



Tercer almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en nueve ciudades mexicanas

Miriam Zuk, M. Guadalupe Tzintzun Cervantes
y Leonora Rojas Bracho

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Instituto Nacional de Ecología

**TERCER ALMANAQUE DE DATOS
Y TENDENCIAS DE LA CALIDAD DEL AIRE
EN NUEVE CIUDADES MEXICANAS**

**TERCER ALMANAQUE DE DATOS
Y TENDENCIAS DE LA CALIDAD DEL AIRE
EN NUEVE CIUDADES MEXICANAS**

*Miriam Zuk, María Guadalupe Tzintzun Cervantes
y Leonora Rojas Bracho*

Con la colaboración de:

*Georgina Echaniz Pellicer, Verónica Garibay Bravo,
Rodolfo Iniestra Gómez, María Tania López Villegas,
Jorge Martínez y María Fernanda Padilla Stevenel*

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Instituto Nacional de Ecología

Primera edición: mayo de 2007

D.R. © Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT)
Periférico sur 5000. Col. Insurgentes Cuicuilco,
C.P. 04530. México, D.F.
www.ine.gob.mx

REVISIÓN Y TIPOGRAFÍA: Raúl Marcó del Pont Lalli

DISEÑO DE PORTADA: Raúl Marcó del Pont Lalli

FOTO DE PORTADA: IStockphoto

EDICIÓN PARA INTERNET: Susana Escobar

ISBN 978-968-817-840-9

ISBN 968-817-840-3

Impreso y hecho en México

ÍNDICE

Agradecimientos	9
Siglas y acrónimos	11
Resumen ejecutivo	13
Introducción	17
1 Antecedentes	19
2 Redes de monitoreo en México	25
3 Metodología para la generación de indicadores de la calidad del aire	43
4 Partículas suspendidas	49
5 Ozono	63
6 Monóxido de carbono	73
7 Bióxido de azufre	83
8 Bióxido de nitrógeno	93
9 Conclusiones y recomendaciones	103
Anexo I. Normatividad internacional	109
Bibliografía	111

AGRADECIMIENTOS

Las fuentes de los datos horarios empleados para elaborar este tercer almanaque fueron amablemente proporcionados por las siguientes dependencias:

- Dirección General de Gestión Ambiental del Aire de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal (www.sma.df.gob.mx/simat/).
- Centro de la Información Ambiental de la Secretaría de Medio Ambiente para el Desarrollo Sustentable del Gobierno del Estado de Jalisco (http://semades.jalisco.gob.mx/site/06/imeca_actual.htm).
- Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México (http://www.edomex.gob.mx/se/rama/monitoreo_atmosferico.htm).
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales del Gobierno del Estado de Puebla (<http://www.remapuebla.gob.mx/aire.php>).
- Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato (http://www.guanajuato.gob.mx/ieeg/contenido_ieeg.htm).
- Agencia de Protección al Medio Ambiente y Recursos Naturales del Estado de Nuevo León (http://www.nl.gob.mx/?P=med_amb_mej_amb_sima).
- Dirección General de Ecología y Protección Civil del Municipio de Juárez, Chihuahua (www.juarez.gob.mx, http://www.tceq.state.tx.us/cgi-bin/compliance/monops/site_info).
- Secretaría de Protección al Ambiente del Estado de Baja California (<http://aire.bajacalifornia.gob.mx/>)
- Agencia de Recursos del Aire de California de EUA (CARB, por sus siglas en inglés) (<http://www.arb.ca.gov/qaweb/site.php>).

También agradecemos los comentarios de:

- Dirección General de Gestión Ambiental del Aire de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal .

- Centro de la Información Ambiental de la Secretaría de Medio Ambiente para el Desarrollo Sustentable del Gobierno del Estado de Jalisco.
- Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México.
- Agencia de Protección al Medio Ambiente y Recursos Naturales del Gobierno del Estado de Nuevo León.
- Secretaría del Protección al Ambiente del Gobierno del Estado de Baja California.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales del Estado de Puebla.
- Dirección General del Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental del Instituto Nacional de Ecología.

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

AEMA	Agencia Europea del Medio Ambiente		Investigación sobre la Contaminación Urbana, Regional y Global
AGEB	Áreas Geo-estadísticas básicas		
AIRS	Aerometric Information Retrieval System	DGIPEA	Dirección General de Política y Economía Ambiental
BDAM	Banco de Desarrollo de América del Norte	DI	Datos insuficientes
CARB	Agencia de Recursos del Aire de California (California Air Resources Board)	DOF	Diario Oficial de la Federación
CH ₄	Metano	EC	Comisión Europea (European Commission)
CO	Monóxido de carbono	EUA	Estados Unidos de América
COT	Compuestos orgánicos totales	FTCJ	Fondo de Fomento Turístico de Ciudad Juárez
COV	Compuestos orgánicos volátiles	GDF	Gobierno del Distrito Federal
CPA	Contaminantes peligrosos del aire	GEBC	Gobierno del Estado de Baja California
DGCENICA	Dirección General del Centro de Investigación y Capacitación Ambiental	GECH	Gobierno del Estado de Chihuahua
DGICURG	Dirección General de	GEG	Gobierno del Estado de Guanajuato
		GEJ	Gobierno del Estado de Jalisco

GEM	Gobierno del Estado de México	RMA	Red de Monitoreo Atmosférico
GENL	Gobierno del Estado de Nuevo León	SE	Secretaría de Ecología
GEP	Gobierno del Estado de Puebla	SEDESOL	Secretaría de Desarrollo Social
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico	SEGOB	Secretaría de Gobernación
HC	Hidrocarburos	SEMARNAP	Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca
IDW	Método de interpolación de distancia inversa ponderada (Inverse Distance Weighted)	SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
IMECA	Índice Metropolitano de la Calidad del Aire	SENER	Secretaría de Energía
INE	Instituto Nacional de Ecología	SI	Sin información en el INE
INEGI	Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática	SIMA	Sistema Integral de Monitoreo Ambiental
mm	Micrómetros	SIMAT	Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México
msnm	Metros sobre el nivel del mar	SINAICA	Sistema Nacional de Información de Calidad del Aire
NO	Óxido nítrico	SM	Sin medición
NO ₂	Bióxido de nitrógeno	SMA	Secretaría del Medio Ambiente
NOM	Norma Oficial Mexicana	SMRN	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Estado de Puebla
NO _x	Óxido de nitrógeno	SO ₂	Bióxido de azufre
NSC	Nacional Safety Council	SO ₃	Trióxido de azufre
O ₃	Ozono	SO _x	Óxido de azufre
OJEC	Official Journal of the European Communities	UE	Unión Europea
Pb	Plomo	USEPA	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (Environmental Protection Agency)
PM	Partículas suspendidas	UV	Ultravioleta
PM ₁₀	Partículas suspendidas con diámetros aerodinámicos menores de 10 µg/m ³	WDHFS	Wisconsin Department of Health and Family Services
PM _{2.5}	Partículas suspendidas con diámetros aerodinámicos menores de 2.5 µg/m ³	WHO	Organización Mundial de la Salud (OMS)
PNMA	Programa Nacional de Monitoreo Atmosférico	ZMG	Zona Metropolitana de Guadalajara
ppm	Partes por millón	ZMM	Zona Metropolitana de Monterrey
PST	Partículas Suspendidas Totales	ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México
RAMA	Red Automática de Monitoreo Atmosférico	ZMVT	Zona Metropolitana del Valle de Toluca
REDDA	Red de Depósito Atmosférico	µg/m ³	Microgramo sobre metro cúbico
REDMA	Red Manual del Monitoreo Atmosférico		
REDMET	Red Meteorológica		
REMA	Red Estatal de Monitoreo Atmosférico		

RESUMEN EJECUTIVO

El *Tercer almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en nueve ciudades mexicanas* recopila, sistematiza y analiza los datos de la calidad del aire generados por las redes locales de monitoreo de nueve zonas metropolitanas y ciudades mexicanas: las zonas metropolitanas del Valle de México (ZMVM), de Guadalajara (ZMG), del Valle de Toluca (ZMVT) y de Monterrey (ZMM), y las ciudades de Puebla, Tijuana, Mexicali, Salamanca y Ciudad Juárez, para el periodo 1997-2005.

La información contenida en este almanaque muestra que las ciudades mexicanas presentan niveles elevados de contaminantes atmosféricos que pueden representar un riesgo para la salud de la población y para el medio ambiente. Aunque algunas ciudades han experimentado disminuciones en los niveles de ciertos contaminantes, en todas las ciudades aquí incluidas se registraron en el año 2005, para al menos un contaminante, concentraciones que exceden las normas establecidas por la Secretaría de Salud para

proteger la salud humana. En este sentido cabe hacer mención de la reducción de las concentraciones de bióxido de azufre (SO_2), bióxido de nitrógeno (NO_2) y monóxido de carbono (CO), en contraposición a las consistentemente elevadas concentraciones de ozono (O_3) y partículas suspendidas con diámetro aerodinámico menor de 10 micras (PM_{10}).

El cuadro 1 presenta una clasificación de las ciudades de acuerdo con los niveles de contaminación registrados en 2005 para cada contaminante. La clasificación responde a un indicador compuesto que pondera tanto la frecuencia de días en los que se excede el límite establecido en la norma de calidad del aire, como la magnitud de las concentraciones alcanzadas en cada ciudad o zona metropolitana (ver capítulo 3); de esta forma, el primer lugar corresponde a la ciudad más contaminada, y el último a aquella con menores niveles del contaminante.

Con base en el indicador compuesto mencionado, se observa que las ciudades con un problema más serio

CUADRO 1. CLASIFICACIÓN DE LAS CIUDADES POR CONTAMINANTE (2005)

CONTAMINANTE	ZMVM	ZMG	ZMVT	PUEBLA	SALAMANCA	ZMM	CIUDAD JUÁREZ	TIJUANA	MEXICALI
PM ₁₀	6°	5°	2°	8°	NA	3°	4°	7°	1°
O ₃	1°	2°	4°	7°	NA	3°	5°	8°	6°
CO	5°	2°	4°	8°	NA	6°	3°	7°	1°
SO ₂	2°	5°	3°	6°	1°	4°	NA	8°	7°
NO ₂	2°	1°	4°	7°	NA	6°	NA	5°	3°

NA: no aplica.

de PM₁₀ son Mexicali, la ZMVT, la ZMM y Ciudad Juárez; para el resto de las ciudades, las concentraciones son menores, pero de todas formas rebasan los límites establecidos para la protección de la salud humana –con la excepción de Puebla. Entre las fuentes principales de emisión de PM₁₀ se encuentran los procesos de combustión, como son las emisiones de vehículos que utilizan diesel, la erosión, los caminos sin pavimentación y las quemas agrícolas. Por ello, algunas ciudades con tránsito intenso de vehículos de carga y las que se encuentran asentadas en las zonas áridas del país registran los niveles más elevados de este contaminante, lo que indica que es necesario controlar tanto las fuentes antropogénicas como las naturales.

Las partículas de la fracción fina, conocidas como PM_{2.5}, se monitorean en la ZMVM y la ZMM, pero sólo en la primera se cuenta con suficientes datos para evaluar la calidad del aire conforme a la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993 (DOF, 2005). Los datos de la ZMVM indican que se cumple con la norma diaria, aunque no con la norma anual que regula la exposición crónica, pues se registran concentraciones ambientales que casi duplican los límites especificados en la norma.

Es importante que el resto de las redes de monitoreo del país incluyan las mediciones de PM_{2.5}, ya que es el contaminante que se ha asociado más fuertemente con ciertos efectos en la salud, e incluso con muertes prematuras. Por lo pronto, se espera una reducción a escala nacional de las emisiones de este contaminante y sus precursores, con medidas que conforman

un enfoque sistémico que incluye la instrumentación conjunta de estrategias para mejorar la calidad ambiental de los combustibles (en particular la reducción de azufre en gasolina y diesel) a la par del desempeño vehicular, con la revisión de las normas de emisiones vehiculares (NOM-044 y NOM-042), que se han vuelto paulatinamente más estrictas. A pesar de las disminuciones de emisiones que se espera que ocurran en los próximos años, son indispensables los esfuerzos para lograr mayores reducciones de este contaminante y de sus precursores, provenientes no sólo del sector transporte sino también del sector eléctrico y petroquímico, ya que no se ha identificado una concentración umbral para algunos de los efectos en la salud evaluados con estudios epidemiológicos en diversas ciudades del mundo.

En lo referente al O₃, en los últimos años casi todas las ciudades reportadas en este almanaque (menos Tijuana) han rebasado las normas de calidad del aire horaria y anual. La ZMVM, aunque se han reducido las concentraciones máximas en un 30% durante el periodo 1997-2005, lleva la delantera en cuanto al indicador presentado en el cuadro 1, pues rebasa la norma durante el mayor número de días (233 días en 2005). Por su parte, la ZMG y la ZMM son focos de atención debido a que en los últimos cinco años las concentraciones de O₃ (los quintos máximos anuales de los promedios móviles de 8 horas) han aumentado en un 11% y un 22%, respectivamente.

La situación expuesta para el O₃ indica que es necesario controlar las principales fuentes de emisión de

los precursores de este contaminante –los compuestos orgánicos volátiles (COV) y los óxidos de nitrógeno (NO_x)–, entre las que se encuentran los vehículos motorizados. Sin un control más estricto de las emisiones de este sector, podrían revertirse las mejoras –manifestadas por la reducción de los niveles máximos de ozono– que se han logrado en algunas ciudades del país en la última década. Se estima que con el control más estricto de las emisiones de los vehículos nuevos, junto con la reducción del contenido de azufre en gasolina y diesel, las emisiones de COV y NO_x de origen vehicular podrían reducirse, respectivamente, en un 28% y un 50% durante los próximos 25 años (INE, 2006). Por lo tanto, el mejorar la calidad de los combustibles y acelerar la renovación de la flota vehicular deben complementarse con medidas adicionales para el control de otras fuentes de emisión.

Con la introducción de los convertidores catalíticos a principios de la década pasada, se redujeron significativamente las emisiones y, por lo tanto, las concentraciones ambientales de CO, lo que contribuyó a que este contaminante presente niveles por arriba del límite establecido en la norma de calidad del aire sólo en tres ciudades: Mexicali, la ZMG y Ciudad Juárez. Las concentraciones elevadas en las ciudades de la frontera pueden asociarse con los vehículos con tecnologías caducas que circulan en ellas. Por ejemplo, en Mexicali, las concentraciones ponderadas por población fueron las más altas de todas las ciudades evaluadas, y en 2004 se rebasó el valor de la norma en 17 días. Por ello, es fundamental promover y acelerar la renovación de la flota vehicular con tecnologías avanzadas para la reducción de emisiones, en paralelo con el control de las emisiones de los vehículos en circulación a través de programas de verificación vehicular.

En lo que respecta al SO₂, el escenario de las ciudades es más favorable, pues la mayoría de ellas cumplieron con las normas de calidad del aire. La excepción la constituye Salamanca, lo que se explica porque en ella se asientan la Central Termoeléctrica de Salamanca y la Refinería Ing. Antonio M. Amor; la consecuencia de las elevadas emisiones de SO₂ es que las concentraciones de SO₂ ponderadas por población en 2005 fueron dos veces superiores a las de la ciudad con el valor más

elevado —la ZMVT—, y que sea la única ciudad reportada en este almanaque donde se rebasa la norma anual de SO₂ establecida en la respectiva norma de calidad del aire.

Seguramente otras ciudades o localidades donde se ubican termoeléctricas o refinerías importantes presentan niveles elevados de SO₂, pero no se cuenta con monitoreos para conocer su situación respecto a este contaminante. Por otra parte, la reducción de los niveles de SO₂ en la atmósfera puede lograrse tanto mediante el mejoramiento de la calidad ambiental de los combustibles industriales, como mediante la disminución de las emisiones de estas fuentes con la instalación de equipos de control, estrategias que deben instrumentarse en el país dado que varios estudios realizados en el país y en el extranjero han mostrado que las emisiones de las centrales termoeléctricas pueden afectar la calidad del aire en las zonas aledañas y la salud de las poblaciones circunvecinas (Levy *et al.*, 2002; Levy y Spengler, 2002; EC, 1995; SEMARNAT y CEPAL, 2004; López *et al.*, 2005).

Para el NO₂, un contaminante que proviene principalmente de las emisiones vehiculares, se encontró que las zonas metropolitanas de Guadalajara y del Valle de México se ubican en el primer lugar en la clasificación global de las ciudades del almanaque (cuadro 1), por ser las que han presentado niveles por arriba de la norma. Como ya se mencionó, la introducción de nuevas tecnologías vehiculares, junto con la mejora de sus combustibles, podría reducir en un 50% la emisión de NO_x proveniente de este sector. Sin embargo, para poder reducir todavía más las concentraciones de NO₂, se requiere un control más estricto de las emisiones de vehículos en circulación y la reducción del uso de automóviles particulares en general, lo que se puede lograr mediante el fortalecimiento de los sistemas de transporte público.

El *Tercer almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire* pone en evidencia la necesidad de mejorar la calidad del aire en las ciudades mexicanas, y resalta que la ZMVM, alguna vez asignataria de la etiqueta “una de las ciudades más contaminadas del mundo”, ahora comparte esta desafortunada distinción con otras ciudades del país.

Con el objeto de evaluar la evolución y las tendencias de la calidad del aire, se requiere del apoyo y la mejora de los sistemas de monitoreo atmosférico locales, así como de la instrumentación total del Programa Nacional de Monitoreo Atmosférico, ya en sus etapas iniciales de implementación a través del INE. A la vez, las autoridades federales, en coordinación con las estatales y locales, debemos buscar mecanismos para asegurar el cumplimiento de las normas y la reducción de las emisiones de los contaminantes, con el fin de proteger la salud de la población actual y también de las generaciones futuras.

El INE, al elaborar este almanaque, muestra el valor potencial de los datos colectados en las redes de monitoreo de contaminantes atmosféricos, pues el diagnóstico de la calidad del aire es una herramienta crucial para diseñar, aplicar y evaluar estrategias de control de la contaminación del aire. Asimismo, el poner esta información a disposición de autoridades, instituciones públicas y privadas, y también de todos aquellos ciudadanos interesados, es una vía para exhortarlos a seguir trabajando juntos para mejorar la calidad del aire que todos, inevitablemente, respiramos.

INTRODUCCIÓN

El aire que se respira en las principales ciudades mexicanas se encuentra contaminado por varios compuestos atmosféricos, que son generados tanto por procesos naturales como por actividades humanas. La exposición de las personas a los contaminantes atmosféricos está asociada con graves afecciones de la salud, como ataques de asma, bronquitis, enfermedades cardíacas, etcétera, y se ha encontrado que la inhalación de los contaminantes día con día, aun en cantidades relativamente bajas, puede causar daños irreversibles a la salud, como por ejemplo reducciones en la capacidad pulmonar de los niños (Gauderman *et al.*, 2004). Asimismo, los resultados de algunos estudios epidemiológicos muestran que la exposición a ciertos contaminantes atmosféricos está asociada con un incremento de mortalidad por enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Castillejos *et al.*, 2000; Borja-Aburto *et al.*, 1998; Pope *et al.*, 2002).

Debido a esta asociación entre contaminación atmosférica y efectos en la salud, la gestión de la calidad

del aire en las ciudades mexicanas se ha establecido como una prioridad para las autoridades ambientales. El monitoreo junto con los inventarios de emisiones son las herramientas básicas para la atención de los problemas de calidad del aire. En este proceso es imprescindible contar con un diagnóstico preciso de la distribución en espacio y tiempo de cada contaminante, pues sólo a partir de ello es posible estimar la magnitud del problema que se pretende atender.

Este *Tercer almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en nueve ciudades mexicanas* presenta la recopilación, el procesamiento y el análisis sistemático de los datos de la calidad del aire generados en nueve zonas metropolitanas y ciudades, que se han agrupado en regiones norte y centro. La región centro comprende la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG), la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), Puebla y Salamanca. En la región norte se incluyen la Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM),

Ciudad Juárez, Tijuana y Mexicali. El propósito de este documento es proporcionar a las autoridades ambientales y de salud, investigadores, estudiantes, organismos no gubernamentales y otros interesados, un panorama de la distribución de los contaminantes y las tendencias de la calidad del aire en dichas ciudades, así como una evaluación de la situación actual de la contaminación atmosférica.

En el primer capítulo de este documento se exponen algunos conceptos básicos sobre los contaminantes atmosféricos, las normas de calidad del aire y el monitoreo atmosférico, con el fin de proporcionar los antecedentes y el marco contextual para el análisis incluido en los capítulos siguientes. El segundo capítulo incluye una breve descripción de las redes de monitoreo de las nueve ciudades en cuestión. En el tercer capítulo se muestra la metodología utilizada para analizar y procesar los datos generados por las redes de monitoreo, así como los procedimientos para el cálculo de los diversos indicadores que permiten cuantificar, comunicar y comparar el estado de la calidad del aire en estas nueve localidades.

Del capítulo cuatro al capítulo ocho se presentan los indicadores y tendencias de la calidad del aire para cada uno de los siguientes contaminantes: partículas suspendidas (PM_{10} y $PM_{2.5}$), ozono (O_3), monóxido de carbono (CO), bióxido de azufre (SO_2) y bióxido de nitrógeno (NO_2), durante el periodo 1997-2005. La

información para cada contaminante se expone de manera general para cada una de las ciudades; esto es, con cada indicador se cuantifica la situación de la calidad del aire en toda la ciudad. Con el fin de describir el comportamiento de los contaminantes, cada capítulo muestra la distribución temporal y espacial de las concentraciones, la exposición de la población, el cumplimiento con las normas de calidad del aire, y las conclusiones.

Finalmente, en el capítulo nueve se presentan las conclusiones derivadas de los datos analizados para cada una de las ciudades, así como recomendaciones generales con respecto al uso y funcionamiento de las redes de monitoreo atmosférico y al control de la contaminación atmosférica, como parte integral de los procesos de gestión de calidad del aire en México.

Adicionalmente, este documento viene acompañado de un disco compacto que contiene información complementaria sobre cada una de las estaciones que conforman las redes de monitoreo atmosférico de las nueve ciudades, incluyendo los siguientes datos:

- localización de la estación de monitoreo atmosférico
- métodos de medición de los contaminantes atmosféricos
- porcentaje de días al año que cuentan con datos válidos
- concentraciones horarias y muestreos manuales.

1 ANTECEDENTES

El aire se contamina como consecuencia de una gran cantidad de actividades que se desarrollan de manera cotidiana a escala individual (por ejemplo, el uso del automóvil y la quema de basura), a escala institucional o empresarial (por ejemplo, la quema de combustibles en la industria y el uso de solventes), de fuentes naturales (por ejemplo, erupciones volcánicas e incendios forestales), o bien por la utilización de servicios (por ejemplo, tintorerías y restaurantes). El resultado de estas actividades es la emisión de gases o partículas contaminantes que pueden afectar a la salud humana y a los ecosistemas.

Los efectos en la salud humana están determinados por la exposición a la contaminación del aire y la toxicidad de los contaminantes, e incluyen desde síntomas agudos (como dolor de cabeza e irritación de los ojos) hasta enfermedades respiratorias y cardiovasculares, e incluso la muerte prematura. La diversidad de los efectos depende de factores tales como la concentración

y las características del contaminante, además de la susceptibilidad del individuo expuesto y el tiempo de exposición. La exposición se considera crónica cuando uno está expuesto a la contaminación durante periodos largos (por ejemplo, años), y aguda cuando se trata de periodos cortos (por ejemplo, días u horas).

