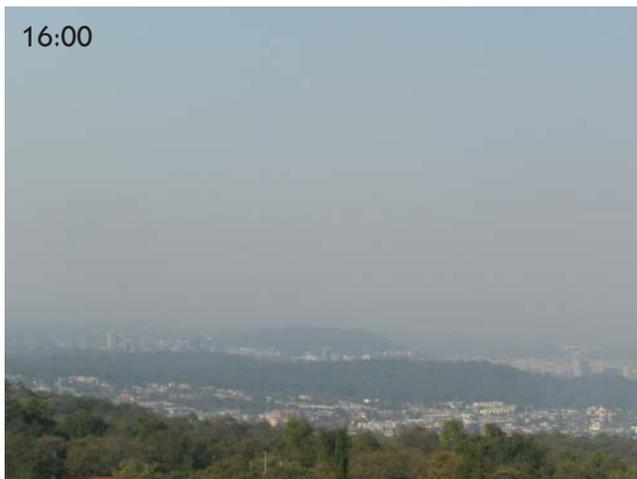


Figura 6.4 Fotografías obtenidas por la Hazecam desde el sur de la ciudad el día 13 de febrero. La secuencia va de las 10:00 Precontingencia. La disminución de la visibilidad fue provocada por la acumulación de partículas finas y por la formación de y la falta de dispersión provocaron que al final de la tarde la visibilidad fuera menor a 5 km.

16:00 horas la concentración de ozono superaba los 150 puntos IMECA (0.165 ppm) en las estaciones de Iztacalco (IZT), Santa Ursula (SUR), Pedregal (PED) y Coyoacán (COY). El arrastre se mantuvo en las siguientes horas sin que se detuviera la producción de ozono, por lo que a las 17:00 horas la estación Pedregal (PED) registró una concentración máxima de 0.198 ppm, equivalente a 180 puntos IMECA, rebasando el umbral de 165 puntos IMECA de la

activación de la Fase de Precontingencia del PCAA. Después de las 18:00 horas la falta de radiación y el ingreso de una corriente de aire proveniente del oriente favorecieron la disminución de la concentración del contaminante durante las horas de la tarde y la noche (Figura 6.4).

De acuerdo con el Manual para la Aplicación del Programa de Contingencias Ambientales Atmos-



a las 17:00 horas y permite observar el impacto en la visibilidad a lo largo del día durante el evento que activó la Fase de aerosoles orgánicos secundarios durante las reacciones fotoquímicas que dieron origen al ozono. La presencia de las partículas

féricas (Gobierno del Distrito Federal, 2008b), la Fase de Precontingencia se desactiva después de 24 horas si la concentración del contaminante que la activó no rebasa los 150 puntos IMECA. Sin embargo, las condiciones de estabilidad prevalecieron y se registró una lenta movilidad y tránsito intenso el día 14 de febrero (día del amor y la amistad), provocando que la concentración de ozono alcanzara un máximo de 0.196 ppm, equi-

valente a 178 puntos IMECA, a las 18:00 horas en la estación Pedregal.

El día 15 de febrero la entrada de un flujo anticiclónico desde el Pacífico oriental hacia la meseta central, mantuvo condiciones de estabilidad atmosférica moderada sobre la región central del país, viento ligero a moderado y cielo despejado a medio nublado. Por lo que la concentración máxi-

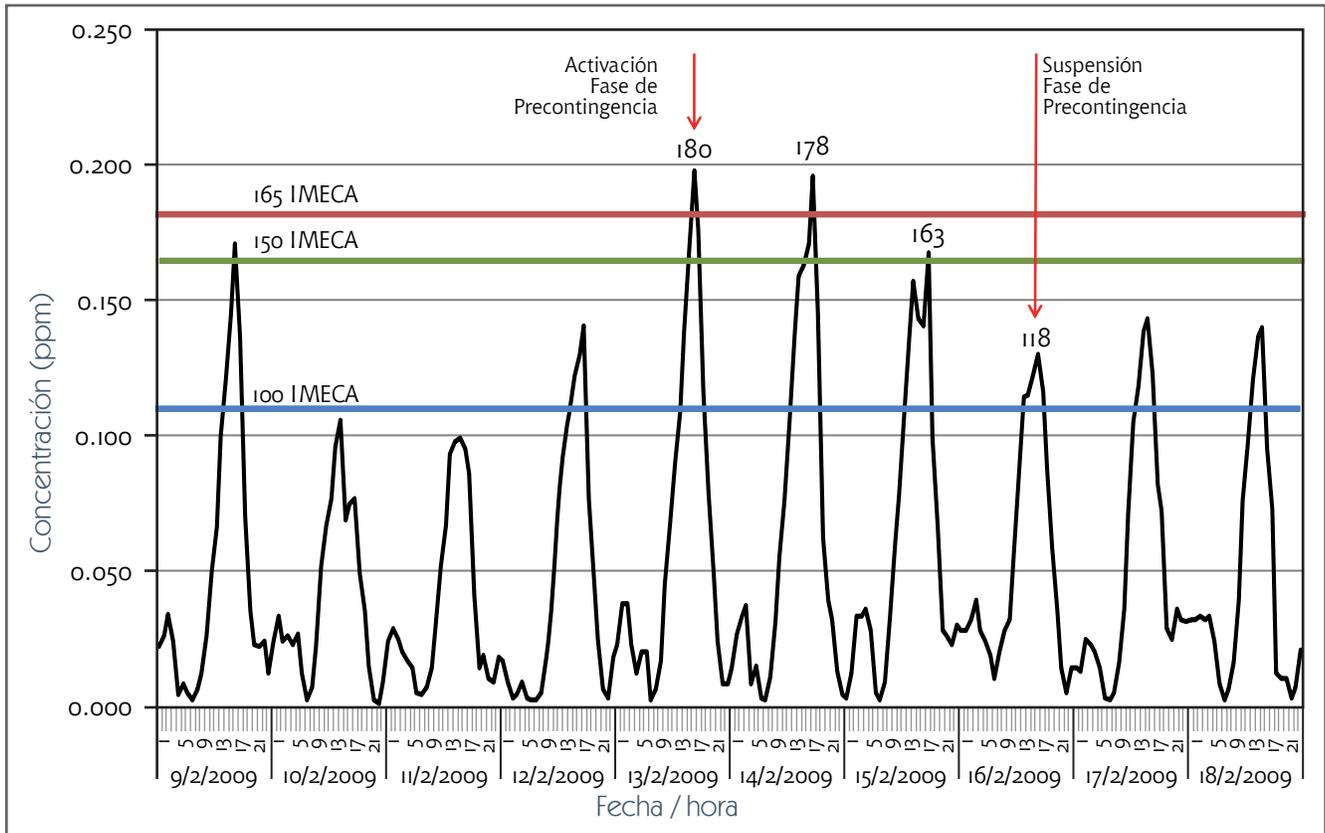


Figura 6.5 Serie de tiempo de las concentraciones de ozono del 9 al 18 de febrero de 2009. Los datos corresponden a los promedios horarios registrados en la estación Pedregal (PED) al suroeste de la Ciudad de México. En la gráfica se indica el período en el que se aplicó la Fase de Precontingencia, con los máximos para cada día.

ma registrada a las 16:00 horas fue de 0.179 ppm, equivalentes a 163 puntos IMECA, en la estación Tacuba (TAC) al noroeste de la ciudad, manteniendo activa la Fase de Precontingencia.

El lunes 16 de febrero las condiciones mejoraron ligeramente para la dispersión, provocando una disminución en la concentración máxima de ozono. El máximo de 0.130 ppm (118 puntos IMECA) a las 17:00 en la estación Pedregal desactivó la Fase de Precontingencia, después de tres días continuos de activación (Figura 6.5).

Activación de la Fase de Precontingencia por  $PM_{10}$ : 3 de noviembre de 2009

Las concentraciones altas de  $PM_{10}$  se registran con mayor frecuencia en las estaciones localizadas al noreste de la ciudad, durante las primeras horas de la mañana, asociadas principalmente con el tránsito vehicular. Además los vientos intensos que suelen presentarse en algunos meses del año, pueden levantar el polvo del suelo y provocar incrementos instantáneos en la concentración de este contaminante, los que se observan en las es-

taciones cercanas a zonas erosionadas, terrenos de cultivo o calles y avenidas con un mantenimiento deficiente.

El año 2009 se caracterizó por un retraso en la temporada de lluvias y una disminución en la precipitación total en gran parte del país, la sequía intensa provocó serios problemas en la Ciudad de México y a nivel nacional. La mayor parte de la precipitación registrada en 2009 se concentró hacia finales de la temporada de lluvias, en los meses de septiembre y octubre. En la última semana de octubre se observó la interacción de sistemas ciclónicos y anticiclónicos que incursionaron desde el noroeste y sureste

del país, produciendo nubes de gran espesor que provocaron lluvias intensas en el centro del país.

El 30 de octubre se registró un evento de lluvia intensa que provocó deslaves, inundaciones e importantes daños materiales en varios puntos de la Ciudad de México, afectando mayormente la zona noreste (Figura 6.6). De acuerdo con la Secretaría de Protección Civil, el volumen de precipitación fue de 74 mm de lluvia, mientras que el Sistema de Aguas reportó un máximo de 86 mm, esto en un periodo de tiempo relativamente corto (3 horas). La Sierra de Guadalupe fue una de las zonas más afectadas por las intensas lluvias. En la parte alta de

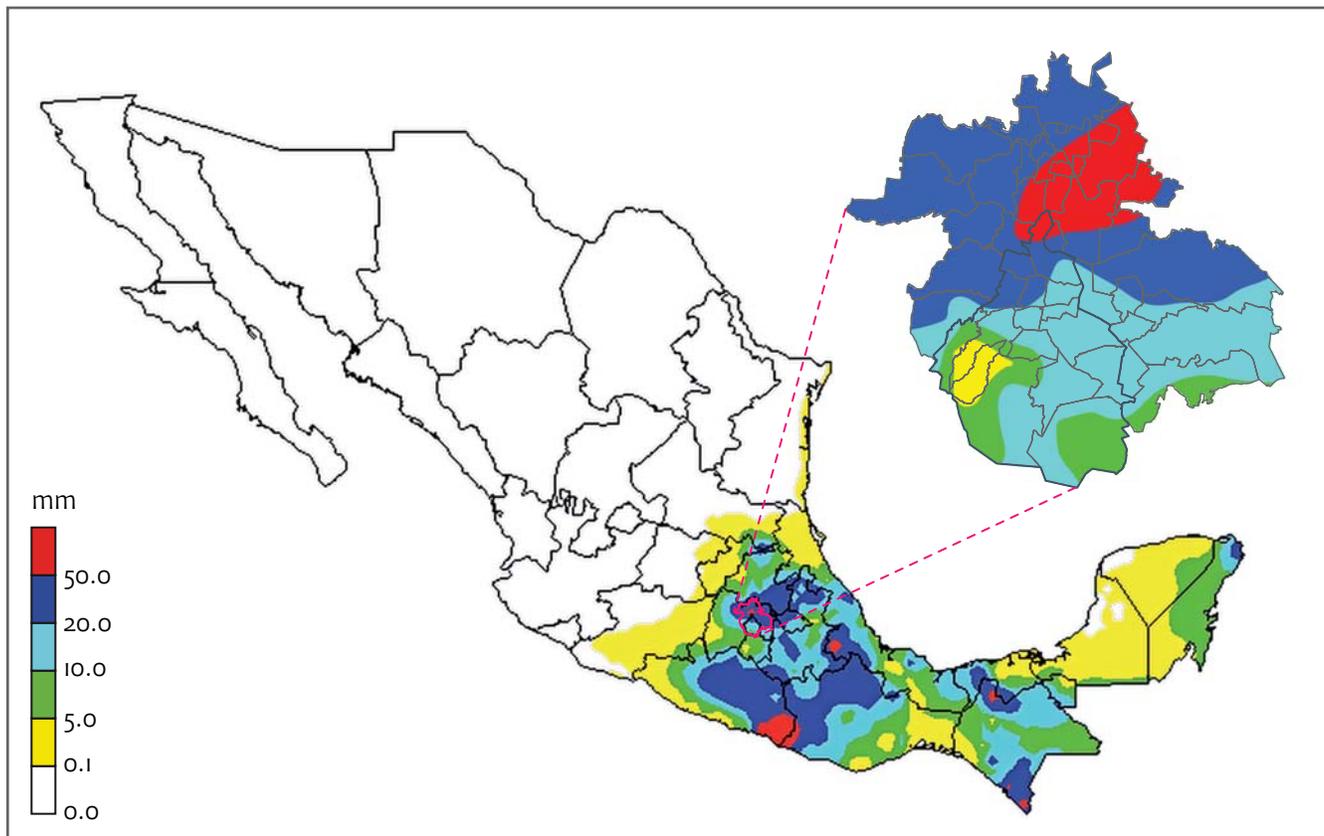


Figura 6.6 Distribución de la precipitación el día 30 de octubre de 2009 (elaborado con información del Servicio Meteorológico Nacional de la CONAGUA y del Sistema de Aguas del Gobierno del Distrito Federal).



Figura 6.7 Retiro de lodo y tierra en la avenida Vía Morelos en el municipio de Ecatepec de Morelos, Estado de México (Foto: Archivo de la Subdirección de Monitoreo).

la sierra existen varias presas de gavión que actúan como reguladoras de los cauces naturales del agua y tienen el propósito de prevenir inundaciones o afectaciones mayores a la población localizada en las zonas bajas. Sin embargo, la gran cantidad de lluvia de ese día, rebasó la capacidad de las presas provocando el colapso de las mismas, el cauce del agua arrastró consigo una gran cantidad de lodo, azolve y rocas inundando la parte baja de la sierra (Secretaría de Protección Civil, 2010). Las delegaciones Gustavo A. Madero y Azcapotzalco en el Distri-

to Federal y los municipios de Ecatepec, Coacalco y Tultitlán en el Estado de México, fueron los más afectados por inundaciones que rebasaron un metro de altura en algunas zonas.

En los días siguientes, al retirarse gran parte del agua de las zonas inundadas mecánicamente o por evaporación, se formó un depósito de tierra y lodo de algunos centímetros de espesor. Este depósito fue removido lentamente de calles y avenidas en un proceso que duró más de cuatro semanas, durante

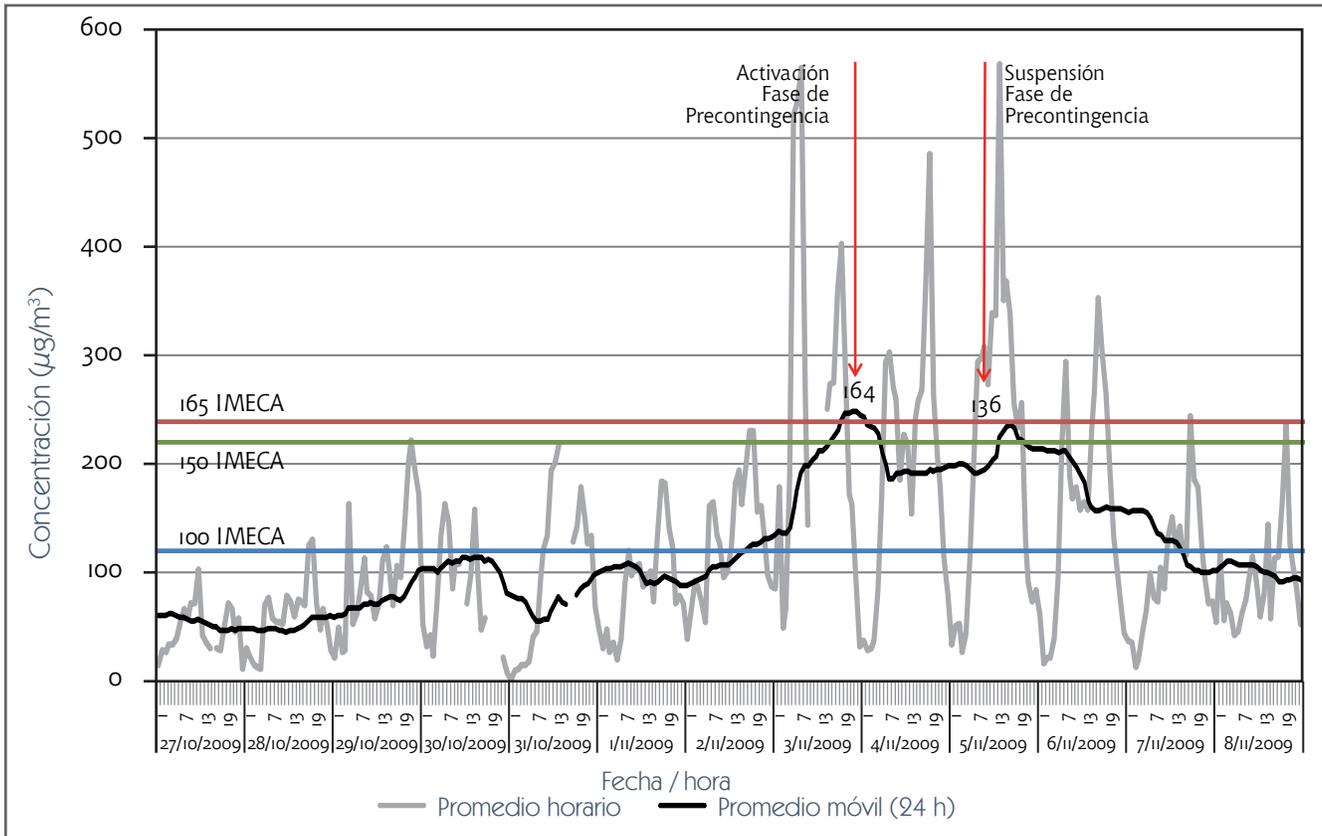


Figura 6.8 Serie de tiempo para la concentración horaria y el promedio móvil de 24 horas de partículas menores a 10 micrómetros ( $PM_{10}$ ) en la estación Xalostoc, del 27 de octubre al 8 de noviembre de 2009. La tarde del día 30 de octubre se registró lluvia intensa en el noreste de la ciudad ocasionando una inundación en esa región. El retiro de tierra, basura y desechos en los días posteriores y el polvo levantado por la circulación de los vehículos provocaron incrementos en la concentración de  $PM_{10}$ , las concentraciones horarias indican un patrón diurno del contaminante. Los niveles elevados de este contaminante activaron la Fase de Precontingencia del día 3 al 5 de noviembre de 2009.

las que no se suspendió totalmente la circulación en la zona afectada, a pesar de la condición en la que se encontraban las calles y avenidas. Adicionalmente, el proceso de retiro de escombros se realizó sin un control adecuado de polvos, provocando su resuspensión durante el traspaleo del material. En consecuencia en los alrededores de la estación Xalostoc (XAL), en Ecatepec de Morelos, las actividades de limpieza y el paso de los vehículos provocaron la resuspensión del polvo (Figura 6.7), lo que a su

vez ocasionó un impacto local en la calidad del aire con un incremento en la concentración promedio horaria de  $PM_{10}$  de  $564 \mu g/m^3$ . Esta situación propició que a las 22:00 horas del día 3 de noviembre la concentración promedio de 24 horas activara la Fase de Precontingencia con una concentración de  $248 \mu g/m^3$ , equivalente a 164 puntos IMECA.

Como ya se mencionó, las actividades de limpieza en el municipio de Ecatepec se prolongaron du-

rante cuatro semanas, motivo por el que las concentraciones del contaminante se mantuvieron en niveles elevados a lo largo de dicho período (Figura 6.8). Esto ocasionó que la Fase de Precontingencia se prolongara hasta el día 5 de noviembre cuando el promedio de 24 horas descendió a un valor de  $192 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (136 puntos IMECA).

Aunque los niveles se mantuvieron por encima de la norma ( $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , promedio de 24 horas) por varios días más, sólo la estación de Xalostoc registró concentraciones elevadas de este contaminante, en el resto de la ciudad las condiciones de calidad del aire se mantuvieron por debajo de los 100 puntos IMECA. La escala del impacto de la contaminación generada

Las lluvias intensas registradas el 30 de octubre provocaron inundaciones en la parte baja de la Sierra de Guadalupe, generando acumulación de lodo y azolve que al secarse y removerse, ocasionó el incremento de la concentración de partículas y la activación del PCAA el 03 de noviembre.

por los escombros de la inundación fue local, afectando únicamente la zona en donde la limpieza fue deficiente o el polvo era resuspendido por el viento o el paso de los vehículos. De acuerdo con cifras del H. Ayuntamiento de Ecatepec de Morelos se recolectaron cerca de 11 500 metros cúbicos de lodo y 1850 toneladas de basura. Los restos depositados por la inundación contenían, además de polvo del suelo, restos de basura y residuos de aguas negras, por lo que es probable que el impacto en la salud de los habitantes en esa zona fuera mayor que el provocado por las altas concentraciones del contaminante. Sin embargo, no existe información que permita cuantificar los efectos de este evento sobre la salud.





**LA VISIBILIDAD**

---



La apreciación del paisaje es un concepto que se puede asociar directamente con el confort de las personas. En la Ciudad de México la vista de un cielo despejado con un paisaje rodeado de montañas, vincula a los habitantes con la naturaleza y la belleza que aún se puede apreciar en la cuenca, por el contrario, la percepción de un cielo contaminado y opaco puede causar malestar emocional o depresión en las personas. Primordialmente existen tres factores que influyen en la alteración de la visibilidad: la meteorología local, la fisiología del ojo del ser humano y las características del objeto a visualizar respecto al fondo circundante.

En los grandes centros urbanos es común asociar la contaminación del aire con la disminución de la visibilidad. En el caso de la Ciudad de México, durante los días más contaminados la visibilidad se reduce notablemente debido al efecto de la mezcla de vapor de agua, partículas suspendidas y gases que se perciben como “bruma”.

De forma simple se puede definir a la visibilidad como “la apreciación de las características de un paisaje a cierta distancia”, sin embargo, el término más común y el que se emplea en la metodología de este documento define la visibilidad como “la

mayor distancia a la cual un observador es capaz de distinguir un objeto negro contra el horizonte”. La visibilidad en el aire depende no sólo del estado de la atmósfera y de la persona que realiza la observación, también del objeto observado. De modo que los objetos oscuros y negros sobre fondos blancos o blanquecinos se observan mejor que objetos que contrastan poco con el fondo. No obstante, la visibilidad es algo más que la capacidad de distinguir un objeto a la distancia; si bien está asociada con las condiciones que permiten la apreciación de la forma, el contraste, el detalle y el color de los objetos cercanos y distantes, la visibilidad incluye también procesos de juicio y de percepción subjetiva del impacto visual por parte del observador, además de la interacción física de la luz con las partículas y gases en la atmósfera. En consecuencia el valor que se le otorga a la visibilidad incluye tanto las condiciones físicas y fisiológicas como la valoración humana.

¿Qué provoca la disminución de la visibilidad?

Cuando las partículas y los gases presentes en la atmósfera interactúan con la luz, se presentan dos fenómenos que pueden disminuir la visibilidad: la



Fotografía de la página anterior: Imagen obtenida por la Hazecam el día 12 de julio de 2009 a las 20:20 horas. Muy cerca de la puesta, los rayos del sol atraviesan la atmósfera en un ángulo muy bajo y tienen que recorrer una trayectoria más larga a través de la misma, las moléculas dispersan una gran parte de la luz con una longitud de onda corta y no así la luz amarilla, naranja y roja. Esto hace que los atardeceres y amaneceres tengan estas tonalidades. Cuando la atmósfera contiene una gran cantidad de partículas con diámetros apenas mayores que las moléculas del aire, sólo la luz roja puede penetrarla. La imagen en tonos sepia captada por la cámara, es un ejemplo interesante de esta interacción de la luz con la atmósfera.

dispersión y la absorción. En el primero la energía es dispersada, es decir, re-irradiada en diferentes direcciones y con diferentes intensidades por las partículas que tienen un tamaño similar a la longitud de onda. En el segundo, la energía es absorbida por las partículas y puede transformarse en otras formas de energía tales como calor o energía química. La dispersión se asocia con la presencia de partículas finas y de algunos gases, que pueden presentarse tanto en el día como durante la noche, mientras que la absorción se asocia principalmente a la presencia de dióxido de nitrógeno y carbón negro.

Durante el día, la disminución de la visibilidad impide que los objetos se vean claramente a la distancia, este fenómeno es el que frecuentemente se usa para juzgar el estado de la calidad del aire. Durante la noche, la luz proveniente de las lámparas de las calles y casas es reflejada por las partículas en el aire e impide observar las estrellas en el cielo.

La contaminación por partículas suspendidas, principalmente  $PM_{2.5}$ , tiene un fuerte impacto en la visibilidad, ya que a medida que el número de partículas se incrementa, absorbe y/o dispersa mayor cantidad de luz, provocando menor claridad, color y rango visual. Las  $PM_{2.5}$  ó partículas finas están formadas principalmente por cinco tipos de componentes que contribuyen de manera directa a disminuir la visibilidad: sulfatos, nitratos, carbono orgánico, carbono elemental y el polvo del suelo. Algunos factores naturales y ópticos que influyen en la disminución de la visibilidad son un alto contenido de humedad en el aire, la formación de niebla y neblina, la presencia de nubes bajas, el ángulo del sol, la intensidad de la luz y el ángulo de reflexión. Cuando se combinan niveles altos de partículas y un elevado contenido

En la mayoría de las zonas urbanas la condición de la visibilidad es mala, por lo que se considera como una característica de una atmósfera contaminada.