Internacionalmente, los contaminantes del aire se han clasificado en contaminantes criterio y contaminantes peligrosos del aire (CPA), y de los primeros nos ocuparemos en este almanaque; los segundos son un conjunto de compuestos que pueden causar efectos serios e irreversibles en la salud humana, tales como los compuestos orgánicos volátiles (COV), que no se incluyen en este documento.

Los contaminantes criterio se han identificado como perjudiciales para la salud y el bienestar de los seres humanos. Se les llama contaminantes criterio porque fueron objeto de evaluaciones publicadas en documentos criterio de calidad del aire en los Estados Unidos (EUA), con el objetivo de establecer para los

contaminantes niveles permisibles que protegieran la salud, el medio ambiente y el bienestar de la población. Actualmente, el término contaminantes criterio ha sido adoptado en muchos países y, en general, comprende los siguientes contaminantes: partículas suspendidas (PM), ozono (O₃), monóxido de carbono (CO), bióxido de azufre (SO₂), bióxido de nitrógeno (NO₂) y plomo (Pb). El cuadro 1.1 muestra una breve descripción de los cinco contaminantes criterio que se reportan en este almanaque con las características de cada uno, sus fuentes de emisión y sus posibles efectos en la salud humana.

1.1 Normas de calidad del aire

Para proteger la salud humana, los gobiernos en muchos países del mundo controlan los niveles de contaminantes atmosféricos utilizando diversas herramientas normativas. Entre éstas se encuentran las normas de calidad del aire, que establecen concentraciones aceptables para la población en términos de los riesgos que los contaminantes representan para la salud humana. Así, dichas normas definen las concentraciones aceptables durante diferentes periodos de exposición, ya que en algunos casos se considera que

CUADRO 1.1 CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS: SUS FUENTES DE EMISIÓN Y SUS EFECTOS EN LA SALUD HUMANA

Contaminante	Fuentes de emisión	Efectos en la salud humana
Partículas suspendidas con diámetro aerodinámico menor de 10 micras (PM ₁₀), también conocidas como partículas “inhalables”, y partículas suspendidas con diámetro aerodinámico menor de 2.5 micras (PM _{2.5}), también conocidas como partículas “respirables”.	Sus fuentes antropogénicas son los automóviles, calentadores domésticos, termoeléctricas, etc., y sus fuentes naturales incluyen los incendios y la resuspensión del polvo. Las partículas pueden ser emitidas directamente de la fuente, o formarse en la atmósfera.	Las PM se han asociado con un aumento de síntomas de enfermedades respiratorias, reducción de la función pulmonar, agravamiento del asma, y muertes prematuras por afecciones respiratorias y cardiovasculares.
Ozono (O ₃): gas muy reactivo, incoloro y con olor penetrante. Es el principal compuesto químico en el smog fotoquímico.	Ocurre naturalmente en la capa de ozono estratosférica (15 a 20 km snm). En la tropósfera, el ozono se forma cuando los COV y NO _x , que vienen principalmente de emisiones vehiculares, reaccionan en presencia de la luz solar.	La exposición al ozono está asociada con reducciones en la función pulmonar, síntomas respiratorios como tos, flemas y silbilancias, y el agravamiento del asma. El ozono también tiene efectos adversos en la vegetación y en los materiales de los edificios.
Monóxido de carbono (CO): gas incoloro e inodoro.	Es producido por la quema incompleta de combustibles. Los automóviles son la principal fuente de emisión.	Se combina con la hemoglobina en el torrente sanguíneo para reducir el flujo de oxígeno en los órganos y tejidos del cuerpo. El CO puede afectar las funciones mentales y el estado de alerta, aun en exposición a bajas concentraciones.

(Continúa)

CUADRO 1.1 CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS: SUS FUENTES DE EMISIÓN Y SUS EFECTOS EN LA SALUD HUMANA

Contaminante	Fuentes de emisión	Efectos en la salud humana
Bióxido de azufre (SO ₂): gas reactivo, incoloro y con olor acre; es uno de los óxidos de azufre que desempeña un papel importante en la formación de lluvia ácida y partículas secundarias.	Se forma durante la quema de combustibles que contienen azufre.	Es un irritante para los ojos, nariz y garganta, y agrava los síntomas del asma y la bronquitis. La exposición prolongada al bióxido de azufre reduce el funcionamiento pulmonar y causa enfermedades respiratorias.
Bióxido de nitrógeno (NO ₂): gas de color café, muy reactivo; es uno de los óxidos de nitrógeno que desempeña un papel importante en la formación de smog fotoquímico y partículas secundarias.	Sus principales fuentes de emisión son los automóviles, la industria y las plantas de generación de energía.	La exposición aguda al NO ₂ puede incrementar las enfermedades respiratorias, especialmente en niños y personas asmáticas. La exposición crónica a este contaminante puede disminuir las defensas contra infecciones respiratorias.

una concentración menor, pero durante un tiempo de exposición mayor, también representa un riesgo para la población. Por ejemplo, para el SO₂ la norma respectiva establece la concentración aceptable para un promedio de 24 horas, y otra para un promedio anual, dado que se han documentado tanto impactos en la salud por exposiciones a niveles elevados de SO₂ en un solo día, como por exposiciones también a niveles más bajos pero durante todo un año.

En general las normas de calidad del aire se establecen con base en los resultados de estudios toxicológicos y epidemiológicos que evalúan la relación entre la exposición a un contaminante y sus efectos en la salud. Cuando existe una concentración umbral, un nivel abajo del cual no se identifican impactos en la salud, se toma esa concentración como el límite permisible. Sin embargo, para algunos contaminantes, como las partículas suspendidas, aún no se han detectado umbrales para algunos efectos en la salud; de hecho, se han encontrado impactos en la salud aun a niveles muy bajos (Pope et al., 2002). Por lo tanto, el establecimiento de normas de calidad del aire para ciertos contaminantes conlleva intrínsecamente un grado de riesgo aceptable para la población. En muchos casos, las normas de calidad del aire son conservadoras, con

el fin de proteger la salud de las poblaciones más susceptibles, como los niños, ancianos y personas con enfermedades (WHO, 2000).

Adicionalmente, en la formulación de las normas se consideran otros factores, tales como la capacidad de un país o una región para cumplir con los límites establecidos; la influencia de las emisiones que se originan en otros países o regiones (este caso es especialmente relevante para países pequeños, que pueden ser impactados por emisiones de sus países vecinos); los niveles de fondo de un contaminante (WHO, 2000); y la influencia de condiciones meteorológicas extremas, que pueden causar picos de concentraciones (Lippmann y Maynard, 1999).

Las autoridades que establecen las normas de calidad del aire usualmente evalúan todas estas condiciones locales para determinar si el control de emisiones permite llegar a los niveles establecidos en las normas o bien, a la frecuencia aceptable, que es el número de veces que se permite exceder los niveles establecidos. La frecuencia aceptable se establece para comparar los datos más representativos de la calidad del aire de una zona con los valores de la norma, y para minimizar los casos de incumplimiento de la norma debido a circunstancias no controlables, como eventos climá-

ticos extremos. De esta forma, en la norma de ozono se establece un límite para un periodo de 8 horas, y a partir de la evaluación de las tendencias históricas y de la influencia de eventos meteorológicos extremos, se permite exceder este límite cuatro veces al año (Lippmann y Maynard, 1999).

En nuestro país, la Secretaría de Salud es el órgano responsable de evaluar la evidencia de los impactos de la contaminación atmosférica en la salud y establecer los límites permisibles de concentración de los contaminantes en la atmósfera. Los valores establecidos para los contaminantes criterio en México se exhiben en el cuadro 1.2. Algunos de

estos valores son comparables con las normas de los EUA o de la Unión Europea; así, los valores de la norma de $PM_{2.5}$ y la norma anual de SO_2 son iguales que los normados en los EUA. Sin embargo, para otros contaminantes las normas mexicanas tienen establecidos límites por arriba de otras normas internacionales, como sucede con la norma horaria de NO_2 , cuyo valor se encuentra establecido en casi dos veces el valor especificado en la Unión Europea. En el anexo I se encuentran las normas de los EUA y de la Unión Europea, además de las guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (WHO, por sus siglas en inglés).

CUADRO 1.2 VALORES NORMADOS PARA CONTAMINANTES DEL AIRE EN MÉXICO

Contaminante	Valores límite			Normas oficiales mexicanas
	Exposición aguda	Exposición crónica		
	Concentración y tiempo promedio	Frecuencia máxima aceptable	Concentración y tiempo promedio	
Partículas suspendidas totales (PST)	210 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 horas)	2% de mediciones al año	-	
Partículas menores de 10 micrómetros (PM_{10})	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 horas)	2% de mediciones al año	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (promedio aritmético anual)	Modificación a la NOM-025-SSA1-1993 (DOF, 2005)
Partículas menores de 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$)	65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 horas)	2% de mediciones al año	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (promedio aritmético anual)	
Ozono (O_3)	0.11 ppm (1 hora) (216 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	No se permite	-	
	0.08 ppm (8 horas)	4 veces al año	-	Modificación a la NOM-020-SSA1-1993 (DOF, 2002)
Monóxido de carbono (CO)	11 ppm (8 horas) (12 595 $\mu\text{g}/\text{m}_3$)	1 vez al año	-	NOM-021-SSA1-1993 (DOF, 1994a)

(Continúa)

CUADRO 1.2 VALORES NORMADOS PARA CONTAMINANTES DEL AIRE EN MÉXICO

Contaminante	Valores límite			Normas oficiales mexicanas
	Exposición aguda		Exposición crónica	
	Concentración y tiempo promedio	Frecuencia máxima aceptable	Concentración y tiempo promedio	
Bióxido de azufre (SO ₂)	0.13 ppm (24 horas) (341 µg/m ³)	1 vez al año	0.03 ppm (promedio aritmético anual)	NOM-022-SSA1-1993 (DOF, 1994b)
Bióxido de nitrógeno (NO ₂)	0.21 ppm (1 hora) (395 µg/m ³)	1 vez al año	-	NOM-023-SSA1-1993(DOF, 1994c)

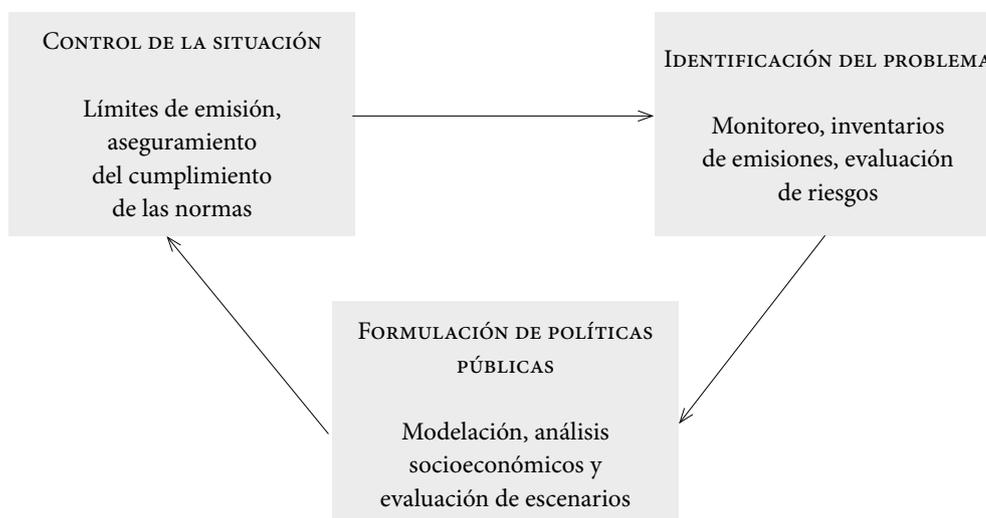
1.2 Monitoreo de la calidad del aire

Si bien las autoridades de salud tienen la responsabilidad de establecer los límites de las normas de los contaminantes atmosféricos, son las autoridades ambientales las que cuentan con la atribución de medir y evaluar los niveles de tales contaminantes en la atmósfera. Estas mediciones se llevan a cabo en las redes de monitoreo de la calidad del aire, siendo responsa-

bilidad de los gobiernos locales, con apoyo técnico de la SEMARNAT, el operar y administrar dichas redes (DOF, 2006).

La información generada por las redes de monitoreo proporciona, junto con los inventarios de emisiones, la base para la toma de decisiones y el desarrollo de estrategias para abatir la contaminación, por lo que la medición de los contaminantes atmosféricos es clave en la gestión de la calidad del aire. En la figura 1.1

FIGURA 1.1 EL PAPEL DEL MONITOREO EN LA GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE



Fuente: WHO (1999).

se presentan varias de las etapas de la gestión de la calidad del aire que muestran la importancia del monitoreo, tanto en la caracterización del problema, como en su evaluación y vigilancia.

La instalación de redes de monitoreo de la calidad del aire puede tener distintos objetivos, como por ejemplo (WHO, 1999):

- Evaluar el cumplimiento de las normas de calidad del aire
- Verificar o calibrar modelos de la calidad del aire
- Informar a la población sobre los niveles de contaminación
- Cuantificar los riesgos a la salud y a los ecosistemas
- Caracterizar la exposición de la población a ciertos contaminantes
- Determinar los impactos de las medidas de control de emisiones
- Desarrollar políticas y establecer prioridades para la gestión ambiental
- Identificar o vigilar zonas críticas, también conocidas como *hot spots*
- Cuantificar tendencias para identificar progresos y posibles problemas futuros.

Las redes de monitoreo se conforman por estaciones de monitoreo, donde se encuentran los equipos de medición y un centro de control para almacenar, revisar y validar los datos generados por dichas estaciones. En general, las estaciones de monitoreo deben estar ubicadas estratégicamente para cuantificar los niveles

de contaminación en sitios representativos, con el fin de caracterizar adecuadamente la contaminación en una región específica (WHO, 2000).

Para tener fundamento y certeza en las decisiones que se toman en materia de calidad del aire, las mediciones registradas en las redes de monitoreo deben reflejar la situación atmosférica actual y real; en otras palabras, los datos generados deben ser de calidad. La confiabilidad de la información generada por las diferentes redes de monitoreo atmosférico queda, en gran parte, supeditada a la calidad del trabajo operativo y al rigor de las instituciones responsables de su manejo.

Por ello, en muchos países los métodos de medición están normados con el fin de asegurar que la información generada por las redes sea confiable, comparable con otras redes y de suficiente calidad, lo que permite evaluar el cumplimiento de las normas de calidad del aire (WHO, 1999).

La operación de las redes es tan importante como la revisión y la validación de los datos generados. La validación de los datos se refiere al proceso de verificar que los valores registrados correspondan a las concentraciones reales de los contaminantes. Para tal efecto, los administradores de las redes de monitoreo revisan los datos generados automáticamente por los equipos de monitoreo, así como las banderas (etiquetas que indican el estatus de los datos; ver <http://sinaica.ine.gob.mx/banderas.html>) asignadas a algunos de ellos, para determinar, basándose en las bitácoras y en su experiencia, que los datos sean reales.

2 LAS REDES DE MONITOREO EN MÉXICO

En México existen más de 50 localidades que cuentan con redes o estaciones de monitoreo, operadas por entidades que van desde gobiernos municipales hasta empresas privadas (INE-DGCENICA, 2004b), y funcionan de manera independiente, con diferentes objetivos, diseños, equipos, procedimientos de validación y formatos para el reporte de información. En este tercer almanaque se incluye información de sólo nueve de estas localidades (la ZMVM, la ZMG, la ZMVT, Puebla, Salamanca, la ZMM, Ciudad Juárez, Tijuana y Mexicali), que representan las zonas metropolitanas y ciudades con redes consolidadas, y que cuentan con información suficiente (por lo menos de 5 años) para realizar el análisis de tendencias y comportamiento de los contaminantes.

Las bases de datos con las que se generaron los indicadores presentados en este tercer almanaque se recopilaron directamente de las redes monitoreo, después

de que sus responsables las revisaron y validaron. Las bases de datos de la ZMVM y Ciudad Juárez se descargaron directamente de los correspondientes sitios de Internet, y las del resto de las ciudades y zonas metropolitanas fueron enviadas (vía correo electrónico o por paquetería) por las autoridades correspondientes a la Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana, Regional y global (DGICURG) del INE. Los datos recibidos en la DGICURG fueron revisados siguiendo los lineamientos que se describen en el siguiente capítulo.

A continuación se presenta información general sobre cada una de las redes de monitoreo de las nueve ciudades incluidas en este almanaque, sus principales fuentes de contaminación, así como su historia y sus características. En el CD anexo a este documento se incluye, para cada red, una lista completa de la ubicación de las estaciones de monitoreo y los métodos de medición que utilizan.

2.1 Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de México (SIMAT)

La ZMVM está ubicada en el centro del país, y estuvo conformada por 16 delegaciones en el Distrito Federal y 18 municipios del Estado de México hasta el 22 de diciembre de 2005, fecha en la que el jefe de gobierno del Distrito Federal y el gobernador del Estado de México suscribieron un acuerdo para ampliar su cobertura a 59 municipios (58 municipios del Estado de México y 1 municipio del estado de Hidalgo) y a las 16 delegaciones del Distrito Federal, con una superficie de 7815 km² (SEDESOL *et al.*, 2004). Esta zona metropolitana tiene una elevación promedio de 2240 metros sobre el nivel del mar (msnm) y está rodeada de montañas excepto en su parte norte.

Son varios los factores que ejercen una influencia determinante sobre la calidad del aire en la ZMVM; entre ellos, el que esté rodeada por un sistema montañoso que impide una adecuada dispersión de contaminantes; el que se presenten inversiones térmicas; el que reciba una radiación solar intensa que acelera la formación fotoquímica de contaminantes atmosféricos, como el ozono; el que cuente con una menor cantidad de oxígeno (aproximadamente un 23% menos que al nivel del mar), lo que contribuye a que los procesos de combustión sean menos eficientes y que se emita una mayor cantidad de contaminantes.

La ZMVM es una de las megaciudades más grandes del mundo, con aproximadamente 19 millones de personas (INEGI, 2006b). En cuanto a las actividades económicas, en el D.F. la actividad industrial ha disminuido respecto a años anteriores, siendo reemplazada por el comercio y los servicios; en cambio los municipios conurbados han registrado un crecimiento de establecimientos industriales (INEGI, 2006a). Aun así, de las más de 46 000 industrias manufactureras asentadas en la ZMVM, cerca de 28 000 se encuentran en el Distrito Federal, y alrededor de 22 000 en los municipios conurbados del Estado de México (INEGI, 2006a).

Con el crecimiento poblacional de la ZMVM, la mancha urbana ha seguido creciendo, aumentado así las distancias y los tiempos de traslado dentro de la zona. Así mismo, la falta de transporte público metropolitano masivo, eficiente y seguro ha favorecido el continuo crecimiento de la flota vehicular de uso particular, que llega actualmente a 3.5 millones de automóviles (SMA-GDF, 2006a). Lo anterior se ve claramente reflejado en el inventario de emisiones de la ZMVM del año 2004 (cuadro 2.1), en el que se estima que las fuentes móviles son responsables de aproximadamente el 76% de las emisiones totales de contaminantes.

El monitoreo de contaminantes atmosféricos en la ZMVM data de 1966, cuando la entonces Dirección de Higiene Industrial de la Secretaría de Salubridad

CUADRO 2.1 INVENTARIO DE EMISIONES DE LA ZMVM (2004)

Tipo de fuente de emisión	Contaminante (%)					
	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	CO	NO _x	COT ¹
Fuentes puntuales	19	10	49	0.4	11	15
Fuentes de área	52	30	1	0.4	6	59
Fuentes móviles	23	56	50	99.2	82	24
Vegetación y suelos	6	4	N/A	N/A	1	2

¹ Compuestos orgánicos totales.

N/A: no se aplica

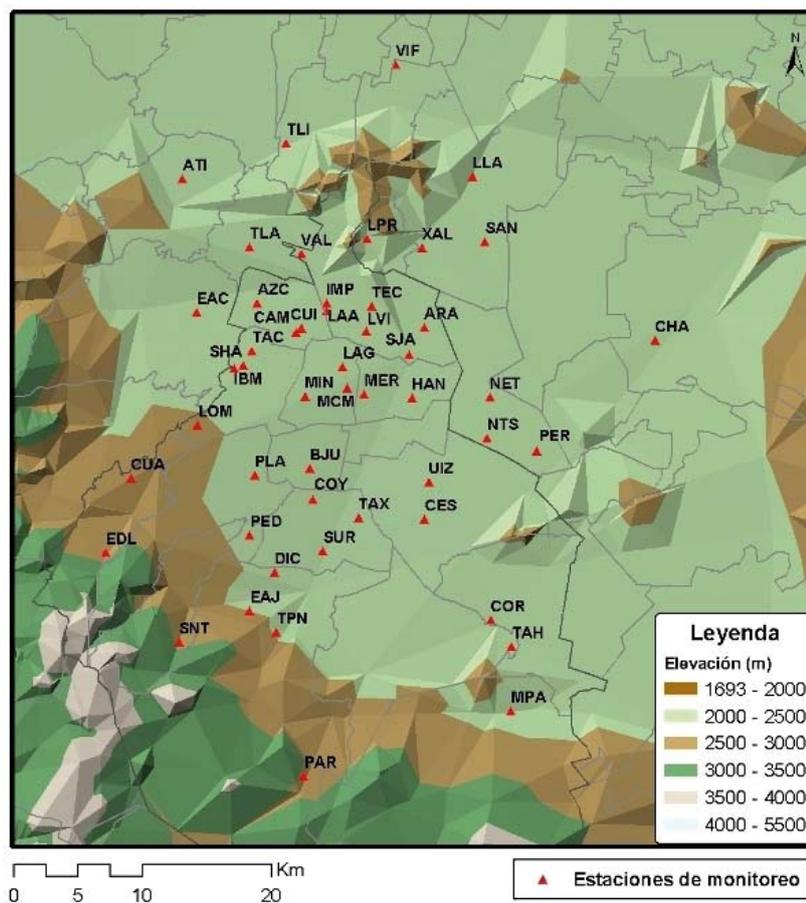
Fuente: SMA-GDF (2006) Inventario de emisiones 2004.

y Asistencia integró la primera red de monitoreo con equipos para medir SO_2 y partículas suspendidas en cuatro estaciones localizadas en Tlalnepantla, Tacuba, el aeropuerto y el centro de la ciudad (SMA-GDF, 2006b).

Actualmente, el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT) (figura 2.1), a cargo de la Dirección General de Gestión Ambiental del Aire de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, está integrado por cuatro subsistemas: a) la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA); b) la Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA); c) la Red Meteorológica (REDMET); y d) la Red de Depósito Atmosférico (REDDA).

La RAMA está conformada por 36 estaciones de monitoreo (cuadro 2.2), 24 ubicadas en el Distrito Federal y 12 en el Estado de México. Todas miden contaminantes criterio de manera continua. A partir de agosto de 2003 se incluyeron también las mediciones de $\text{PM}_{2.5}$ en ocho de estas estaciones de monitoreo. Las características del entorno de cada estación de monitoreo se describen en el mapa sensible del SIMAT: <http://www.sma.df.gob.mx/simat/pnrednueva.htm>. Cabe señalar que la información generada por la RAMA y la REDMA se difunde a través de la página de Internet de la Secretaría del Medio Ambiente (SMA) del GDF, tanto en tiempo real como en informes donde se analiza la calidad del aire de la ZMVM.