SIMAT, Ciudad de México

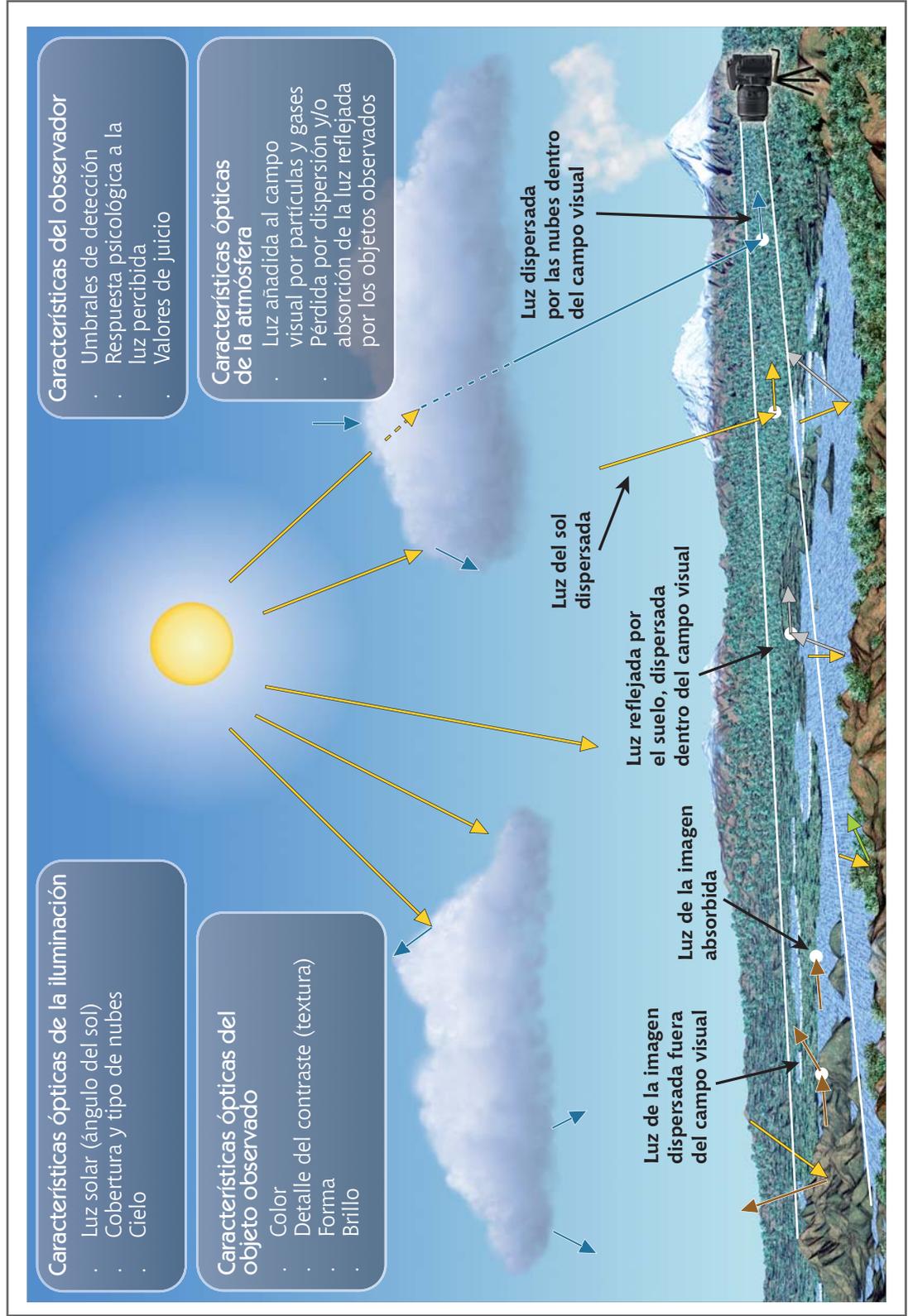
de humedad relativa (mayor a 60%), se observa una notable reducción en la visibilidad.

Bajo condiciones de estabilidad atmosférica o de inversión térmica, los aerosoles quedan atrapados en ciertos niveles de la atmósfera y forman una capa densa de bruma sobre la ciudad. A medida que transcurre el día y se calientan la atmósfera y el suelo, se produce un movimiento vertical que engrosa la capa y la diluye, este movimiento junto con el desplazamiento horizontal del viento contribuye a dispersar las partículas y gases mejorando gradualmente la visibilidad.

#### La visibilidad y la calidad del aire

El deterioro de la visibilidad es la característica principal de una atmósfera contaminada, tanto

Figura 7.1 El ojo humano, al igual que los componentes ópticos en una cámara, construye la imagen de un objeto a partir de la luz reflejada por el mismo. Sin embargo, la información necesaria para apreciar la imagen se reduce a medida que pasa a través de la atmósfera. La luz del sol, la reflejada por las nubes y la reflejada desde el suelo, se incorporan al campo visual en donde es dispersada o absorbida por las partículas. Parte de la luz dispersada permanece en el campo visual y en ocasiones puede ser tan brillante que la imagen no se distingue o desaparece (adaptado de Malm, William C., 1999).



por la apariencia visual de las emisiones de la industria (chimeneas), como por la degradación del paisaje (Molenar y Malm, 1994). En algunas áreas remotas del mundo, en un día claro se puede tener una visibilidad de 300 km en climas secos y de 100 km en climas húmedos. Desafortunadamente, en la mayoría de las áreas urbanas la experiencia normal de visibilidad es mala y de menos de 20 km (Hyslop, 2009). La visibilidad es de lo más valorado y deseado de las condiciones ambientales para los habitantes de las zonas metropolitanas y debe tomarse en consideración durante la cuantificación del costo-beneficio de la gestión ambiental.

Los compuestos presentes en la bruma de una ciudad contaminada están relacionados con serios efectos en la salud y con el daño ambiental. La exposición a partículas finas, principales responsables del deterioro de la visibilidad, está asociada con el incremento de enfermedades respiratorias, decremento en la función pulmonar y la muerte prematura. Los nitratos y sulfatos presentes en las partículas, contribuyen en la formación de la lluvia ácida, la cual daña los bosques, reduce la población de especies acuáticas, altera la composición de los suelos y erosiona edificios y monumentos históricos.

La relación entre la disminución de la visibilidad y la contaminación es el fenómeno más evidente en ciudades muy contaminadas. Existen diversos estudios que confirman una relación directa entre la visibilidad y las concentraciones de partículas y contaminantes gaseosos. En la ciudad de Shanghai se encontró una fuerte correlación entre la visibilidad y los niveles de  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ , y una correlación moderada con dióxido de azufre y dióxido de ni-

trógeno. Los resultados son similares a los reportados en ciudades de Estados Unidos, Tel Aviv y Pekín (Ozkaynak *et al.*, 1985; Dayan y Levy, 2005; Huang *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2010). Debido a esta asociación entre la disminución de la visibilidad y la calidad del aire, existe una hipótesis razonable que plantea que la visibilidad puede ser un sustituto de los niveles de contaminación atmosférica para evaluar los efectos sobre la salud en lugares donde no existe una red de monitoreo atmosférico (Huang *et al.*, 2009).

Para un sector importante de la población de la Ciudad de México la referencia inmediata de un día contaminado es un día con un cielo gris y con bruma, mientras que la mejora en la visibilidad es un indicador de una “buena” calidad del aire. De acuerdo con una encuesta sobre la percepción social de la contaminación publicada en el 2001, el 33.2% de los entrevistados asociaba una contaminación baja con la opción “Se ve despejado”, un 22.9% con la opción “Hay visibilidad” y un 17.7% con la opción “No tiene molestias en los ojos” (Gobierno del Distrito Federal *et al.*, 2001).

#### La visibilidad en la Ciudad de México durante 2009

En enero de 2009 el Sistema de Monitoreo Atmosférico inició un programa para el monitoreo continuo de la condición de visibilidad en la Ciudad de México empleando una cámara fotográfica que cada diez minutos obtiene una imagen instantánea de la región central de la ciudad, la cual es transmitida vía digital al Centro de Información de la Calidad del Aire para su difusión (Figura 7.1). Cada una de las fotografías se analiza para interpretar la

En la Ciudad de México, sólo el 13% de las horas diurnas del año se tiene una visibilidad “buena” con un rango visual de 19 km.

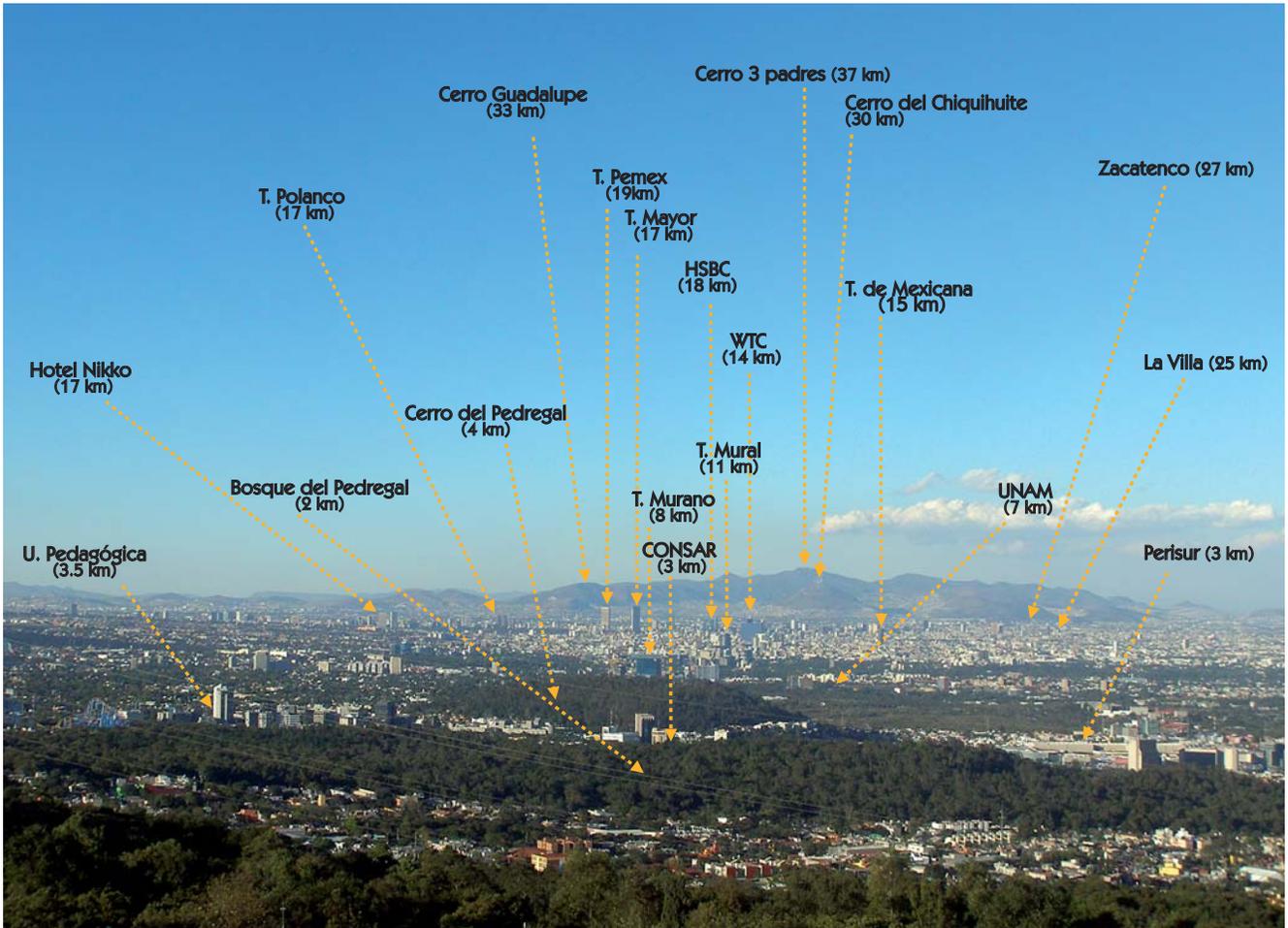


Figura 7.2 Puntos de referencia para la evaluación de la visibilidad en la Ciudad de México.

condición de visibilidad, definida como el rango visual al cual se puede percibir un objeto distante contra el horizonte.

Las imágenes permiten evaluar los cambios en la visibilidad de la ciudad y asignarle un valor numérico, a partir de la identificación de puntos de referencia dentro del campo de visión de la cámara (Figura 7.2). Empleando los resultados del primer año de monitoreo se puede observar que durante la mayor parte de los días, la visibilidad desde el sur de la ciudad es menor a 10 kilóme-

tros. Solo en el 13% de las horas del día se puede lograr una visibilidad “buena”, con un rango visual mayor a 19 kilómetros. La visibilidad a lo largo del día es “mala” durante la mañana y mejora a medida que avanza la tarde. Entre las 16:00 y 18:00 se presenta la mejor condición de visibilidad en la ciudad.

En las mañanas es frecuente observar una capa claramente definida de contaminación cerca del suelo, provocada por la presencia de una atmósfera estable. La imagen de la Figura 7.3 se obtuvo el



Figura 7.3 Imagen del 25 de febrero de 2009 a las 9:00 horas, en la fotografía se observa una densa capa de contaminación atrapada bajo una inversión térmica que contrasta con el azul del cielo por encima de ella. La concentración de  $PM_{2.5}$  reportada en la zona centro fue de  $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

día 25 de febrero, en ella se puede apreciar claramente la acumulación de contaminantes sobre la ciudad, la falta de dispersión asociada a una inversión térmica provoca una capa densa que disminuye notablemente la visibilidad. Dentro de la capa de contaminantes se pueden encontrar partículas orgánicas, inorgánicas, carbón negro y dióxido de nitrógeno, todos ellos capaces de absorber o dispersar la luz del sol y, por consiguiente, deteriorar la visibilidad.

Las inversiones térmicas pueden ser de superficie o de altura (de subsidencia), las inversiones de superficie suelen presentarse durante las mañanas, mientras que las de altura pueden permanecer durante varios días. Una inversión de superficie en la Ciudad de México difícilmente alcanza un espesor mayor a 600 metros, mientras que una de altura puede abarcar hasta 10 000 metros. Las inversiones de superficie generalmente se presentan durante el invierno, mientras que las de altura suelen presen-



Figura 7.4 Imagen del 16 de febrero de 2009 a las 17:20 horas, este día se presentó una inversión de altura acompañada por radiación solar intensa. La presencia de bruma blanquecina se debe a la luz dispersada por los aerosoles secundarios producidos por la actividad fotoquímica en la atmósfera. A esta hora los niveles de ozono registraron una concentración máxima de 0.130 ppm en la estación Pedregal y la concentración de  $PM_{2.5}$  en la zona centro fue de  $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

tarse en los meses de la temporada seca-caliente (marzo-mayo) y son provocadas por la presencia de sistemas de alta presión. Las mayores concentraciones de ozono y aerosoles secundarios se registran generalmente en días con presencia de inversiones de subsidencia. La Figura 7.4 presenta una imagen obtenida el día 16 de febrero durante un episodio con inversión de altura localizada a 2200 metros, donde la falta de dispersión y la intensa radiación

solar favorecieron la producción de aerosoles orgánicos secundarios, que dispersan la luz dando un tono blanquecino a la bruma que se encuentra sobre la ciudad.

La información obtenida en 2009 indica que las  $PM_{2.5}$ , la humedad relativa y el dióxido de nitrógeno son los principales responsables de la disminución de la visibilidad en la Ciudad de México. La



Figura 7.5 Imagen del 23 de octubre de 2009 a las 11:10 horas con condiciones de humedad relativa elevada (mayor al 70%) y una concentración de  $PM_{2.5}$  de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . La visibilidad es menor a 5 km.

dispersión de la luz por las partículas es la causa dominante de la reducción en la visibilidad, ya que en el proceso son más eficientes que los gases, sin embargo, no todos los tamaños de partículas dispersan la luz uniformemente en todas las direcciones, las partículas con diámetros iguales o mayores a la longitud de onda de la luz visible tienen mayor capacidad para dispersar y lo hacen preferentemente hacia adelante, por lo que la bruma es brillante cuando el sol se encuentra frente al observador y

oscura cuando el sol se encuentra detrás del observador. Estas partículas son las responsables de que la vista hacia el horizonte tenga una apariencia blanquecina.

Por otra parte, algunas partículas absorben agua, particularmente aquellas que contienen sulfatos y nitratos. A medida que aumenta la humedad relativa las partículas crecen en diámetro y en la misma medida se incrementa su habilidad para dispersar

la luz. La presencia en la atmósfera de partículas higroscópicas incrementa la probabilidad de reducir la visibilidad, intensificando el problema en una atmósfera contaminada (Figura 7.5).

A diferencia de la dispersión de la luz, la absorción resulta en la pérdida de luz visible, ya que la luz absorbida se convierte en calor (energía de longitud de onda larga). En términos de visibilidad, la absorción de luz provoca el oscurecimiento y la decoloración de la atmósfera. Solamente las partículas coloridas y los gases pueden absorber la luz y la mayor parte de los gases en la atmósfera son transparentes, con excepción del dióxido de nitró-

geno ( $\text{NO}_2$ ) que absorbe principalmente la luz azul y cuando se encuentra en altas concentraciones provoca en el aire un tinte café, rojo o amarillo. La mayoría de las partículas son ligeramente coloridas y varían en color excepto el carbón negro, ya que este absorbe fuertemente la luz en todas las longitudes de onda y cuando se encuentra presente en el aire en altas concentraciones le da un tono oscuro.

Durante 2009 se observó que el 72% de las horas diurnas (entre las 7:00 y las 19:00) registran una condición “mala” de visibilidad (menor o igual a 10 km) y el 61% de estas horas presentaron “pésimo”

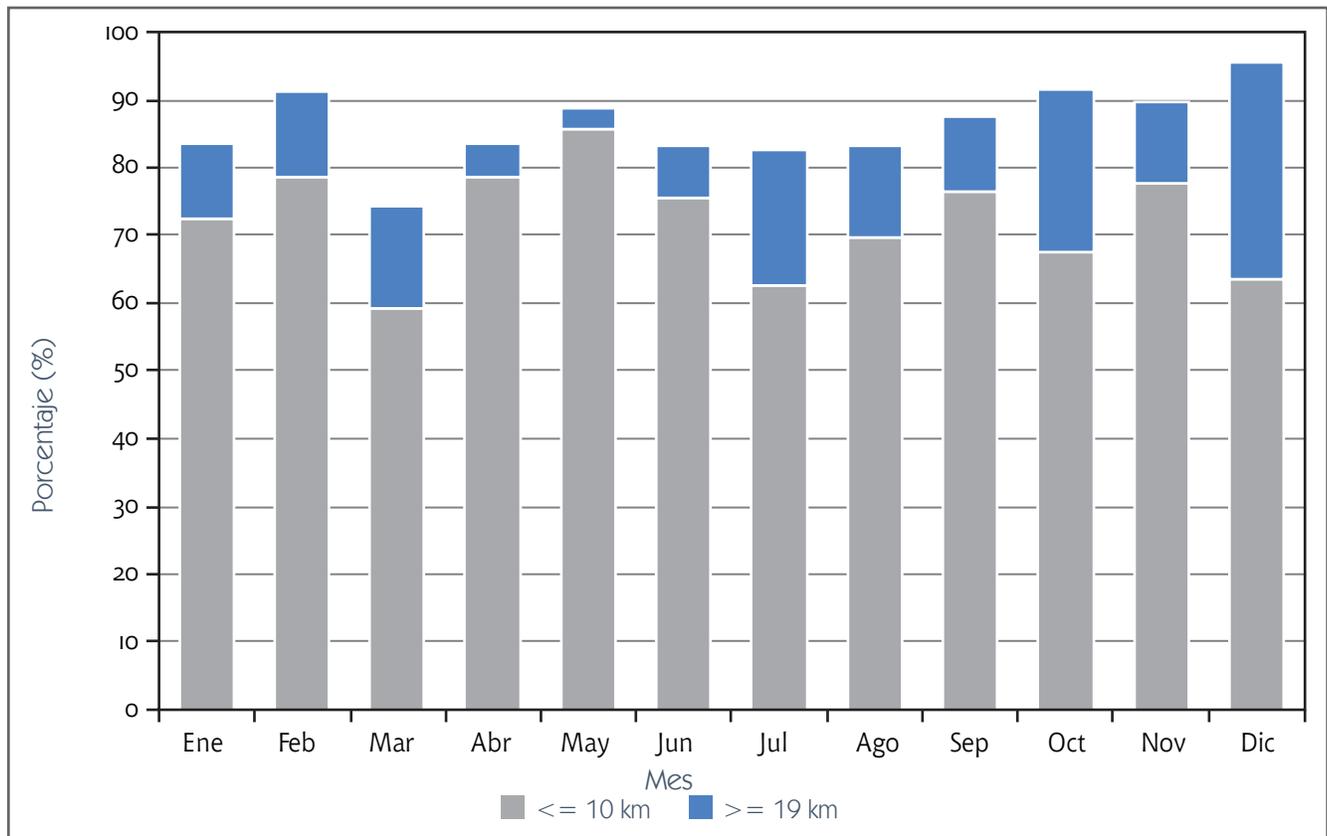


Figura 7.6 Distribución mensual del porcentaje de horas con visibilidad mala (menor o igual a 10 km) y buena (mayor o igual a 19 km).

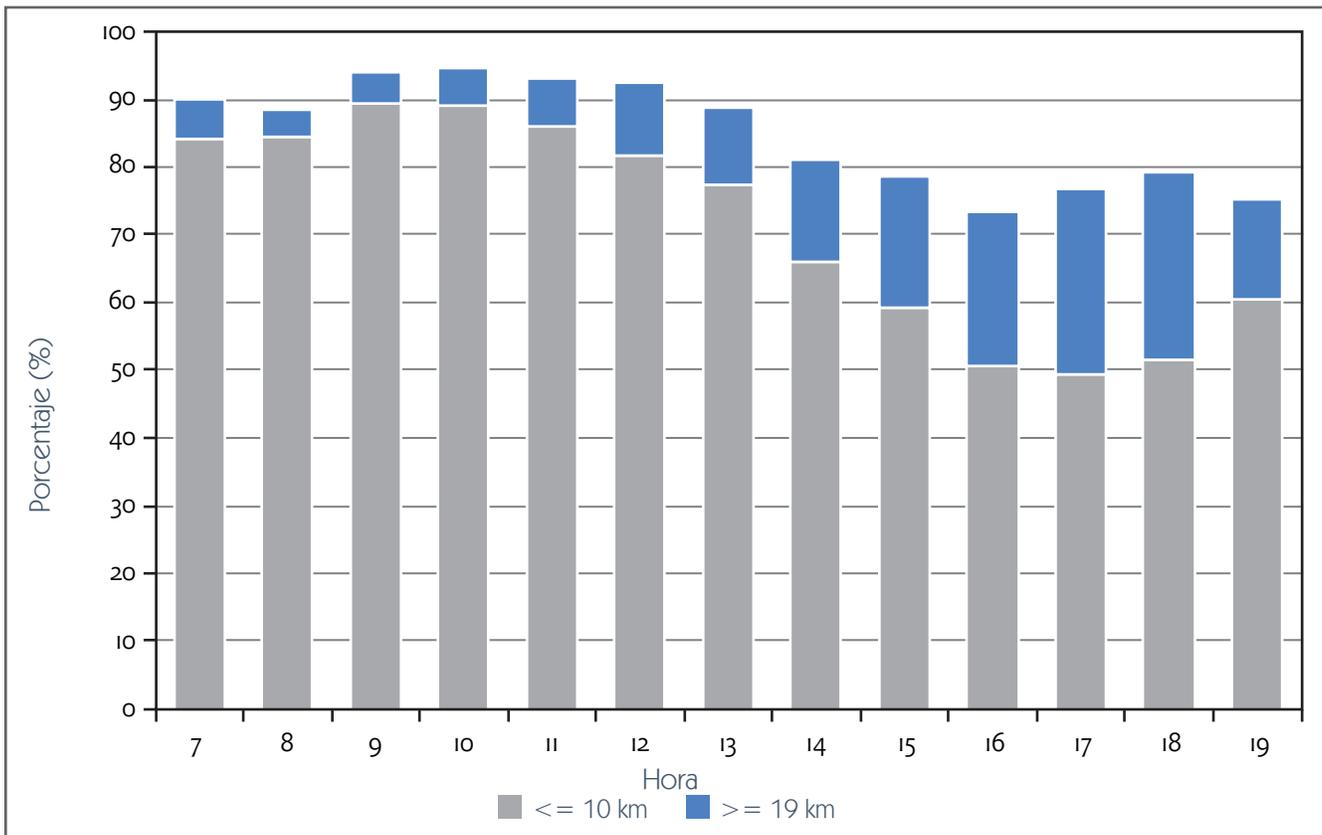


Figura 7.7 Distribución del porcentaje de visibilidad mala (igual o menor a 10 km) y buena (igual o mayor a 19 km), por hora del día.

ma” visibilidad con menos de 4 km. Únicamente el 13% de horas se pueden clasificar con visibilidad “buena” (mayor o igual a 19 km) y el 15% restante se clasifica con una visibilidad “regular” entre 11 km y 18 km. El mayor número de horas con “buena” visibilidad se observó en diciembre con más del 30% de las horas. El mes de mayo fue el mes con la peor visibilidad con sólo el 3% de las horas (Figura 7.6).

En la Ciudad de México, la mejor condición de visibilidad se presenta entre las 16:00 y las 18:00 horas, cuando el viento ayuda a dispersar los contaminantes del aire y las emisiones disminuyen.

Durante el día, la mejor visibilidad se presenta entre las 17:00 y 18:00 horas cuando los vientos de la tarde han favorecido la dispersión de contami-

nantes y la emisión de estos disminuye significativamente. En las primeras horas de la mañana, entre las 7:00 y las 11:00 horas, se registra la peor visibilidad (Figura 7.7).

Para ejemplificar la relación que existe entre la contaminación del aire, la humedad relativa y la visibilidad en las Figuras 7.8 a 7.12 se presentan cinco secuencias en donde se analiza la condición de la visibilidad durante el día, junto con el comportamiento de los componentes del aire responsables de su deterioro.

Figura 7.8 Ejemplo de un día con una condición mala de visibilidad durante la mañana, provocada por un alto porcentaje de humedad relativa y altas concentraciones de  $PM_{2.5}$  y dióxido de nitrógeno, no obstante por la tarde la visibilidad mejora. La secuencia de imágenes corresponde al día 25 de diciembre de 2009.