FIGURA 2.1 SISTEMA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO



CUADRO 2.2 ESTACIONES DE MONITOREO Y PARÁMETROS REGISTRADOS POR LA RAMA Y LA REDMA DE LA ZMVM¹

Zona	Estación	Clave	RAMA		
			PM ₁₀	PM _{2,5}	O ₃
Noroeste	Vallejo	VAL			
	Tacuba	TAC			✓
	ENEP Acatlán	EAC	✓		✓
	Azcapotzalco	AZC			✓
	Tlalnepantla	TLA	✓	✓	✓
	I.M.P.	IMP			
	Cuitláhuac	CUI			
	Tultitlán	TLI	✓		
	Atizapán	ATI			
	Camarones	CAM		✓	
	Secretaría de Hacienda	SHA			
Noreste	Los Laureles	LLA			
	La Presa	LPR			
	La Villa	LVI	✓		
	San Agustín	SAG	✓	✓	✓
	San Juan de Aragón	SJA		✓	
	Xalostoc	XAL	✓		✓
	Aragón	ARA			
	Netzahualcóyotl	NET	✓		
	Villa de las Flores	VIF	✓		
	Chapingo	CHA			✓
	Perla Reforma	PER		✓	
Netzahualcóyotl Sur	NTS				
Centro	Lagunilla	LAG			✓
	Merced	MER	✓	✓	✓
	Hangares	HAN	✓		✓
	Benito Juárez	BJU			✓
	Insurgentes	MIN			
Suroeste	Museo de la Ciudad de México	MCM			
	Santa Úrsula	SUR	✓		✓
	Pedregal	PED	✓		✓
	Plateros	PLA	✓		✓
	Cuajimalpa	CUA			✓
	Tlalpan	TPN			✓
	Coyoacán	COY		✓	✓
	Lomas	LOM			
Sureste	Cerro de la Estrella	CES	✓		✓
	UAM Iztapalapa	UIZ		✓	✓
	Taxqueña	TAX	✓		✓
	Tláhuac	TAH	✓		✓
	Xochimilco	XCH			

¹ Este cuadro incluye tanto las estaciones que operan actualmente como las que han salido de operación, debido a que la información de estas últimas se presenta en las bases de datos históricas del SIMAT. Las estaciones que han salido

CO	RAMA		REDMA	
	SO ₂	NO ₂	PM ₁₀	PM _{2.5}
✓	✓			
✓	✓	✓		
✓	✓	✓		
✓	✓	✓		
✓	✓	✓	✓	✓
✓				
✓	✓	✓		
✓	✓			
			✓	
	✓		✓	
	✓	✓		✓
✓	✓	✓		
✓	✓	✓		✓
✓	✓	✓		
✓	✓	✓		
✓	✓	✓		
✓	✓	✓	✓	
✓	✓	✓	✓	✓
✓	✓	✓	✓	
✓	✓	✓	✓	
✓	✓	✓	✓	✓
✓	✓	✓	✓	
✓	✓	✓	✓	✓
✓	✓	✓	✓	
	✓		✓	

de operación para algún contaminante, durante algún periodo o definitivamente, son TLI, LLA, NET, BJU, TPN y TAH.

2.2 Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMG

La ZMG se ubica en el centro del estado de Jalisco, conformada por los municipios de Guadalajara, Tlaquepaque, Tonalá y Zapopan, y en ella se asientan más de 4 millones de habitantes (INEGI, 2006b).

El desarrollo económico de la ZMG comenzó siendo de carácter comercial y agropecuario; poco a poco tomó un aspecto más industrial y de manufactura, sobresaliendo las industrias metalúrgica, fotográfica, cigarrera, de productos químicos, de alimentos y de bebidas (GEJ et al., 1997), llegando actualmente a albergar a más de 6 000 industrias manufactureras (INEGI, 2006a).

Del inventario de emisiones del año 1995 de la ZMG (cuadro 2.3) se observa que el sector transporte es el que más contribuye a las emisiones de contaminantes totales, con casi el 74%.

En esta zona metropolitana se presentan inversiones térmicas en aproximadamente el 78% de los días del año, lo que impide una buena dispersión de los contaminantes (GEJ et al., 1997).

CUADRO 2.3 INVENTARIO DE EMISIONES DE LA ZMG (1995)

Tipo de fuente de emisión	Contaminante (%)				
	PST ¹	SO ₂	CO	NO _x	HC ²
Fuentes puntuales	0.53	68	0.22	8	3
Fuentes de área	0.01	2	0.08	1	40
Fuentes móviles	1.94	30	99.7	91	57
Vegetación y suelos	97.52	N/A	N/A	N/A	N/A

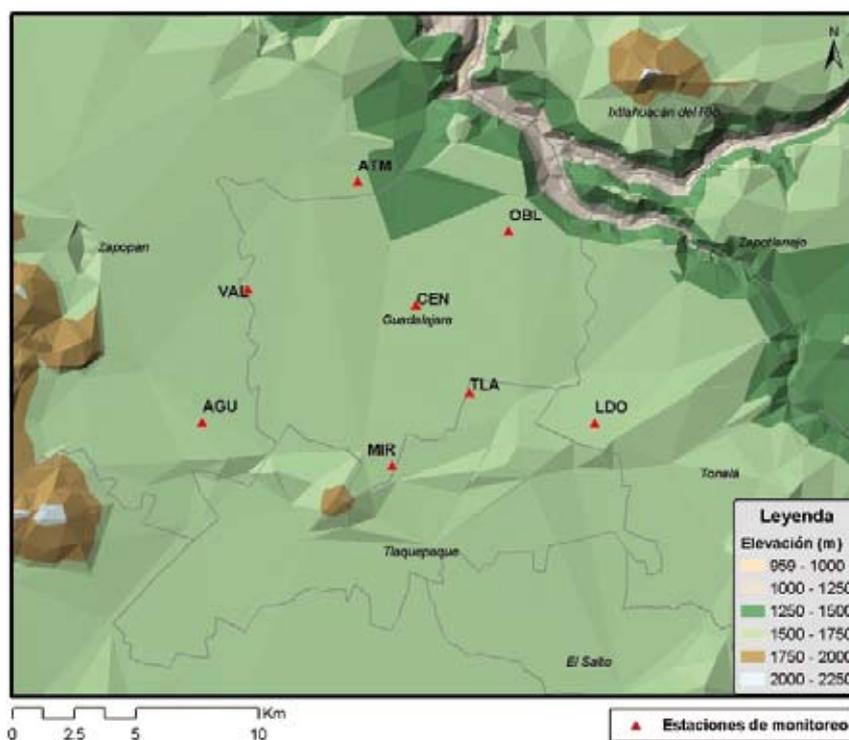
N/A : no se aplica

¹ Partículas suspendidas totales

² Hidrocarburos

Fuente: Gobierno de Jalisco (1997).

FIGURA 2.2 RED AUTOMÁTICA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO DE LA ZMG



CUADRO 2.4 ESTACIONES DE MONITOREO Y PARÁMETROS REGISTRADOS POR LA RAMA DE LA ZMG

Zona	Estación	Clave	PM ₁₀	O ₃	CO	SO ₂	NO ₂
Norte	Atemajac	ATM	✓	✓	✓	✓	✓
	Oblatos	OBL	✓	✓	✓	✓	✓
Este	Loma Dorada	LDO	✓	✓	✓	✓	✓
	Tlaquepaque	TLA	✓	✓	✓	✓	✓
Centro	Centro	CEN	✓	✓	✓	✓	✓
Sur	Miravalle	MIR	✓	✓	✓	✓	✓
Oeste	Águilas	AGU	✓	✓	✓	✓	✓
	Vallarta	VAL	✓	✓	✓	✓	✓

En 1973 el Gobierno Mexicano a través de la Secretaría de Salubridad y Asistencia, junto con el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, inició un proyecto de diagnóstico que consistió en medir la calidad del aire durante un periodo de 5 años (1975-1979). En 1991 se conformó una red de monitoreo manual con 15 estaciones en las que se muestreaba plomo y partículas suspendidas. La actual red automática de monitoreo atmosférico de la ZMG (figura 2.2) empezó a operar en 1993 y se encuentra integrada por 8 estaciones de monitoreo (cuadro 2.4). La operación y administración de la red es responsabilidad de la Secretaría de Medio Ambiente para el Desarrollo Sustentable del Gobierno del Estado de Jalisco. Para mayor información sobre la red de monitoreo de la ZMG, puede consultarse la página <http://semades.jalisco.gob.mx>.

2.3 Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT

La ZMVT comprende siete municipios: Lerma, Metepec, Ocoyoacac, San Mateo Atenco, Toluca, Xonacatlán y Zinacantepec. La extensión municipal es de 1209 km², y está habitada por alrededor de 1.6 millones de personas (SE-GEM, 2004; INEGI, 2006b).

La ZMVT es de gran importancia para el Estado de México debido, en gran parte, al desarrollo industrial, comercial y habitacional que demanda servicios y consumo de energía, lo que contribuye al problema de la contaminación atmosférica. En la ZMVT se en-

uentran ubicadas 3326 industrias manufactureras, de las cuales 2297 se ubican en el municipio de Toluca (INEGI, 2006a). La cercanía con la capital del país ha convertido a Toluca en un lugar propicio para el establecimiento de industrias manufactureras.

El inventario de emisiones 2000 de la ZMVT (cuadro 2.5) muestra la elevada contribución del sector industrial a las emisiones de SO₂, y la gran cantidad de partículas PM₁₀ generadas por la erosión de suelos. Asimismo, se observa que las fuentes móviles son responsables mayoritarias de las emisiones de los demás contaminantes.

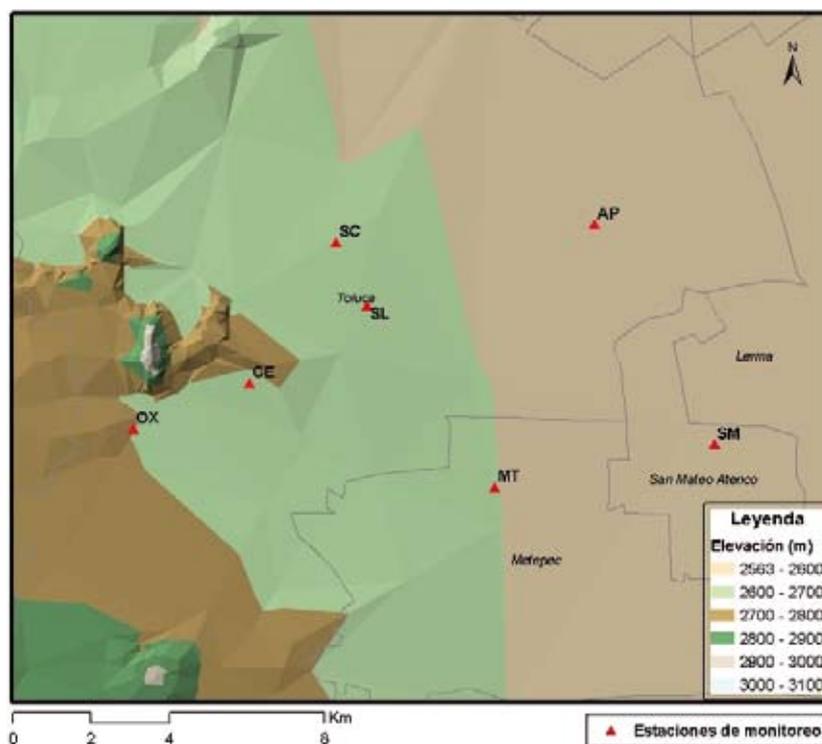
En 1975 se iniciaron las primeras actividades de monitoreo para las PST en la ZMVT. En 1993, el Gobierno del Estado adquirió equipos automáticos para siete estaciones de monitoreo, las cuales empezaron a funcionar a partir de 1994. La Secretaría de Ecología

CUADRO 2.5 INVENTARIO DE EMISIONES DE LA ZMVT (2000)

Tipo de fuente de emisión	Contaminante (%)				
	PM ₁₀	SO ₂	CO	NO _x	HC
Fuentes puntuales	15	86	0.06	10	3
Fuentes de área	4	5	0.1	3	24
Fuentes móviles	21	9	99.84	81	69
Erosivas	60	N/A	N/A	N/A	N/A
Vegetación y suelos	N/A	N/A	N/A	6	4

N/A : no se aplica
Fuente: Gobierno del Estado de México (2004).

FIGURA 2.3 RED AUTOMÁTICA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO DE LA ZMVT



del Estado de México es la responsable de la operación y administración de la red automática de monitoreo atmosférico de la ZMVT (INE-DGCENICA, 2006). La página http://www.edomex.gob.mx/se/rama/monitoreo_atmosferico.htm contiene información adicional sobre la red de monitoreo de la ZMVT.

2.4 Red Estatal de Monitoreo Atmosférico de Puebla

La ciudad de Puebla con su zona conurbada tiene una superficie de 483 km² y se encuentra ubicada a una altura promedio de 2140 msnm. La zona conurbada de

CUADRO 2.6 ESTACIONES DE MONITOREO Y PARÁMETROS REGISTRADOS POR LA RAMA DE LA ZMVT

Zona	Estación	Clave	PM ₁₀	O ₃	CO	SO ₂	NO ₂
Norte	S.L. Tepaltitlán	SL	✓	✓	✓	✓	✓
	Aeropuerto	AP	✓	✓		✓	✓
	San Cristóbal Huichochitlán	SC	✓	✓		✓	✓
Centro	Oxtotitlán	OX	✓	✓	✓	✓	✓
	Toluca-Centro	CE	✓	✓	✓	✓	✓
Sur	Metepéc	MT	✓	✓	✓	✓	✓
	San Mateo Atenco	SM	✓	✓		✓	✓

Puebla está conformada por la ciudad de Puebla y las localidades pertenecientes a los municipios de Amozoc, San Andrés Cholula, San Pedro Cholula, Corongo y Cuautlancingo, y cuenta con una población de alrededor de 1.8 millones (SMRN-GEP et al. 2006; SEGOB-GEP, 2006a; INEGI, 2006b).

El 80% de la industria se encuentra en el municipio de Puebla y sus alrededores. Los sectores industriales que existen en esta área son metálica básica, química ligera, artículos eléctricos, textil, metalúrgica, automotriz y de alimentos. Existen zonas industriales consolidadas dentro del municipio de Puebla: 1) Parque Industrial 5 de Mayo, 2) Fraccionamiento Industrial Resurrección y 3) Parque Industrial Puebla 2000. Otras áreas industriales se encuentran a lo largo de la carretera México-Puebla (SEGOB-GEP, 2006a).

En el inventario de emisiones de Puebla del año 2004 se aprecia que el sector de fuentes móviles es el que más contribuye a las emisiones de NO_x , CO y COT, mientras que las fuentes de área emiten la mayor parte del SO_2 y de PM_{10} (cuadro 2.7).

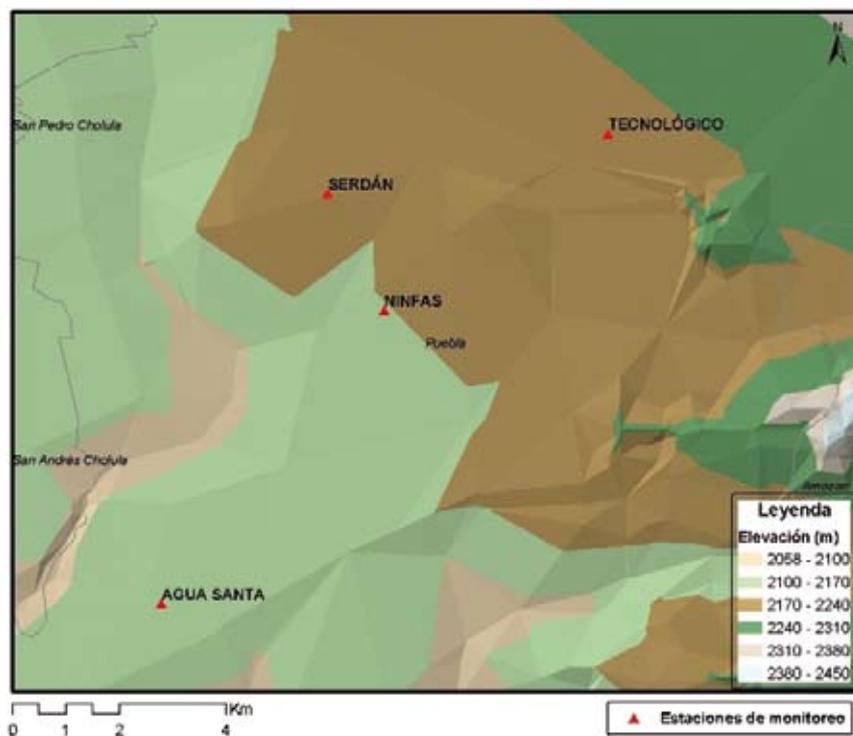
CUADRO 2.7 INVENTARIO DE EMISIONES DE PUEBLA (2004)

Tipo de fuente de emisión	Contaminante (%)				
	PM_{10}	SO_2	CO	NO_x	COT
Fuentes móviles	5	3	96	81	52
Fuentes fijas	11	23	-	7	7
Fuentes de área	84	74	4	12	41
Fuentes naturales	-	-	-	-	-

N/A: no se aplica.
Fuente: SMRN-GEP (2006).

En la ciudad de Puebla se midieron PST con equipos manuales durante el periodo de 1987 a 1992. Los primeros intentos de diseñar un sistema automático de monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de Puebla se dieron en el año de 1996 a través de la solicitud de apoyo técnico a la Federación por parte del Gobierno Estatal; dicho proyecto fue concretado en 2000, año a partir del cual comenzó sus operaciones la Red Estatal de Monitoreo Atmosférico de Puebla

FIGURA 2.4 RED ESTATAL DE MONITOREO ATMOSFÉRICO DE PUEBLA



(REMA), conformada por cuatro estaciones de monitoreo (cuadro 2.8). La REMA es administrada y operada por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SMRN) del Gobierno del Estado de Puebla (SMRN-GEP et al., 2006) (INE-DGCENICA, 2006). Para mayor información sobre la red de monitoreo de la ciudad de Puebla, puede consultarse la página <http://www.remapuebla.gob.mx/aire.php>.

CUADRO 2.8 ESTACIONES DE MONITOREO Y PARÁMETROS REGISTRADOS POR LA REMA DE LA CIUDAD DE PUEBLA

Estación	PM ₁₀	O ₃	CO	SO ₂	NO ₂
Serdán	✓	✓	✓	✓	✓
Tecnológico	✓	✓	✓	✓	✓
Ninfas	✓	✓	✓	✓	✓
Agua Santa	✓	✓	✓	✓	✓

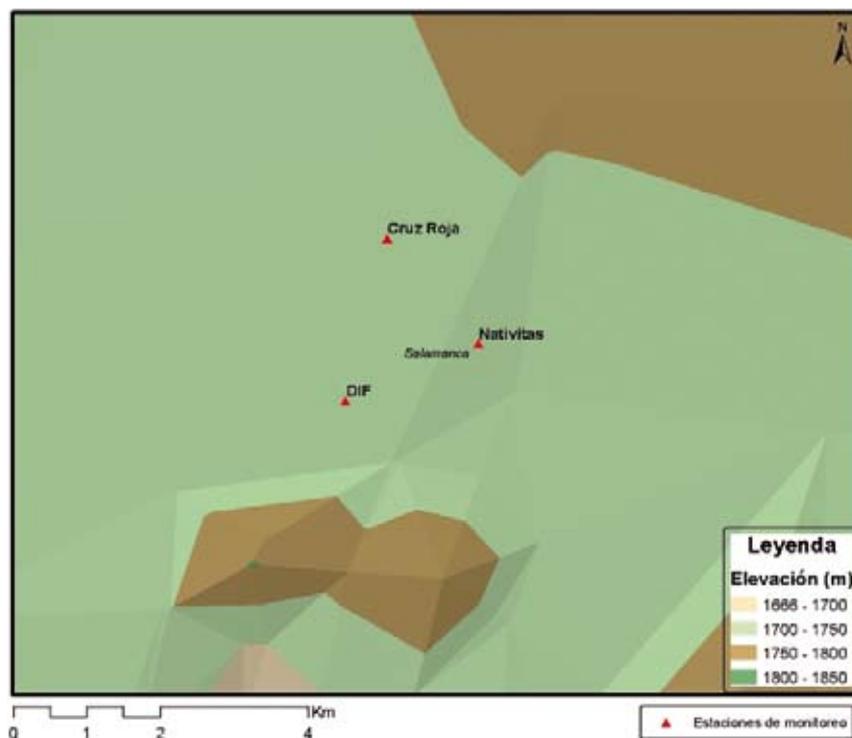
2.5 Red de Monitoreo Atmosférico de Salamanca

La ciudad de Salamanca se encuentra ubicada en el municipio con el mismo nombre en el estado de Guanajuato, y cuenta con una población de 233 623 habitantes (INEGI, 2006b).

Los diferentes sectores industriales que se encuentran en Salamanca incluyen el sector eléctrico (Central Termoeléctrica de Salamanca, abasteciendo gran parte del territorio nacional), el sector petrolero (Refinería Ing. Antonio M. Amor, con más de 53 plantas), y otras instalaciones industriales que pertenecen a los sectores químico, metalúrgico, cementero, de alimentos y textil. Asimismo, se lleva a cabo comúnmente la quema de residuos agrícolas (GEG et al., 2004).

En el inventario de emisiones de Salamanca del año 2004 se observa que casi todas las emisiones de

FIGURA 2.5 RED DE MONITOREO ATMOSFÉRICO DE LA CIUDAD DE SALAMANCA



SO₂ se generan en el sector industrial (99.7%), que emite también el 43% de las PM₁₀ y el 72% de los NO_x (cuadro 2.9).

CUADRO 2.9 INVENTARIO DE EMISIONES DE SALAMANCA (2004)

Tipo de fuente de emisión	Contaminante (%)				
	PM ₁₀	SO ₂	CO	NO _x	HC
Fuentes puntuales	42.9	99.7	4.0	72.4	2.8
Fuentes móviles	2.5	0.1	61.3	20.6	43.2
Fuentes de área	53.9	0.1	34.6	0.7	30.7
Vegetación y suelos	0.8	0	0	6.3	23.4

Fuente: Instituto de Ecología de Guanajuato (2006).

Dada la ubicación geográfica del municipio de Salamanca, se dificulta la dispersión de los contaminantes, ya que se encuentra rodeado en parte por la Sierra de las Codornices (GEG et al., 2004), por lo que ha presentado problemas de calidad del aire.

En 1999 se estableció la primera estación de monitoreo atmosférico en la ciudad de Salamanca, y en el año 2000 se adicionaron otras dos (cuadro 2.10 y figura 2.5). A partir de 2004 las estaciones de monitoreo están a cargo del Patronato para el Monitoreo de la Calidad del Aire de Salamanca, que es una organización civil. Para mayor información sobre la red de monitoreo de la ciudad de Salamanca, puede consultarse la página <http://www.prodigyweb.net.mx/redmas/infraestructura.htm>.

CUADRO 2.10 RED DE MONITOREO ATMOSFÉRICO DE SALAMANCA

Estación	PM ₁₀ *	O ₃	CO	SO ₂	NO ₂
Cruz Roja	✓	✓	✓	✓	✓
DIF	✓	✓	✓	✓	✓
Nativitas	✓	✓	✓	✓	✓

* En la estación de monitoreo Nativitas el equipo es automático, y en las estaciones Cruz Roja y DIF es manual.

2.6 Sistema Integral de Monitoreo Ambiental de la Zona Metropolitana de Monterrey (SIMA)

La ZMM se encuentra ubicada en una zona árida, rodeada por montañas que impiden la dispersión de los contaminantes hacia el exterior, y a una altitud de 500 msnm (GENL et al., 1997). Los municipios que la comprenden son Apodaca, García, General Escobedo, Guadalupe, Juárez, Monterrey, San Nicolás de los Garza, San Pedro Garza García y Santa Catarina. La población en esta zona metropolitana es de alrededor de 3.7 millones de habitantes (INEGI, 2006b).

La ZMM se ha caracterizado por tener un enfoque industrial, y mantiene un estatus de liderazgo con respecto a otras entidades del país. Hoy en día los giros industriales más comunes que se pueden encontrar en Monterrey son acero, vidrio, cervecero, autopartes, cemento, cerámica, textiles y alimentos (Monterrey Virtual, 2006).

Según el inventario de emisiones de 1995, el sector transporte contribuye a la mayoría de las emisiones de CO, NO_x, y HC, mientras que la mayoría de las emisiones de SO₂ son industriales (cuadro 2.11).

CUADRO 2.11 INVENTARIO DE EMISIONES DE LA ZMM (1995)

Tipo de fuente de emisión	PST	Contaminante (%)			
		SO ₂	CO	NO _x	HC
Fuentes puntuales	5.25	92	0.3	35	5
Fuentes de área	0.05	N/S	0.01	1	29
Fuentes móviles	0.7	8	99.69	64	66
Vegetación y suelos	94	N/A	N/A	N/A	*

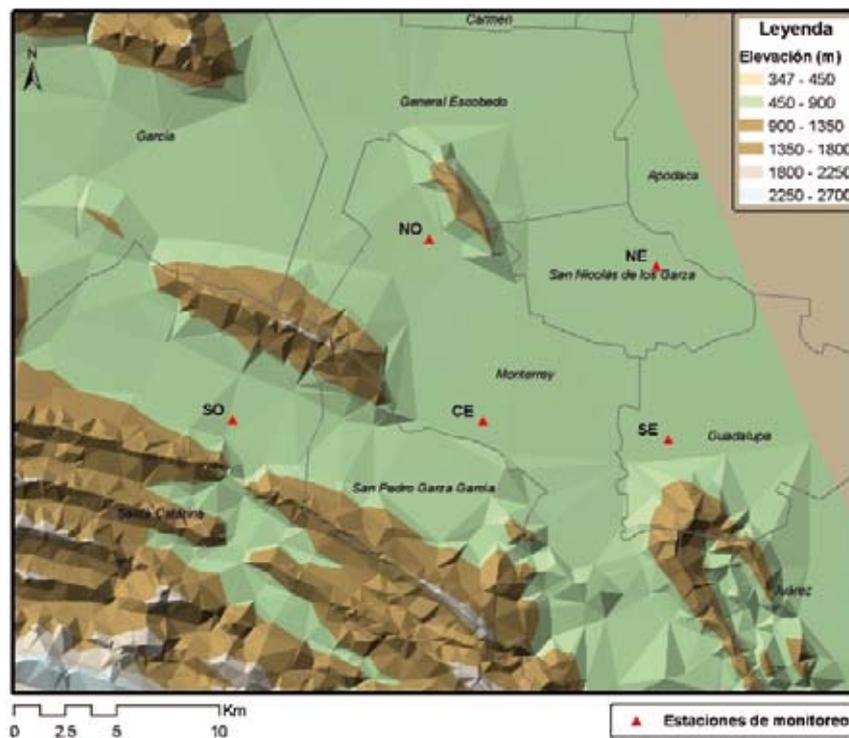
* Emisiones no estimadas N/A: no se aplica N/S: no significativo Fuente: Gobierno del Estado de Nuevo León (1997).

La red de monitoreo ambiental de la ZMM inició sus operaciones en 1992, y actualmente cuenta con 5 estaciones automáticas (cuadro 2.12). La Agencia de Protección al Medio Ambiente y Recursos Naturales del Estado de Nuevo León es la responsable de la ope-

ración de esta red (figura 2.6) (GENL et al., 1997). Se puede consultar mayor información sobre la red de

monitoreo de la ZMM en la página http://www.nl.gob.mx/?P=med_amb_mej_amb_sima.

FIGURA 2.6 SISTEMA INTEGRAL DE MONITOREO AMBIENTAL DE LA ZMM



CUADRO 2.12 ESTACIONES DE MONITOREO Y PARÁMETROS REGISTRADOS POR EL SIMA DE LA ZMM

Zona	Estación	Clave	PM ₁₀	PM _{2.5}	O ₃	CO	SO ₂	NO ₂
Noroeste	San Bernabé	NO	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Noreste	San Nicolás	NE	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Centro	Obispado	CE	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Suroeste	Santa Catarina	SO	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Sureste	La Pastora	SE	✓	✓	✓	✓	✓	✓

2.7 Red de Monitoreo Atmosférico de Ciudad Juárez

Ciudad Juárez se encuentra ubicada en la frontera con los EUA, en el estado de Chihuahua. El municipio de Juárez cuenta con una extensión urbana de 190 km² y una población de 1.3 millones de habitantes (GECH et al., 2006; INEGI, 2006b), y comparte una cuenca con las ciudades estadounidenses de El Paso, Texas, y Sunland Park, Arizona. El clima de Ciudad Juárez es árido y extremo debido a que se encuentra en una zona desértica (Juárez, 2006).

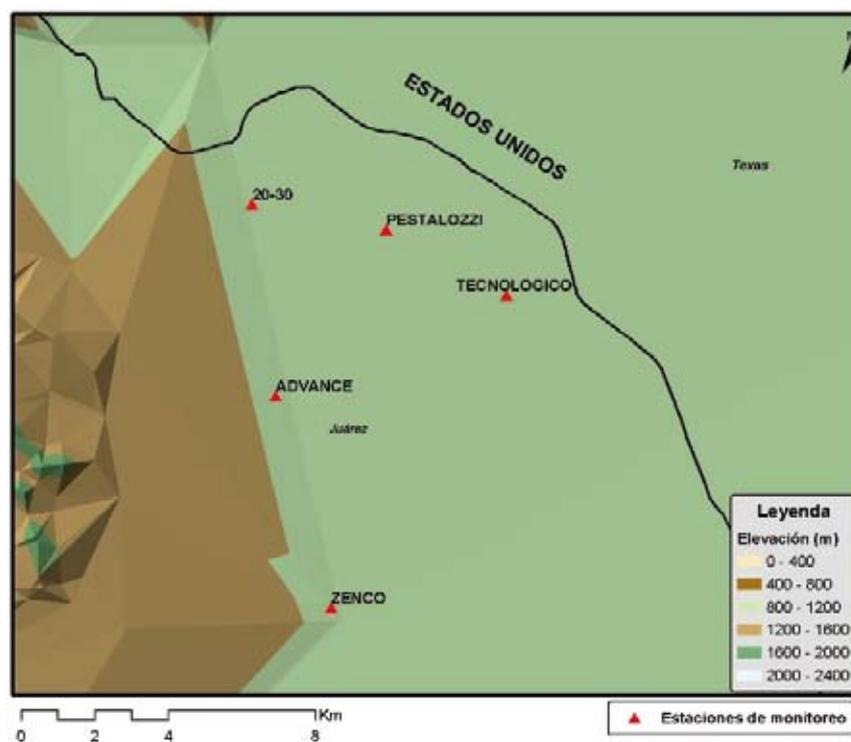
Ciudad Juárez se encuentra experimentando una fase acelerada de desarrollo económico y social propiciado por la industria manufacturera. En el año 1995 existían en la ciudad 309 plantas maquiladoras; para 2005 esta cantidad aumentó a 819 (GECH et al., 2006). En la actualidad, en Ciudad Juárez se encuentran 17 parques industriales donde están establecidas cerca de 420 empresas (FTCJ, 2006).

Ciudad Juárez es un lugar fronterizo de gran afluencia donde existen cuatro puentes para pasar por la vía terrestre de México a EUA y viceversa. Durante el año 2003 se registraron alrededor de 14.5 millones de cruces fronterizos de vehículos privados de Ciudad Juárez a El Paso, Texas, y alrededor de 611 mil de vehículos de carga. En general, se observa una mayor congestión vehicular en los cruces internacionales con sentido sur a norte, donde se forman filas de hasta 1600 metros de coches. Se considera que la calidad del aire es fuertemente impactada por la intensa actividad industrial y vehicular de la zona (GECH et al., 2006).

En el inventario de emisiones de Ciudad Juárez de 2002 se aprecia que la mayor parte de las emisiones de SO₂ provienen del sector industrial, mientras que la mayoría de las de CO, NO_x y COT provienen del sector transporte (cuadro 2.13).

Los primeros monitoreos de la calidad del aire en la zona se hicieron en 1990, y los registros históricos, a partir de 1991. La Red de Monitoreo de Ciudad Juárez

FIGURA 2.7 RED DE MONITOREO ATMOSFÉRICO DE CIUDAD JUÁREZ



CUADRO 2.13 INVENTARIO DE EMISIONES DE CIUDAD JUÁREZ (2002)

Tipo de fuente de emisión	Contaminante (%)					
	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	CO	NO _x	COT
Fuentes puntuales	5.7	19.0	94.8	2.4	43.8	10.7
Fuentes de área	13.5	16.4	3.2	6.5	5.3	34
Fuentes móviles	1.9	7.9	2.0	91.1	50.9	55.3
Vegetación y suelos	78.9	56.7	0	0	0	0

Fuente: Gobierno del Estado de Chihuahua (2006).

rez cuenta con 5 estaciones de monitoreo, tres de las cuales tienen equipo automático (cuadro 2.14, figura 2.7). La red es administrada por la Dirección General de Ecología y Protección Civil del Municipio de Juárez, y es operada por personal de la Dirección de Normatividad Ambiental en estrecha colaboración con la Comisión Ambiental de Texas (GECH et al., 2006). Para mayor información sobre la red de monitoreo de Ciudad Juárez, se recomienda consultar la página http://www.tceq.state.tx.us/cgi-bin/compliance/mo-nops/site_info.

CUADRO 2.14 ESTACIONES DE MONITOREO Y PARÁMETROS REGISTRADOS POR LA RMA DE CIUDAD JUÁREZ

Estación	PM ₁₀ [*]	O ₃	CO
20-30	✓	✓	✓
Tecnológico	✓	✓	✓
Advance	✓	✓	✓
Zenco	✓	✓	✓
Pestallozzi	✓	✓	✓

*Equipo manual.

2.8 Red de Monitoreo Atmosférico de Tijuana

La ciudad de Tijuana se encuentra ubicada en la frontera norte del país, junto al mar, y colinda con San Diego, que pertenece al estado de California de los EUA. La superficie territorial del municipio de Tijuana es de 1727 km², con una población de casi 1.5 millones de habitantes (INEGI, 2006b).

Tijuana se ha caracterizado por su industria maquiladora, que desempeña un papel importante en el desarrollo y el crecimiento de la ciudad. Los sectores más importantes para la economía local incluyen las industrias electrónica, maderera y manufacturera.

En Tijuana existen dos garitas para el cruce fronterizo entre México y EUA. Según el Programa para Mejorar la Calidad del Aire Tijuana Rosarito 2000-2005 (GEBC et al., 2000), en el año 1997 alrededor de 53 millones de vehículos cruzaron la frontera hacia EUA.

El inventario de emisiones de la ciudad de Tijuana muestra que el sector servicios es el que más contribuye a las emisiones de PM₁₀, y el sector industria, a las emisiones de SO₂ (cuadro 2.15).

CUADRO 2.15 INVENTARIO DE EMISIONES DE TIJUANA-ROSARITO (1998)

Tipo de fuente de emisión	PM ₁₀	Contaminante (%)			
		SO ₂	CO	NO _x	COV ¹
Fuentes puntuales	11	72	0.2	12	11
Fuentes de área	80	25	5.8	5.5	40
Fuentes móviles	4	3	94	82	47
Vegetación y suelos	5	N/A	N/A	0.5	2

¹ Compuestos orgánicos volátiles N/A: no se aplica
Fuente: Gobierno del Estado de Baja California (2000).

La red de monitoreo de Tijuana inició sus operaciones en 1996 dentro del Programa Frontera XXI, con ayuda financiera de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés), la Agencia de Recursos del Aire de California (CARB, por sus siglas en inglés) y la entonces SEMARNAP. La red de monitoreo está conformada por 5 estaciones (cuadro 2.16 y figura 2.8), y hasta el momento es financiada y operada por la Agencia Estatal de California y la empresa TEAM-TRACER de Estados Unidos. Actualmente, su administración se encuentra en el proceso de transferencia de parte del estado de California en Estados Unidos hacia el estado de Baja California en México (GEBC et al., 2000).

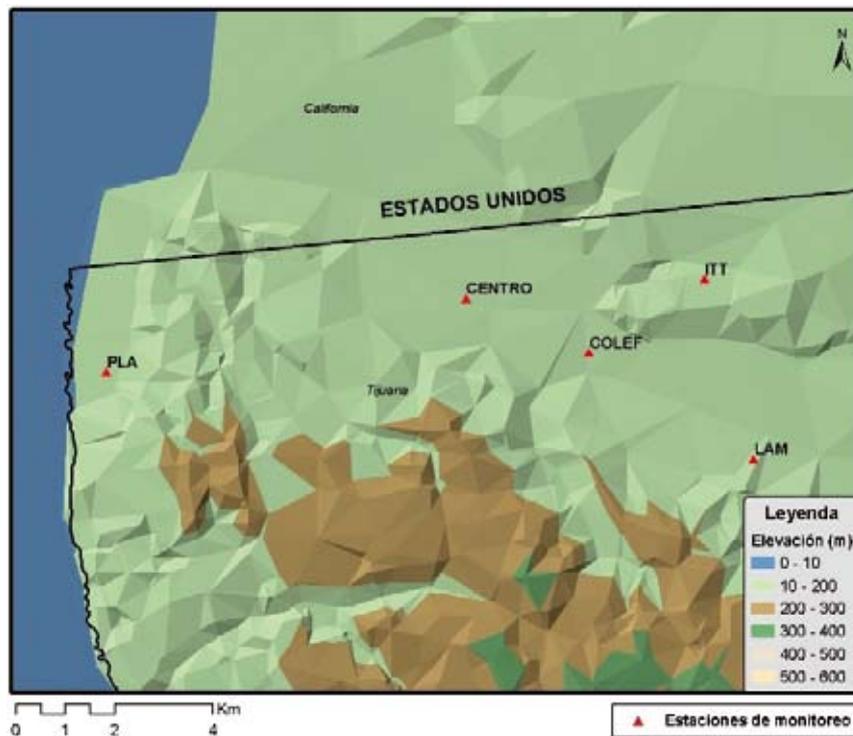
La validación y la evaluación de los datos de la calidad del aire generados en la red de monitoreo se llevan a cabo de acuerdo con los criterios y estándares

de la USEPA (GEBC et al., 2000). Una vez generada, la información es enviada a la CARB y ya validada se transmite al sistema AIRS de la USEPA. La información sobre la calidad del aire generada por la Red de Monitoreo Atmosférico de Tijuana es recopilada cada hora por la Secretaría de Protección al Ambiente del estado, y se publica en tiempo real en la página de Internet <http://aire.bajacalifornia.gob.mx>.

2.9 Red de Monitoreo Atmosférico de Mexicali

La ciudad de Mexicali está situada al norte de la República Mexicana en un punto estratégico de la frontera con los EUA, en una zona árida rodeada por desierto; el número de personas que la habitan es de 856 mil (INEGI, 2006b).

FIGURA 2.8 RED DE MONITOREO ATMOSFÉRICO DE TIJUANA



CUADRO 2.16 ESTACIONES DE MONITOREO Y PARÁMETROS REGISTRADOS POR LA RMA DE TIJUANA

Estación	Clave	PM ₁₀ *	O ₃	CO	SO ₂	NO ₂
Instituto Tecnológico	ITT	✓	✓	✓	✓(1)	✓
Centro de Salud	CENTRO	✓				
Colegio de la Frontera	COLEF	✓				
Playas	PLA	✓	✓	✓	✓(1)	✓
La Mesa	LAM	✓(2)	✓	✓	✓	✓

* Equipo manual.

(1) Las estaciones ITT y PLA dejaron de medir SO₂ después del año 2002.

(2) La estación La Mesa también cuenta con equipo automático de PM₁₀.

La actividad económica de esta ciudad está relacionada con la industria maquiladora (GEBC et al., 1999). Se estima que en la ciudad de Mexicali existen cerca de 1100 establecimientos industriales, de los cuales la mayoría corresponde a la micro y pequeña industria, y sólo el 11% corresponde a la industria mediana y grande (GEBC et al., 1999).

La ciudad de Mexicali cuenta con dos garitas para el cruce entre México y Estados Unidos. En el año 1996 cruzaron la frontera casi 7 millones de vehículos, y los meses de mayor afluencia fueron diciembre y enero (GEBC et al., 1999).

El inventario de emisiones de Mexicali muestra las elevadas emisiones de SO₂ por parte del sector industrial; en tanto que en las fuentes de área, las emisiones más altas corresponden a las PM10. El sector transporte es el que más contribuye a las emisiones totales de CO, NO_x y HC (cuadro 2.17).

La red de monitoreo de Mexicali inició sus operaciones en 1997 dentro del Programa Frontera XXI, con

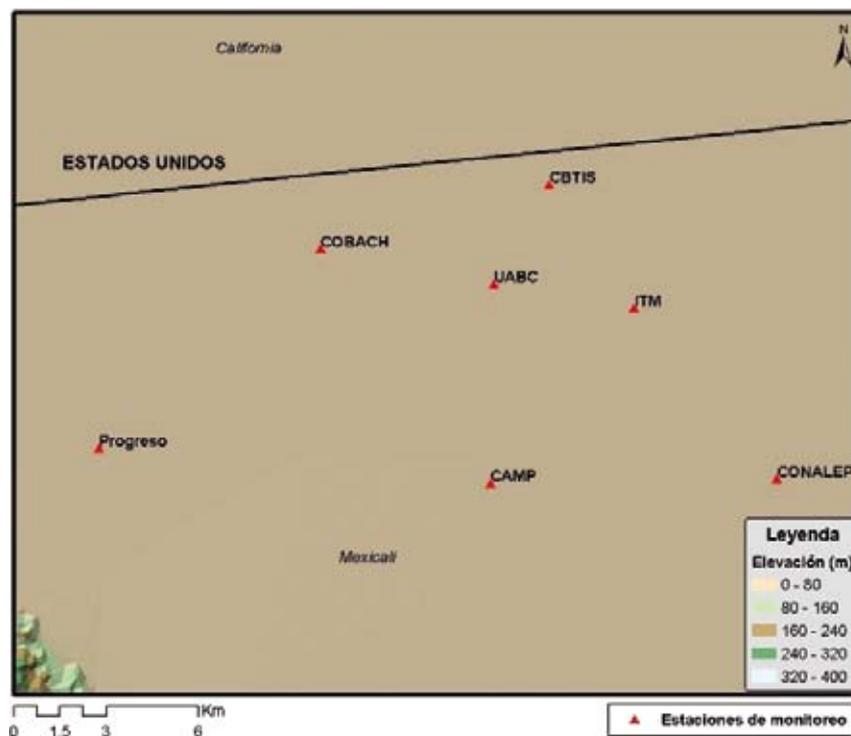
CUADRO 2.17 INVENTARIO DE EMISIONES DE MEXICALI (1996)

Tipo de fuente de emisión	Contaminante				
	PM ₁₀	SO ₂	CO	NO _x	HC
Fuentes puntuales	2	75	2	8	2
Fuentes de área	73	0.3	7	4	30
Fuentes móviles	1	24.7	91	81	61
Vegetación y suelos	24	N/A	N/A	7	7

N/A: no se aplica
Fuente: Gobierno del Estado de Baja California (1999).

ayuda financiera de la USEPA, la CARB y la entonces SEMARNAP. La red de monitoreo está conformada por 6 estaciones (cuadro 2.18 y figura 2.9). La red de Mexicali se encuentra en las mismas condiciones que la de Tijuana en lo que se refiere a su operación, a la transferencia de las estaciones de monitoreo y a la validación de la información. La información sobre la calidad del aire generada por la Red de Monitoreo At-

FIGURA 2.9 RED DE MONITOREO ATMOSFÉRICO DE MEXICALI



mosférico de Mexicali es recopilada cada hora por la Secretaría de Protección al Ambiente del estado, y se

publica en tiempo real en la página de Internet <http://aire.bajacalifornia.gob.mx>.

CUADRO 2.18 ESTACIONES DE MONITOREO Y PARÁMETROS REGISTRADOS POR LA RMA DE MEXICALI

Estación	Clave	PM ₁₀ *	O ₃	CO	SO ₂	NO ₂
Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios**	CBTIS	✓	✓	✓	✓(1)	✓
Campestre***	CAMP	✓	✓	✓		
Colegio de Bachilleres	Cobach	✓	✓	✓	✓(1)	✓
Universidad Autónoma de Baja California	UABC	✓(2)	✓	✓	✓	✓
Instituto Tecnológico	ITM	✓	✓	✓	✓(1)	✓
Centro de Salud	Progreso	✓				
CONALEP	CONALEP	✓				

* Equipo manual ** Se midieron los contaminantes de 1997 a 2002 de 2004, y el resto de los contaminantes a partir de julio de 2005.

*** La estación Campestre empezó a medir las PM₁₀ a partir de abril

(1) Las estaciones CBTIS, Cobach e ITM dejaron de medir SO₂ después de 2002

(2) La estación UABC también tiene equipo automático para PM_{2.5} y PM₁₀.

3 METODOLOGÍA PARA LA GENERACIÓN DE INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AIRE

Un indicador se define como un valor que cuantifica y simplifica un fenómeno, y que ayuda a entender condiciones complejas (IISD, 2006). En este caso los indicadores sobre calidad del aire permiten evaluar la situación de la contaminación atmosférica, establecer metas, evaluar el progreso hacia las metas, y comunicar al público la calidad del aire que respira.

A continuación se describe la metodología utilizada en este almanaque para el procesamiento de las bases de datos de contaminantes atmosféricos y para la generación de indicadores que permiten analizar las tendencias temporales y espaciales de la calidad del aire.

3.1 Revisión y limpieza de las bases de datos

Los datos generados por las redes de monitoreo que se utilizaron para la generación de los indicadores

presentados en este almanaque fueron sometidos a un proceso de tres etapas de revisión y limpieza en la DGICURG del INE, lo que contempló la eliminación de datos no válidos y la revisión del comportamiento temporal de los contaminantes.