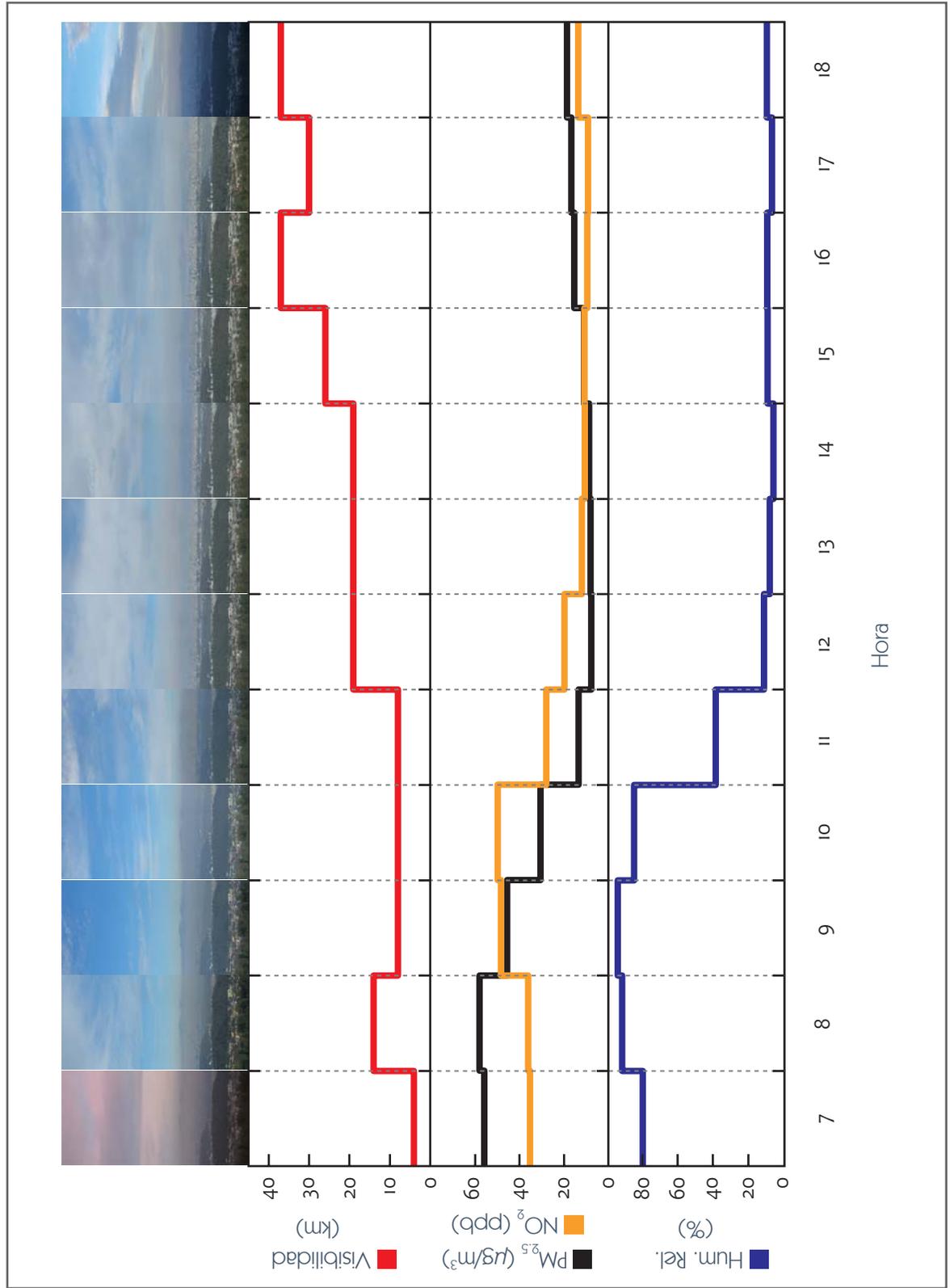


Figura 7.9 Ejemplo de un día con una condición mala de visibilidad durante todo el día, provocada por la humedad relativa. Ese día las concentraciones de  $PM_{2.5}$  y dióxido de nitrógeno no contribuyen de manera significativa al deterioro de la visibilidad. La secuencia de imágenes corresponde al día 31 de octubre de 2009.

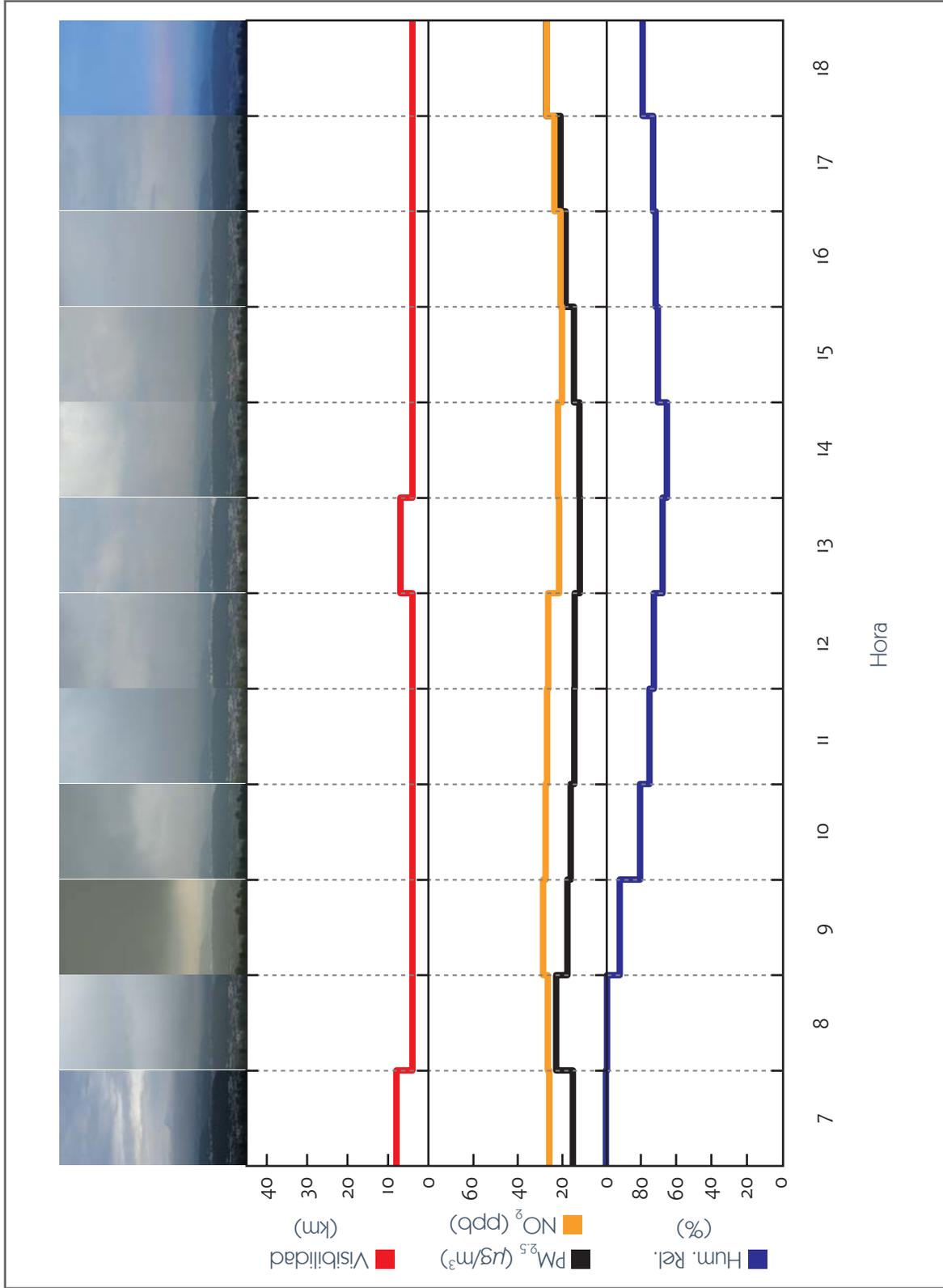


Figura 7.10 Ejemplo de un día con una condición mala de visibilidad provocada por altas concentraciones de  $PM_{2.5}$ . La contribución de la humedad relativa es importante por la mañana y disminuye antes del mediodía. La secuencia de imágenes corresponde al día 10 de mayo de 2009.

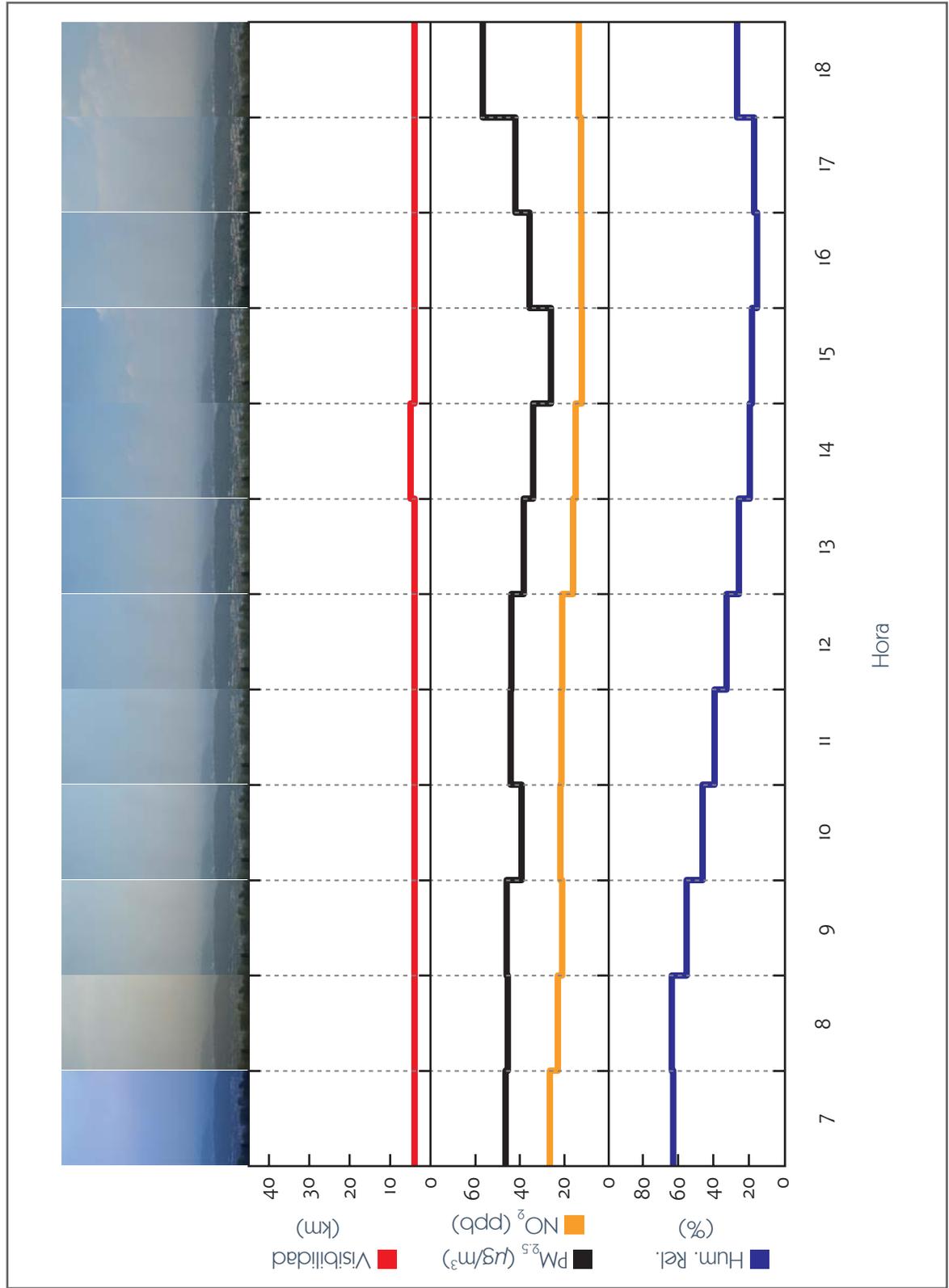


Figura 7.11 Ejemplo de un día con una condición buena de visibilidad, la humedad relativa disminuye en las primeras horas de la mañana, al igual que las concentraciones de  $PM_{2.5}$  y dióxido de nitrógeno. Después de las 12:00 las condiciones de visibilidad son óptimas. La secuencia de imágenes corresponde al día 8 de octubre de 2009.

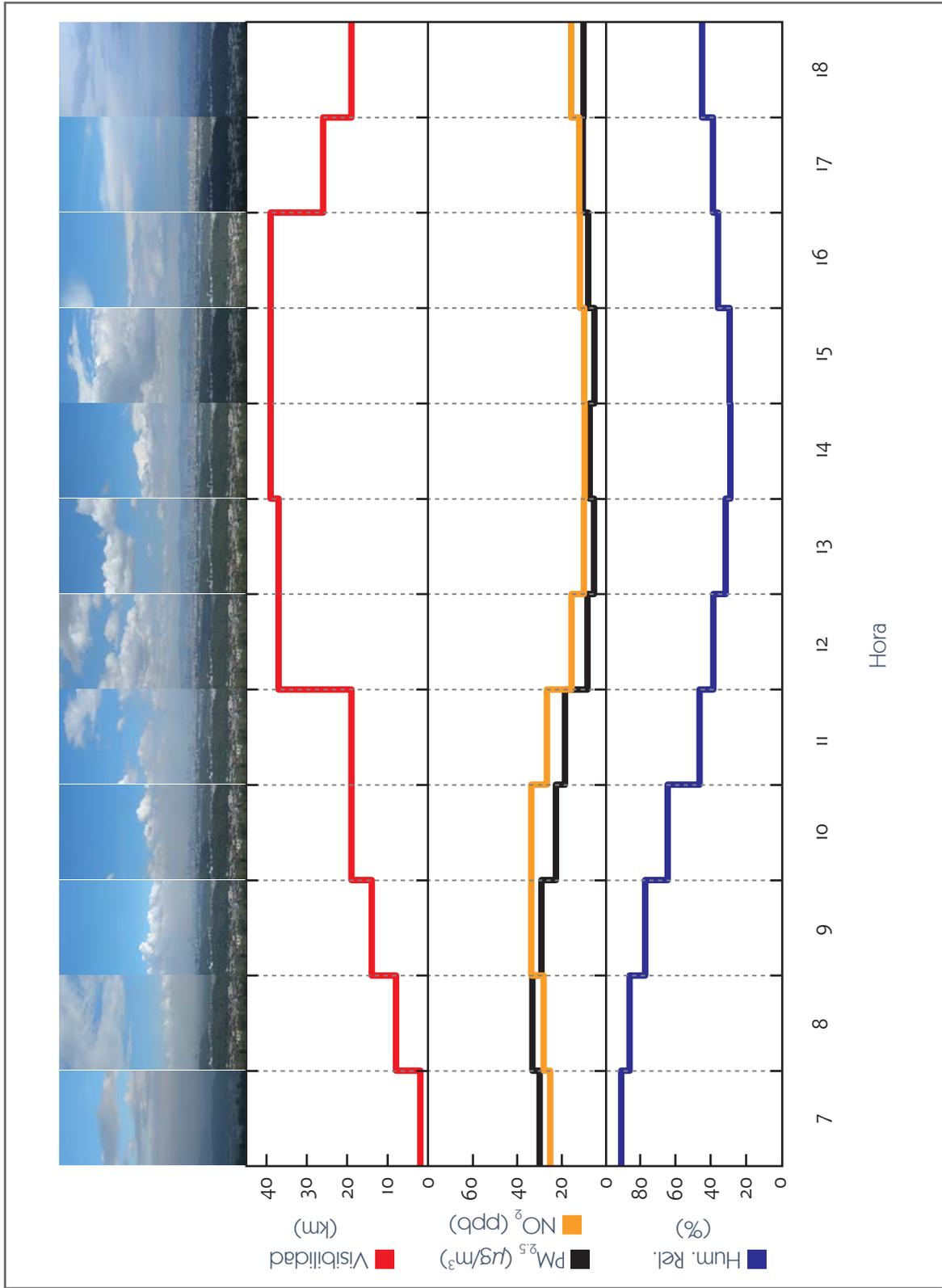
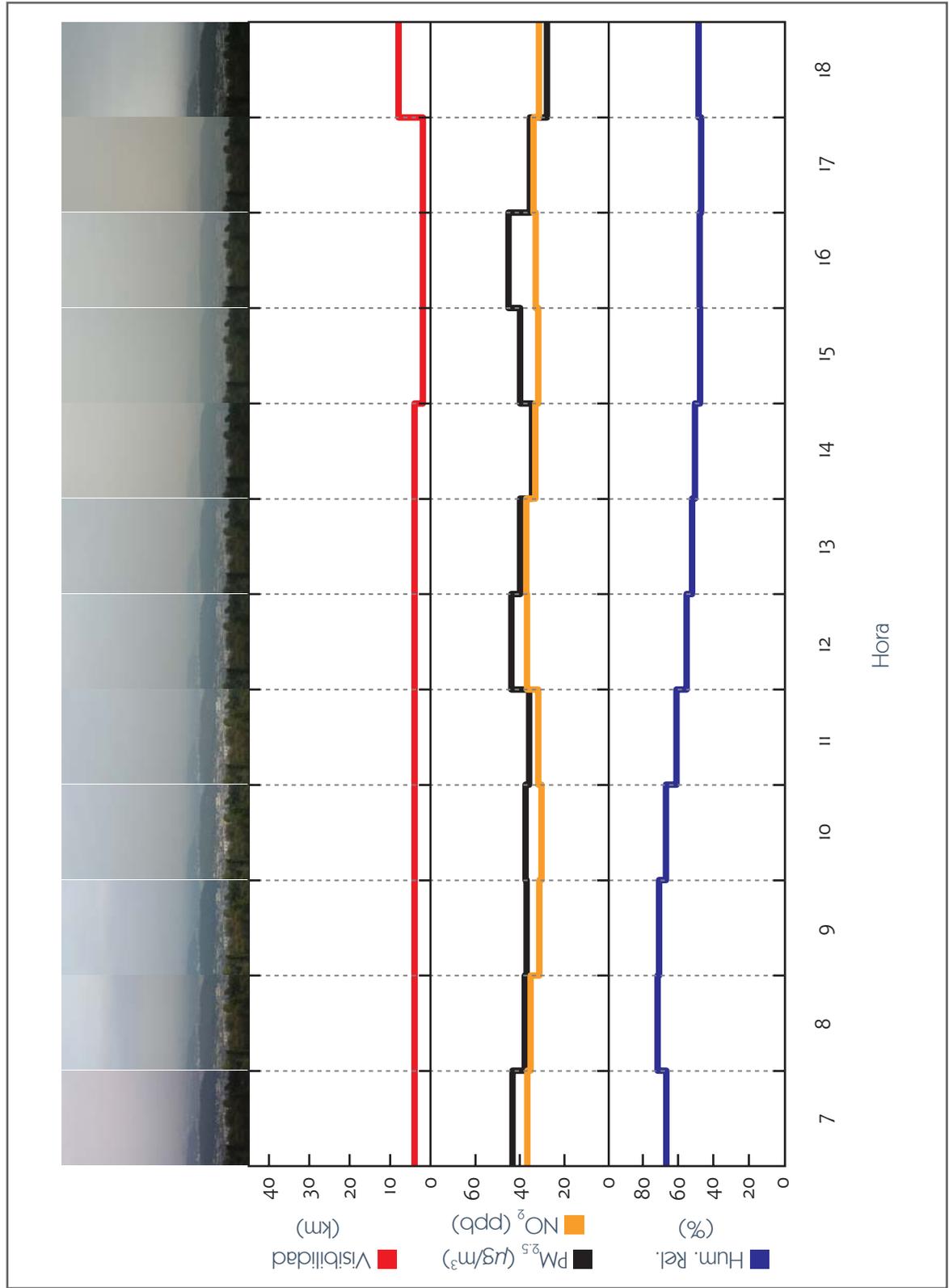


Figura 7.12 Ejemplo de un día con una condición mala de visibilidad provocada por altas concentraciones de  $PM_{2.5}$  y dióxido de nitrógeno. La presencia de dióxido de nitrógeno otorga un tinte pajizo en algunas de las imágenes. La contribución de la humedad relativa es importante por la mañana y disminuye ligeramente por la tarde. La secuencia de imágenes corresponde al día 30 de enero de 2009.







# DEPÓSITO ATMOSFÉRICO Y LLUVIA ÁCIDA

---



El depósito atmosférico es el proceso mediante el cual las partículas y gases contaminantes del aire llegan a la superficie de la tierra. Si ocurre en presencia de precipitación pluvial (lluvia, llovizna, granizo, nieve, etc.) se denomina depósito húmedo, si se deposita a través de procesos como la sedimentación, la impactación y la adsorción, se denomina depósito seco.

Para caracterizar la acidez de las precipitaciones se usa la escala de pH que indica la concentración de iones hidrógeno ( $H^+$ ) responsables de la acidez. En condiciones naturales el agua de lluvia es ligeramente ácida y tiene un pH de 5.6, esta acidez se debe al dióxido de carbono que se encuentra en la atmósfera y que reacciona con el agua para formar ácido carbónico. Cuando el depósito húmedo tiene una mayor acidez el valor de pH es menor a 5.6 y se considera como precipitación ácida o lluvia ácida.

El incremento de la acidez en el agua de lluvia se debe, principalmente, a reacciones químicas en la atmósfera de los óxidos de azufre y los óxidos de nitrógeno emitidos durante la combustión, en presencia de agua. Los precursores de la lluvia ácida pueden viajar cientos de kilómetros desde las fuentes de emisión y provocar gran variedad de impactos en una amplia región geográfica (US Environmental Protection Agency, 2010).

En ecosistemas terrestres y acuáticos, la lluvia ácida puede ocasionar la declinación de especies, no obstante, esto también depende del tiempo de exposición y del nivel de sensibilidad. En la vegetación puede causar daños directos como pérdida de nutrientes foliares y necrosis en hojas y tejidos reproductores, lo que conduce al debilitamiento de la planta, pérdida de frutos y descenso en la productividad, sin embargo, los efectos indirectos pueden ser mayores. La acidificación progresiva del suelo origina la pérdida de cationes básicos y acumulación de aluminio, inhibiendo la fijación de nitrógeno en leguminosas, la biodisponibilidad de fosfatos y el crecimiento de las raíces. Esto conduce a la defoliación, clorosis y debilitamiento generalizado de la planta, haciéndola vulnerable al ataque de plagas, enfermedades, sequías u otros contaminantes. La degradación del suelo, también se manifiesta en aguas superficiales y mantos freáticos a través de procesos de acidificación, eutrofización y acumulación de metales tóxicos como el aluminio, que ocasionan la muerte progresiva de organismos acuáticos (Krupa, 1999; Larssen et al., 2006; Pérez et al., 2006, US Environmental Protection Agency, 2010).

En la Ciudad de México, existen alrededor de 88 mil hectáreas que corresponden a suelo de conservación ecológica (Figura 8.1) y que año con año se ven



Fotografía de la página anterior: Imagen obtenida por la Hazecam el día 12 de abril de 2009 a las 19:50 horas. La imagen ofrece una interesante combinación de efectos entre la luz y la lluvia, que le dan al cielo una apariencia de pinceladas de tonos rojizos sobre un lienzo gris. Este efecto se debe a la interacción de los tonos rojos del atardecer con los tonos oscuros que produce la absorción de la luz en las grandes gotas de agua de las nubes y la lluvia.

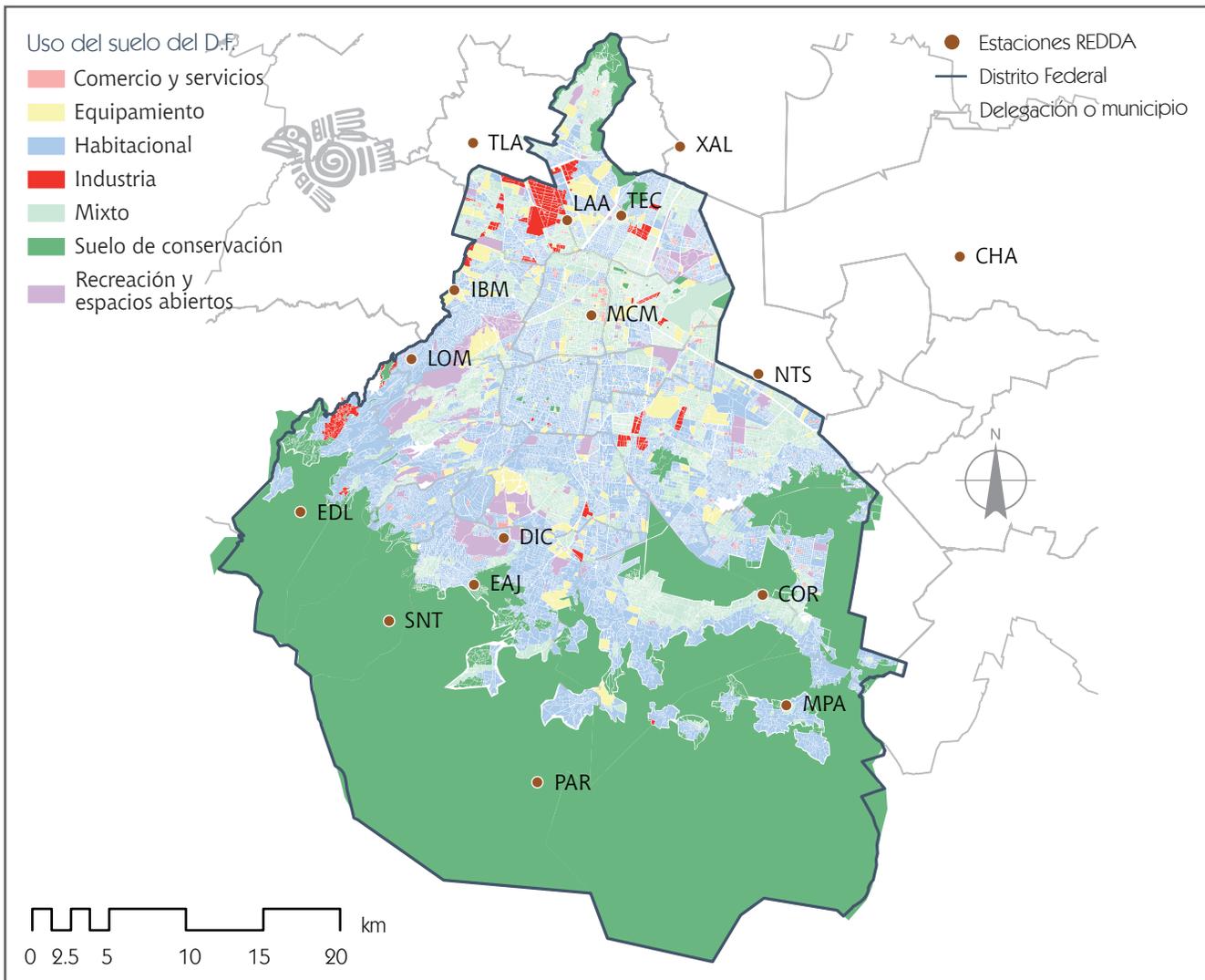


Figura 8.1 Uso del suelo en el Distrito Federal para el año 2000. Fuente: PNUMA, SMA y CENTRO GEO, 2003.

afectadas por la lluvia ácida. De estas 88 mil hectáreas el 34.6% es de uso forestal, el 35.6% corresponde a uso agrícola, el 16.2% a pastizales y matorrales, el 10.3% está dedicado a usos urbanos (poblados rurales o asentamientos urbanos) y el 0.01% corresponde a humedales y vegetación subacuática. Los tipos de suelos que predominan son los andosoles, litosoles, feozems, regosoles, solonchaks y gleysoles, y las principales especies vegetales establecidas

en suelo de conservación son pino, oyamel, encino, aile, matorrales, pastizales, halófitas, vegetación acuática y subacuática, y cultivos agrícolas; de los cuales, en el año agrícola 2008, el 80% de la superficie sembrada correspondió a cultivos cíclicos (avena forrajera achicalada, maíz, brócoli, romeros, papa y flores) y el 20% a cultivos perennes (nopales, alfalfa, manzana, árbol de navidad y rosa) (Hernández y Bauer, 1989; Instituto Nacional de

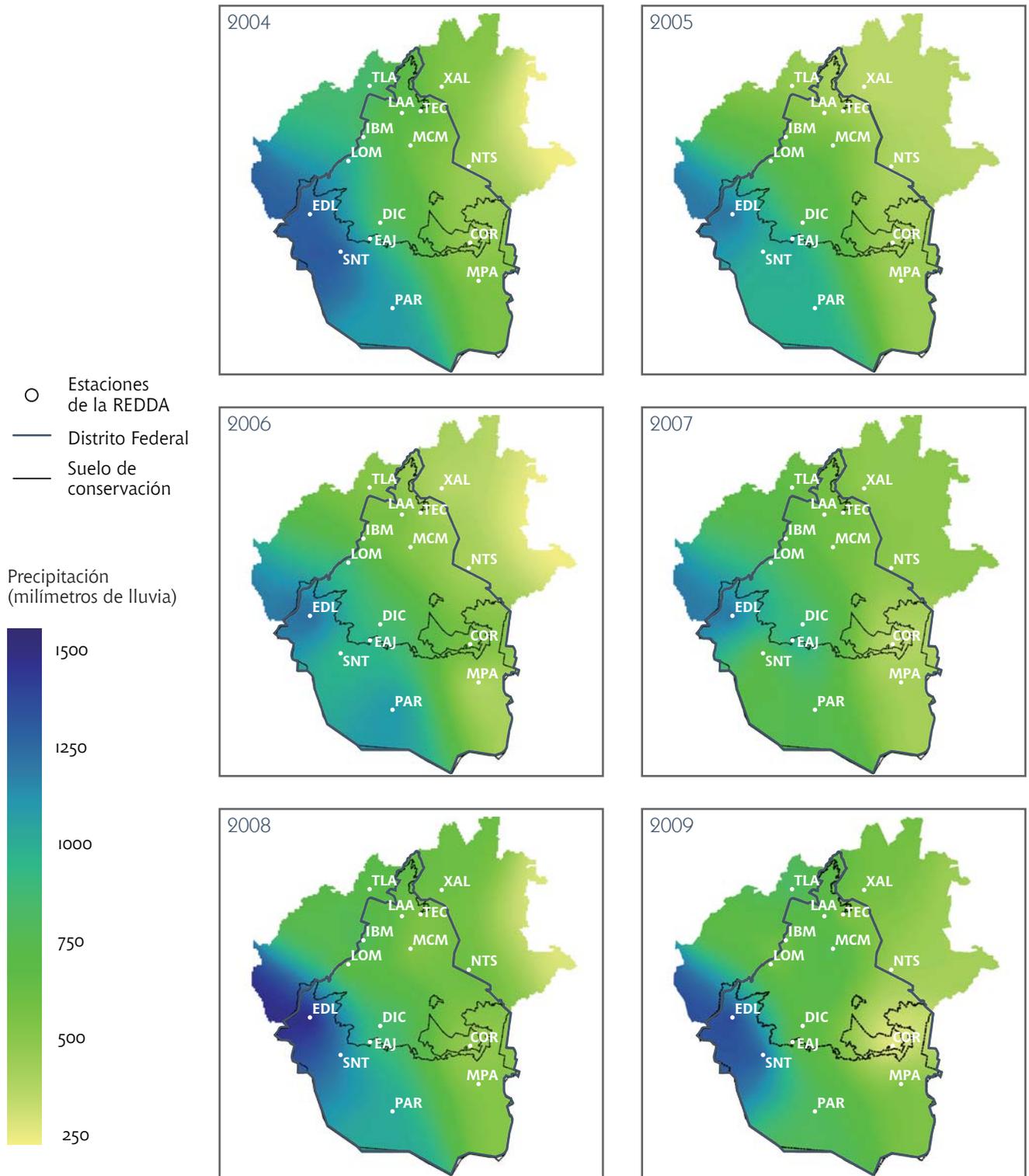


Figura 8.2 Distribución espacial de la precipitación pluvial durante la temporada de lluvias de los años 2004 a 2009.