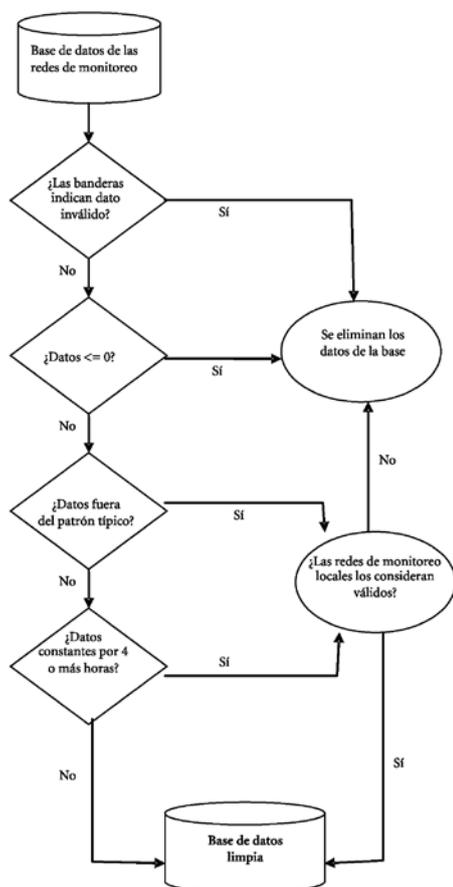
La primera etapa consistió en la limpieza de las bases de datos de aquellos valores etiquetados con banderas como no válidos por los responsables de las redes, entre otras razones, por fallas en el sistema eléctrico o de comunicación, por fallas en los analizadores y por operaciones de calibración o mantenimiento de equipos.

En la segunda etapa se eliminaron los datos negativos o nulos debido a que la mayoría de los equipos de monitoreo cuentan con *límites de detección inferiores* (las concentraciones mínimas de un contaminante que el equipo de monitoreo puede registrar) que son mayores que cero.

La última etapa en la revisión de las bases de datos por parte de la DGICURG fue la identificación

de los datos que presentan un comportamiento fuera del patrón de los contaminantes, como son los datos extremos y las concentraciones constantes por un periodo de cuatro o más horas consecutivas. Una vez identificados dichos valores, fueron validados o en su caso invalidados por los responsables de las redes de monitoreo.

FIGURA 3.1 LIMPIEZA DE LAS BASES DE DATOS



3.2 Construcción de los indicadores

Después de la revisión y la limpieza de las bases de datos horarios, se generaron los diferentes indicadores basados en las *concentraciones horarias*, en las *concentraciones de promedios móviles* o en las *concentraciones diarias*, dependiendo del tiempo promedio

especificado en las correspondientes normas de calidad del aire, y tomando en cuenta los criterios de suficiencia correspondientes (cuadro 1.2).

Los *promedios móviles de 8 horas* de CO y O₃ se calcularon de las concentraciones horarias, tomando el promedio de la hora seleccionada con las 7 concentraciones registradas en las horas previas. Por ejemplo, para estimar el *promedio móvil de 8 horas* de las 13:00 horas, se calcula el promedio de las concentraciones registradas para cada hora desde las 06:00 hasta la 13:00 horas. Para el cálculo de los promedios móviles es necesario contar con al menos el 75% de los registros horarios (DOF, 2002).

La *concentración diaria* se calculó a partir de las concentraciones horarias o de los promedios móviles de 8 horas, debiendo contar con al menos el 50% de los registros en un día (cuadro 3.1). Este criterio de suficiencia se seleccionó para que los indicadores de este almanaque sean comparables con los generados en el *Segundo almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en seis ciudades mexicanas* (SEMARNAT-INE, 2003). Sólo en el caso de las partículas y el ozono se utilizó el criterio de suficiencia de información del 75%, tal como se especifica en sus respectivas normas de calidad del aire (DOF, 2002; DOF, 2005). En el cuadro 3.1 se describe, por contaminante, el tipo de dato diario considerado y el criterio de suficiencia de información utilizado para su cálculo.

En este documento se presentan las tendencias temporales y espaciales de los contaminantes estudiados, en cinco secciones: 1) *comportamiento diario y mensual* de los contaminantes; 2) *distribución espacial* de los contaminantes en cada ciudad; 3) *exposición de la población* a los contaminantes mediante la estimación de la concentración ponderada por población; 4) *cumplimiento con las normas oficiales mexicanas (NOM)* de salud; y 5) *conclusiones* sobre los resultados obtenidos en las primeras cuatro secciones.

Cabe destacar que los indicadores que se muestran representan de manera general la calidad del aire que prevalece en las ciudades y zonas metropolitanas, debido a que en su generación se consideraron todas las estaciones que midieron el contaminante. Para facilitar la visualización de los datos, los indicadores de las

CUADRO 3.1 CONCENTRACIONES DIARIAS Y CRITERIOS DE SUFICIENCIA DE INFORMACIÓN

Contaminante	Concentración diaria	Criterio de suficiencia de información para el cálculo de las concentraciones diarias
PM ₁₀	Promedio de 24 horas	Al menos el 75% de los datos horarios
PM _{2.5}	Promedio de 24 horas	Al menos el 75% de los datos horarios
O ₃	Máximo horario en un día	Al menos el 50% de los datos horarios
	Máximo diario del promedio móvil de 8 horas	Al menos el 75% de los datos de promedios móviles de 8 horas
CO	Máximo diario del promedio móvil de 8 horas	Al menos el 50% de los datos de promedios móviles de 8 horas
SO ₂	Promedio de 24 horas	Al menos el 50% de los datos horarios
NO ₂	Máximo horario en un día	Al menos el 50% de los datos horarios

ciudades se agrupan en dos regiones: la *región centro*, que comprende la ZMVM, ZMG, ZMVT, Puebla y Salamanca, y la *región norte*, conformada por la ZMM, Ciudad Juárez, Tijuana y Mexicali.

A continuación se presentan las consideraciones y metodologías utilizadas para la generación de cada uno de los indicadores en este documento.

Comportamiento horario y mensual

Las figuras mostradas en esta sección permiten visualizar, como su nombre lo indica, el comportamiento de los contaminantes a lo largo del día o de los meses del año, en una zona determinada.

El *comportamiento horario* se obtiene mediante el cálculo de la mediana de todas las concentraciones alcanzadas en cada una de las horas del día, considerando todas las estaciones de monitoreo de una zona metropolitana o ciudad durante el periodo de análisis (1997-2005). Así por ejemplo, para el cálculo de la concentración de PM₁₀ a las 10:00 horas se tomó la mediana de las concentraciones que se generaron durante esa hora en todas las estaciones y durante todos los días de los años 1997-2005. En forma similar, el *comportamiento mensual* se estimó a partir de las medianas de todas las concentraciones horarias durante cada uno de los meses del periodo de análisis.

Distribución espacial de los contaminantes

La distribución espacial de los contaminantes en las ciudades se ilustra mediante mapas de contorno, generados a partir del cálculo de los promedios anuales correspondientes a 2005. Los promedios anuales de las concentraciones en cada estación de monitoreo se calcularon con base en las concentraciones diarias descritas anteriormente, excepto en el caso del SO₂, para el que se utilizó el promedio anual de las concentraciones horarias. Cabe mencionar que para el O₃ se calculó el promedio anual de los máximos diarios de los promedios móviles de 8 horas, debido a que tiene dos tiempos promedio base para el cálculo de la concentración diaria -máximo horario en el día y máximo diario de los promedios móviles de 8 horas.

Se generaron los mapas interpolando los promedios anuales entre estaciones con el *software* ARCGIS, utilizando el método de interpolación de distancia inversa ponderada (IDW, por sus siglas en inglés). Dicho método se basa en la suposición de que a medida que nos alejamos del punto de la muestra (las estaciones de monitoreo), la concentración va disminuyendo.

Cabe mencionar que sólo se interpolaron las concentraciones entre las estaciones de monitoreo, y no se extrapoló fuera del dominio establecido por la ubicación de las estaciones de monitoreo. El dominio de interpolación de las concentraciones para una ciudad puede cambiar dependiendo del contaminante y del

año, dado que algunas redes no miden todos los contaminantes en todas las estaciones, o bien porque los datos para una estación de monitoreo en un año no eran suficientes para el cálculo.

Es importante mencionar también que los dominios de los mapas no necesariamente corresponden a la representatividad espacial de las redes. Por ejemplo, la concentración reportada en una estación podría reflejar las condiciones locales o regionales dependiendo de su entorno, por lo que en este análisis se asumió que la representatividad de la red sólo se extiende a su dominio de cobertura. Cabe aclarar que únicamente la ZMVM reporta la representatividad de sus estaciones.

Exposición de la población

Un indicador que permite estimar la exposición de la población de una ciudad a la contaminación atmosférica es la *concentración promedio anual ponderada por población*. Dado que los patrones espaciales de la contaminación son desiguales a la distribución espacial de la población, se intenta conocer la exposición de la población asociando la concentración de un contaminante en una región determinada con la población asentada en esa misma región.

La estimación de la *concentración promedio anual ponderada por población* se realizó posicionando los mapas de concentración, descritos en la sección anterior, sobre el mapa de población desagregado a nivel de las áreas geostatísticas básicas (AGEBS). Se utilizó el procedimiento geográfico de INTERSECT (intersección), con el que se obtuvo la concentración de los contaminantes asociada a cada AGEBS en el área de cobertura. Con esta información se calcularon las concentraciones ponderadas por población mediante la siguiente expresión:

$$C_p = \frac{\sum C_i \cdot x \cdot N_i}{N}$$

en donde:

C_p = concentración ponderada

C_i = concentración en la AGEBS i

N_i = número de personas en la AGEBS i

N = población total en toda el área de cobertura

El valor del indicador que se obtiene representa una estimación de la exposición promedio de la población de cada ciudad.

Cabe destacar que la población considerada en los cálculos descritos no necesariamente corresponde a la población total de una ciudad, sino a toda la población que se ubica dentro del dominio de la red de monitoreo. Esta población puede cambiar en una ciudad dependiendo del contaminante bajo análisis, a causa de las diferencias entre los dominios descritos en la sección anterior. Debido a cambios en las estaciones de monitoreo o en el funcionamiento de los equipos, la cobertura de las redes puede variar entre años y, por lo tanto, también puede cambiar la población.

La población considerada para cada uno de los contaminantes y ciudades se muestra en el cuadro 3.2 (INEGI, 2000). Como se observa en este cuadro, las poblaciones consideradas en algunos casos son sólo una fracción de la población total; sin embargo, es una aproximación de la concentración promedio a la que está expuesta un porcentaje importante de la población.

Indicadores de evaluación del cumplimiento de las NOM

La evaluación de la calidad del aire tiene como referencia obligada los límites máximos permisibles establecidos en las NOM de calidad del aire. Así, se pueden clasificar las zonas metropolitanas o ciudades en términos de su cumplimiento con las NOM y, complementariamente, se calcula el número de días del año en los que los niveles de un contaminante se encuentran por arriba de los límites establecidos en la NOM correspondiente.

Se evaluó el cumplimiento de las NOM en relación con el tiempo promedio y la frecuencia de tolerancia (cuadro 1.2) especificados en las mismas. Se determinó el cumplimiento o incumplimiento de la norma para una zona metropolitana o ciudad, considerando los datos de todas las estaciones de monitoreo que miden el contaminante. Así por ejemplo, para el SO_2 , si la concentración del *segundo máximo de los promedios de 24 horas* de todas las estaciones de monitoreo en un

CUADRO 3.2 HABITANTES CONSIDERADOS EN EL CÁLCULO DE LA CONCENTRACIÓN PONDERADA POR POBLACIÓN (2005)

Contaminante	ZMVM	ZMG	ZMVT	Puebla	ZMM	Ciudad Juárez	Tijuana	Mexicali	Salamanca
PM ₁₀	11 807 589	2 023 475	411 870	636 759	1 197 399	459 068	250 676	516 620	-
PM _{2.5}	6 126 214	-	-	-	1 197 399	-	-	-	-
O ₃	12 467 515	2 023 475	411 870	636 759	1 197 399	186 464	250 676	85 514	-
CO	12 213 353	2 023 475	266 262	636 759	1 197 399	186 464	250 676	85 514	-
SO ₂	12 213 353	2 023 475	411 870	636 759	1 197 399	-	250 676	85 514	31 795
NO ₂	9 851 310	2 023 475	411 870	636 759	1 197 399	-	250 676	85 514	-

Fuente: INEGI, XII Censo general de población y vivienda (2000).

año excede el límite de 0.13 ppm, se considera que esa ciudad incumple con la norma diaria para este contaminante, debido a que en la norma se especifica que sólo se puede exceder ese valor una vez al año. Cabe mencionar que para las PM₁₀ y PM_{2.5} sólo se evaluó el cumplimiento con sus respectivas normas cuando se apegaron al criterio de suficiencia anual de por lo menos 3 trimestres con al menos el 75% de concentraciones diarias válidas, en consistencia con la norma respectiva (DOF, 2005).

El cálculo del número de *días en los que se rebasa el valor de la norma* se genera a partir de las *concentraciones diarias*, basándose en el valor más alto de todas las estaciones de monitoreo. Esto es, si al menos una estación de monitoreo rebasa el valor de norma en un día, se considera que la zona metropolitana o ciudad rebasó la norma en ese día. Cabe aclarar que este indicador se calculó considerando el criterio de suficiencia de información para las concentraciones diarias de al menos el 50% de los datos horarios para todos los contaminantes, incluyendo PM₁₀ y PM_{2.5}.

Dado que el número de días en los que se rebasa el valor de la norma en un año depende del número de días con información verificada, se recomienda evaluar los resultados considerando el porcentaje de días con datos válidos al año para cada una de las ciudades. El *disco compacto* anexo al almanaque contiene esta información.

Cabe mencionar que los datos de las PM₁₀ para Ciudad Juárez, Tijuana y Mexicali provienen de muestreos manuales cada 6 días, lo que significa que sólo se reportan datos en una sexta parte del año. Por

lo tanto, el indicador del número de días del año en los que se rebasa la norma para dichas ciudades no sería comparable con el de ciudades que cuentan con datos para todo el año. Así, en el presente almanaque se excluyen, para este indicador, las tres ciudades mencionadas.

Conclusiones sobre los contaminantes

Para resumir la calidad del aire, por contaminante, que reflejan algunos indicadores, en la sección de conclusiones se presenta un mapa del país que indica para las zonas metropolitanas o ciudades si se cumplió o no con la norma durante 2005, y la tendencia creciente o decreciente del indicador *concentración promedio anual ponderada por población* durante el periodo 2000-2005. Cabe mencionar que en el caso de no contar con el indicador requerido de 2005 o del periodo 2000-2005, se consideró el del año más reciente o el del periodo para el que sí hubiera sido posible calcular los indicadores.

Por último, se clasificó a las ciudades de acuerdo con su grado de contaminación en el año 2005, de mayor a menor. Dicha clasificación está basada en un índice compuesto generado a partir de los siguientes indicadores:

- Días por arriba del valor de norma (excepto PM₁₀)
- Concentración comparable con la norma (máximo, segundo máximo, percentil 98, promedio anual)
- Concentración promedio anual ponderada por población.

Al valor de cada indicador se le asignó una calificación de 0 a 1. Esta calificación se determinó al dividir el valor del indicador de cada ciudad entre el valor más alto de todas; así, la ciudad con el valor más alto resultó con una calificación, para ese indicador, igual a 1. Una vez calificados todos los indicadores, se sumaron las calificaciones correspondientes a cada

ciudad. De este modo, la suma de las calificaciones de todos los indicadores refleja el grado relativo de contaminación entre ciudades, correspondiendo la calificación más alta a la ciudad más contaminada. En el cuadro 3.3 se muestra como ejemplo la forma en que se calificaron los indicadores de NO₂.

CUADRO 3.3 ÍNDICE COMPUESTO PARA EL NO₂ EN SIETE CIUDADES MEXICANAS (2005)

Ciudad	ZMVM	ZMG	ZMVT	Puebla	ZMM	Tijuana	Mexicali
Número de días por arriba del valor de la norma	3	13	0	0	0	0	0
Calificación del número de días por arriba del valor de la norma	0.23	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Segundo máximo	0.297	0.218	0.143	0.099	0.115	0.185	0.185
Calificación del segundo máximo	1.00	0.73	0.48	0.33	0.39	0.62	0.62
Promedio anual ponderado por población	0.064	0.062	0.046	0.035	0.034	0.034	0.041
Calificación del promedio anual ponderado por población	1.00	0.96	0.71	0.55	0.52	0.53	0.63
<i>Índice compuesto (suma de calificaciones)</i>	<i>2.23</i>	<i>2.69</i>	<i>1.20</i>	<i>0.88</i>	<i>0.91</i>	<i>1.15</i>	<i>1.25</i>
<i>Clasificación de acuerdo con el índice compuesto</i>	<i>2°</i>	<i>1°</i>	<i>4°</i>	<i>7°</i>	<i>6°</i>	<i>5°</i>	<i>3°</i>

4 PARTÍCULAS SUSPENDIDAS

Las partículas suspendidas (PM, por sus siglas en inglés) forman una mezcla compleja de materiales sólidos y líquidos suspendidos en el aire, que pueden variar significativamente en tamaño, forma y composición, dependiendo fundamentalmente de su origen. El tamaño de las partículas suspendidas varía desde 0.005 hasta 100 micras de diámetro aerodinámico; esto es, desde unos cuantos átomos hasta aproximadamente el grosor de un cabello humano.

Las partículas pueden tener un origen natural (como la polinización de las plantas, procesos geológicos e incendios forestales), y también antropogénico (que puede incluir desde la quema de combustibles hasta la fertilización de campos agrícolas). Las partículas pueden ser directamente emitidas de la fuente, las llamadas partículas primarias, o bien formarse en la atmósfera cuando en ésta reaccionan algunas sustancias (óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, amoníaco, compues-

tos orgánicos, etc.), siendo consideradas partículas secundarias.

El estudio y la regulación ambiental de las partículas empezó centrándose en las partículas suspendidas totales (PST), las cuales son menores de 100 μm de diámetro aerodinámico. Posteriormente, la atención se centró en las partículas con diámetros aerodinámicos menores de 10 μm (PM_{10}), y actualmente, en las partículas finas y ultrafinas,¹⁰ es decir, las menores de 2.5 μm ($\text{PM}_{2.5}$) y 1 μm (PM_1), respectivamente. En los Estados Unidos la regulación de las PST empezó en 1971, agregando normas para PM_{10} en 1987 y para $\text{PM}_{2.5}$ en 1997 (USEPA, 2006). En México, la norma que regula los niveles de PM_{10} entró en vigor en 1994 y fue modificada en 2005 (DOF, 2005), cuando se incluyeron las $\text{PM}_{2.5}$.

Por su tamaño, las $\text{PM}_{2.5}$ permanecen en el aire más tiempo y se transportan a mayores distancias que las PM_{10} , por lo que las fuentes de emisión de $\text{PM}_{2.5}$ primarias o de los precursores de $\text{PM}_{2.5}$ secundarias

pueden encontrarse lejos de los sitios donde se monitorean (Finlayson-Pitts *et al.*, 2000). La fracción gruesa de las partículas suspendidas, con diámetro aerodinámico entre 2.5 micras y 10 micras, en general se deposita más rápidamente, con una vida media en la atmósfera de sólo minutos u horas y, por ende, presenta mayor variabilidad espacial dentro de una misma región (WHO, 1999).

En términos de sus efectos en la salud, se sabe que entre más pequeñas sean las partículas, pueden penetrar con mayor facilidad hasta el interior de los pulmones, con posibles efectos tóxicos debido a sus características fisicoquímicas. Las PM_{10} pueden entrar directamente al aparato respiratorio y depositarse en sus diferentes regiones, mientras que las $PM_{2.5}$ pueden llegar a la región alveolar. Las partículas suspendidas son capaces de interferir con uno o más mecanismos de defensa del aparato respiratorio, o actuar como vehículo de sustancias tóxicas absorbidas o adheridas a la superficie de la partícula. En varios estudios llevados a cabo en Estados Unidos y en Europa, se ha encontrado que la exposición prolongada a las partículas finas aumenta el riesgo de mortalidad por cáncer pulmonar y enfermedades cardiopulmonares (Pope *et al.*, 2002 y Dockery *et al.*, 1993).

En general, diversos estudios científicos han relacionado la exposición a las PM_{10} y $PM_{2.5}$ con efectos en la salud, incluyendo agravación del asma, aumento de los síntomas respiratorios, como tos y respiración difícil o dolorosa, bronquitis crónica y reducción de la función pulmonar, entre otras consecuencias. En la ZMVM se ha encontrado que la exposición a las PM_{10} y $PM_{2.5}$ puede aumentar el número de casos de bronquitis crónica (Romano, 2000), incrementar el número de ingresos a las salas de emergencias por asma (Damokosh *et al.*, 2000), aumentar la aparición de infecciones respiratorias (Torres-Meza, 2000), reducir la función pulmonar (Gold *et al.*, 1999), disminuir la variabilidad cardiaca en ancianos (Holguin *et al.*, 2003) y aumentar el riesgo de mortalidad (Borja-Aburto *et al.*, 1998; Loomis *et al.*, 1999; Castillejos *et al.*, 2000).

En las siguientes secciones se presentan las tendencias temporales y espaciales de las PM_{10} en ocho ciudades mexicanas: la ZMVM, la ZMG, la ZMVT,

Puebla, la ZMM, Ciudad Juárez, Tijuana y Mexicali, durante el periodo 1997-2005. Cabe mencionar que los indicadores se calcularon con base en información proveniente de equipos automáticos (que proporcionan concentraciones horarias) para las primeras cinco ciudades, y de equipos manuales (que proporcionan concentraciones integradas de 24 horas) para las tres últimas. Es importante tener presente este aspecto en la interpretación de los indicadores, debido a que la diferencia metodológica entre las mediciones de partículas con equipo manual y equipo automático podría afectar los resultados que éstos generan, y por lo tanto la comparación de los indicadores entre las ciudades con equipo manual y equipo automático. Así mismo, cabe aclarar que la red de monitoreo de la ZMVM cuenta tanto con equipos manuales como con equipos automáticos; por tanto, se utilizaron los datos de los equipos manuales para generar los indicadores que evalúan la NOM, y los datos de los equipos automáticos para el resto de los indicadores.

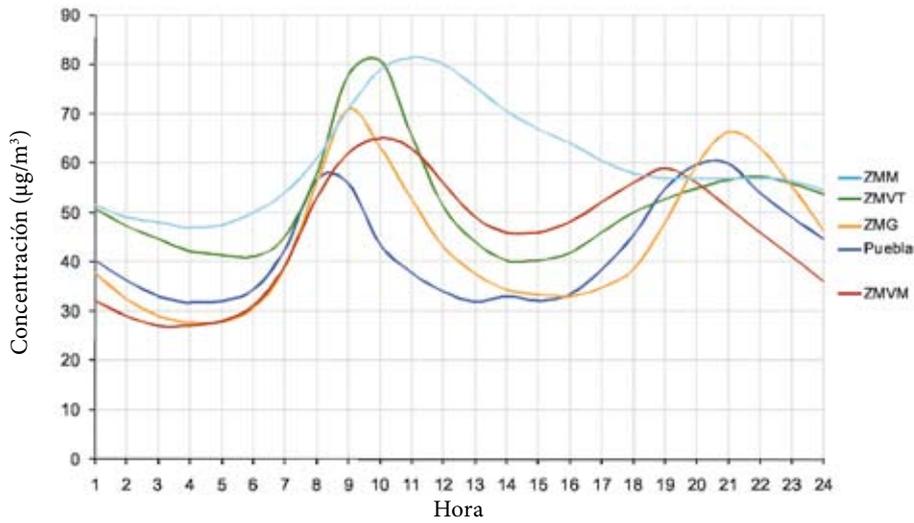
PM_{10} : fracción inhalable o torácica

4.1 Comportamiento de las PM_{10} en el tiempo

La figura 4.1 muestra el comportamiento horario de las PM_{10} para las cinco ciudades que tienen equipo de monitoreo automático (ZMVM, ZMG, ZMVT, Puebla y ZMM). De la figura se aprecia que, excepto para la ZMM, el comportamiento del contaminante es bimodal, es decir, las concentraciones más elevadas se presentan por la mañana (entre las 7:00 y las 11:00 horas) y por la tarde-noche (de 18:00 a 22:00 horas), coincidiendo con las horas pico de actividad vehicular. En cambio, para la ZMM el comportamiento es unimodal, alcanzando las concentraciones más elevadas entre las 10 y las 12 horas.