Estadística Geografía e Informática 2009; Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente *et al.*, 2003; Secretaría del Medio Ambiente, 2000).

En lo que respecta a materiales, la lluvia ácida afecta, principalmente, a la caliza y al mármol, que son rocas sedimentarias compuestas del mineral calcita (carbonato de calcio), el cual reacciona fácilmente con el depósito ácido para formar yeso (sulfato de calcio). En la Ciudad de México y su área metropolitana existen cientos de monumentos y construcciones con dichos materiales y muchos son catalogados como patrimonio histórico de México, entre ellos destacan el Palacio de Bellas Artes, el Hemiciclo a Juárez, el Altar de la Patria, el Monumento a la Revolución y la Catedral Metropolitana (Krupa, 1999).

La cadena montañosa al sur y poniente de la Ciudad de México está poblada por la extensión más importante de bosques naturales del Distrito Federal, y como se observa en la Figura 8.2, esta región recibe el mayor volumen de precipitación pluvial cada año, lo cual se explica porque el aire que circula con dirección predominante de noreste a suroeste, es obligado a elevarse cuando se encuentra con la barrera montañosa y se enfría conforme sube, si su humedad es suficiente, como suele ocurrir en temporada de lluvias, el vapor de agua se condensa y origina las lluvias (Chu y Lin, 2000).

En la temporada de lluvias de 2009 (junio a octubre), la estación de monitoreo Ex Convento Desierto de los Leones (EDL) acumuló el máximo de precipitación con 1227 mm de lluvia, seguida por la estación San Nicolás Totolapan (SNT) con 1144 mm, de acuerdo con los registros de la Red de Depósito Atmosférico (REDDA) del SIMAT.

En el sur y poniente de la Ciudad de México se encuentra la mayor extensión de bosques naturales y en estas zonas se registra la mayor acidez en el agua de lluvia.

Las precipitaciones en la Ciudad de México y su área metropolitana, suelen ser más ácidas en el sur y poniente que en el norte y centro (Figura 8.3), aunado a esto, la región expuesta a eventos de lluvia ácida se ha incrementado gradualmente desde 2004. Los resultados de 2009 indican que la acidez de la lluvia presentó poca variabilidad espacial con valores promedio de pH entre 4.9 y 5.6. El valor promedio más ácido se obtuvo en la estación Ecoguardas Ajusco (EAJ), localizada en la delegación Tlalpan y la muestra más ácida, con un pH de 4.3, se registró la cuarta semana de octubre en la estación Ex Convento Desierto de los Leones (EDL), ubicada en la delegación Cuajimalpa.

A pesar de que los datos de pH indican cierta homogeneidad en la distribución de la acidez, es probable que en el sur del Distrito Federal sean mayores los efectos de la lluvia ácida, ya que suele ser mayor el porcentaje de muestreos ácidos en esta región, tal es el caso de las estaciones Parres (PAR), Milpa Alta (MPA), San Nicolás Totolapan (SNT), Ecoguardas Ajusco (EAJ), CORENA (COR) y Ex Convento Desierto de los Leones (EDL), que presentaron valores ácidos en al menos una quinta parte de los muestreos (52, 40, 36, 32, 31 y 28% respectivamente). Dichas estaciones son representativas de la mayor área de conservación en la Ciudad de México, que incluye los bosques de la Sierra del Ajusco, el bosque del Desierto de los Leones y las zonas agrícolas del Ajusco, Milpa Alta y Xochimilco.

En las Figuras 8.4 y 8.5 se muestra la distribución espacial del depósito húmedo de sulfatos y nitratos para las temporadas de lluvia de 2004 a 2009. El patrón general presenta un gradiente con valores altos en el suroeste y bajos en el noreste, similar al

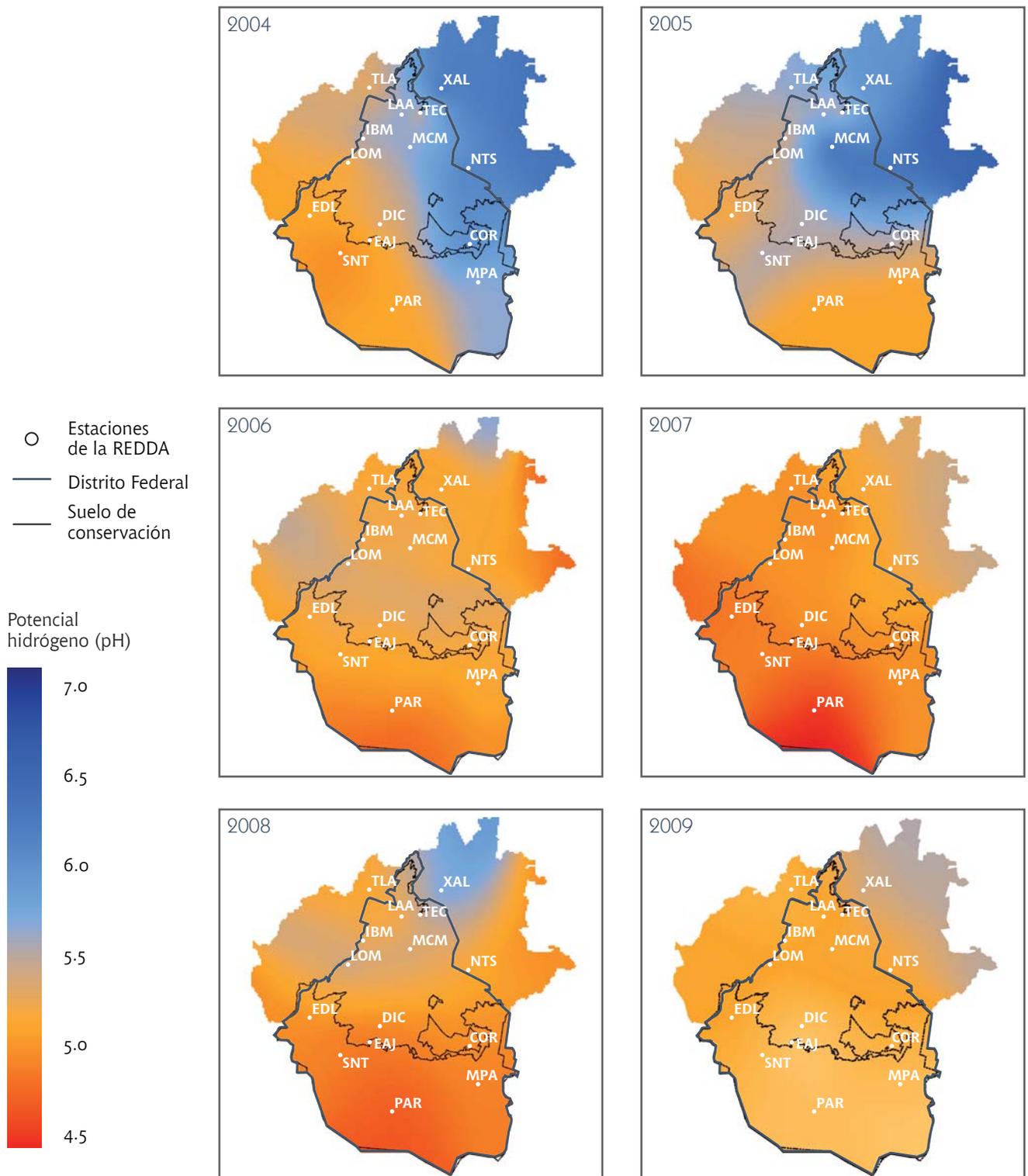


Figura 8.3 Distribución espacial de la acidez de las precipitaciones pluviales para los años 2004 a 2009.

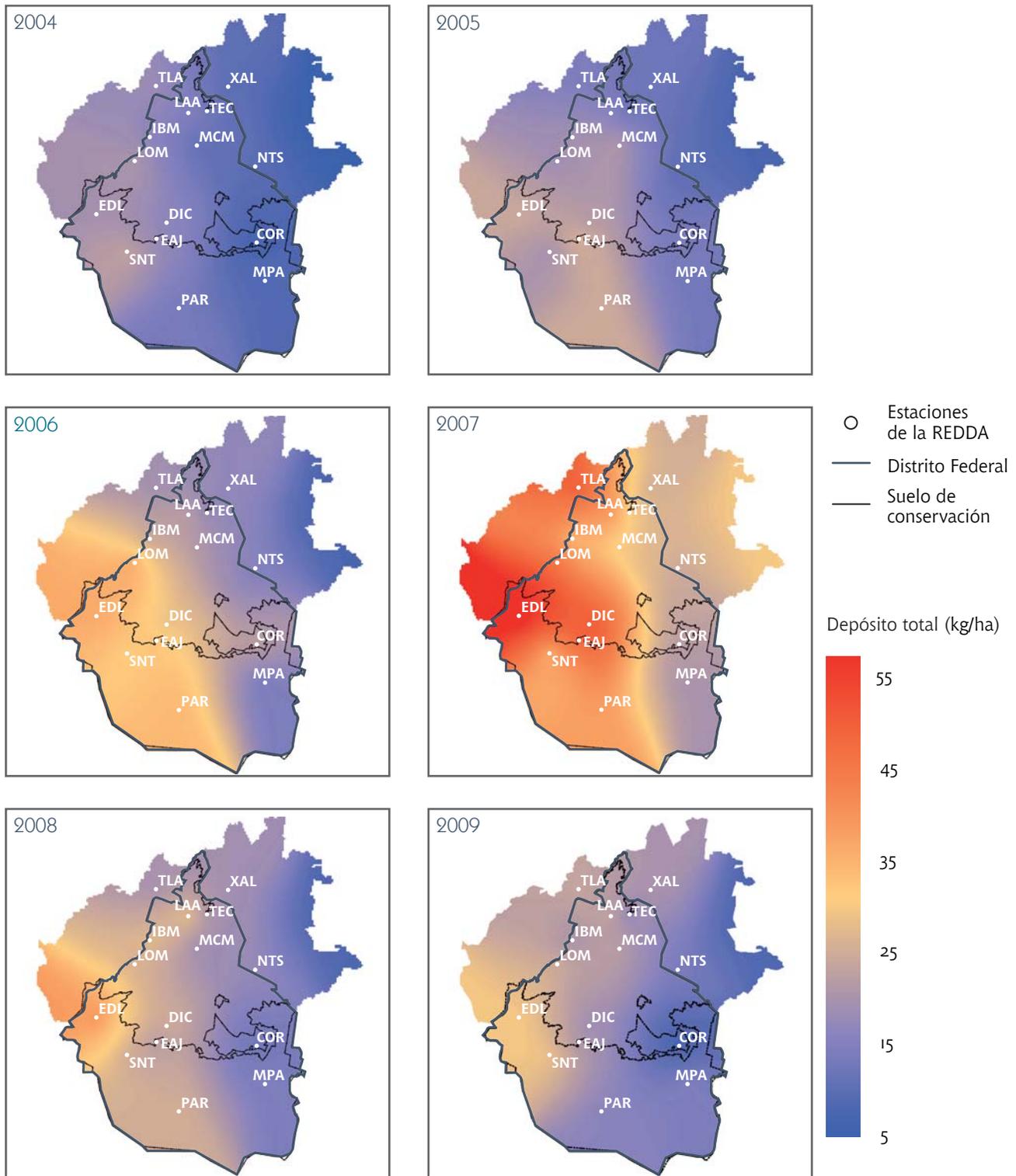


Figura 8.4 Distribución espacial del depósito total de sulfatos ( $SO_4^{2-}$ ) en el depósito húmedo para los años 2004 a 2009.

# DEPÓSITO ATMOSFÉRICO Y LLUVIA ÁCIDA

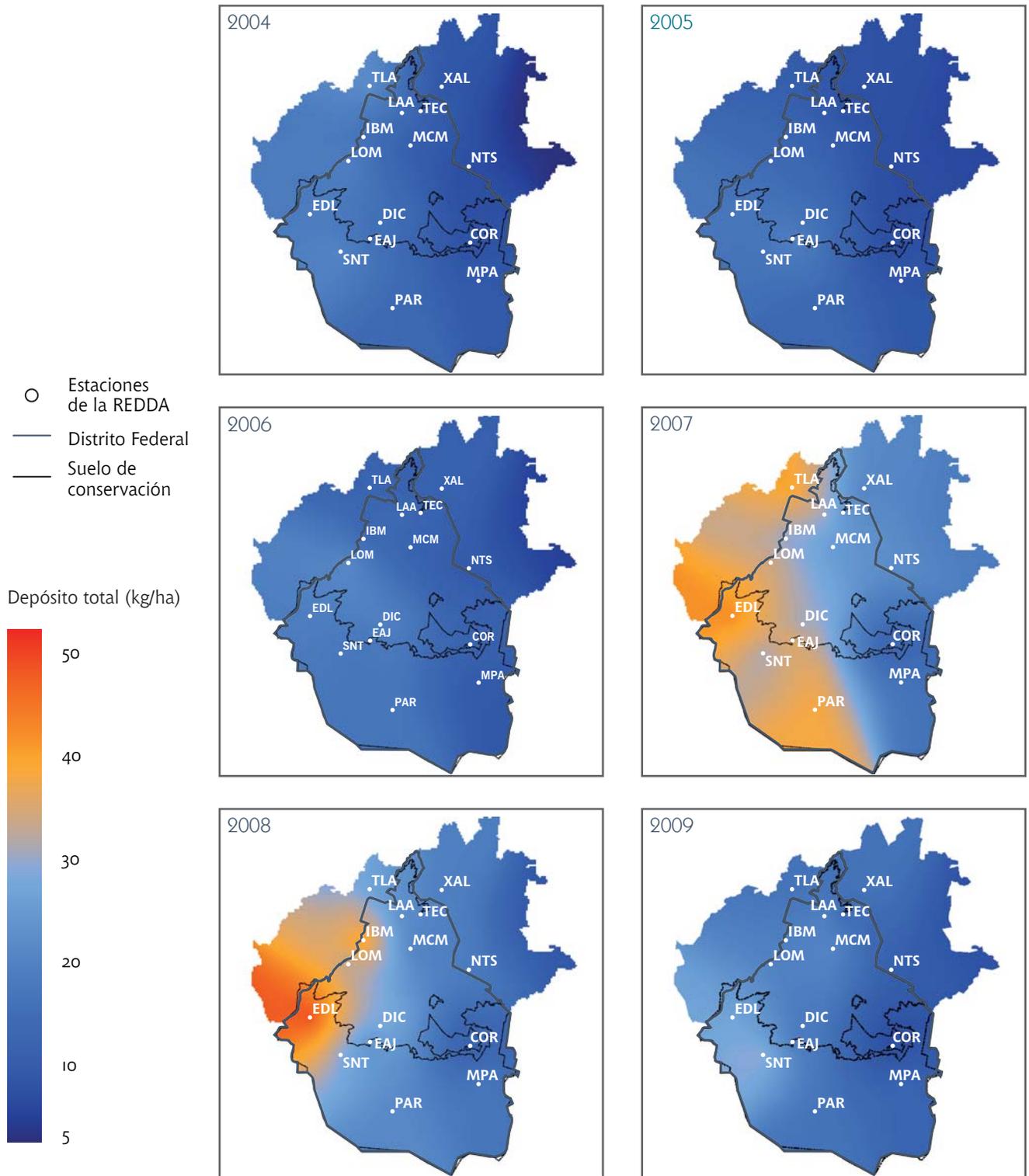


Figura 8.5 Distribución espacial del depósito total de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) en el depósito húmedo para los años 2004 a 2009.

patrón de la precipitación pluvial. Esto se explica porque los óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ) y de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) generados por la quema de combustibles fósiles en la zona urbana e industrial, pueden ser transportados varios kilómetros en la dirección del viento predominante, antes de que concluyan las reacciones químicas que dan origen a la acidez de las precipitaciones y finalmente se depositen en forma de sulfatos y nitratos. De ahí que la acidez del agua de lluvia se correlacione con la cantidad de sulfatos y nitratos. El tiempo medio de permanencia en la atmósfera para el dióxido de

azufre ( $\text{SO}_2$ ) es de un día, mientras que el estimado para óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), es de uno a cuatro días (Wallace y Hobbs, 2006). Debido a este tiempo de vida relativamente corto, los efectos de la

lluvia ácida se circunscriben a una escala local o regional, pero no a una global.

Los cambios en la distribución espacial del depósito húmedo, indican que el poniente y sur del Distrito Federal son las regiones más afectadas, ya que reciben la mayor cantidad de sulfatos y nitratos año con año. En la temporada de lluvias 2009, el depósito total de sul-

*Durante el mes de septiembre de 2009, se registró la mayor cantidad de lluvia en la Ciudad de México y en la primera semana de este mes, se presentaron los valores máximos de acidez, sulfatos y nitratos.*

las regiones más afectadas, ya que reciben la mayor cantidad de sulfatos y nitratos año con año. En la temporada de lluvias 2009, el depósito total de sul-

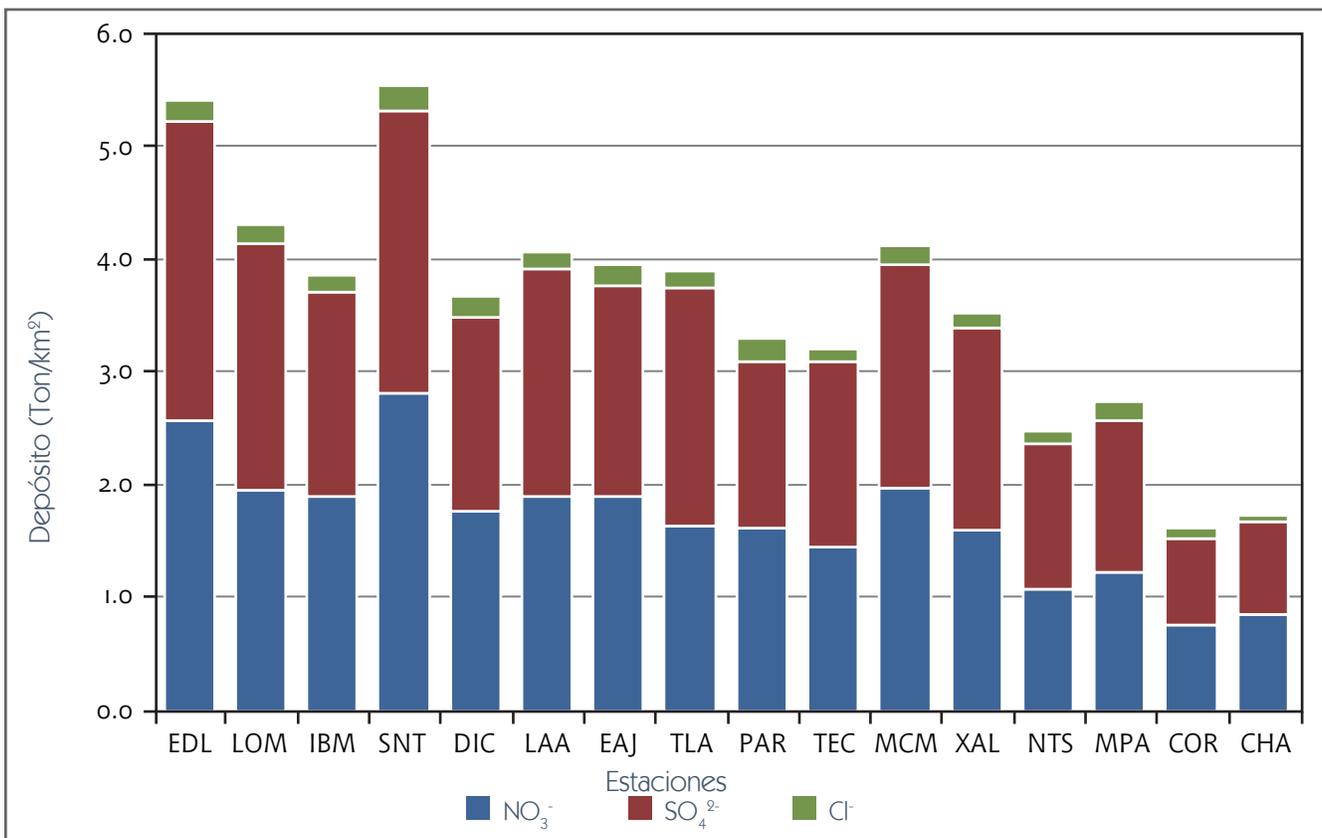


Figura 8.6 Depósito total de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) durante la temporada de lluvias de 2009.

datos fue mayor en la estación Ex Convento Desierto de los Leones (EDL), con 26.4 kilogramos por hectárea (kg/ha), mientras que el depósito total de nitratos fue mayor en la estación San Nicolás Totolapan (SNT), con 28.2 kg/ha. Estos valores equivalen a 8.8 y 6.4 kg/ha de azufre y nitrógeno, respectivamente, y son mayores a lo reportado en Estados Unidos para 2008. En ese año el depósito máximo de azufre fue de 8.7 kg/ha en Ohio y el depósito máximo de nitrógeno fue de 3.6 kg/ha en Indiana, Nueva York y Massachusetts (*National Atmospheric Deposition Program, 2009; US Environmental Protection Agency, 2010*).

Los datos de 2009 indican que la mayoría de las estaciones de monitoreo presentaron su máximo

de acidez y de depósito húmedo (sulfatos y nitratos) en la primera semana de septiembre, cuando el paso de una onda tropical originó las lluvias de mayor intensidad en prácticamente toda la Ciudad de México y su área metropolitana.

Además del análisis de sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), en las muestras de depósito húmedo se determina la concentración de iones: cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), sodio ( $\text{Na}^+$ ) y potasio ( $\text{K}^+$ ). La presencia de estos iones en el agua de lluvia es producto de la contribución de diferentes fuentes de contaminación, de los procesos de transformación y del transporte en la atmósfera. Los resultados proporcionan infor-

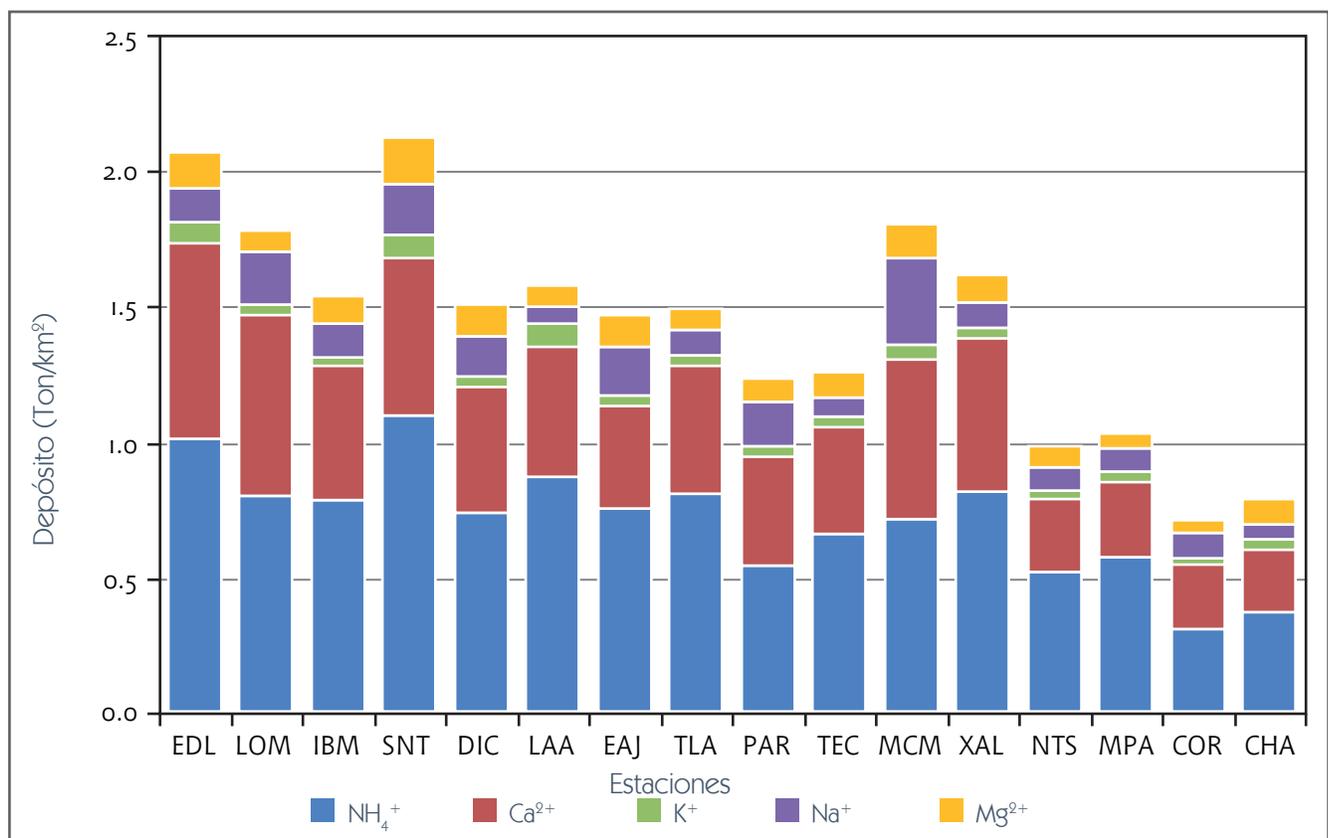


Figura 8.7 Depósito total de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ), sodio ( $\text{Na}^+$ ) y magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) durante la temporada de lluvias de 2009.

mación importante para la identificación de fuentes y mejorar el conocimiento sobre la dinámica atmosférica regional. La composición de las precipitaciones también proporciona información para entender los procesos de acidificación en suelos y aguas, ya que el valor del pH es resultado del balance que existe entre los componentes.

En las Figuras 8.6 y 8.7 se reporta el depósito húmedo por especie química y por sitio de muestreo durante la época de lluvias de 2009. En general, la contribución fue mayor en las estaciones San Nicolás Totolapan (SNT) y Ex Convento Desierto de los Leones (EDL), y menor en CORENA (COR),

Chapingo (CHA), Nezahualcóyotl Sur (NTS) y Milpa Alta (MPA).

La evolución de la acidez a partir de 1998, indica la presencia de lluvia ácida en la mayoría de los sitios de muestreo de la REDDA. El nivel de acidez fue menor entre 2003 y 2005, ya que solo el 50% de las estaciones presentaron valores ácidos de pH. A partir de 2006 predominó nuevamente la acidez en las precipitaciones de la Ciudad de México y su área metropolitana, no obstante, se aprecia un incremento en los valores mínimos de pH de 2007 a 2009, lo cual sugiere una ligera disminución del nivel de acidez (Figura 8.8).

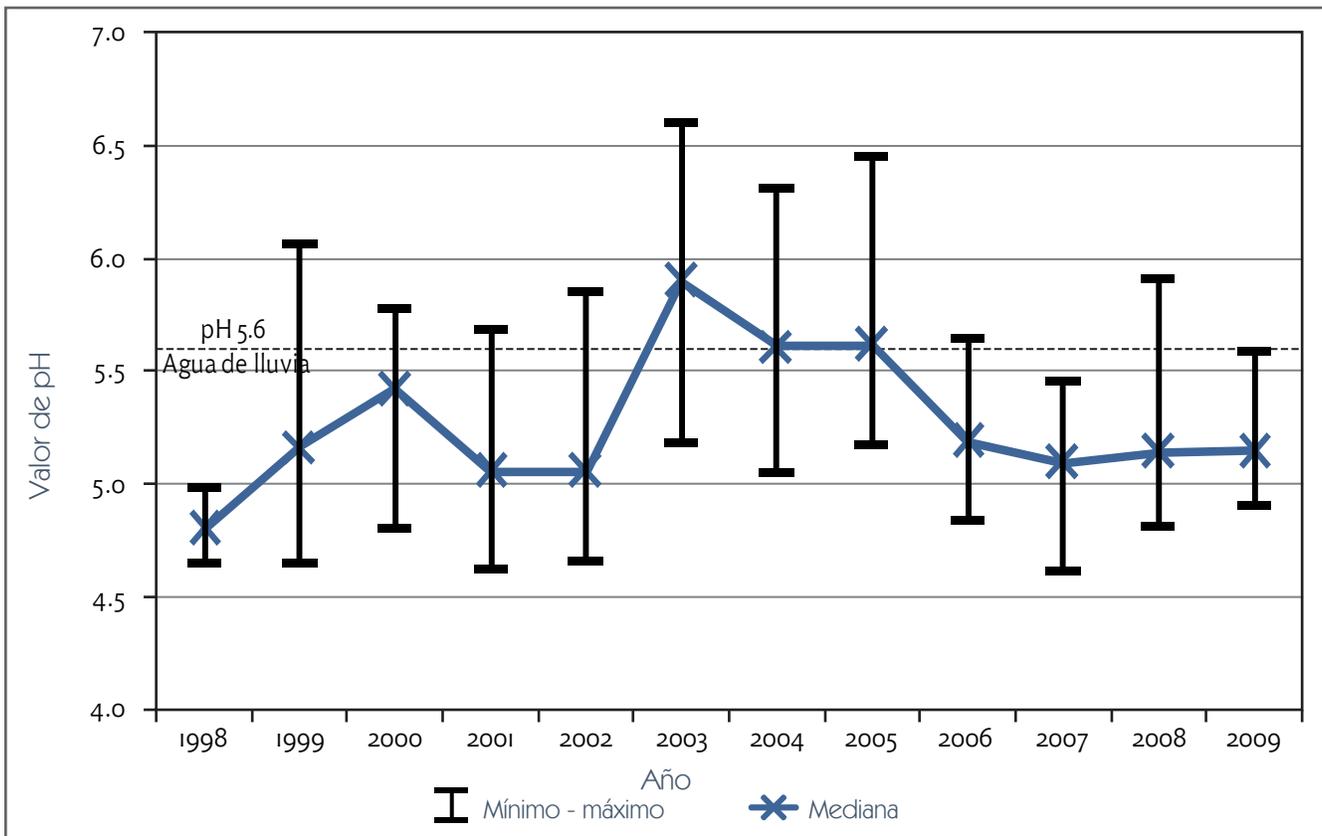


Figura 8.8 Variación de la acidez en el depósito húmedo expresada en términos de pH ponderado durante la temporada de lluvias de 1998 a 2009.

El comportamiento de la acidez del agua de lluvia se asocia con la cantidad de sulfatos y nitratos disueltos en ella. En la Figura 8.9 se observa un incremento gradual en el depósito húmedo de sulfatos a partir de 2004. El máximo se alcanzó en 2007 en la estación Ex Convento del Desierto de los Leones (EDL) con 55.34 kg/ha y a partir de 2008 presentó una disminución.

Asimismo, en la Figura 8.10 se observa un aumento en depósito de nitratos entre 2005 y 2007, con una disminución en los valores mínimo y mediana a partir de 2008. No obstante, en 2008 se obtuvo el máximo histórico de 46.2 kg/ha para la

estación Ex Convento del Desierto de los Leones (EDL).

En contraste con el aumento en la acidez de las precipitaciones y en los depósitos de sulfatos y nitratos de los últimos años, los resultados del monitoreo atmosférico indican a partir de 1992 una reducción paulatina en las concentraciones de dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y partículas suspendidas en el aire ambiente (Figuras 5.1 y 5.3 del capítulo de *Tendencia de la calidad del aire*). Para comprender este comportamiento es necesario obtener mayor información sobre las fuentes de los precursores y la dinámica atmosférica.

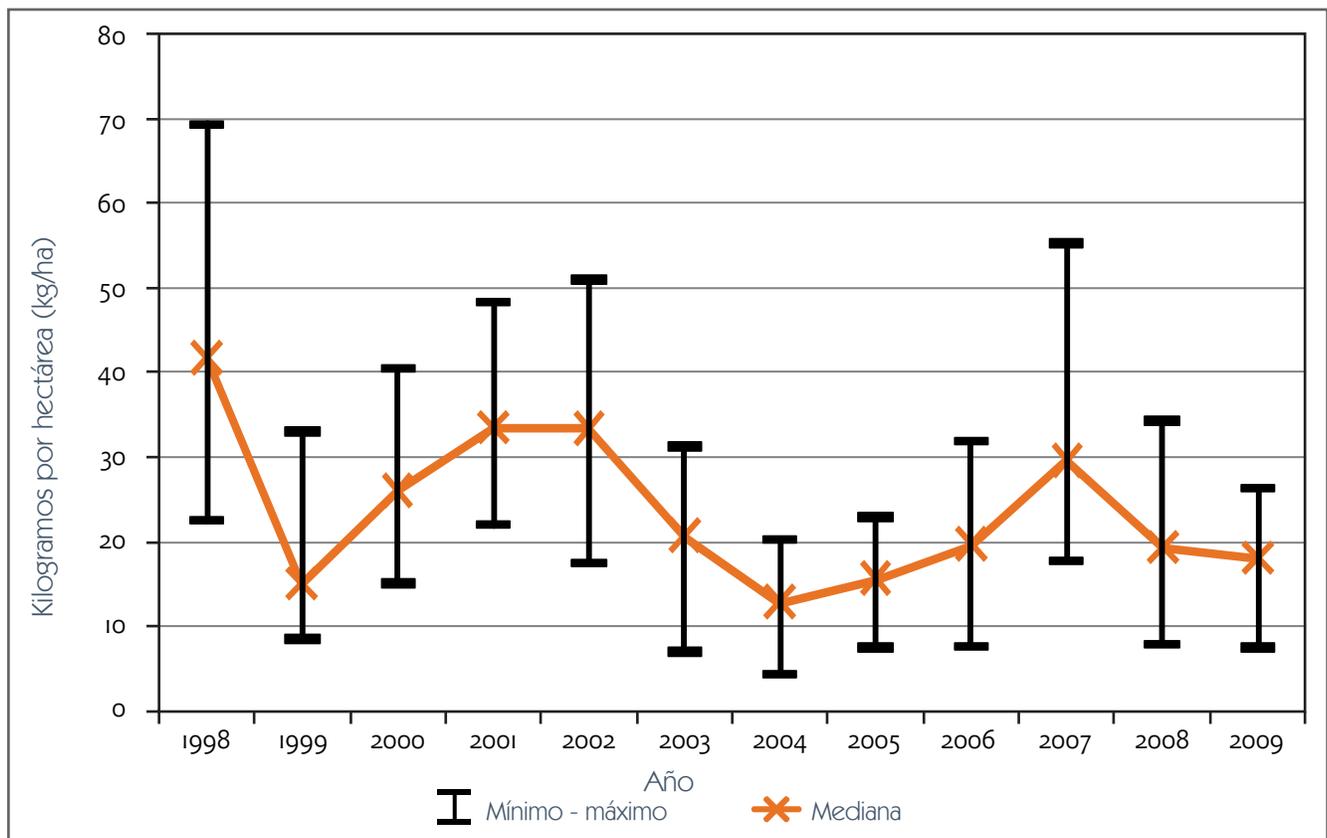


Figura 8.9 Variación del depósito húmedo de sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) durante la temporada de lluvias de 1998 a 2009.

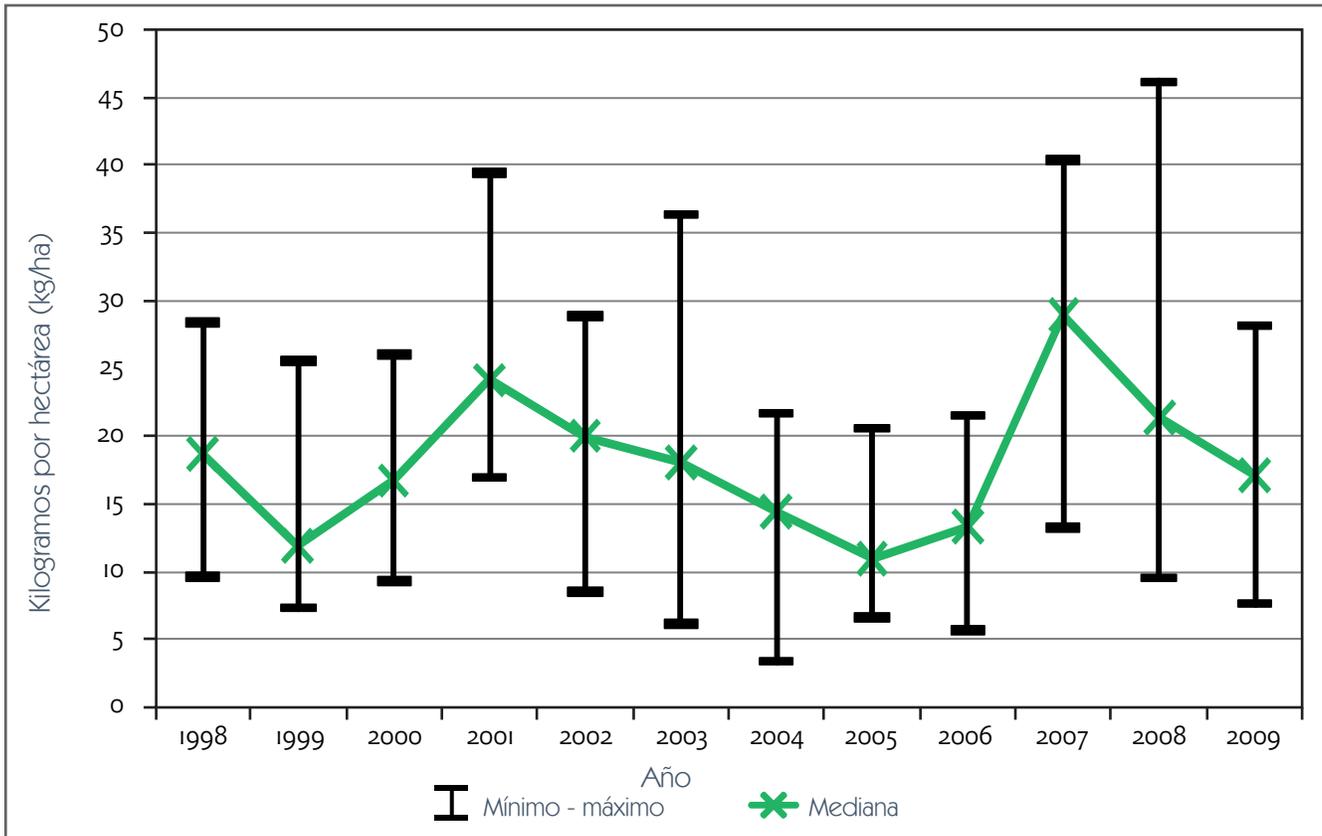


Figura 8.10 Variación del depósito húmedo de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) durante la temporada de lluvias de 1998 a 2009.



**Ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ).** Líquido corrosivo que se forma en la atmósfera de la reacción entre los óxidos de nitrógeno y el agua.

**Ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ).** Líquido corrosivo que se puede encontrar en la atmósfera en forma de gotas microscópicas, se forma de la oxidación del contaminante dióxido de azufre y su posterior reacción con el agua.

**Ácido sulfuroso ( $\text{HSO}_3$ ).** Ácido que se forma al disolverse el dióxido de azufre en agua, se puede encontrar en la lluvia ácida.

**Adsorción.** Se refiere a la retención de una sustancia sobre una superficie por atracción química o física.

**Aerosol marino.** Sustancia sólida o líquida que permanece suspendida en los gases de la atmósfera y tiene la misma composición del agua de mar (agua y cloruro sódico, sales de magnesio, calcio, potasio y sulfatos).

**Aile.** Nombre común de los árboles del género *Alnus* de la familia de las Betuláceas.

**Antioxidantes.** Son sustancias cuya acción consiste en inhibir la tasa de oxidación provocada por los radicales libres en el cuerpo humano.

**Año agrícola.** Es el periodo de 18 meses que resulta de la adición de las siembras y cosechas, comprende desde octubre del año previo hasta marzo del año siguiente.

**Asintomático.** Que no presenta síntomas de enfermedad.

**Atmósfera inestable.** Se caracteriza por la presencia de movimiento vertical y horizontal, su flujo puede ser turbulento y es favorable para la dispersión de la contaminación.

**Biomasa.** Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía. Por ejemplo, leña, carbón, gas metano, residuos agrícolas, paja, etc.

**Broncoconstricción.** Estrechamiento de las vías aéreas que provoca la disminución o bloqueo del flujo de aire.

**Bronquiolos.** En los pulmones, son las pequeñas vías aéreas en las que se dividen los bronquios y conducen hacia los alvéolos.

**Carboxihemoglobina.** Es un complejo estable que se forma de la combinación de la hemoglobina con el monóxido de carbono. Su presencia en la sangre inhibe la función de transporte de oxígeno.

**Clorosis.** Es una condición fisiológica anormal en la que el follaje no produce suficiente clorofila. Las hojas afectadas no tienen la coloración normal verde y presentan un color verde pálido, amarillo o amarillo blanquecino. Generalmente es producida por deficiencias específicas de nutrientes.

**Compuestos Orgánicos Volátiles (COV).** Se refiere a todos aquellos hidrocarburos que se encuen-

tra en forma de gas o vapor a las condiciones ambientales de la Ciudad México. Se producen durante la quema parcial de los combustibles fósiles, durante los incendios forestales y de la evaporación de solventes y combustibles. Las plantas pueden producir también este tipo de hidrocarburos y a estos se les denomina como biogénicos. Los COV al mezclarse con otros contaminantes atmosféricos forman el *smog* fotoquímico.

**Convección atmosférica.** Es el movimiento ascendente del aire provocado principalmente por el efecto de calentamiento que ocasiona la radiación solar en la superficie terrestre. Este fenómeno es responsable del comportamiento del viento y de la formación de nubes, vaguadas, ciclones, anticiclones y precipitaciones.

**Costo-beneficio.** Es una lógica o razonamiento basado en el principio de obtener los mayores y mejores resultados al menor esfuerzo invertido, tanto por eficiencia técnica como por motivación humana. Se supone que todos los hechos y actos pueden evaluarse bajo esta lógica, aquellos donde los beneficios superan el costo son exitosos, en caso contrario fracasan.

**Cultivos cíclicos.** También conocidos como anuales o de ciclo corto. La siembra se realiza en los dos ciclos del año agrícola (primavera-verano, otoño-invierno). La duración de su período vegetativo es menor a los doce meses y requieren de una nueva siembra para la obtención de la cosecha.

**Cultivos perennes.** También conocido como cultivos de ciclo largo. Su período vegetativo se extiende más allá de los doce meses y por lo regular una vez establecida la plantación, se obtienen

varias cosechas, mismas que son continuas o cíclicas, dependiendo del tipo de plantación.

**Declinación.** Es la acumulación de enfermedades en las plantas causadas por varios factores que propician el deterioro gradual de las especies hasta llegar a la muerte en un periodo más corto de lo normal.

**Difusión.** Es el proceso por el cual el oxígeno se desplaza de los alvéolos a la sangre a través de pequeños vasos sanguíneos (capilares) que recubren las paredes alveolares. Una vez en la sangre, la hemoglobina realiza el transporte de oxígeno.

**Efectos agudos.** Se refiere a los efectos en la salud provocados por la exposición de corta duración a altas concentraciones de un contaminante.

**Efectos crónicos.** Se refiere a los efectos en la salud provocados por la exposición de larga duración a concentraciones moderadas de un contaminante.

**Emisiones antropogénicas.** Se refieren a las emisiones contaminantes producidas por cualquier actividad realizada por y para el ser humano.

**Epitelio.** Es el tejido formado por una o varias capas de células unidas entre sí que recubren todas las superficies libres del organismo y constituyen el recubrimiento interno de las cavidades, órganos huecos, conductos del cuerpo y la piel, y que también forman las mucosas y las glándulas.

**Eutrofización.** Proceso normal de envejecimiento por el cual un lago evoluciona hacia el estado de ciénega o pantano, hasta alcanzar las características terrestres y desaparecer como tal.

**Exacerbación.** Agravar o avivar una enfermedad o una molestia.

**Fármaco.** Es toda sustancia química purificada utilizada en la prevención, diagnóstico y tratamiento de una enfermedad. Se emplea para evitar la aparición de un proceso fisiológico no deseado o para modificar condiciones fisiológicas con fines específicos.

**Halófitas.** Se dice de las plantas que viven en terrenos donde abundan las sales.

**HRV (heart rate variability).** Es un fenómeno fisiológico en donde se observa que el intervalo entre latidos cardíacos varía.

**Hectárea (ha).** Medida de superficie equivalente 10 000 m<sup>2</sup>.

**Hemoglobina.** Es una proteína de la sangre que se encuentra en las células sanguíneas responsables del transporte del oxígeno, desde los pulmones al resto de los tejidos.

**Impactación.** Se produce cuando las partículas transportadas por el viento inciden sobre un obstáculo, depositándose.

**Lacrimales.** Glándulas que tienen la función de producir lágrimas para mantener húmedos y limpios los ojos.

**Membrana alveolar.** Región de la pared de los alvéolos pulmonares en donde se realiza el intercambio de dióxido de carbono por oxígeno durante la respiración.

**Metano (CH<sub>4</sub>).** Hidrocarburo gaseoso inflamable e incoloro formado por un átomo de carbono y

cuatro de hidrógeno. Se produce de manera natural en cavernas profundas y minas, es emitido en los procesos de descomposición anaeróbica de materia orgánica y pantanos. Es considerado un gas de efecto invernadero.

**Metales tóxicos.** Elementos químicos del grupo de los metales que poseen cierta toxicidad y es común referirse a ellos con el término genérico de “metales pesados”. Los más conocidos son el mercurio, el plomo, el cadmio y el talio.

**Morbilidad.** Tasa de enfermedades o de discapacidad, por lo general expresada por cada 1000 habitantes.

**Mortalidad.** Tasa de defunciones por cantidad de población, por lo general expresada por cada 1000 habitantes.

**Movilidad.** Se refiere a la demanda de viajes que requiere una población creciente, considerando la infraestructura vial de avenidas y calles, así como el medio para realizar los viajes, desde el auto particular hasta el transporte público de mediana y gran capacidad.

**Nasofaringe.** Es la porción nasal de la faringe que se encuentra detrás de la nariz y por encima del paladar blando. Se comunica hacia abajo con la orofaringe y la laringofaringe y es la única de las tres cavidades que permanece permeable, es decir, continuamente abierta al aire.

**Necrosis.** Degeneración de un tejido por muerte de sus células.

**Nutrientes foliares.** Mezcla nutritiva para el follaje de las plantas.

- Oxidación.** Reacción química en la que una sustancia se combina con oxígeno. En contaminación atmosférica, un ejemplo de ello es la formación de contaminantes secundarios que se producen como consecuencia de las reacciones físicas y químicas que sufren los contaminantes primarios en la atmósfera.
- Óxido nítrico (NO).** Gas incoloro tóxico y poco soluble en agua, producido principalmente durante la combustión. En ambientes urbanos es generado mayoritariamente por automóviles y plantas de energía.
- Petajoules.** Unidad de medida de calor y energía que se utiliza para cuantificar grandes cantidades de energía y equivale a  $10^5$  joules o poco más de 277 millones de kilowatts por hora (kW/h).
- Presas de gavión.** Construcciones de piedra y malla de diferentes dimensiones, ubicadas en cerros y lechos de arroyos que permite retener agua y tierra.
- Radical hidroxilo (OH).** Es la forma neutra del ion hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ), se forma en la atmósfera de la reacción entre el oxígeno atómico con el agua. Es una molécula fundamental en muchas de las reacciones que ocurren en la atmósfera, por ejemplo en la producción de ozono y de otros contaminantes secundarios.
- Rinitis.** Es la inflamación del revestimiento mucoso de la nariz, caracterizada clínicamente por uno o más síntomas como estornudos, prurito (picor) nasal, congestión, secreción nasal.
- Sedimentación.** Proceso por el cual los sólidos de mayor densidad que el agua se asientan por gravedad, facilitando su separación y extracción.
- Subclínico.** Una afección o enfermedad que no se expresa con signos y síntomas que signifiquen sintomatología clínica detectable.
- Sustentable.** Es la capacidad de una sociedad humana de apoyar en su medio ambiente el mejoramiento continuo de la calidad de vida de sus miembros a largo plazo; la sustentabilidad de una sociedad es en función del manejo que ella haga de sus recursos naturales y pueda ser mejorada indefinidamente.
- Toxicidad.** Potencial o capacidad inherente de un material para causar efectos adversos en un organismo vivo.
- Vientos alisios.** Vientos que fluyen de manera relativamente constante en verano. Circulan entre los trópicos, entre los  $30^\circ$  a  $35^\circ$  de latitud hacia el ecuador. Se dirigen desde las altas presiones subtropicales, hacia las bajas presiones ecuatoriales. El movimiento de rotación de la Tierra desvía a los Alisios hacia el oeste, y por ello soplan del noreste al suroeste en el hemisferio norte y del sureste hacia el noroeste en el hemisferio sur.