En las figuras 4.2 y 4.3 se muestra el comportamiento mensual de las PM_{10} en ocho ciudades, agrupadas por región. En la figura 4.2 se observa que las concentraciones más bajas se presentan en los meses de junio a septiembre en la región centro, en tanto que en la figura 4.3 las más bajas se aprecian en los meses de abril a septiembre en la región norte. En ambas

FIGURA 4.1 COMPORTAMIENTO HORARIO DE LAS PM_{10} EN CINCO CIUDADES MEXICANAS (1997-2005)



regiones los niveles más elevados se presentan en los meses fríos (noviembre, diciembre y enero). El comportamiento de las concentraciones de las PM_{10} a lo largo del año puede deberse a que en los meses fríos se tiene una menor capacidad dispersiva del contaminante en la atmósfera, y se facilita su acumulación.

Además, por tratarse de la época seca del año, ocurre una mayor resuspensión de PM del suelo. En contraparte, en los meses de la época de lluvias las PM son eliminadas por retención y arrastre en las gotas de lluvia, fenómenos que tienen un efecto de limpieza de las PM de la atmósfera.

FIGURA 4.2 COMPORTAMIENTO MENSUAL DE LAS PM_{10} EN LA REGIÓN CENTRO DEL PAÍS (1997-2005)

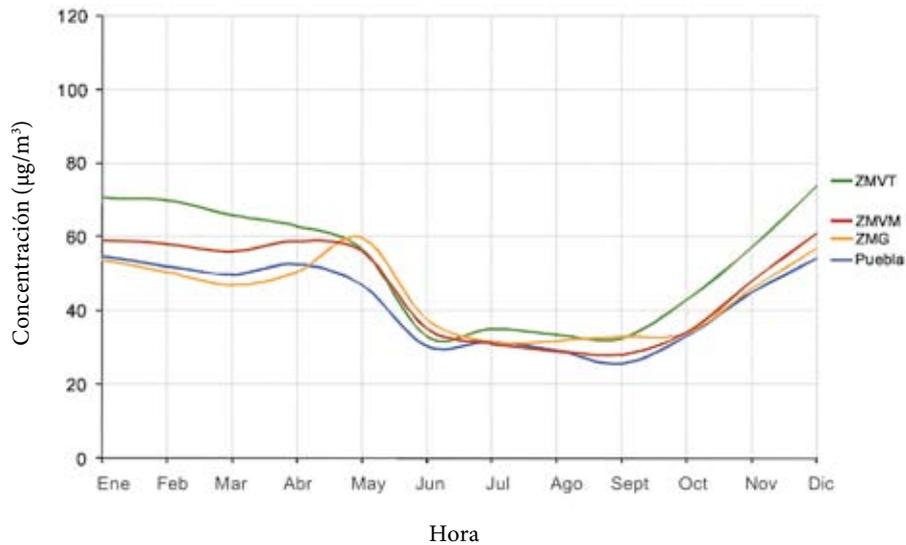
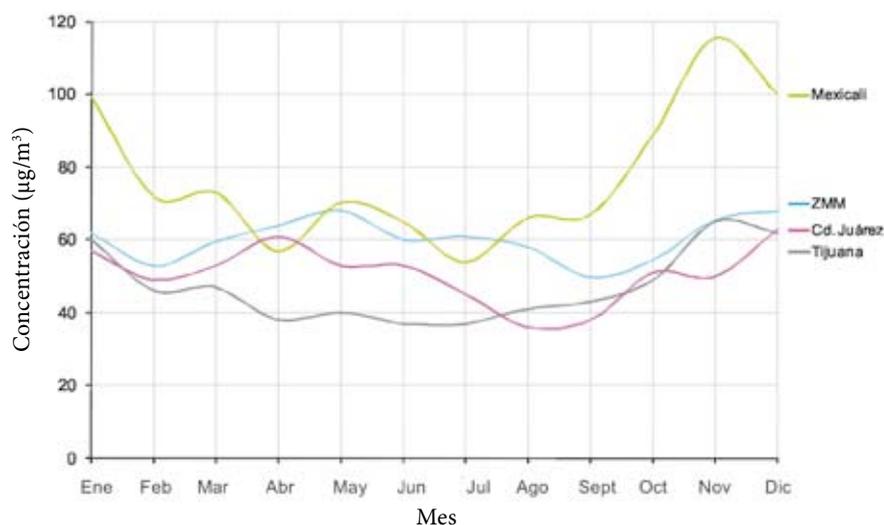


FIGURA 4.3 COMPORTAMIENTO MENSUAL DE LAS PM_{10} EN LA REGIÓN NORTE DEL PAÍS (1997-2005)



4.2 Distribución espacial de las PM_{10}

Con la finalidad de mostrar la distribución espacial de las concentraciones de PM_{10} en cada una de las ciudades, se elaboraron mapas de contorno a partir de los promedios anuales de las concentraciones diarias (promedios de 24 horas) para el último año de análisis.

En la ZMVM (figura 4.4a) se observa que los niveles más elevados de PM_{10} se presentan en la parte norte, alrededor de las estaciones de monitoreo Xalostoc y Villa de las Flores, disminuyendo de manera gradual hacia el suroeste. Una posible fuente de emisión asociada con los niveles registrados en Xalostoc es el flujo vehicular intenso que cruza zonas habitacionales e industriales con caminos sin pavimentar y suelos desprovistos de cubierta vegetal.

En lo que respecta a la ZMG (figura 4.4b), las concentraciones más altas se ubican en el sur y el sureste, y se registraron en los alrededores de las estaciones Loma Dorada y Miravalle. En la ZMVT (figura 4.4c) las concentraciones más elevadas de PM_{10} se ubican alrededor de la estación de monitoreo San Cristóbal, en el norte de la zona metropolitana, con concentraciones entre un 34 y un 52% por arriba de las registradas en las demás estaciones. Dicha estación se encuentra en un área semi-rural, a favor del viento de

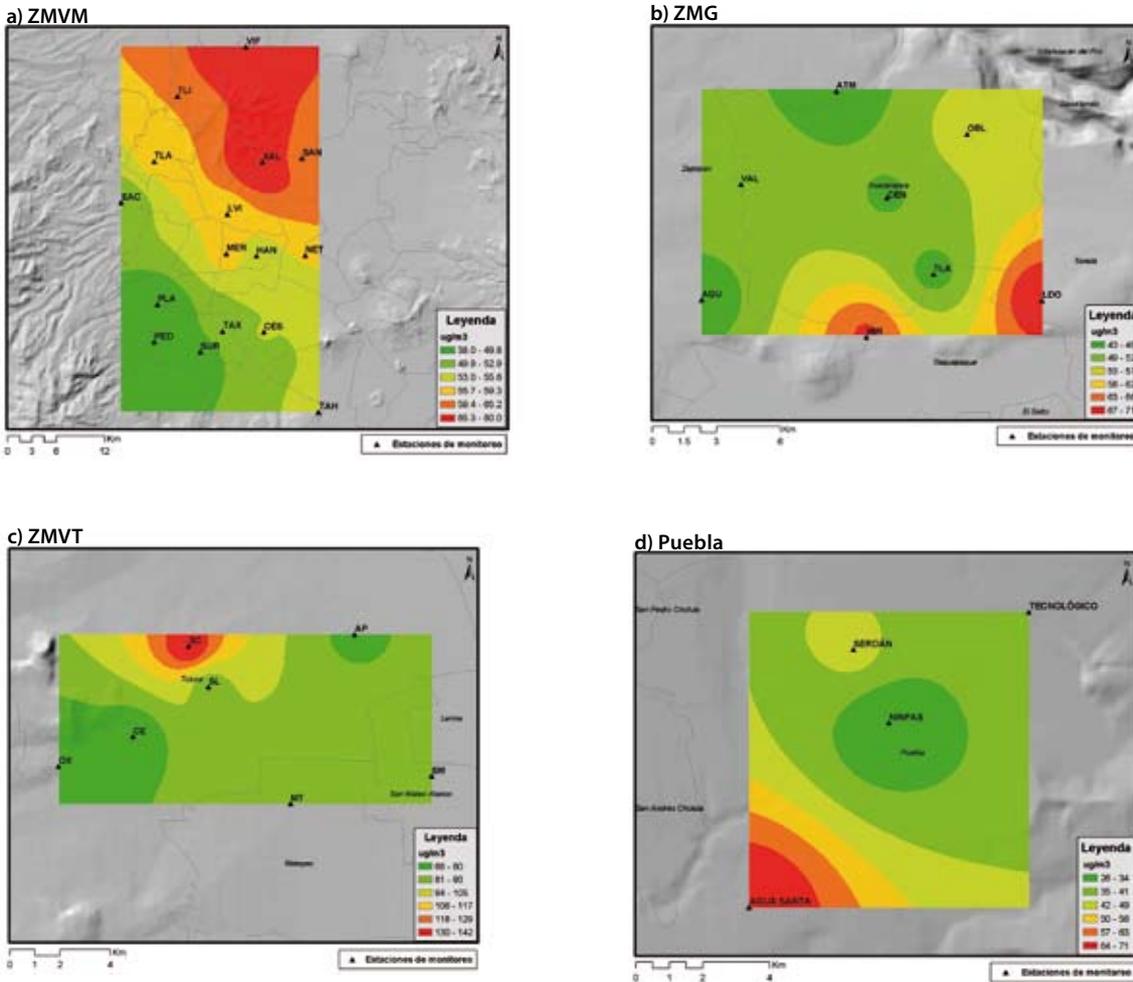
la zona industrial. Por la descripción del entorno, no se identifica una fuente de emisión muy cercana, aunque sería importante evaluar la representatividad de la estación.

En lo que se refiere a Puebla, las concentraciones más elevadas de PM_{10} se registraron al suroeste, en los alrededores de la estación de monitoreo Agua Santa (figura 4.4d). La zona suroeste de Puebla es una de las áreas más erosionadas, con una gran cantidad de calles sin pavimentar, además de que los vientos dominantes de Puebla provienen del noreste, lo que favorece el transporte de los contaminantes al suroeste de la ciudad (SMRN-GEP *et al.*, 2006).

En lo que respecta a las ciudades agrupadas en la región norte, la figura 4.5a muestra que en la ZMM los niveles más elevados de PM_{10} se registraron en los alrededores de la estación de monitoreo Santa Catarina (suroeste), disminuyendo gradualmente hacia La Pastora (sureste). Por su ubicación, el viento arrastra las emisiones de la mayoría de las fuentes industriales de Monterrey hacia la estación Santa Catarina (GENL *et al.*, 1997).

En Ciudad Juárez las concentraciones más elevadas de PM_{10} se presentaron en las inmediaciones de la estación Advance, disminuyendo hacia el norte de la estación y alcanzando las concentraciones más bajas

FIGURA 4.4 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS PM_{10} EN LAS CIUDADES DE LA REGIÓN CENTRO (2005)



cerca de las estaciones 20-30, Pestalozzi y Tecnológico (figura 4.5b). Es posible que las emisiones de la industria y de la colonia ladrillera que se alojan cerca de Advance se relacionen con los niveles alcanzados en esta estación.

Respecto a la situación de Tijuana (figura 4.5c), los niveles más altos de PM_{10} se ubicaron en los alrededores de la estación de monitoreo La Mesa, disminuyendo de manera gradual hacia el oeste.

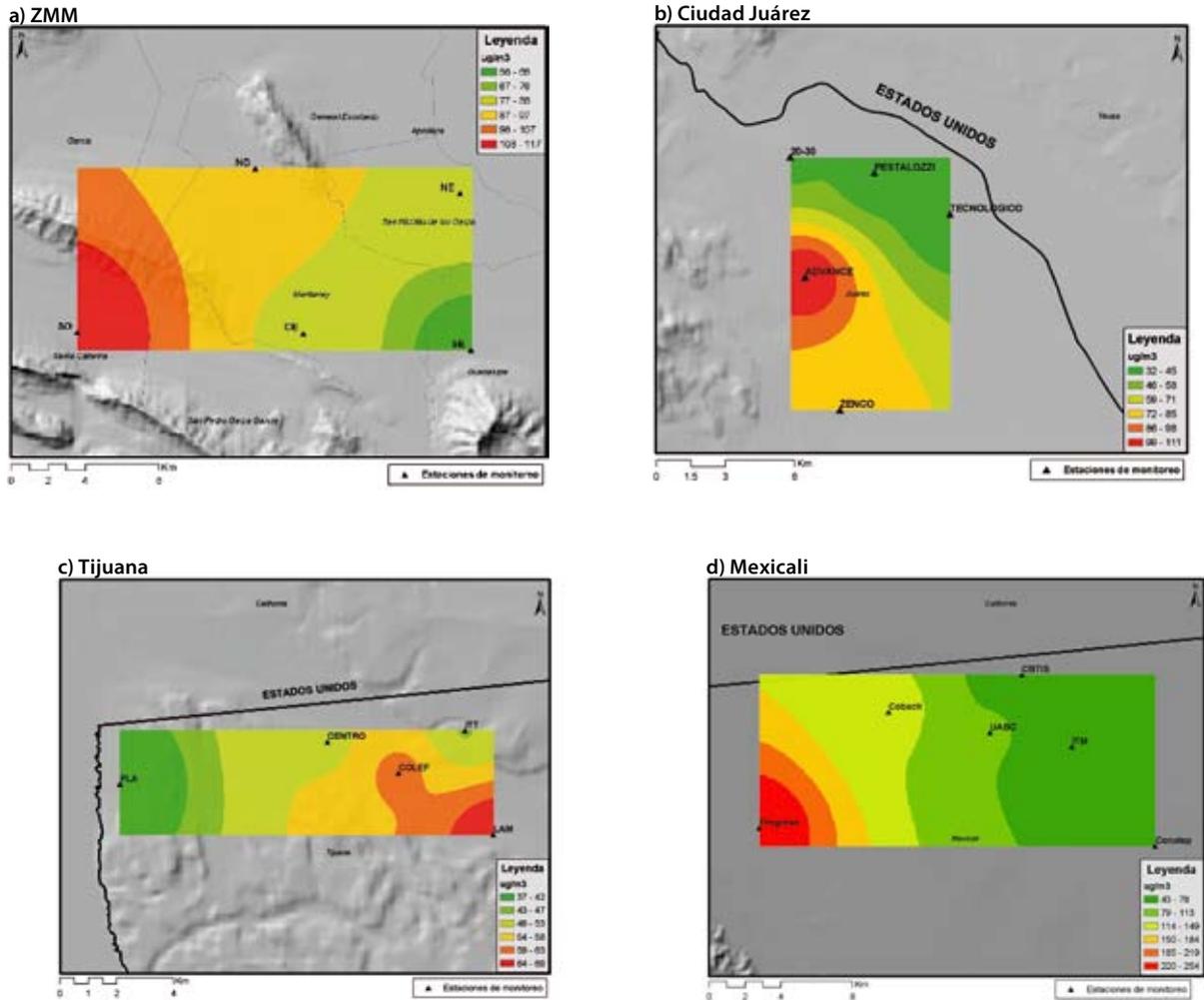
Por último, en Mexicali (figura 4.5d) la estación Progreso es la que registra las mayores concentraciones de PM_{10} , que van disminuyendo gradualmente hacia el este de la estación. La estación Progreso se en-

cuentra ubicada en un área muy erosionada, y colinda con una calle de terracería que presenta un intenso flujo vehicular, por lo que pudiera tratarse de niveles de PM_{10} asociados fuertemente con fuentes locales, y no necesariamente representar las condiciones regionales.

4.3 Exposición de la población a las PM_{10}

El cuadro 4.1 muestra las estimaciones de las concentraciones promedio anuales ponderadas por población que se calcularon para caracterizar la exposición general de la población a las PM_{10} en las ciudades analiza-

FIGURA 4.5 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS PM_{10} EN LAS CIUDADES DE LA REGIÓN NORTE (2005)



das. Dichas estimaciones combinan la información de la distribución espacial de las PM_{10} descrita en la sección anterior, con la información sobre la distribución espacial de la población, lo que permite una aproximación a la exposición promedio de la población. Así, los indicadores muestran que hasta el año 2004 la población mayormente expuesta era la de Mexicali, con una mejoría considerable en 2004 y 2005. Resalta que para los últimos años el promedio anual ponderado se ha incrementado en la ZMVT y la ZMM, con promedios similares o incluso superiores a los de Mexicali. Ciudad Juárez presenta también valores altos, con un promedio anual ponderado en 2003 muy superior al resto de las ciudades.

En la figura 4.6 se muestra el promedio anual ponderado por población de PM_{10} para el último año de análisis, identificándose que las ciudades con los valores más elevados son, en orden decreciente, la ZMM, la ZMVT, Mexicali y Ciudad Juárez.

4.4 Evaluación del cumplimiento de la NOM de PM_{10}

Con el fin de determinar el cumplimiento de la norma de PM_{10} en las ciudades estudiadas, en esta sección se muestran las tendencias de las concentraciones ambientales en comparación con las especificaciones de la norma de calidad del aire, así como el número de

CUADRO 4.1 PROMEDIO ANUAL DE CONCENTRACIONES¹ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) DE PM_{10} PONDERADO POR POBLACIÓN EN OCHO CIUDADES MEXICANAS (1997-2005)

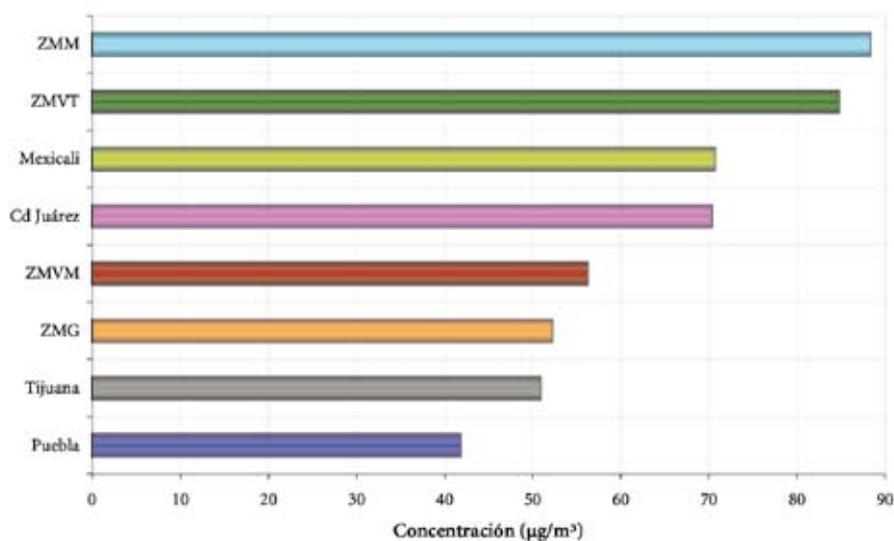
Año	ZMVM	ZMG	ZMVT	Puebla	ZMM	Ciudad Juárez	Tijuana	Mexicali
1997	76	49	SM	SM	44	83	59	83
1998	76	73	63	SM	57	63	49	83
1999	54	60	62	SM	73	75	55	101
2000	53	57	42	DI	62	83	50	110
2001	52	54	41	55	87	81	53	89
2002	51	53	48	61	87	83	50	100
2003	59	51	72	49	86	124	49	91
2004	54	50	76	41	81	57	49	88
2005	56	52	85	42	88	70	51	71

¹ Promedio anual calculado a partir de promedios de 24 horas con registros continuos para la ZMVM, la ZMG, la ZMVT, Puebla y la ZMM; para Ciudad Juárez, Tijuana y Mexicali, el cálculo se hizo a partir de datos de muestreos de 24 horas realizados cada seis días

SM = sin medición

DI = datos insuficientes.

FIGURA 4.6 PROMEDIO ANUAL DE CONCENTRACIONES DE PM_{10} PONDERADO POR POBLACIÓN EN OCHO CIUDADES MEXICANAS (2005)

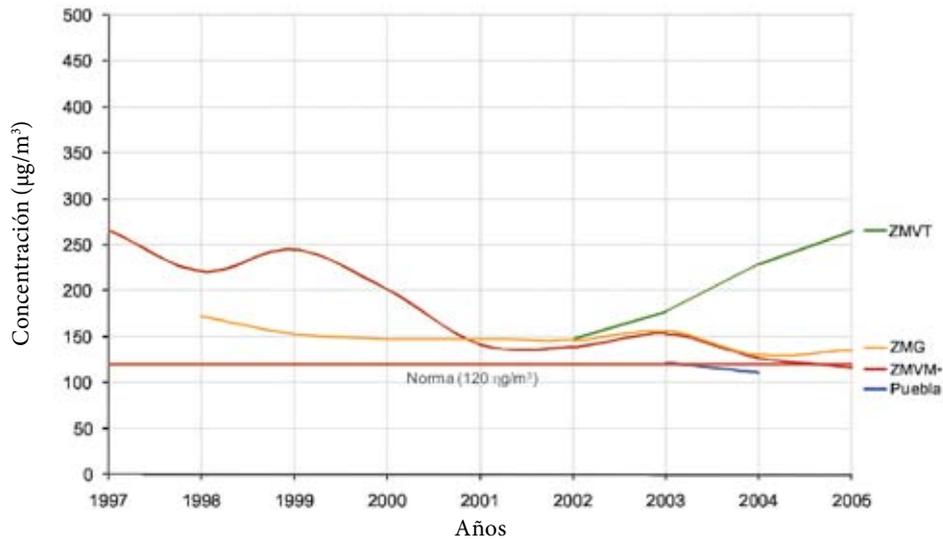


días en los que las concentraciones rebasan el nivel de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En las figuras 4.7 y 4.8 se ilustra, para las regiones centro y norte, el percentil 98 de los promedios de 24 horas de PM_{10} . Cabe mencionar que dado el estricto criterio de suficiencia de información establecido en la NOM, no fue posible calcular el indicador en algunos años y para algunas ciudades.