## ANEXO A. SISTEMA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

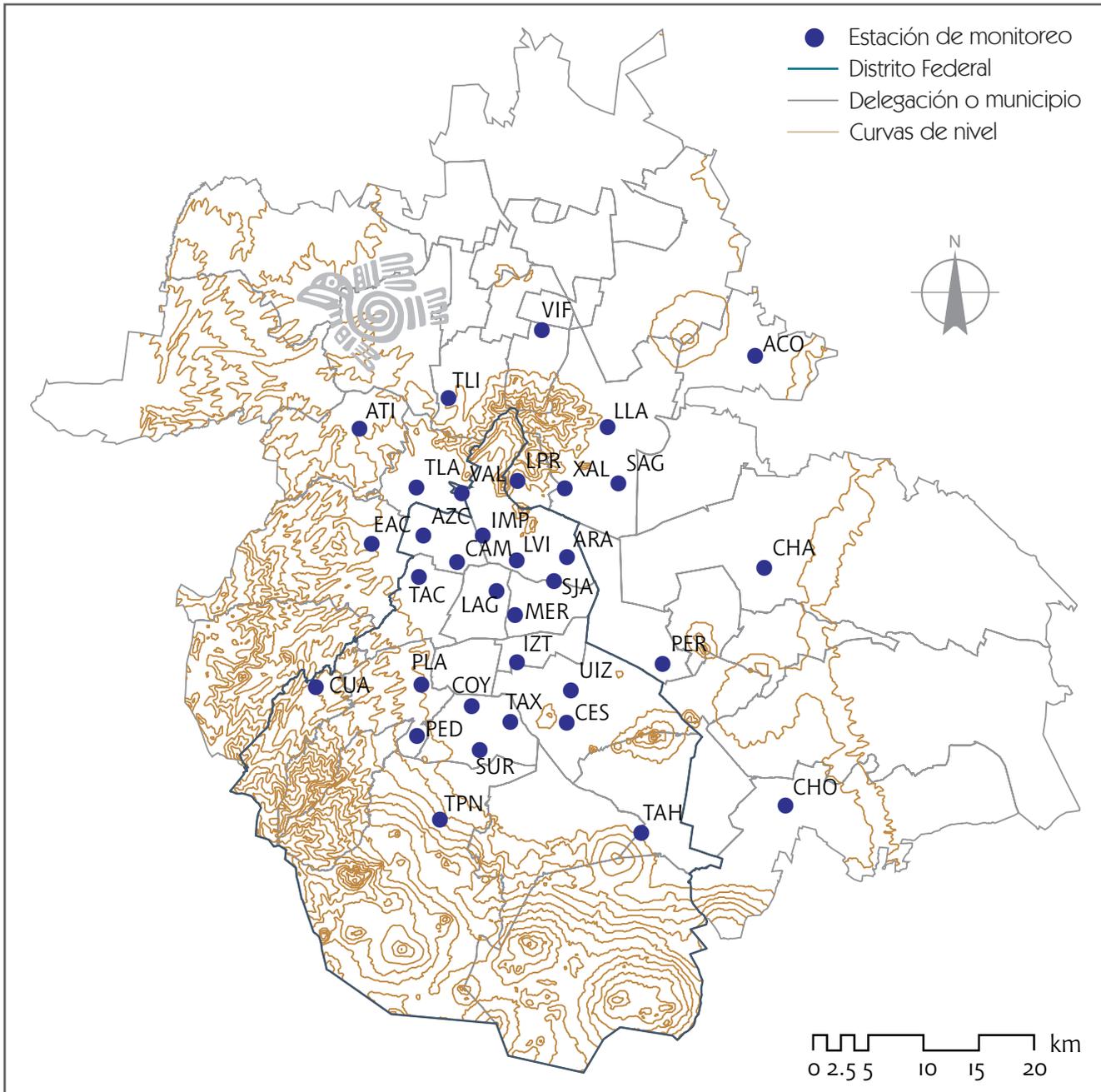


Figura A.1 Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA).

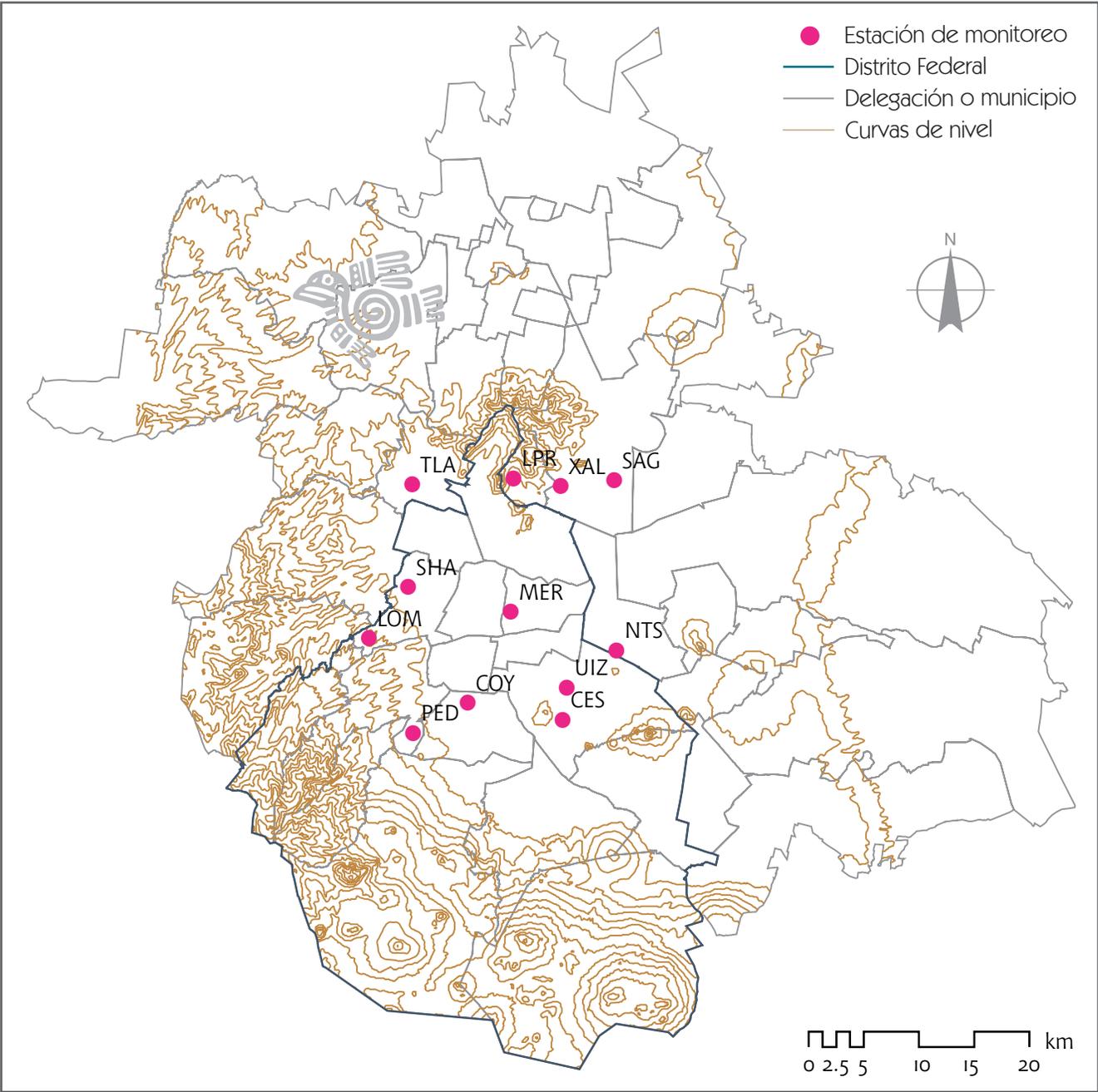


Figura A.2 Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA).

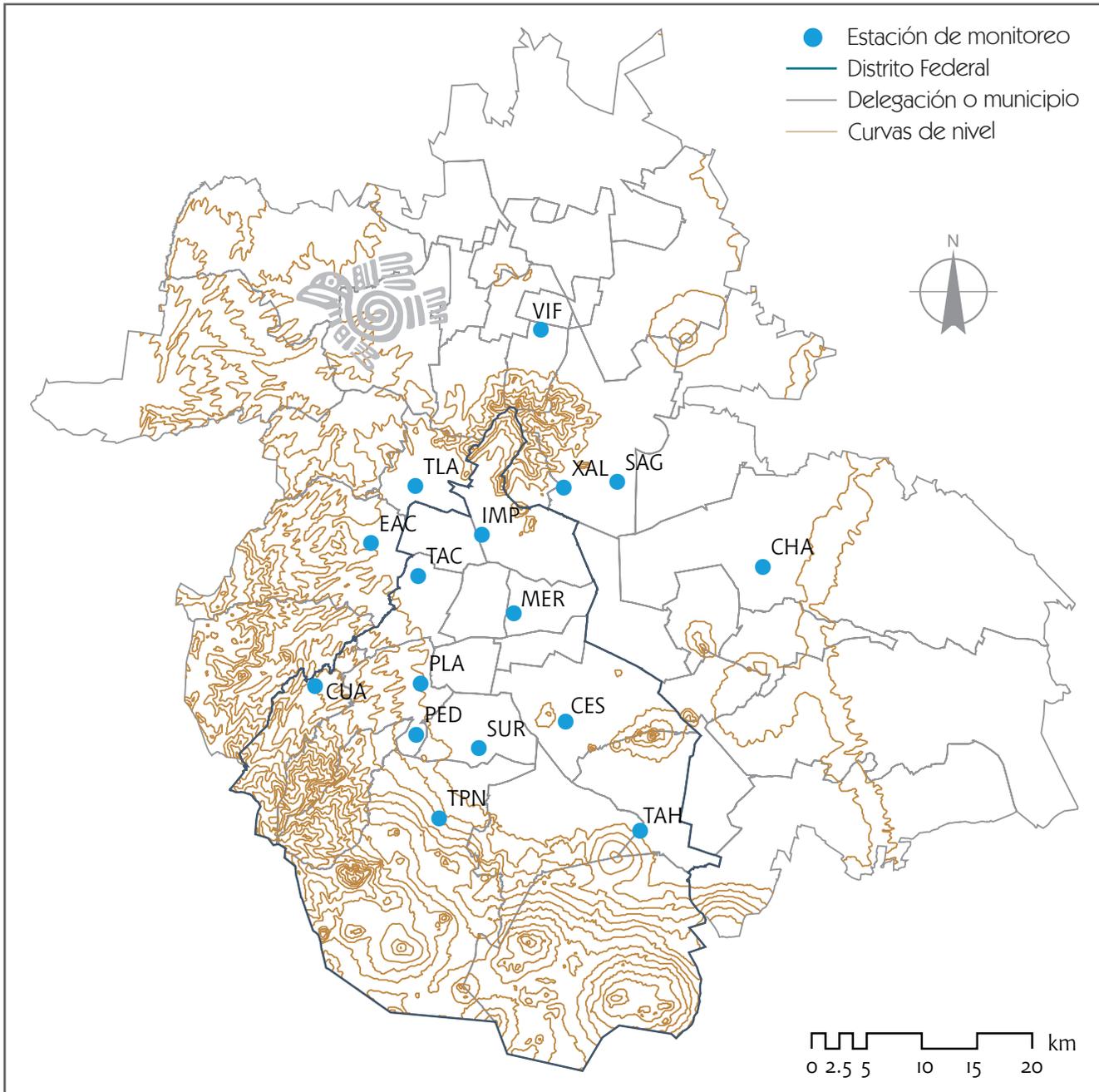


Figura A.3 Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET).

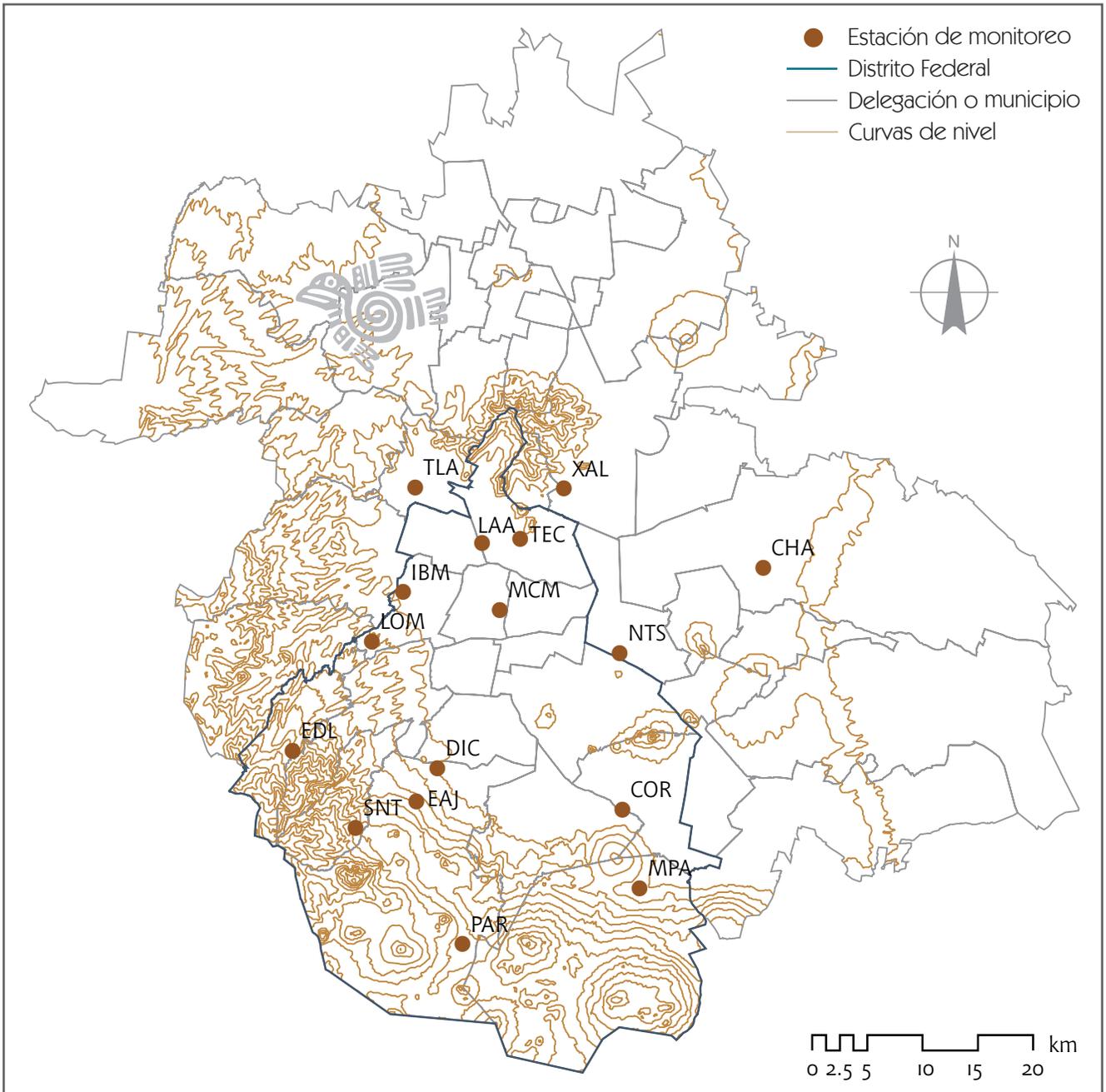


Figura A.4 Red de Depósito Atmosférico (REDDA).

Tabla A.1 Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA).

Entidad	Delegación o municipio	Estación	Clave	Inicio de operación	Parámetros								
					O <sub>3</sub>	NO	NO <sub>x</sub>	NO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	CO	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	
Distrito Federal	Álvaro Obregón	Pedregal	PED	Ene-1986									
		Plateros	PLA	Ene-1986									
	Azcapotzalco	Azcapotzalco	AZC	Ene-1986									
		Camarones	CAM	Ago-2003									
	Coyoacán	Coyoacán	COY	Ago-2003									
		Santa Úrsula	SUR	May-1986									
		Taxqueña	TAX	May-1986									
	Cuajimalpa	Cuajimalpa	CUA	Nov-1993									
	Cuauhtémoc	Lagunilla	LAG	Ene-1986									
	Gustavo A. Madero	Aragón	ARA	Ene-1986									
		Instituto Mexicano del Petróleo	IMP	Ene-1986									
		La Villa	LVI	Ene-1986									
		San Juan de Aragón	SJA	Ago-2003									
		Vallejo	VAL	Ene-1986									
	Iztacalco	Iztacalco	IZT	Jul-2007									
	Iztapalapa	Cerro de la Estrella	CES	Ene-1986									
		UAM Iztapalapa	UIZ	Ene-1986									
	Miguel Hidalgo	Tacuba	TAC	Ene-1986									
	Tlalpan	Tlalpan	TPN	Nov-1993									
	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	ENEP-Acatlán	EAC	Ene-1986									
	Nezahualcóyotl	La Perla	PER	Ago-2003									
	Texcoco	Chapingo	CHA	Nov-1993									
	Tlalnepantla	La Presa	LPR	Ene-1986									
		Tlalnepantla	TLA	Ene-1986									
	Tultitlán	Tultitlán	TLI	Nov-1993									

 Parámetro que se mide en la estación

Tabla A.2 Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA).

Entidad	Delegación o municipio	Estación	Clave	Inicio de operación	Parámetros				
					PST	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	Pb-PST	Pb-PM <sub>10</sub>
Distrito Federal	Álvaro Obregón	Pedregal	PED	Ene-1989					
	Coyoacán	Coyoacán	COY	Ago-2003					
	Iztapalapa	Cerro de la Estrella	CES	Ene-1989					
		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 Sur	NTS	Ene-1989					
	Tlalnepantla	La Presa	LPR	Ene-1989					
		Tlalnepantla	TLA	Ene-1989					

 Parámetro que se mide en la estación

Tabla A.3 Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET).

Entidad	Delegación o municipio	Estación	Clave	Inicio de operación	Parámetros								
					TMP	HR	WDR	WSP	PA	RUV-A	RUV-B	RG	PAR
Distrito Federal	Álvaro Obregón	Pedregal	PED	Ene-1986									
		Plateros	PLA	Ene-1986									
	Coyoacán	Santa Úrsula	SUR	Ago-2008									
	Cuajimalpa	Cuajimalpa	CUA	Jun-2000									
	Gustavo A. Madero	Instituto Mexicano del Petróleo	IMP	Nov-2007									
	Iztapalapa	Cerro de la Estrella	CES	Ene-1986									
	Miguel Hidalgo	Tacuba	TAC	Ene-1986									
	Tlalpan	Tlalpan	TPN	Jun-2000									
	Venustiano Carranza	Merced	MER	Ene-1986									
Xochimilco	Tláhuac	TAH	Jun-2000										
Estado de México	Coacalco	Villa de las Flores	VIF	Jun-2000									
	Ecatepec	San Agustín	SAG	Feb-1986									
		Xalostoc	XAL	Ene-1986									
	Naucalpan	ENEP- Acatlán	EAC	Ene-1986									
	Texcoco	Chapingo	CHA	Jun-2000									
Tlalnepantla	Tlalnepantla	TLA	Ene-1986										

 Parámetro que se mide en la estación

Tabla A.4 Red de Depósito Atmosférico (REDDA).

Entidad	Delegación o municipio	Estación	Clave	Inicio de operación	Parámetros					
					Pp	pH	H	CE	Aniones	Cationes
Distrito Federal	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						
	Magdalena Contreras	San Nicolás Totolapan	SNT	Ago-1998						
	Miguel Hidalgo	Legaría	IBM	Jun-1989						
		Lomas	LOM	Jun-1988						
	Milpa Alta	Milpa Alta	MPA	May-1998						
	Tlalpan	Diconsa	DIC	Jun-1988						
		Ecoguardas Ajusco	EAJ	Jun-1998						
		Parres	PAR	May-1998						
	Xochimilco	Corena	COR	Jun-1990						
Estado de México	Ecatepec	Xalostoc	XAL	May-1989						
	Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl Sur	NTS	Jun-1991						
	Texcoco	Chapingo	CHA	Jun-1994						
	Tlalnepantla	Tlalnepantla	TLA	Jun-1989						

 Parámetro que se mide en la estación

## ANEXO B. EVALUACIÓN DEL CUMPLIMIENTO DE LAS NORMAS OFICIALES MEXICANAS DE SALUD AMBIENTAL

Nota:

i. Para la obtención de los indicadores presentados en este anexo se consideraron únicamente las estaciones que cuentan con datos suficientes, es decir, que registraron al menos 75% de datos válidos en el año.

Tabla B.1 Valor de los indicadores de la NOM-020-SSA1-1993 para ozono durante 2009.

Entidad	Estación	Clave	Horas que exceden la NOM de 1 h (NOM = 0.110 ppm)	Máximo anual horario (NOM = 0.110 ppm)	Quinto máximo anual de 8 h (NOM = 0.080 ppm)	Cumple la NOM
Distrito Federal	Azcapotzalco	AZC	162	0.164	0.111	No
	Cerro de la Estrella	CES	32	0.129	0.085	No
	Coyoacán	COY	165	0.167	0.107	No
	Cuajimalpa	CUA	93	0.177	Datos insuficientes	No
	Iztacalco	IZT	169	0.185	0.113	No
	Lagunilla	LAG	81	0.167	0.099	No
	Merced	MER	78	0.177	0.096	No
	Pedregal	PED	287	0.198	0.124	No
	Plateros	PLA	169	0.180	0.116	No
	Santa Úrsula	SUR	229	0.180	0.114	No
	Tacuba	TAC	156	0.179	Datos insuficientes	No
	Taxqueña	TAX	24	0.167	Datos insuficientes	No
	Tláhuac	TAH	137	0.164	0.109	No
	Tlalpan	TPN	38	0.155	Datos insuficientes	No
UAM Iztapalapa	UIZ	213	0.178	0.114	No	
Estado de México	Acolman	ACO	16	0.145	Datos insuficientes	No
	Chalco	CHO	41	0.153	0.095	No
	Chapingo	CHA	24	0.136	Datos insuficientes	No
	Enep Acatlán	EAC	111	0.165	0.105	No
	San Agustín	SAG	23	0.146	0.084	No
	Tlalnepantla	TLA	104	0.162	0.104	No
	Xalostoc	XAL	46	0.166	0.098	No

Tabla B.2 Valor del indicador de la NOM-025-SSA1-1993 para partículas suspendidas totales durante 2009.

Entidad	Estación	Clave	Valor percentil 98 (NOM = 210 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Cumple la NOM
Distrito Federal	Cerro de la Estrella	CES	226	No
	Merced	MER	396	No
	Pedregal	PED	256	No
	UAM Iztapalapa	UIZ	202	Sí
Estado de México	Tlalnepantla	TLA	238	No
	Xalostoc	XAL	769	No

Tabla B.3 Valor de los indicadores de la NOM-025-SSA1-1993 para partículas menores a 10 micrómetros durante 2009.

Entidad	Estación	Clave	Valor percentil 98 (NOM = 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Promedio anual (NOM = 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Cumple la NOM
Distrito Federal	Cerro de la Estrella	CES	91	56.1	No
	Lomas	LOM	91	44.4	Sí
	Merced	MER	101	59.3	No
	Pedregal	PED	68	39.9	Sí
	Secretaría de Hacienda	SHA	94	53.1	No
	UAM Iztapalapa	UIZ	87	50.8	No
Estado de México	La Presa	LPR	125	68.7	No
	Nezahualcóyotl Sur	NTS	90	54.3	No
	Tlalnepantla	TLA	105	62.7	No
	Xalostoc	XAL	247	105.6	No

Tabla B.4 Valor de los indicadores de la NOM-025-SSA1-1993 para partículas menores a 2.5 micrómetros durante 2009.

Entidad	Estación	Clave	Valor percentil 98 (NOM = 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Promedio anual (NOM = 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Cumple la NOM
Distrito Federal	Coyoacán	COY	44	19.8	No
	Merced	MER	52	22.4	No
	Pedregal	PED	39	18.5	No
	UAM Iztapalapa	UIZ	48	20.6	No
Estado de México	San Agustín	SAG	34	19.3	No
	Tlalnepantla	TLA	44	21.3	No
	Xalostoc	XAL	58	26.0	No

Tabla B.5 Valor del indicador de la NOM-021-SSA1-1993 para monóxido de carbono durante 2009.

Entidad	Estación	Clave	Máximo promedio de 8 h (NOM = 11.0 ppm)	Cumple la NOM
Distrito Federal	Instituto Mexicano del Petróleo	IMP	3.8	Si
	Iztacalco	IZT	4.1	Si
	Lagunilla	LAG	4.0	Si
	Merced	MER	5.2	Si
	Pedregal	PED	2.3	Si
	Plateros	PLA	4.1	Si
	Santa Úrsula	SUR	2.6	Si
	Tacuba	TAC	3.8	Si
	Taxqueña	TAX	3.4	Si
	UAM Iztapalapa	UIZ	3.5	Si
	Vallejo	VAL	4.8	Si
Estado de México	Chalco	CHO	3.3	Si
	ENEP Acatlán	EAC	3.4	Si
	San Agustín	SAG	3.4	Si
	Tlalnepantla	TLA	3.0	Si
	Tultitlán	TLI	3.9	Si
	Villa de las Flores	VIF	2.8	Si
	Xalostoc	XAL	4.2	Si

Tabla B.6 Valor de los indicadores de la NOM-022-SSA1-1993 para dióxido de azufre durante 2009.

Entidad	Estación	Clave	Máximo promedio de 24 h (NOM = 0.130 ppm)	Promedio anual (NOM = 0.030 ppm)	Cumple la NOM
Distrito Federal	Aragón	ARA	0.024	Datos Insuficientes	Si
	Azcapotzalco	AZC	0.042	0.006	Si
	Cerro de la Estrella	CES	0.027	0.006	Si
	Iztacalco	IZT	0.039	0.006	Si
	Lagunilla	LAG	0.047	0.007	Si
	La Villa	LVI	0.036	Datos Insuficientes	Si
	Merced	MER	0.045	0.007	Si
	Pedregal	PED	0.023	0.003	Si
	Plateros	PLA	0.036	0.006	Si
	Santa Úrsula	SUR	0.035	0.005	Si
	Tacuba	TAC	0.038	Datos Insuficientes	Si
	Tláhuac	TAH	0.018	0.002	Si
	Taxqueña	TAX	0.027	Datos Insuficientes	Si
	UAM Iztapalapa	UIZ	0.033	0.006	Si
	Vallejo	VAL	0.050	Datos Insuficientes	Si
Estado de México	Acolman	ACO	0.013	Datos Insuficientes	Si
	Atizapán	ATI	0.045	0.008	Si
	Chalco	CHO	0.010	0.003	Si
	ENEP Acatlán	EAC	0.030	0.007	Si
	Los Laureles	LLA	0.036	Datos Insuficientes	Si
	La Presa	LPR	0.028	0.004	Si
	San Agustín	SAG	0.046	0.004	Si
	Tlalnepantla	TLA	0.052	0.011	Si
	Tultitlán	TLI	0.052	0.008	Si
	Villa de las Flores	VIF	0.039	Datos Insuficientes	Si
	Xalostoc	XAL	0.032	0.006	Si

Tabla B.7 Valor del indicador de la NOM-023-SSA1-1993 para dióxido de nitrógeno durante 2009.

Entidad	Estación	Clave	Máximo anual horario (NOM = 0.210 ppm)	Cumple la NOM
Distrito Federal	Azcapotzalco	AZC	0.159	Si
	Cerro de la Estrella	CES	0.139	Si
	Iztacalco	IZT	0.180	Si
	Lagunilla	LAG	0.141	Si
	Merced	MER	0.162	Si
	Pedregal	PED	0.132	Si
	Plateros	PLA	0.146	Si
	Santa Úrsula	SUR	0.124	Si
	Tacuba	TAC	0.211	Si
	Taxqueña	TAX	0.131	Si
	UAM Iztapalapa	UIZ	0.145	Si
Estado de México	Atizapán	ATI	0.135	Si
	ENEP Acatlán	EAC	0.178	Si
	San Agustín	SAG	0.101	Si
	Tlalnepantla	TLA	0.127	Si
	Tlilitlán	TLI	0.133	Si
	Villa de las Flores	VIF	0.085	Si
	Xalostoc	XAL	0.154	Si

Tabla B.8 Valor del indicador de la NOM-026-SSA1-1993 para plomo durante 2009.

Entidad	Estación	Clave	Máximo promedio trimestral (NOM = 1.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Cumple la NOM
Distrito Federal	Cerro de la Estrella	CES	0.039	Si
	Merced	MER	0.057	Si
	Pedregal	PED	0.031	Si
	UAM Iztapalapa	UIZ	0.039	Si
Estado de México	Tlanepantla	TLA	0.134	Si
	Xalostoc	XAL	0.080	Si

## ANEXO C. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LOS PARÁMETROS QUE MIDE EL SISTEMA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Nota:

i. Para propósitos del análisis estadístico, se consideran únicamente las estaciones con datos suficientes, es decir, que registraron al menos 75% de datos válidos en el año.

Tabla C.1 Ozono (máximos diarios).

Entidad	Delegación o municipio	Estación	Mínimo (ppm)	Máximo (ppm)	Promedio (ppm)	Desviación estándar (ppm)	Porcentaje de datos válidos (%)
Distrito Federal	Alvaro Obregón	PED	0.020	0.198	0.095	0.034	94
		PLA	0.019	0.180	0.087	0.031	91
	Azcapotzalco	AZC	0.022	0.164	0.084	0.030	96
	Coyoacán	COY	0.013	0.167	0.088	0.029	97
		SUR	0.017	0.180	0.093	0.032	86
		TAX	—	—	—	—	59
	Cuajimalpa	CUA	—	—	—	—	47
	Cuauhtémoc	LAG	0.015	0.167	0.078	0.028	94
	Iztacalco	IZT	0.016	0.185	0.089	0.029	95
	Iztapalapa	CES	0.013	0.129	0.073	0.025	95
		UIZ	0.014	0.178	0.090	0.030	96
	Miguel Hidalgo	TAC	—	—	—	—	71
	Tlapan	TPN	—	—	—	—	48
	Venustiano Carranza	MER	0.013	0.177	0.080	0.029	91
Xochimilco	TAH	0.013	0.164	0.084	0.028	94	
Estado de México	Acolman	ACO	—	—	—	—	59
	Chalco	CHO	0.011	0.153	0.074	0.025	92
	Ecatepec	SAG	0.014	0.146	0.066	0.023	91
		XAL	0.018	0.166	0.068	0.027	91
	Naucalpan	EAC	0.016	0.165	0.079	0.028	94
	Texcoco	CHA	—	—	—	—	73
	Tlalnepantla	TLA	0.024	0.162	0.078	0.027	90

Tabla C.2 Dióxido de nitrógeno (máximos diarios).

Entidad	Delegación o municipio	Estación	Mínimo (ppm)	Máximo (ppm)	Promedio (ppm)	Desviación estándar (ppm)	Porcentaje de datos válidos (%)
Distrito Federal	Alvaro Obregón	PED	0.019	0.132	0.048	0.018	95
		PLA	0.019	0.146	0.057	0.023	89
	Azcapotzalco	AZC	0.022	0.159	0.057	0.024	96
	Coyoacán	SUR	0.022	0.124	0.052	0.017	90
		TAX	—	—	—	—	63
	Cuauhtémoc	LAG	0.014	0.141	0.061	0.024	90
	Iztacalco	IZT	0.020	0.180	0.061	0.025	95
	Iztapalapa	CES	0.020	0.139	0.057	0.020	95
		UIZ	0.019	0.145	0.054	0.019	94
	Miguel Hidalgo	TAC	—	—	—	—	72
Venustiano Carranza	MER	0.017	0.162	0.064	0.024	94	
Estado de México	Atizapán	ATI	0.017	0.135	0.046	0.019	94
	Coacalco	VIF	—	—	—	—	57
	Ecatepec	SAG	0.009	0.101	0.041	0.015	90
		XAL	0.016	0.154	0.056	0.022	94
	Naucalpan	EAC	0.019	0.178	0.059	0.028	97
	Tlalnepantla	TLA	0.022	0.127	0.058	0.021	95
	Tultitlán	TLI	0.011	0.133	0.048	0.020	98

Tabla C.3 Óxidos de nitrógeno (máximos diarios).

Entidad	Delegación o municipio	Estación	Mínimo (ppm)	Máximo (ppm)	Promedio (ppm)	Desviación estándar (ppm)	Porcentaje de datos válidos (%)
Distrito Federal	Alvaro Obregón	PED	0.020	0.260	0.085	0.042	95
		PLA	0.027	0.480	0.131	0.066	89
	Azcapotzalco	AZC	0.025	0.449	0.136	0.072	96
	Coyoacán	SUR	0.031	0.391	0.126	0.064	90
		TAX	—	—	—	—	63
	Cuauhtémoc	LAG	0.017	0.621	0.154	0.083	90
	Iztacalco	IZT	0.024	0.453	0.144	0.075	95
	Iztapalapa	CES	0.029	0.353	0.143	0.056	95
		UIZ	0.024	0.383	0.121	0.065	94
	Miguel Hidalgo	TAC	—	—	—	—	72
Venustiano Carranza	MER	0.036	0.506	0.176	0.086	94	
Estado de México	Atizapán	ATI	0.020	0.352	0.110	0.062	94
	Coacalco	VIF	—	—	—	—	57
	Ecatepec	SAG	0.014	0.365	0.122	0.071	90
		XAL	0.043	0.783	0.214	0.118	94
	Naucalpan	EAC	0.025	0.367	0.150	0.077	97
	Tlalnepantla	TLA	0.031	0.411	0.159	0.080	95
	Tultitlán	TLI	0.015	0.447	0.129	0.085	98

Tabla C.4 Monóxido de carbono (máximos de promedios móviles de 8 h).

Entidad	Delegación o municipio	Estación	Mínimo (ppm)	Máximo (ppm)	Promedio (ppm)	Desviación estándar (ppm)	Porcentaje de datos válidos (%)
Distrito Federal	Alvaro Obregón	PED	0.1	2.3	0.7	0.4	96
		PLA	0.3	4.1	1.5	0.7	86
	Coyoacán	SUR	0.2	2.6	1.2	0.5	92
		TAX	—	—	—	—	62
	Cuauhtémoc	LAG	0.4	4.0	1.7	0.7	97
	Gustavo A. Madero	IMP	—	—	—	—	49
		VAL	—	—	—	—	45
	Iztacalco	IZT	0.2	4.1	1.4	0.6	96
	Iztapalapa	UIZ	0.0	3.5	1.5	0.6	97
	Miguel Hidalgo	TAC	—	—	—	—	72
Venustiano Carranza	MER	0.3	5.2	1.6	0.7	94	
Estado de México	Chalco	CHO	0.4	3.3	1.4	0.5	91
	Coacalco	VIF	—	—	—	—	57
	Ecatepec	SAG	0.1	3.4	1.2	0.6	93
		XAL	0.1	4.2	1.5	0.7	96
	Naucalpan	EAC	0.1	3.4	1.6	0.7	96
	Tlamepantla	TLA	0.1	3.0	1.2	0.5	94
	Tultitlán	TLI	0.3	3.9	1.3	0.6	98

Tabla C.5 Dióxido de azufre (promedios de 24 h).

Entidad	Delegación o municipio	Estación	Mínimo (ppm)	Máximo (ppm)	Promedio (ppm)	Desviación estándar (ppm)	Porcentaje de datos válidos (%)
Distrito Federal	Alvaro Obregón	PED	0.000	0.023	0.003	0.003	95
		PLA	0.000	0.036	0.006	0.005	93
	Azcapotzalco	AZC	0.000	0.042	0.006	0.007	90
	Coyoacán	SUR	0.000	0.035	0.005	0.005	92
		TAX	—	—	—	—	63
	Cuauhtémoc	LAG	0.000	0.047	0.007	0.006	96
	Gustavo A. Madero	ARA	—	—	—	—	46
		LVI	—	—	—	—	64
		VAL	—	—	—	—	52
	Iztacalco	IZT	0.000	0.039	0.006	0.006	96
	Iztapalapa	CES	0.000	0.027	0.006	0.004	96
		UIZ	0.001	0.033	0.006	0.005	97
	Miguel Hidalgo	TAC	—	—	—	—	72
	Venustiano Carranza	MER	0.000	0.045	0.007	0.006	89
Xochimilco	TAH	0.000	0.018	0.002	0.003	95	
Estado de México	Acolman	ACO	—	—	—	—	57
	Atizapán	ATI	0.000	0.045	0.008	0.007	98
	Chalco	CHO	0.000	0.010	0.003	0.002	91
	Coacalco	VIF	—	—	—	—	56
	Ecatepec	LLA	—	—	—	—	46
		SAG	0.000	0.046	0.004	0.005	93
		XAL	0.000	0.032	0.006	0.005	94
	Naucalpan	EAC	0.000	0.030	0.006	0.006	97
	Tlalnepantla	LPR	0.000	0.028	0.004	0.004	94
		TLA	0.002	0.052	0.011	0.007	95
	Tultitlán	TLI	0.000	0.052	0.008	0.008	98

Tabla C.6 Partículas menores a 10 micrómetros, monitoreo continuo (promedio de 24 h). Las concentraciones están reportadas a las condiciones locales de presión y temperatura.

Entidad	Delegación o municipio	Estación	Método de medición	Mínimo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Máximo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Promedio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Desviación estándar ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Porcentaje de datos válidos (%)
Distrito Federal	Alvaro Obregón	PED	TEOM (35 °C)	8	79	35	14	90
		PLA	TEOM (35 °C)	—	—	—	—	22
	Coyoacán	SUR	TEOM (35 °C)	11	95	41	17	92
		TAX	TEOM (35 °C)	—	—	—	—	72
	Gustavo A. Madero	LVI	TEOM (35 °C)	18	138	55	23	79
	Iztacalco	IZT	BETA (35 °C)	12	108	47	19	97
	Iztapalapa	CES	TEOM (35 °C)	13	104	47	18	95
	Venustiano Carranza	MER	TEOM (35 °C)	11	117	49	21	94
Xochimilco	TAH	TEOM (35 °C)	8	120	47	23	89	
Estado de México	Coacalco	VIF	TEOM (35 °C)	—	—	—	—	66
	Ecatepec	SAG	TEOM (35 °C)	10	138	53	25	92
		XAL	TEOM (35 °C)	21	245	88	32	90
	Naucalpan	EAC	TEOM (35 °C)	8	96	43	18	95
	Tlalnepantla	TLA	TEOM (35 °C)	12	134	54	22	96
Tultitlán	TLI	TEOM (35 °C)	—	—	—	—	6	

Tabla C.7 Partículas menores a 10 micrómetros, monitoreo manual (muestreo de 24 h cada seis días). Las concentraciones están reportadas a las condiciones locales de presión y temperatura.

Entidad	Delegación o municipio	Estación	Método de medición	Mínimo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Máximo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Promedio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Desviación estándar ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Porcentaje de datos válidos (%)
Distrito Federal	Alvaro Obregón	PED	Alto volumen	14	86	40	15	97
	Iztapalapa	CES	Alto volumen	22	95	56	19	98
		UIZ	Alto volumen	15	94	51	19	100
	Miguel Hidalgo	LOM	Alto volumen	14	91	44	17	100
		SHA	Alto volumen	20	98	53	18	97
Venustiano Carranza	MER	Alto volumen	17	116	59	22	95	
Estado de México	Ecatepec	XAL	Alto volumen	55	287	106	45	93
	Nezahualcóyotl	NTS	Alto volumen	16	97	54	21	100
	Tlalnepantla	LPR	Alto volumen	15	132	69	30	100
TLA		Alto volumen	23	118	63	23	100	

Tabla C.8 Partículas menores a 2.5 micrómetros, monitoreo continuo (promedio de 24 h). Las concentraciones están reportadas a las condiciones locales de presión y temperatura.

Entidad	Delegación o municipio	Estación	Método de medición	Mínimo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Máximo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Promedio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Desviación estándar ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Porcentaje de datos válidos (%)
Distrito Federal	Azcapotzalco	CAM	BETA (35 °C)	—	—	—	—	47
	Coyoacán	COY	TEOM-FDMS	4	54	23	10	92
	Gustavo A. Madero	SJA	BETA (35 °C)	—	—	—	—	65
	Iztapalapa	UIZ	BETA (35 °C)	4	66	22	9	96
	Venustiano Carranza	MER	TEOM-FDMS	4	53	22	9	91
	Acolman	ACO	BETA (35 °C)	—	—	—	—	60
Estado de México	Ecatepec	SAG	BETA (35 °C)	5	65	24	10	92
	Nezahualcóyotl	PER	BETA (35 °C)	6	82	27	12	91
	Tlalnepantla	TLA	TEOM-FDMS	8	62	27	10	93

Tabla C.9 Partículas menores a 2.5 micrómetros, monitoreo manual (muestreo de 24 h cada seis días). Las concentraciones están reportadas a las condiciones locales de presión y temperatura.

Entidad	Delegación o municipio	Estación	Método de medición	Mínimo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Máximo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Promedio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Desviación estándar ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Porcentaje de datos válidos (%)
Distrito Federal	Álvaro Obregón	PED	Partisol-2000 FRM	5	42	18	9	85
	Coyoacán	COY	Partisol-2000 FRM	5	45	20	8	97
	Iztapalapa	UIZ	Partisol-2000 FRM	5	53	21	9	100
	Venustiano Carranza	MER	Partisol-2000 FRM	6	52	22	9	83
Estado de México	Ecatepec	SAG	Partisol-2000 FRM	5	45	19	8	87
		XAL	Partisol-2000 FRM	9	58	26	11	83
	Tlalnepantla	TLA	Partisol-2000 FRM	7	49	21	8	85

Tabla C.10 Partículas suspendidas totales (muestreo de 24 h cada seis días). Las concentraciones están reportadas a las condiciones locales de presión y temperatura.

Entidad	Delegación o municipio	Estación	Método de medición	Mínimo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Máximo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Promedio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Desviación estándar ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Porcentaje de datos válidos (%)
Distrito Federal	Álvaro Obregón	PED	Alto volumen	27	258	89	51	95
		CES	Alto volumen	34	246	127	51	95
	Iztapalapa	UIZ	Alto volumen	34	204	111	44	98
		MER	Alto volumen	42	472	150	78	90
Estado de México	Ecatepec	XAL	Alto volumen	77	924	251	138	92
	Tlalnepantla	TLA	Alto volumen	32	238	127	56	98

Tabla C.11 Plomo contenido en partículas suspendidas totales (muestreo de 24 h cada seis días), análisis por ICP-óptico. Las concentraciones están reportadas a las condiciones locales de presión y temperatura.

Entidad	Delegación o municipio	Estación	Mínimo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Máximo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Promedio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Desviación estándar ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Porcentaje de datos válidos (%)
Distrito Federal	Alvaro Obregón	PED	< LD*	0.070	0.014	0.020	95
	Iztapalapa	CES	< LD*	0.093	0.021	0.025	95
		UIZ	< LD*	0.087	0.023	0.025	98
Estado de México	Venustiano Carranza	MER	< LD*	0.165	0.048	0.035	92
	Ecatepec	XAL	< LD*	0.192	0.065	0.042	90
	Tlalnepantla	TLA	< LD*	0.964	0.068	0.123	98

\* Se detectaron muestras por abajo del límite de detección equivalente a  $0.0001 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Tabla C.12 Plomo contenido en partículas menores a 10 micrómetros (muestreo de 24 h cada seis días), análisis por ICP-óptico. Las concentraciones están reportadas a las condiciones locales de presión y temperatura.

Entidad	Delegación o municipio	Estación	Mínimo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Máximo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Promedio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Desviación estándar ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Porcentaje de datos válidos (%)
Distrito Federal	Alvaro Obregón	PED	< LD*	0.058	0.007	0.015	95
	Iztapalapa	CES	< LD*	0.081	0.011	0.018	97
		UIZ	< LD*	0.082	0.013	0.020	98
Estado de México	Venustiano Carranza	MER	< LD*	0.107	0.028	0.027	93
	Ecatepec	XAL	< LD*	0.169	0.043	0.037	92
	Tlalnepantla	TLA	< LD*	0.887	0.050	0.115	98
	Nezahualcóyotl	NTS	< LD*	0.095	0.015	0.022	98
		LPR	< LD*	0.119	0.031	0.029	98

\* Se detectaron muestras por abajo del límite de detección equivalente a  $0.0001 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Tabla C.13 Temperatura ambiente (promedios horarios).

Entidad	Delegación o municipio	Estación	Mínimo (°C)	Máximo (°C)	Promedio (°C)	Desviación estándar (°C)	Porcentaje de datos válidos (%)
Distrito Federal	Álvaro Obregón	PED	—	—	—	—	67
		PLA	3	31	17	5	99
	Coyoacán	SUR	3	28	16	4	82
	Cuajimalpa	CUA	—	—	—	—	43
	Gustavo A. Madero	IMP	—	—	—	—	22
	Iztapalapa	CES	3	31	17	5	87
	Miguel Hidalgo	TAC	—	—	—	—	49
	Tlalpan	TPN	—	—	—	—	49
	Venustiano Carranza	MER	4	32	18	5	94
	Xochimilco	TAH	—	—	—	—	64
Estado de México	Coacalco	VIF	—	—	—	—	58
	Ecatepec	SAG	1	32	17	5	92
		XAL	3	31	17	5	98
	Naucalpan	EAC	2	32	18	6	94
	Texcoco	CHA	—	—	—	—	50
	Tlalnepantla	TLA	4	30	17	5	96

Tabla C.14 Humedad relativa (promedios horarios).

Entidad	Delegación o municipio	Estación	Mínimo (%)	Máximo (%)	Promedio (%)	Desviación estándar (%)	Porcentaje de datos válidos (%)
Distrito Federal	Álvaro Obregón	PED	—	—	—	—	27
		PLA	5	100	54	24	87
	Coyoacán	SUR	3	100	52	22	80
	Cuajimalpa	CUA	—	—	—	—	42
	Gustavo A. Madero	IMP	—	—	—	—	22
	Iztapalapa	CES	3	100	52	23	87
	Miguel Hidalgo	TAC	—	—	—	—	49
	Tlalpan	TPN	—	—	—	—	49
	Venustiano Carranza	MER	4	100	53	23	95
	Xochimilco	TAH	—	—	—	—	64
Estado de México	Coacalco	VIF	—	—	—	—	58
	Ecatepec	SAG	5	100	55	24	92
		XAL	2	100	53	23	97
	Naucalpan	EAC	2	100	55	24	92
	Texcoco	CHA	—	—	—	—	37
	Tlalnepantla	TLA	4	100	53	24	99

Tabla C.16 Depósito húmedo, el análisis de cationes y aniones se realizó por cromatografía de iones (muestreo semanal).

Entidad	Delegación o municipio	Estación	Clave	Pp	pH		
				Precipitación pluvial total (mm de lluvia)	Mínimo pH	Promedio pH	Porcentaje de eventos de lluvia ácida (%)
Distrito Federal	Cuajimalpa	Ex Convento Desierto de los Leones	EDL	1227	4.3	5.2	27
	Cuauhtémoc	Museo de la Ciudad de México	MCM	716	4.8	5.3	20
	Gustavo A. Madero	Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	663	4.6	5.1	25
		Cerro del Tepeyac	TEC	527	4.6	5.2	21
	Magdalena Contreras	San Nicolás Totolapan	SNT	1144	4.4	5.1	36
	Miguel Hidalgo	Legaria	IBM	582	4.6	5.1	30
		Lomas	LOM	569	4.6	5.2	30
	Milpa Alta	Milpa Alta	MPA	530	4.4	5.0	45
	Tlalpan	Diconsa	DIC	642	4.4	5.0	35
		Ecoguardas Ajusco	EAJ	671	4.4	4.9	35
Parres		PAR	741	4.5	5.0	55	
Xochimilco	Corena	COR	275	4.4	5.1	36	
Estado de México	Ecatepec	Xalostoc	XAL	554	5.1	5.6	11
	Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl Sur	NTS	436	4.7	5.2	18
	Texcoco	Chapingo	CHA	427	4.4	5.6	18
	Tlalnepantla	Tlalnepantla	TLA	762	4.6	5.1	22

Tabla C.15 Velocidad del viento (promedios horarios).

Entidad	Delegación o municipio	Estación	Mínimo (m/s)	Máximo (m/s)	Promedio (m/s)	Desviación estándar (m/s)	Porcentaje de calmas (%) *	Porcentaje de datos válidos (%)
Distrito Federal	Álvaro Obregón	PED	—	—	—	—	—	66
		PLA	0	5	1	1	17	99
	Coyoacán	SUR	0	7	2	1	13	99
	Cuajimalpa	CUA	—	—	—	—	—	45
	Gustavo A. Madero	IMP	—	—	—	—	—	30
	Iztapalapa	CES	0	5	1	1	24	79
	Miguel Hidalgo	TAC	—	—	—	—	—	45
	Tlalpan	TPN	—	—	—	—	—	49
	Venustiano Carranza	MER	0	5	1	1	17	98
	Xochimilco	TAH	—	—	—	—	—	64
Estado de México	Coacalco	VIF	—	—	—	—	—	59
	Ecatepec	SAG	0	8	2	1	4	99
		XAL	0	6	2	1	13	99
	Naucalpan	EAC	0	7	2	1	9	96
	Texcoco	CHA	—	—	—	—	—	47
	Tlalnepantla	TLA	0	7	2	1	5	99

\* Se considera calma todo registro menor a 0.6 m/s.

Aniones			Cationes				
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> Depósito total (kg/ha)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> Depósito total (kg/ha)	Cl <sup>-</sup> Depósito total (kg/ha)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> Depósito total (kg/ha)	Ca <sup>2+</sup> Depósito total (kg/ha)	K <sup>+</sup> Depósito total (kg/ha)	Mg <sup>2+</sup> Depósito total (kg/ha)	Na <sup>+</sup> Depósito total (kg/ha)
26	26	1.9	10	7.4	0.7	1.3	1.3
20	20	1.7	7	6.0	0.6	1.2	3.2
19	20	1.4	9	5.0	0.9	0.8	0.6
15	16	1.2	7	4.1	0.4	1.0	0.7
28	25	2.1	11	6.0	0.9	1.7	1.8
19	18	1.4	8	5.1	0.3	1.0	1.3
20	22	1.7	8	6.9	0.4	0.8	1.9
12	13	1.7	6	3.0	0.4	0.6	0.8
18	17	1.9	7	4.9	0.4	1.2	1.5
19	19	1.9	8	3.9	0.4	1.1	1.8
16	15	2.0	5	4.3	0.4	0.8	1.7
8	8	0.9	3	2.5	0.2	0.5	0.9
16	18	1.1	8	5.8	0.4	1.0	1.0
11	13	1.1	5	2.9	0.3	0.8	0.8
9	8	0.6	4	2.5	0.4	0.9	0.5
16	21	1.5	8	5.0	0.4	0.8	0.9

## ANEXOD.PROGRAMADECONTINGENCIASAMBIENTALESATMOSFÉRICAS

Tabla D.1 Histórico de la aplicación de las Fases I y II del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA) declaradas por la Comisión Ambiental Metropolitana de 2001 a 2009.

Año	Contaminante	Activación					Desactivación	
		Fecha y hora	Zona	Estación	Valor IMECA	Fase	Fecha y hora	Valor IMECA
2001	—	—	—	—	—	—	—	—
2002	Ozono	18-sep 16:00	SO	PED	242	Fase I	19-sep 16:00	137
2003	PM <sub>10</sub>	25-dic 12:00	NE	XAL	176	Fase I, regional	26-dic 12:00	126
2004	—	—	—	—	—	—	—	—
2005	PM <sub>10</sub>	01-ene 08:00	NE	NE	181	Fase I, regional	02-ene 08:00	90
2006	—	—	—	—	—	—	—	—
2007	—	—	—	—	—	—	—	—
2008	—	—	—	—	—	—	—	—
2009	—	—	—	—	—	—	—	—

Tabla D.2 Histórico de la aplicación de la Fase de Precontingencia del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas declaradas por la Comisión Ambiental Metropolitana de 2001 a 2009 (continúa en la siguiente página).

Año	Contaminante	Activación				Desactivación	
		Fecha y hora	Zona	Estación	Valor IMECA	Fecha y hora	Valor IMECA
2001	Ozono	13-ene 15:00	SO	TPN	209	13-ene 18:00	143
	Ozono	17-ene 15:00	NO	AZC	220	17-ene 17:00	157
	Ozono	29-ene 15:00	NO	AZC	231	29-ene 18:00	91
	Ozono	13-feb 16:00	NO	AZC	208	13-feb 18:00	166
	Ozono	07-mar 14:00	SO	CUA	201	07-mar 17:00	145
	Ozono	02-may 14:00	CE	BJU	219	02-may 16:00	112
	Ozono	02-may 14:00	SO	PLA	214	02-may 16:00	90
	Ozono	24-may 15:00	CE	BJU	205	24-may 17:00	156
	Ozono	28-may 16:00	SO	CUA	213	28-may 18:00	143
	Ozono	07-jun 15:00	NO	TAC	209	07-jun 16:00	143
	Ozono	07-jun 16:00	SO	PLA	213	07-jun 18:00	108
	Ozono	21-jul 15:00	SO	CUA	206	21-jul 18:00	138
	Ozono	04-ago 15:00	SO	SUR	203	04-ago 17:00	176
	Ozono	18-ago 15:00	SO	SUR	209	18-ago 17:00	160

Tabla D.2 Histórico de la aplicación de la Fase de Precontingencia del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas declaradas por la Comisión Ambiental Metropolitana de 2001 a 2009 (continuación).