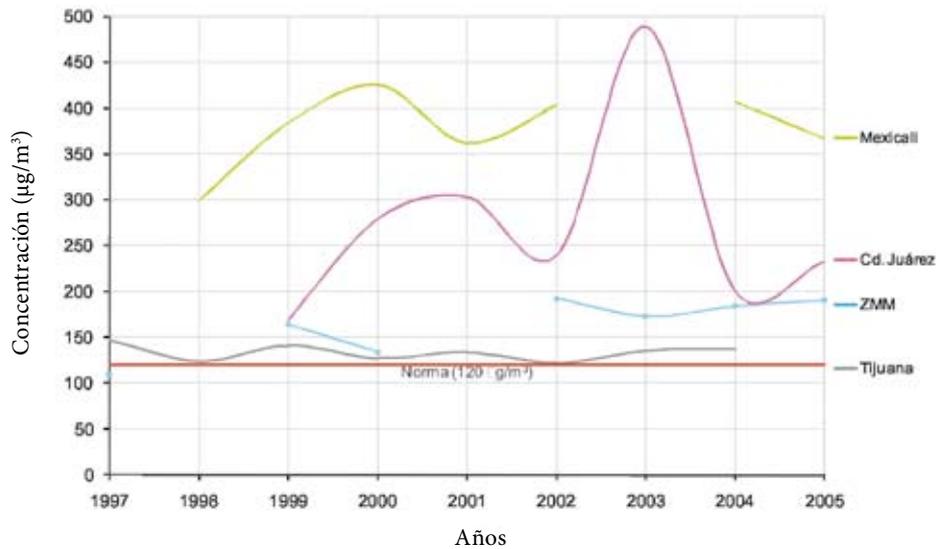
En la figura 4.7 se observa que en la región centro la ZMG y la ZMVT no cumplen con la norma de calidad del aire en todos los años de análisis. La ZMVT presenta una marcada tendencia creciente en los últimos años; en cambio, la ZMVM presenta una tendencia decreciente y cumplió con el límite en 2005, aunque con un valor levemente por abajo del límite establecido.

FIGURA 4.7 PERCENTIL 98 DE LOS PROMEDIOS DE 24 HORAS DE PM_{10} EN LA REGIÓN CENTRO (1997-2005)



*En el cálculo del percentil 98 de la ZMVM se consideró la información de los muestreos de 24 horas realizados cada seis días de las cinco estaciones de monitoreo históricas (TLA, XAL, MER, PED y CES).

FIGURA 4.8 PERCENTIL 98 DE LOS PROMEDIOS DE 24 HORAS DE PM_{10} EN LA REGIÓN NORTE (1997-2005)

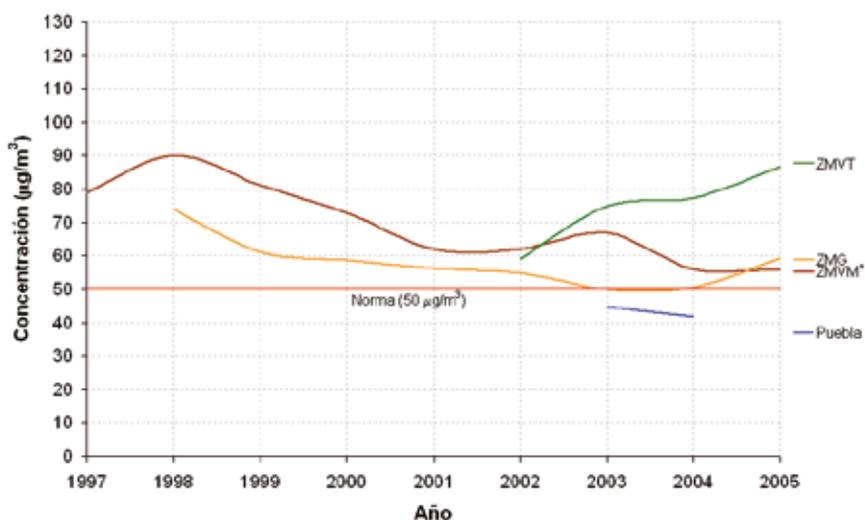


Con respecto a las ciudades de la región norte, se observa una situación más crítica; con la excepción de la ZMM en 1997, ninguna de las otras ciudades cumple con el límite establecido en la norma de calidad del aire en ninguno de los años. En Ciudad Juárez resalta el año 2003, en el que el valor del percentil 98 se

encuentra tres veces por arriba del límite establecido en la norma. Mexicali también se destaca por haber registrado concentraciones que rebasan el límite en más del doble.

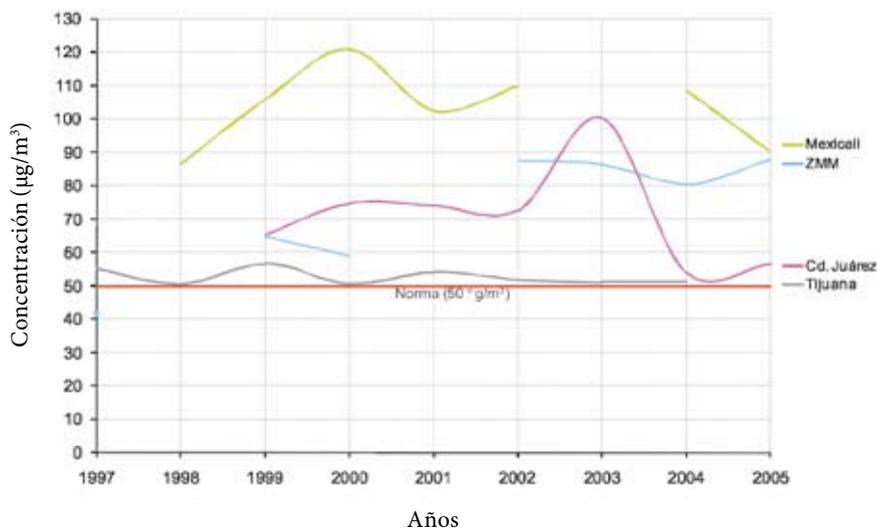
En relación con el valor de la norma anual, las figuras 4.9 y 4.10 exhiben los promedios anuales de

FIGURA 4.9 PROMEDIO ANUAL DE PM_{10} EN LA REGIÓN CENTRO (1997-2005)



*En el cálculo del promedio anual de la ZMVM se consideró la información de los muestreos de 24 horas realizados cada seis días de las cinco estaciones de monitoreo históricas (TLA, XAL, MER, PED y CES).

FIGURA 4.10 PROMEDIO ANUAL DE PM_{10} EN LA REGIÓN NORTE (1997-2005)



PM_{10} en las ciudades agrupadas en las regiones centro y norte, respectivamente. El promedio anual de PM_{10} presenta un comportamiento muy similar al referido para el percentil 98. En prácticamente todas las ciudades y todos los años, se incumple con el límite establecido de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Los valores más elevados de

los últimos años se registraron en la ZMVT, Mexicali y la ZMM. En algunos años, Mexicali ha alcanzado valores que están dos veces por arriba del límite establecido en la NOM, y en Ciudad Juárez resalta para el año 2003 un valor dos veces por arriba de la norma ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

En cuanto al número de días en los que se rebasa el valor de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, como se mencionó previamente, sólo se presenta el indicador en aquellas ciudades donde se utiliza equipo automático.

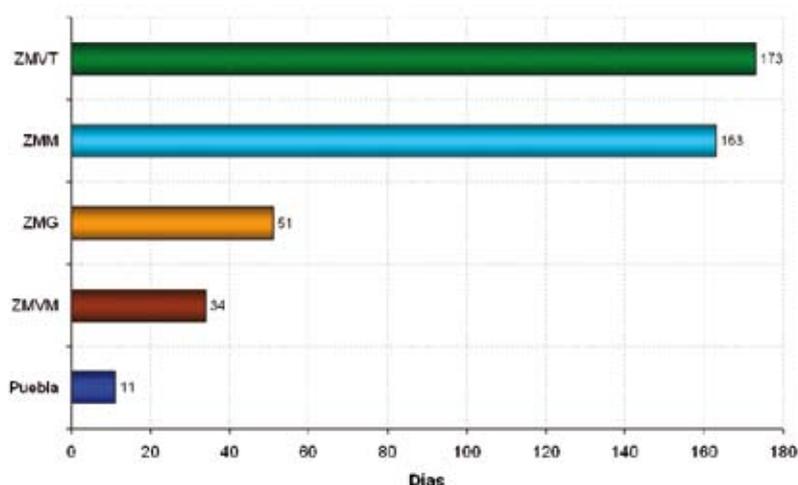
En el cuadro 4.2 se observa que la ZMVM y la ZMG presentan, a través de los años, una disminución del número de días en los que se rebasa el límite.

CUADRO 4.2 NÚMERO DE DÍAS EN LOS QUE SE REBASA EL VALOR DE LA NORMA DE PM_{10} ($120 \mu\text{g}/\text{m}^3$) EN CINCO CIUDADES MEXICANAS (1997-2005)

Año	ZMVM	ZMG	ZMVT	Puebla	ZMM
1997	206	98	SM	SM	8
1998	204	177	57	SM	33
1999	41	150	101	SM	115
2000	55	133	18	DI	45
2001	85	120	18	18	123
2002	51	117	81	26	130
2003	83	71	136	45	133
2004	40	54	138	13	125
2005	34	51	173	11	163

SM = sin medición
DI = datos insuficientes.

FIGURA 4.11 NÚMERO DE DÍAS EN LOS QUE SE REBASA EL VALOR DE LA NORMA DE PM_{10} ($120 \mu\text{g}/\text{m}^3$) EN CINCO CIUDADES MEXICANAS (2005)



En la ZMVM los años con mayor número de días por arriba de la norma (1997 y 1998) fueron aquellos en los que se presentaron grandes incendios forestales que ocasionaron un incremento de PM_{10} en esta metrópoli (Toledo, 1998). La ZMVT y la ZMM muestran un aumento importante, rebasando dicho valor en el último año en 173 y 163 días, respectivamente (figura 4.11).

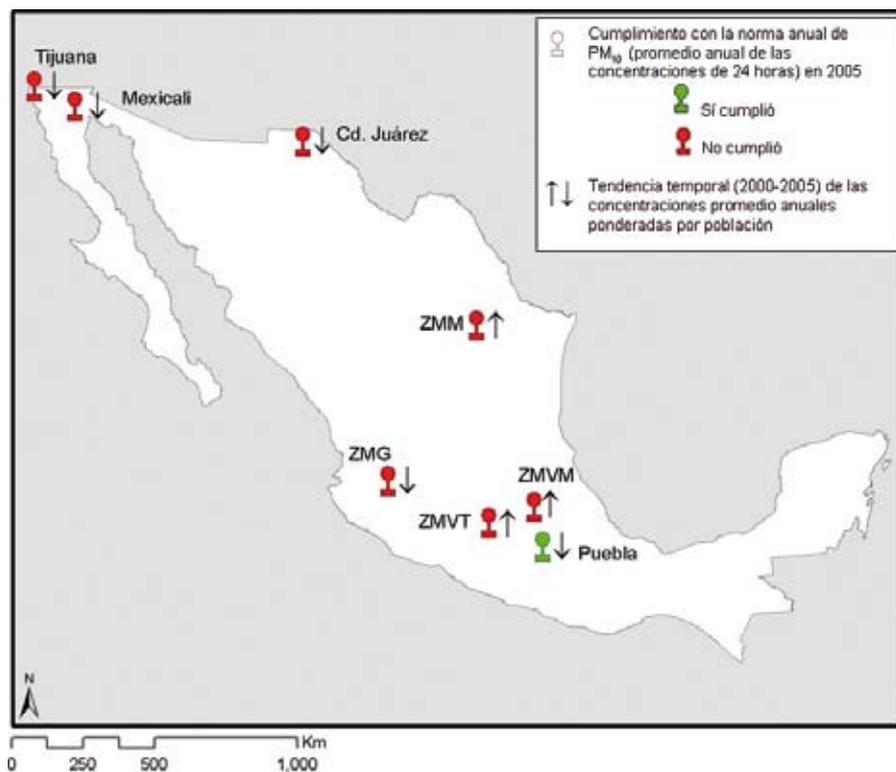
4.5 Conclusiones sobre las PM_{10}

En la figura 4.12 se ilustra el cumplimiento de las ciudades y zonas metropolitanas con la norma anual durante el año 2005, y la tendencia de la concentración promedio anual de PM_{10} ponderada por población en el periodo 2000-2005. Como puede observarse, casi todas las ciudades incumplen con la norma anual de PM_{10} ; en 2005 sólo Puebla cumplió, y además es la única con una tendencia decreciente. En cambio, dos de las ciudades más contaminadas, la ZMVT y la ZMM, no cumplen con la norma y además muestran una tendencia creciente en su concentración promedio anual ponderada por población.

La clasificación de las ciudades en términos de su grado de contaminación por PM_{10} durante el año 2005 se estableció utilizando el percentil 98, el promedio anual y la concentración promedio anual ponderada por población.

De acuerdo con los resultados obtenidos (cuadro 4.3), la ciudad más contaminada por PM_{10} es Mexicali; el indicador que más contribuyó al índice compuesto fue el percentil 98, con casi un 40% por arriba del valor alcanzado por la ciudad que le sigue, la ZMVT, en la que los indicadores más críticos fueron el promedio anual ponderado por población (que alcanzó un 70% por arriba del valor de la norma) y el percentil 98, con un valor más de dos veces el del límite estableci-

FIGURA 4.12 CUMPLIMIENTO CON LA NORMA Y TENDENCIAS EN OCHO CIUDADES MEXICANAS (2000-2005)



Fuente: elaboración propia de los autores.

CUADRO 4.3 CLASIFICACIÓN DE LAS CIUDADES SEGÚN SU GRADO DE CONTAMINACIÓN POR PM_{10}

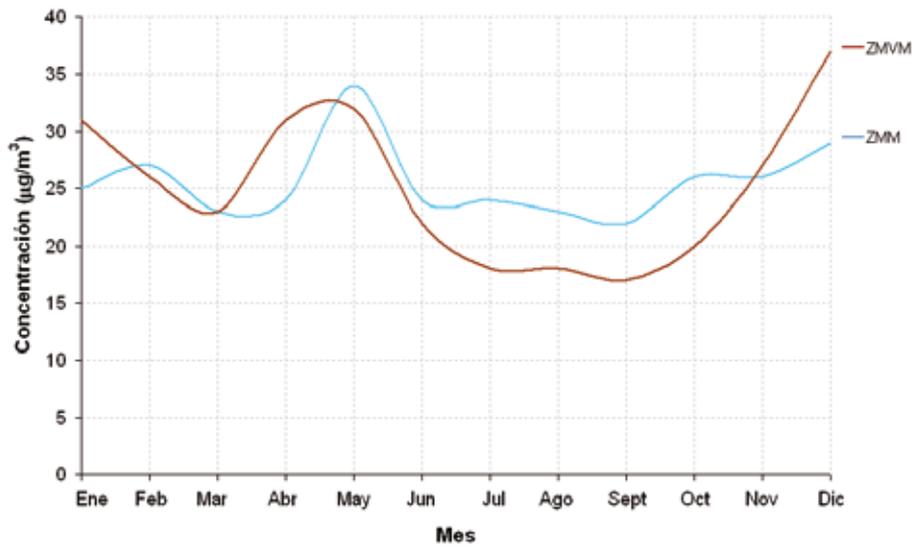
Ciudad	Clasificación
Mexicali	1°
ZMVT	2°
ZMM	3°
Ciudad Juárez	4°
ZMG	5°
ZMVM	6°
Tijuana	7°
Puebla	8°

do en la norma. En la clasificación le siguen, también con problemas importantes de contaminación por PM_{10} , la ZMM y Ciudad Juárez. En cambio, Tijuana y Puebla resultaron las ciudades menos contaminadas por este contaminante; ambas contaron con suficientes datos para evaluar el cumplimiento de la norma

en 2004, mismo año en el que Puebla cumplió con las dos normas de calidad del aire, mientras que Tijuana no cumplió.

Cabe mencionar que los altos niveles de PM_{10} en Mexicali, en todos los años de análisis, son dominados por las concentraciones registradas en la estación de monitoreo Progreso. Como se mencionó anteriormente, ésta es una estación que puede no ser representativa de las condiciones de su región de cobertura (ver sección 4.2). Así, para el año 2005, si no se toma en cuenta la estación mencionada, el promedio anual se reduce en un 28% (a $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$), el percentil 98 en un 46% (a $198 \mu\text{g}/\text{m}^3$), y el promedio anual ponderado por la población, en un 14% (a $71 \mu\text{g}/\text{m}^3$). De este modo, si no se considera la estación Progreso en la clasificación, Mexicali ocuparía el lugar 4° en vez del 1°. Es de suma importancia evaluar la representatividad de esta estación para determinar su inclusión en los análisis futuros.

FIGURA 4.13 COMPORTAMIENTO MENSUAL DE LAS $PM_{2.5}$ EN DOS CIUDADES MEXICANAS (2004-2005)



$PM_{2.5}$: fracción respirable o fina

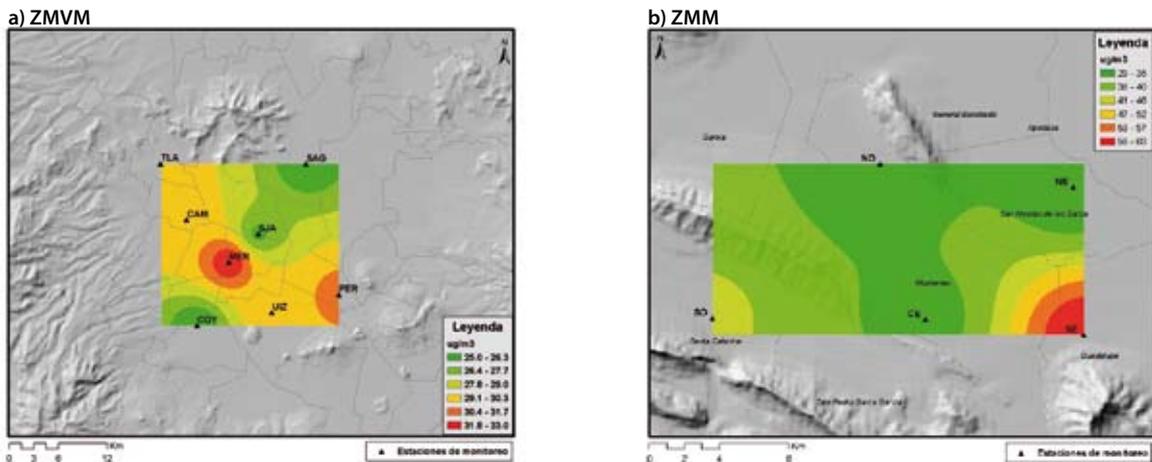
En esta sección se presentan, para la ZMVM y la ZMM, los indicadores de $PM_{2.5}$, contaminante que se mide con equipo automático en las dos ciudades, y además con equipo manual en la ZMVM. Ambas ciudades empezaron a medir $PM_{2.5}$ en el año 2003, dado lo cual no se cuenta con información durante un

periodo suficientemente extenso como para una evaluación de tendencias.

4.6 Comportamiento de las $PM_{2.5}$ en el tiempo

El comportamiento mensual de las $PM_{2.5}$ en 2004 y 2005 para ambas ciudades es similar, con menores concentraciones en los meses de lluvia de junio a octubre, y mayores concentraciones en los meses fríos y se-

FIGURA 4.14 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS $PM_{2.5}$ EN DOS CIUDADES MEXICANAS (2005)



cos del año (figura 4.13). Para esta sección se considera sólo la información de los dos últimos años, debido a la poca información que se generó en 2003.

4.7 Distribución espacial de las PM_{2.5}

La distribución espacial de las concentraciones de PM_{2.5} en las dos ciudades se presenta con mapas de contorno (figura 4.14), elaborados a partir de los promedios anuales de las concentraciones diarias (promedios de 24 horas) registradas en 2005.

En la ZMVM los niveles más elevados de PM_{2.5} ocurrieron en el centro de la ciudad, alrededor del la estación Merced. Por otro lado, en la ZMM las concentraciones más elevadas se presentaron en el suroeste, en la estación La Pastora, que se ubica a favor del viento de un corredor industrial.

4.8 Exposición de la población a las PM_{2.5}

En cuanto a la caracterización de la exposición general de la población a las PM_{2.5}, se observa que los niveles en ambas zonas metropolitanas son similares para los dos primeros años; la concentración más alta se registra en la ZMM en 2005, y no hay una tendencia clara en los tres años que cuentan con mediciones (cuadro 4.4).

CUADRO 4.4 PROMEDIO ANUAL DE CONCENTRACIONES¹ (µG/M³) DE PM_{2.5} PONDERADO POR POBLACIÓN EN DOS CIUDADES MEXICANAS (2003-2005)

Año	ZMVM	ZMM
2003	29	32
2004	28	29
2005	29	36

¹ Promedio anual calculado a partir de los promedios de 24 horas.

4.9 Evaluación del cumplimiento de la NOM de PM_{2.5}

Con el fin de determinar si en las dos ciudades estudiadas se cumplió con los límites establecidos en la NOM, en esta sección se muestran las concentraciones ambientales que se pueden comparar con las especificaciones de la norma; además se incluye el número de días con concentraciones que rebasan el nivel de 65 µg/m³. Cabe mencionar que, para evaluar el cumplimiento, en la ZMVM se utilizó la información generada con equipo manual, debido a especificaciones en la NOM.

Al aplicar el criterio de suficiencia de información establecido en la NOM, no es posible evaluar el percentil 98 ni el promedio anual para la ZMM en ninguno de los años en los que se ha monitoreado este contaminante.

En la ZMVM se cuenta con suficiente información para 2004 y 2005, años en los que se cumplió con el límite de 24 horas (65 µg/m³) con valores para el percentil 98 de 56 y 59 µg/m³ respectivamente; en cambio, no se cumplió con la norma anual (15 µg/m³), registrándose promedios anuales casi dos veces por arriba del límite especificado en la NOM (24 y 25 µg/m³ en 2004 y 2005, respectivamente).

Por último, en lo referente al límite de 24 horas, la ZMM presenta un mayor número de días por arriba del valor de la norma que la ZMVM (cuadro 4.5).

CUADRO 4.5 NÚMERO DE DÍAS EN LOS QUE SE REBASA EL VALOR DE LA NORMA DIARIA PARA PM_{2.5} (65 µG/M³) EN DOS CIUDADES MEXICANAS (2003-2005)

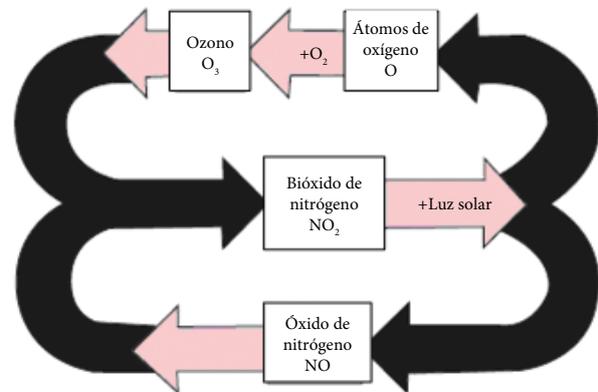
Año	ZMVM	ZMM
2003	8	26
2004	16	17
2005	13	35

5 OZONO

El ozono (O_3) es un gas que se forma en la atmósfera cuando se combinan 3 átomos de oxígeno; se caracteriza además por ser incoloro, con un olor particular, y por poseer la capacidad de oxidar materiales. El O_3 es muy reactivo e incluso a bajas concentraciones es irritante y tóxico. El O_3 se encuentra de manera natural en la estratósfera; sin embargo, en la tropósfera es un contaminante secundario que se forma mediante la reacción química de óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (COV) en presencia de la luz solar (figura 5.1).