Año	Contaminante	Activación				Desactivación	
		Fecha y hora	Zona	Estación	Valor IMECA	Fecha y hora	Valor IMECA
2002	Ozono	16-ene 15:00	SO	PED	219	16-ene 18:00	166
	Ozono	15-feb 16:00	SO	PED	209	15-feb 18:00	130
	Ozono	15-mar 17:00	NO	TAC	204	15-mar 18:00	179
	Ozono	02-abr 14:00	SO	PLA	208	02-abr 16:00	142
	Ozono	20-abr 16:00	SO	PLA	207	20-abr 18:00	144
	Ozono	22-abr 15:00	NO	AZC	202	22-abr 17:00	167
	Ozono	22-abr 16:00	SO	PED	210	22-abr 17:00	176
	Ozono	18-sep 15:00	SO	PED	232	18-sep 16:00	Se activó la Fase I
	Ozono	23-oct 15:00	SO	PED	202	23-oct 17:00	168
	Ozono	21-dic 17:00	NO	EAC	212	21-dic 18:00	127
2003	PM <sub>10</sub>	01-ene 11:00	NE	XAL	161	01-ene 12:00	158
	Ozono	03-abr 15:00	NO	AZC	209	03-abr 17:00	156
	Ozono	10-may 15:00	SO	SUR	204	10-may 17:00	144
	PM <sub>10</sub>	25-dic 09:00	NE	XAL	164	25-dic 12:00	Se activó la Fase I
2004	—	—	—	—	—	—	
2005	—	—	—	—	—	—	
2006	PM <sub>10</sub>	01-ene 09:00	NE	VIF	169	02-ene 03:00	138
	PM <sub>10</sub>	16-mar 19:00	NE	SAG	167	17-mar 17:00	144
2007	Ozono	14-abr 16:00	SO	PED	185	16-abr 16:00	81
	Ozono	23-jun 15:00	SO	COY	172	24-jun 15:00	118
	Ozono	27-jul 16:00	SO	TPN	184	28-jul 16:00	135
2008	Ozono	08-abr 16:00	NO	EAC	172	09-abr 16:00	146
	Ozono	10-may 17:00	SO	COY	172	11-may 17:00	68
2009	Ozono	13-feb 17:00	SO	PED	180	16-feb 17:00	118
	PM <sub>10</sub>	03-nov 22:00	NE	XAL	164	05-nov 09:00	136

## ANEXO E. ÍNDICE METROPOLITANO DE LA CALIDAD DEL AIRE

En la Ciudad de México la Secretaría del Medio Ambiente emplea el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA) para la comunicación de los riesgos a la salud humana derivados de la exposición a la contaminación del aire ambiente. El IMECA se calcula cada hora a partir de los datos del monitoreo ambiental de acuerdo con lo especificado en la Norma Técnica

Ambiental del Distrito Federal NADF-009-AIRE-2006. El valor de 100 puntos IMECA se asigna al valor límite definido por las Normas Oficiales Mexicanas de salud ambiental (NOM) para el indicador de exposición crónica (de corto plazo)\*. Un valor mayor a 100 puntos IMECA indica una calidad del aire que implica algún nivel de riesgo para la salud humana.

Categoría del índice de calidad del aire	Intervalo del IMECA	Equivalencia en unidades de concentración			Las recomendaciones y posibles riesgos son:
		O <sub>3</sub> (ppm)	PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	
Buena	0 a 50	[0.000, 0.055]	[0, 60]	[0, 15.4]	Recomendaciones: Adecuada para llevar a cabo actividades al aire libre.
Regular	51 a 100	(0.055, 0.110]	(60, 120]	[15.5, 40.4]	Recomendaciones: Se pueden llevar a cabo actividades al aire libre. Riesgos: Posibles molestias en niños, adultos mayores y personas con enfermedades respiratorias o cardiovasculares.
Mala	101 a 150	(0.110, 0.165]	(120, 220]	[40.5, 65.4]	Recomendaciones: Evite las actividades al aire libre, esté atento a la información de calidad del aire. Acuda al médico si presenta síntomas respiratorios o cardíacos. Riesgos: Posibles efectos adversos a la salud, en particular niños, adultos mayores y personas con enfermedades cardiovasculares o respiratorias.
Muy mala	151 a 200	(0.165, 0.220]	(220, 320]	[65.5, 150.4]	Recomendaciones: Evite salir de casa y mantenga las ventanas cerradas, no realice actividades al aire libre, esté atento a la información de la calidad del aire. Acuda al médico si presenta síntomas respiratorios o cardíacos. Riesgos: Efectos adversos a la salud de la población en general. Se agravan los síntomas en niños, adultos mayores y personas con enfermedades cardiovasculares o respiratorias.
Extremadamente mala	mayor a 200	0.221 o más	321 o más	150.5 o más	Recomendaciones: Proteja su salud, no salga de casa o permanezca en lugares cerrados. Esté atento a la información de la calidad del aire, siga las instrucciones de Protección Civil y las autoridades de salud. Acuda inmediatamente al médico o solicite servicio de emergencia si presenta síntomas respiratorios o cardíacos. Riesgos: Efectos graves a la salud de la población en general. Se pueden presentar complicaciones en niños, adultos mayores y personas con enfermedades cardiovasculares o respiratorias.

\* Para PM<sub>2.5</sub> 100 puntos IMECA equivalen a 40.4 µg/m<sup>3</sup>.

## ANEXO F. ÍNDICE DE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA

El Índice de Radiación Ultravioleta (IUV), se emplea para comunicar cada hora los riesgos a la salud humana por exposición a la radiación solar. Entre más alto sea el valor del IUV, los

efectos serán mayores, dependiendo también del tiempo de exposición y del tipo de piel.

Si la radiación ultravioleta es...	y el IUV es...	según el tono de piel el tiempo máximo de exposición en minutos, sin protección es:					
		muy clara	clara	morena clara	morena oscura	oscura	muy oscura
Baja	1	112	140	175	219	274	342
	2	56	70	88	109	137	171
Moderada	3	37	47	58	73	91	144
	4	28	35	44	55	68	86
	5	22	28	35	44	55	68
Alta	6	19	23	29	37	47	57
	7	16	20	25	31	39	49
Muy alta	8	14	18	22	27	34	42
	9	12	16	19	24	30	38
	10	11	14	18	22	27	34
Extremadamente alta	11	10	13	16	20	25	31
	12	9	12	15	18	23	29
	13	9	11	14	17	21	26
	14	8	10	13	16	20	24
	15	8	9	12	15	18	23

<p>Piel muy clara</p> <p>Extrasensible, siempre se quema, no resiste el bronceado</p>		<p>Piel morena oscura</p> <p>Se quema mínimamente, siempre se broncea.</p>	
<p>Piel clara</p> <p>Sensible, se quema con facilidad, raramente logra un mínimo bronceado.</p>		<p>Piel oscura</p> <p>Raramente se quema, el bronceado es profundo.</p>	
<p>Piel morena clara</p> <p>Se quema con moderación, el bronceado es gradual.</p>		<p>Piel muy oscura</p> <p>No se quema.</p>	



## REFERENCIAS

- Aneja, V.; Schlesinger, W.; Erisman, J. W. (2009). "Effects of Agriculture upon the Air Quality and Climate: Research, Policy, and Regulations". *Environmental Science & Technology*. 43(12):4234-4240. [DOI: 10.1021/es8024403 disponible en <http://dx.doi.org/>].
- Bäumer D.; Versick S.; Vogel B. (2008). "Determination of the visibility using a digital panorama camera". *Atmospheric Environment*. 42(11): 2593-2602.
- Bush, M. L.; Patrick T. A.; Kristen A. M.; Abdellaziz, B.; James S. U. (1996). "Longitudinal distribution of ozone absorption in the lung: gender differences and intersubject variability". *Journal of Applied Physiology*. 81(4):1651-1657. [Disponible en <http://jap.physiology.org/cgi/content/full/81/4/1651>].
- Canadian Council of Ministers of the Environment. (2008). *2006-2007 Progress Report on The Canada-Wide Acid Rain Strategy for Post-2000*. Canadian Council of Ministers of the Environment. No. 1410. [Disponible en [http://www.ccme.ca/assets/pdf/2006\\_07\\_ar\\_progress\\_rpt\\_pn1410\\_e.pdf](http://www.ccme.ca/assets/pdf/2006_07_ar_progress_rpt_pn1410_e.pdf)].
- Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2010). *Boletín hidrometeorológico, octubre y noviembre 2010*. [Disponible en: [http://geografica.cenapred.unam.mx/Boletin\\_Sig/](http://geografica.cenapred.unam.mx/Boletin_Sig/)].
- Chelala, C. (1999). *Impacto del ambiente sobre la salud infantil*. Organización Panamericana de la Salud. Washington, D.C., USA [Disponible en <http://www.paho.org/spanish/hep/infancia.pdf>].
- Chu, C.; Lin, Y. (2000). "Effects of Orography on the Generation and Propagation of Mesoscale Convective Systems in a Two-Dimensional Conditionally Unstable Flow". *Journal of the Atmospheric Sciences*. 57:3817-3837.
- Cohen, A. J.; Anderson, H. R.; Ostro, B.; Dev Pandey, K.; Krzyzanowsky, M.; Künzli, N.; Gutschmidt, K.; Pope III, C. A.; Romieu, I.; Samet, J. M.; Smith, K. R. (2004). "Global and Regional Burden of Diseases Attributable to Selected Major Risk Factors". *Comparative Quantification of Health Risks*. Organización Mundial de la Salud. Suiza.
- Comisión Ambiental Metropolitana. (2003). *Programa para mejorar la calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2002-2010 (PROAIRE 2002-2010)*. México, D.F.
- Comisión de Derechos Humanos del Distrito Federal. (2008). *Informe especial sobre el derecho humano a un medio ambiente sano y la calidad del aire en la ciudad de México, 2008*. México, D. F.
- Cortez, L. M. (2002). Efecto de la exposición a partículas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  sobre la frecuencia y severidad de las exacerbaciones en los enfermos pulmonares obstructivos crónicos. CONACYT [212270-5-29198-M], PAHO [HDP/HDR/HEP/FEL/MEX/1496].
- Dayan U.; Levy I. (2005). "The Influence of Meteorological Conditions and Atmospheric Circulation Types on  $PM_{10}$  and Visibility in Tel Aviv". *Journal of Applied Meteorology*. 44(5):606-619.

- Fenn, M.; Huntington, T.; Mc Laughlin, S.; Eagar, C.; Gomez, A.; Cook, R. (2006). "Status of soil acidification in North America". Número especial de la revista *Journal of Forest Science*. Riverside, California, USA 52:3-13.
- Fierro, M. A.; O'Rourke M. K.; Burgess, J. L. (2001). *Adverse Health Effects of Exposure to Ambient Carbon Monoxide*. University of Arizona. USA [Disponible en <http://www.airinfoNOW.com/pdf/CARBON%20MONOXID2.PDF>].
- Finlayson-Pitts, B. J.; Pitts, J. N. (1986). *Atmospheric Chemistry: Fundamentals and Experimental Techniques*. John Wiley & Sons. USA
- Gobierno del Distrito Federal. (2007). *Programa General de Desarrollo del Distrito Federal 2007-2012*. México, D. F.
- Gobierno del Distrito Federal. (2008a). "Decreto por el que se expide el Programa para Contingencias Ambientales Atmosféricas en el Distrito Federal". *Gaceta Oficial del Distrito Federal*. México, D.F. Décima séptima época, no. 366. pp. 10-26. [Disponible en: <http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/biblioteca/pcaa2008.pdf>].
- Gobierno del Distrito Federal. (2008b). "Manual para la aplicación del programa para contingencias ambientales atmosféricas en el Distrito federal". *Gaceta Oficial del Distrito Federal*. México, D.F. Décima séptima época, no. 409. pp. 6-37. [Disponible en: [http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/archivos/manual\\_pcaa.pdf](http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/archivos/manual_pcaa.pdf)].
- Gobierno del Distrito Federal, Banco Mundial, Organización Panamericana de la Salud, Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo. (2001). *Ecosistema urbano y salud de los habitantes de la Zona Metropolitana del Valle de México*. México, D.F.
- Hernández, T.; Bauer, M. L. (1989). *La supervivencia vegetal ante la contaminación atmosférica*. Colegio de Postgraduados. Centro de Fitopatología. Montecillo, México.
- Horvath H. (1981). "Atmospheric Visibility". *Atmospheric Environment*. 15(10):1785- 1796.
- Huanga, W.; Tanb, J.; Kanc, H.; Zhaod, N.; Songc, W.; Songe, G.; Chenf, G.; Jiange, L.; Jiange, Ch.; Chenc, R.; Chen, B. (2009). "Visibility, air quality and daily mortality in Shanghai, China". *Science of the Total Environment*. 407(10):3295-3300.
- Hyslop, N. P. (2009). "Impaired visibility: the air pollution people see". *Atmospheric Environment*. 43:182-195.
- H. Ayuntamiento de Ecatepec. (2010). Boletines de prensa. [Disponible en: <http://www.ecatepec.gob.mx/boletines/anteriores.php?m=11&y=2009> - consulta realizada el 20/04/2010].
- Instituto de Aire Limpio. (2007). *Revisión Crítica de Información sobre el Proyecto de Restricción Vehicular Sabatina*. Washington, D.C., USA. [Disponible en <http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/archivos/revisioncritica.pdf>].
- Instituto Nacional de Ecología. (2010). <http://www.ine.gob.mx/calibre-herramientas-analisis/544-calibre-impacto-salud> - consulta realizada el 02/03/2010.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2005). *Estadísticas del Medio Ambiente del*

- Distrito Federal y Zona Metropolitana, 2002.* Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Gobierno del Distrito Federal, Secretaría del Medio Ambiente. México, D. F.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2007). *Encuesta Origen-Destino, 2007.* Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Gobierno del Distrito Federal, Gobierno del Estado de México. México, D. F.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2009). *Anuario Estadístico del Distrito Federal 2009.* Dirección Regional Centro del INEGI. México, D. F.
- Jáuregui Ostos, Ernesto. (2000). *El clima de la Ciudad de México, Temas selectos de geografía de México.* Plaza y Valdés. México, D.F.
- Korc M.; Farías E. F.; Cerda R. (2000). *El proceso de fijación y revisión de normas de calidad del aire.* Organización Panamericana de la Salud. [Disponible en <http://www.cepis.org.pe/bvsci/E/fulltext/normas/normas.html>].
- Krupa, S. V. (1999). *Polución, población y plantas.* Trad. M. Bauer. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Larssen, T.; Lydersen, E.; Tang, D.; He, Y.; Gao, J.; Liu, H.; Duan, L.; Seip, H.M.; Vogt, R.D.; Mulder, J.; Shao, M.; Wang, Y.; Shang, H.; Zhang, X.; Solberg, S.; Aas, W.; Økland, T.; Eilertsen, O.; Angell, V.; Liu, Q.; Zhao, D.; Xiang, R.; Xiao, J.; Luo, J.. (2006). "Acid rain in China". *Environmental Science & Technology*. 40(2):418-425.
- Lezama, J.L. (2001). *El medio ambiente como construcción social: reflexiones sobre la contaminación del aire en la Ciudad de México.* El Colegio de México. pp. 332.
- Malm, William. C. (1999). *Introduction to Visibility.* Cooperative Institute for Research in the Atmosphere. NPS Visibility Program, Colorado State University. USA.
- Malm, E.; Kelley, K.; Molenaar J. (1981). "Human Perception of visual air quality (uniform haze)". *Atmospheric Environment*. 15(10):1875-1890.
- Martineau R. J. y Novello D. P. (2004). *The clean air act, Handbook second edition.* American bar association. [Disponible en <http://books.google.com.mx/> - consulta realizada el 24/03/2010].
- Molenaar J. V.; Malm William C. (1994). "Visual Air Quality Simulation Techniques". *Atmospheric Environment*. 28(5):1055-1063.
- National Atmospheric Deposition Program. (2009). *National Atmospheric Deposition Program 2008, Annual Summary.* Illinois State Water Survey, University of Illinois at Urbana-Champaign. Illinois, USA. Data Report 2009-01. [Disponible en <http://nadp.sws.uiuc.edu/lib/data/2008as.pdf>].
- Organización Mundial de la Salud. *Air Quality and Health.* [<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/index.html> - consulta realizada el 23/03/2010].
- Organización Mundial de la Salud. (2000). *Air Quality Guidelines for Europe.* Regional Office for Europe. European Series. No. 91. 2a. ed. Copenague.
- Organización Mundial de la Salud. (2006a). *Air Quality Guidelines. Global update 2005.* Regional Office for Europe.

- Organización Mundial de la Salud. (2006b). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Actualización mundial 2005*. [Disponible en [http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO\\_SDE\\_PHE\\_OEH\\_06.02\\_spa.pdf](http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf)].
- Ozkaynak H.; Schatz A. D.; Thurston G. D.; Isaacs R. G.; Husar R. B. (1985). "Relationships between aerosol extinction coefficients derived from airport visual range observations and alternative measures of airborne particle mass". *Journal of the Air Pollution Control Association*. 35:1176-1185.
- Pérez, M.; Cetina, V.; Aldrete, A., Fenn, M. E.; Landois, L. (2006). "Química de la precipitación pluvial en dos bosques de la cuenca de la Ciudad de México". *Agrociencia*. 40(002): 239-248. Colegio de Postgraduados. Texcoco, México.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Secretaría del Medio Ambiente, Centro de Investigación en Geografía y Geomática "Ing. Jorge L. Tamayo". (2003). *Perspectivas del medio ambiente*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente Oficina Regional para América Latina y el Caribe (ORPALC), División de Evaluación Ambiental y Alerta Temprana, GEO Ciudad de México. México, D. F. [Disponible en <http://www.pnuma.org/geociudades/PDFs/geomexico.pdf>].
- Pryor, W. A. (1992). "How far does ozone penetrate into pulmonary air/tissue boundary before it reacts?". *Free Radical Biology & Medicine*. 12:83-88.
- Riojas, R. H. (2009). "Efectos de la contaminación del aire en la población de la ZMVM". *Seminario Internacional sobre Calidad del Aire y Efectos a la Salud*. Ciudad de México.
- Rojas, E. ; Valverde, M. ; López, M. C.; Naufal, I.; Sánchez, I.; Bizarro, P. ; López, I.; Fortoul, T. I.; Ostrosky-Wegman, P. (2000). "Evaluation of DNA damage in exfoliated tear duct epithelial cells from individuals exposed to air pollution assessed by single cell gel electrophoresis assay". *Mutation Research*. 468:11-17.
- 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.; Kolb, C. E.; Johnson, K. S.; Zuberi, B.; Marr, L. C.; Volkamer, R.; Molina, L. T.; Molina, M. J.; Cardenas, B.; Bernabé, R. M.; Márquez, C.; Gaffney, J. S.; Marley, N. A.; Laskin, A.; Shutthanandan, V.; Xie, Y.; Brune, W.; Leshner, R.; Shirley, T.; Jimenez, J. L. (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*. 6:925-946.
- Sarangapani, R.; Gentry, P. R.; Covington, T. R.; Teeguarden, J. G.; Clewell III, H. J. (2003). "Evaluation of the potential impact of age- and genderspecific lung morphology and ventilation rate on the dosimetry of vapors". *Inhalation Toxicology*. 15:987-1016.
- Secretaría del Medio Ambiente. (2000). *Manual técnico para el establecimiento y manejo integral de las áreas verdes urbanas del Distrito Federal. Tomo I*. Banco Interamericano de Desarrollo, Gobierno del Distrito Federal. México, D. F.
- Secretaría del Medio Ambiente. (2005). *Informe Climatológico de la ZMVM, 2004*. Gobierno del Distrito Federal. México, D. F.

- Secretaría del Medio Ambiente. (2006a). *La calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México, 20 años de monitoreo atmosférico*. Gobierno del Distrito Federal. México, D. F.
- Secretaría del Medio Ambiente. (2006b). *Informe Climatológico Ambiental del Valle de México, 2005*. Gobierno del Distrito Federal. México, D. F.
- Secretaría del Medio Ambiente. (2007a). *Agenda Ambiental de la Ciudad de México. Programa de Medio Ambiente 2007-2012*. Gobierno del Distrito Federal. México, D. F. [Disponible en <http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/archivos/agendambiental2008/15completo.pdf>].
- Secretaría del Medio Ambiente. (2007b). *Plan Verde de la Ciudad de México 2007-2015*. Gobierno del Distrito Federal. México, D. F. [Disponible en <http://www.sma.df.gob.mx/planverde/>].
- Secretaría del Medio Ambiente. (2008). *Programa de Acción Climática de la Ciudad de México 2008-2012*. Gobierno del Distrito Federal. México, D. F. [Disponible en [http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/archivos/paccm\\_documento.pdf](http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/archivos/paccm_documento.pdf)].
- Secretaría del Medio Ambiente. (2009a). *3<sup>er</sup> Informe de Trabajo de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, Octubre 2008-Septiembre 2009*. Gobierno del Distrito Federal. México, D. F. [Disponible en <http://www.sma.df.gob.mx/sma/index.php?opcion=26&id=616>].
- Secretaría del Medio Ambiente. (2009b). *Programa Demostrativo de Transporte Escolar*. Gobierno del Distrito Federal. México, D. F. [Disponible en [http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/biblioteca/resultados\\_programa\\_demostrativo\\_prote.pdf](http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/biblioteca/resultados_programa_demostrativo_prote.pdf)].
- Secretaría del Medio Ambiente. (2010). *Inventario de emisiones de contaminantes criterio en la Zona Metropolitana del Valle de México 2008*. Gobierno del Distrito Federal, Secretaría del Medio Ambiente. México, D. F.
- Secretaría de Obras y Servicios. (2009). *3<sup>er</sup> Informe de Labores de la Secretaría de Obras y Servicios, 2008-2009*. México, D. F. [Disponible en <http://www.obras.df.gob.mx/noticias/3informe.pdf>].
- Secretaría de Protección Civil del Distrito Federal. (2010). Boletín 346, 347. [Disponible en: <http://www.proteccioncivil.df.gob.mx/boletin/Boletin2009/> - consulta realizada el 21/04/2010].
- Secretaría de Salud. (1994a). "NORMA Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-1993, Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>). Valor normado para la concentración de bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población". *Diario Oficial de la Federación*. México, D.F. Tomo CDXCV, no. 16. pp. 51-53.
- Secretaría de Salud. (1994b). "NORMA Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-1993, Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). Valor normado para la concentración de bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población". *Diario Oficial de la Federación*. México, D.F. Tomo CDXCV, no. 16. pp. 54-55.
- Secretaría de Salud. (1994c). "NORMA Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-1993, Salud Ambiental. Cri-

- terio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al monóxido de carbono (CO). Valor normado para la concentración de monóxido de carbono (CO) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población". *Diario Oficial de la Federación*. México, D.F. Tomo CDXCV, no. 16. pp. 48-50.
- Secretaría de Salud. (1994d). "NORMA Oficial Mexicana NOM-026-SSA1-1993, Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al plomo (Pb). Valor normado para la concentración de plomo (Pb) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población". *Diario Oficial de la Federación*. México, D.F. Tomo CDXCV, no. 16. pp. 62-64.
- Secretaría de Salud. (2002). "NORMA Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-1993, Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al ozono (O<sub>3</sub>). Valor normado para la concentración de ozono (O<sub>3</sub>) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población". *Diario Oficial de la Federación*. México, D.F. Tomo DLXXXIX, no. 25. pp. 47-53.
- Secretaría de Salud. (2005). "NORMA Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterios para evaluar el valor límite permisible para la concentración de material particulado. Valor límite permisible para la concentración de partículas suspendidas totales PST, partículas menores de 10 micrómetros PM<sub>10</sub> y partículas menores de 2.5 micrómetros PM<sub>2.5</sub> de la calidad del aire ambiente. Criterios para evaluar la calidad del aire". *Diario Oficial de la Federación*. México, D.F. Tomo DCXXIV, no. 17. pp. 55-64.
- Secretariado Técnico Intergubernamental. (1990). *Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Un compromiso Común*. México, D. F.
- Servicio Meteorológico Nacional. (2010). *Mapas diarios de precipitación*. [Disponibles en: <http://smn.cna.gob.mx/climatologia/precipitacion/octubre/po octubre.html> - consulta realizada el 21/04/2010].
- Stephens, S.; Madronich, S.; Wu, F.; Olson, B.; Ramos, R.; Retama, A.; Muñoz, R. (2008). "Weekly patterns of México City's surface concentrations of CO, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub> and O<sub>3</sub> during 1986-2007". *Atmospheric Chemistry and Physics*. 8:5313-5325.
- US Environmental Protection Agency. *National Ambient Air Quality Standards (NAAQS)*. [Disponible en <http://www.epa.gov/air/criteria.html> - consultada el 28/02/2010].
- US Environmental Protection Agency. (1999). *Visibility Monitoring Guidance*. Reporte no. EPA-545/R-99-003.
- US Environmental Protection Agency. (2010). *Our Nation's Air. Status and trends through 2008*. Publicación no. EPA-454/R-09-002.
- Valacchi, G.; Pagnin, E.; Corbacho, A. M.; Olano, E.; Davis, P. A.; Packer, L.; Cross, C. E. (2004). "In vivo ozone exposure induces antioxidant/stress-related responses in murine lung and skin". *Free Radical Biology & Medicine*. 36:673-681.
- Wallace, J. M.; Hobbs, P. V. (2006). "Atmospheric Science: An Introductory Survey". *International Geophysics Series*. Vol. 92. 2a. ed. Elsevier, University of Washington. Canada.
- Wiester, M. J.; Stevens, M. A.; Menache, M. G.; McKee, J. L.; Gerrity, T. R. (1996). "Ozone uptake in

healthy adult males during quiet breathing”.  
*Fundamental and Applied Toxicology*. 29:102–109.

World Meteorological Organization. (2004). *Manual for the GAW Precipitation Chemistry Programme*. World Meteorological Organization Global Atmosphere Watch. No. 160.

World Meteorological Organization. (2008). *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. No. 8 . 7a. ed.

Zhang, Q.; Zhang, J.; Xue H. (2010). “The challenge of improving visibility in Beijing”. *Atmospheric Chemistry and Physics Discuss.* 10:6199–6218.



Fotografía: Archivo Dirección de Monitoreo Atmosférico



# CALIDAD DEL AIRE EN LA CIUDAD DE MÉXICO Informe 2009

El Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) es el instrumento de gestión encargado de vigilar y evaluar la calidad del aire en la Ciudad de México y su área metropolitana, para proteger la salud de la población.

El crecimiento urbano que demanda actividades diarias de consumo de energía y factores como las condiciones fisiográficas y climáticas del valle, influyen en el deterioro de la calidad del aire, la cual continúa como uno de los retos ambientales más serios que enfrentan los habitantes y las diferentes administraciones que han gobernado e instrumentado políticas públicas en esta ciudad.

El informe 2009 describe la situación actual de la calidad del aire en la Ciudad de México, así como el nivel de cumplimiento de la normatividad nacional e internacional, las tendencias de los contaminantes criterio y proporciona información detallada sobre las causas e impactos de la contaminación atmosférica.



Sistema de  
Monitoreo Atmosférico de la  
Ciudad de México