La exposición al O_3 puede causar daños en los humanos, tanto sanos como enfermos, siendo los grupos más vulnerables los niños y las personas de edad avanzada; es capaz de ocasionar inflamación pulmonar, depresión del sistema inmunológico, cambios agudos en la función, estructura y metabolismo pulmonar, que pueden resultar en síntomas y enfermedades respiratorios (Evans *et al.*, 2000), e incluso existe evidencia

FIGURA 5.1 REACCIONES QUE PARTICIPAN EN LA FORMACIÓN DE O_3 TROPOSFÉRICO



Fuente: How Stuff Works (2006).

sobre una asociación con mortalidad prematura (Bell *et al.*, 2004).

Algunos estudios realizados en la Ciudad de México han asociado la exposición a altas concentraciones

de ozono con un grupo de efectos adversos en la salud de niños y adultos, como reducción en la función pulmonar, síntomas respiratorios como tos y flemas, visitas a las salas de emergencias por infecciones respiratorias, ausentismo escolar, y mortalidad prematura (Romieu *et al.*, 1992; Romieu *et al.* 1996; Romieu *et al.* 1997; Castillejos, 1995; Tellez-Rojo *et al.*, 1997; O'Neill *et al.*, 2004).

A continuación se describen y se muestran las tendencias espaciales y temporales del O₃ en ocho ciudades mexicanas agrupadas en la región centro (ZMVM, ZMG, ZMVT y Puebla) y la región norte (ZMM, Ciudad Juárez, Tijuana y Mexicali) para el periodo 1997-2005.

5.1 Comportamiento del O₃ en el tiempo

En las figuras 5.2 y 5.3 se observa que las concentraciones de O₃ en todas las ciudades se incrementan gradualmente a partir de las 11:00, con un pico que se mantiene incluso hasta alrededor de las 17:00 horas; este patrón corresponde a los picos de temperatura e intensidad solar que ocurren después de los picos de emisiones por la actividad vehicular de las mañanas.

En relación con el comportamiento del O₃ durante el año, la época de altas concentraciones coincide con la primavera y el principio del verano, ya que en estos meses se presentan condiciones meteorológicas locales o sinópticas que suelen favorecer la formación y la acumulación de este contaminante. De la figura 5.4 se aprecia que las concentraciones más altas para las ciudades agrupadas en la región centro se generan en el mes de mayo, en tanto que en las ciudades de la región norte (figura 5.5) los meses con niveles más elevados son abril y mayo.

5.2 Distribución espacial del O₃

La distribución espacial del O₃ se presenta en mapas de contorno, generados con los promedios anuales que fueron calculados a partir de las concentraciones máximas diarias de los promedios móviles de 8 horas durante el año 2005.

Cabe mencionar que el O₃, dada su naturaleza de contaminante secundario, no necesariamente registra concentraciones elevadas cerca de las fuentes de sus precursores (como por ejemplo en zonas industriales o de elevado tránsito vehicular). Los precursores pue-

FIGURA 5.2 COMPORTAMIENTO HORARIO DEL O₃ EN LA REGIÓN CENTRO (1997-2005)

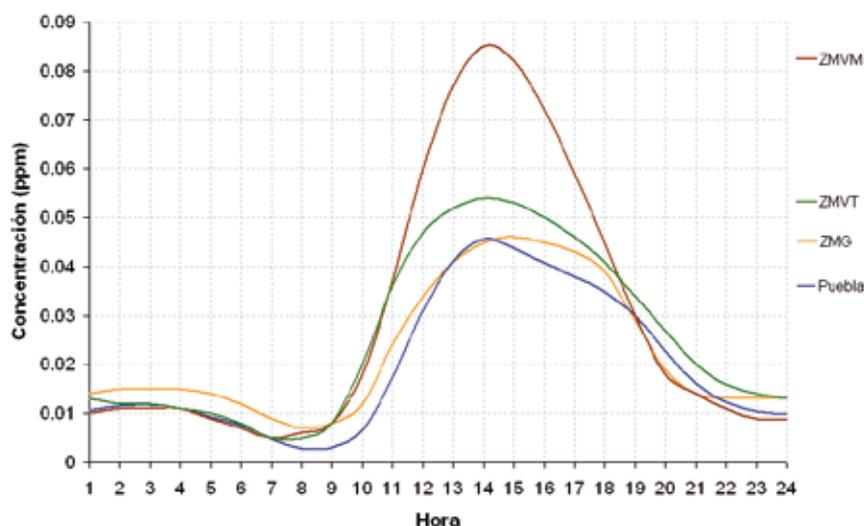


FIGURA 5.3 COMPORTAMIENTO HORARIO DEL O₃ EN LA REGIÓN NORTE (1997-2005)

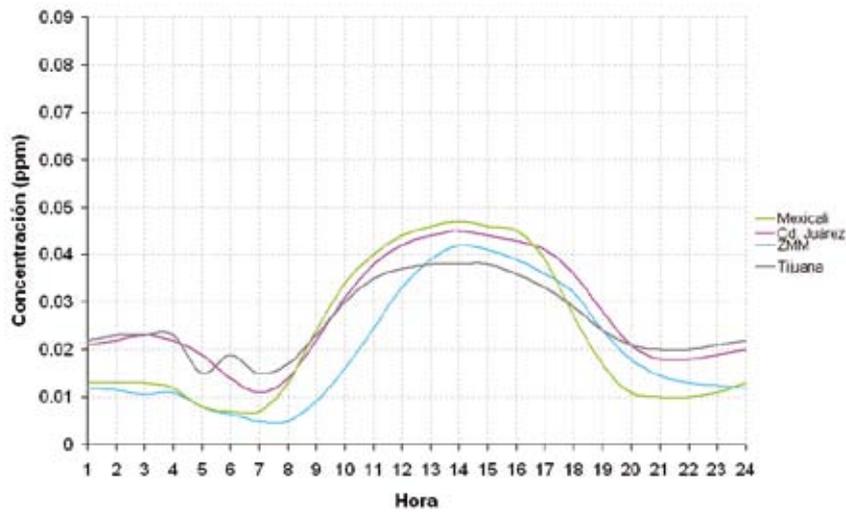
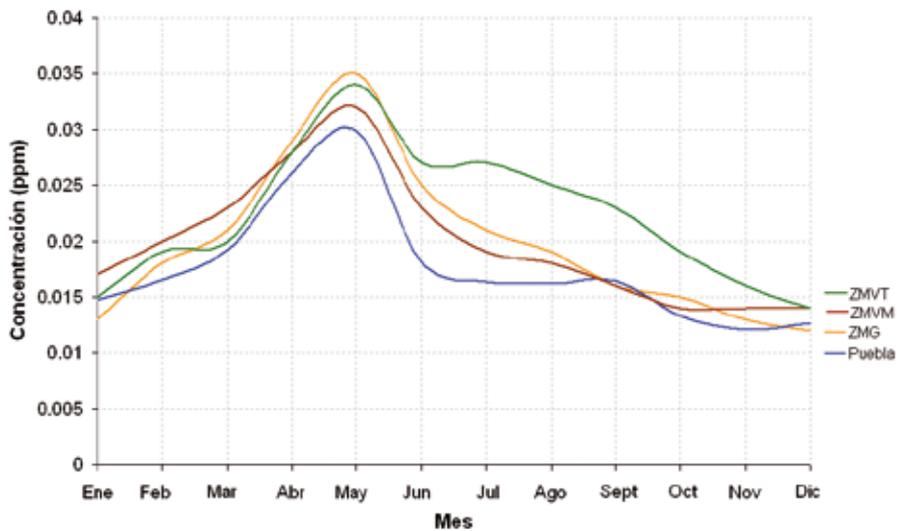


FIGURA 5.4 COMPORTAMIENTO MENSUAL DEL O₃ EN LA REGIÓN CENTRO (1997-2005)



den ser transportados y afectar los niveles de O₃ lejos de las áreas donde se emitieron, o bien el O₃ puede ser transportado de un lugar a otro después de formarse.

En la ZMVM las concentraciones más altas de O₃ se localizaron al sur de la ciudad, principalmente alrededor de las estaciones de monitoreo Pedregal, Santa Úrsula y Tláhuac (figura 5.6a), lo que se relaciona con

el comportamiento predominante de los vientos que van del noreste al suroeste, donde se acumulan los contaminantes. En la ZMG las mayores concentraciones se registraron en el sureste de la zona metropolitana, alrededor de la estación de monitoreo Loma Dorada (figura 5.6b). En lo que se refiere a la ZMVT (figura 5.6c), los valores más altos se presentaron al este de la

FIGURA 5.5 COMPORTAMIENTO MENSUAL DEL O₃ EN LA REGIÓN NORTE (1997-2005)

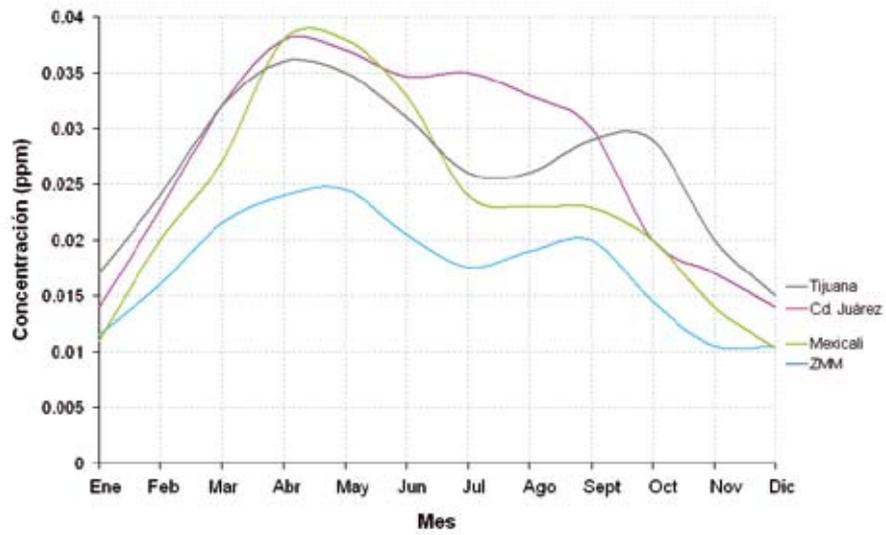
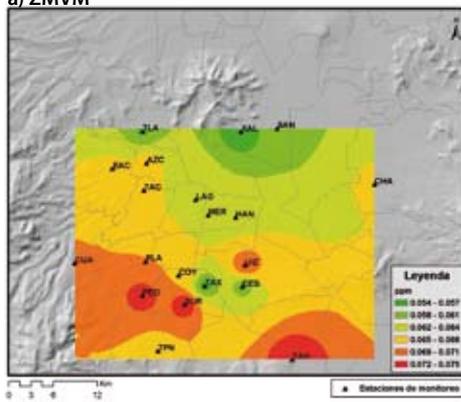
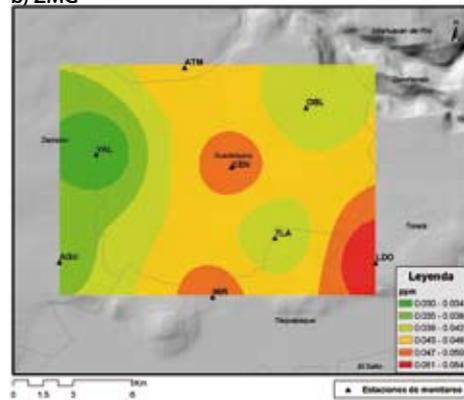


FIGURA 5.6 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL O₃ EN LAS CIUDADES DE LA REGIÓN CENTRO (2005)

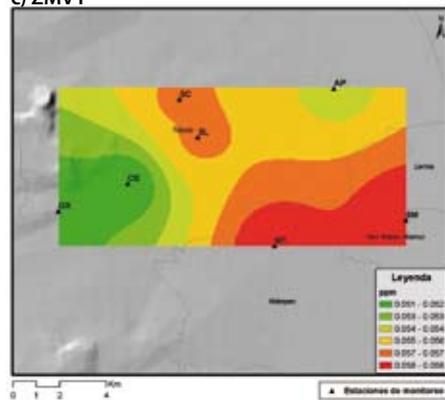
a) ZMVM



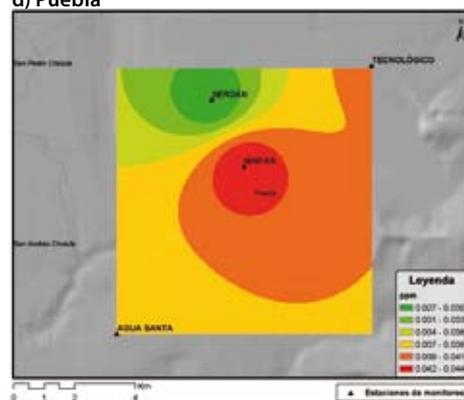
b) ZMG



c) ZMVT



d) Puebla



ciudad (Meteppec y San Mateo Atenco), disminuyendo gradualmente hacia el oeste. En Puebla (figura 5.6d) los niveles más altos se presentaron en el centro de la ciudad, alrededor de la estación de monitoreo Ninfas.

En la ZMM (figura 5.7a) los niveles más altos del contaminante se midieron en la zona noroeste, que se encuentra a favor del viento con respecto a la mayoría de las fuentes industriales y del tráfico de la zona metropolitana. En Ciudad Juárez (figura 5.7b) los mayores niveles de O_3 se presentaron en los alrededores de la estación Tecnológico, disminuyendo hacia el oeste hasta alcanzar los niveles más bajos cerca de la estación 20-30.

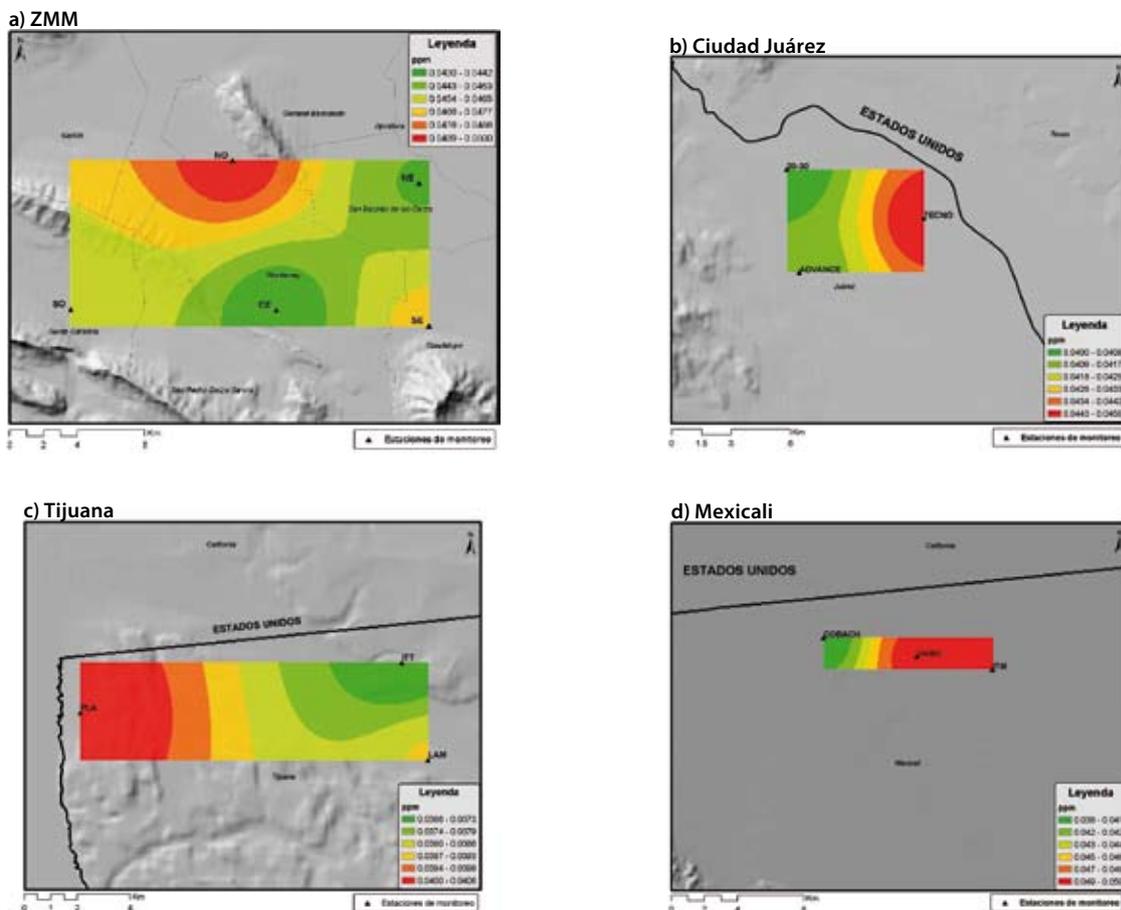
En lo que respecta a Tijuana (figura 5.7c), las más altas concentraciones de O_3 se midieron en la costa del mar, en los alrededores de la estación Playas. Finalmente, en Mexicali (figura 5.7d) los niveles más eleva-

dos se presentaron en los alrededores de las estaciones ITM y UABC.

5.3 Exposición de la población al O_3

Con el fin de caracterizar la exposición de la población al ozono, se muestran las concentraciones anuales de O_3 ponderadas por población. Las estimaciones combinan la información de la distribución espacial de los contaminantes descrita en la sección anterior, con información sobre la distribución espacial de la población. Así, lo que se observa del cuadro 5.1 es que en todos los años analizados se presentan las concentraciones anuales más elevadas de O_3 ponderadas por población en la ZMVM de manera predominante, seguida por la ZMVT, Mexicali, la ZMG, y la ZMM.

FIGURA 5.7 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL O_3 EN LAS CIUDADES DE LA REGIÓN NORTE (2005)

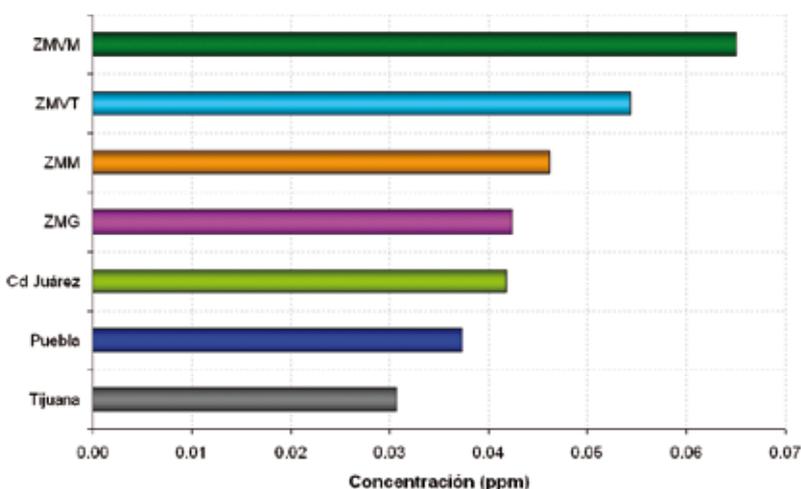


CUADRO 5.1 PROMEDIO ANUAL¹ DE CONCENTRACIONES (PPM) DE O₃ PONDERADO POR POBLACIÓN EN OCHO CIUDADES MEXICANAS (1997-2005)

Año	ZMVM	ZMG	ZMVT	Puebla	ZMM	Ciudad Juárez	Tijuana	Mexicali
1997	0.080	0.064	0.048	SM	0.036	0.040	0.039	0.053
1998	0.078	0.059	0.053	SM	0.038	0.046	0.032	0.049
1999	0.073	0.043	0.053	SM	0.048	0.047	0.029	0.051
2000	0.079	0.041	0.055	DI	0.034	0.048	0.026	0.042
2001	0.070	0.042	0.046	0.042	0.032	0.047	0.032	0.041
2002	0.068	0.046	0.048	0.043	0.039	0.041	0.034	0.045
2003	0.067	0.046	0.048	0.043	0.038	0.042	0.029	0.046
2004	0.058	0.045	0.047	0.036	0.044	0.040	0.037	0.046
2005	0.065	0.042	0.054	0.037	0.046	0.042	0.031	SI

¹ Promedio anual calculado a partir de las concentraciones diarias de los promedios móviles de 8 horas
 SM = sin medición DI = datos insuficientes SI = sin información.

FIGURA 5.8 PROMEDIO ANUAL DE CONCENTRACIONES DE O₃ PONDERADO POR POBLACIÓN EN SIETE CIUDADES MEXICANAS (2005)



5.4 Evaluación del cumplimiento de la NOM de O₃

Con el objetivo de evaluar el cumplimiento con los límites de O₃ establecidos en la NOM, se muestran las tendencias de las concentraciones ambientales en comparación con las especificaciones de la norma, además del número de días en los que se rebasa el nivel máximo permisible como promedio horario.

Las figuras 5.9 y 5.10 presentan las concentraciones horarias máximas de O₃ en las ocho ciudades para el periodo 1997-2005. Para este contaminante se observa que excepto para Puebla en el año 2004 y Tijuana a partir de 1999, las demás ciudades no cumplieron con la norma horaria en ninguno de los años.

De las ciudades agrupadas en la región centro (figura 5.9), se aprecia que la ZMVM y la ZMG son las que han mantenido las mayores concentraciones máximas horarias, que han llegado a rebasar alrededor de

dos veces el límite horario; también se observa que la ZMG rebasó a la ZMVM en sus valores máximos en 2004 y 2005. En esta figura es clara la tendencia de la ZMVM, la ZMVT y Puebla hacia una disminución de las concentraciones máximas horarias, en particular para las dos últimas, que se acercan al valor de la norma horaria.

En relación con las ciudades agrupadas en la región norte (figura 5.10), tanto Ciudad Juárez como Tijuana presentan una tendencia decreciente, aunque para la primera la tendencia se invierte en los dos úl-

FIGURA 5.9 MÁXIMO HORARIO DE O₃ EN LA REGIÓN CENTRO (1997-2005)

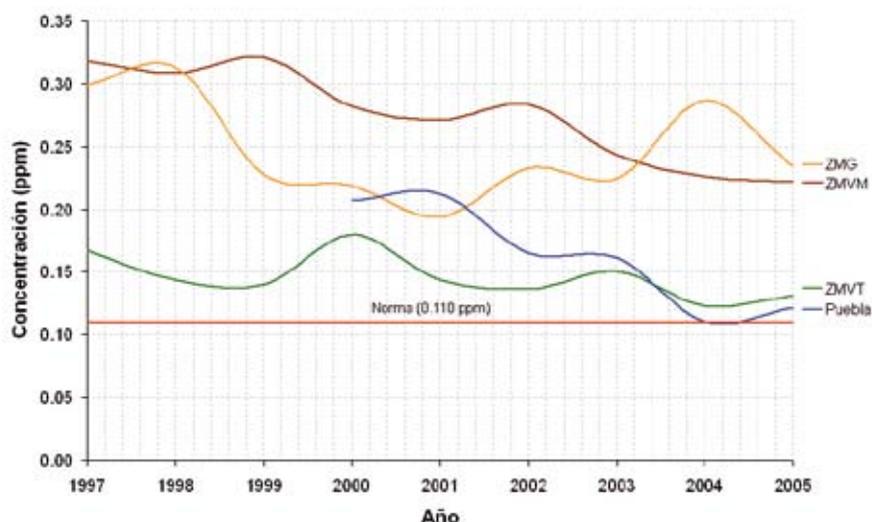
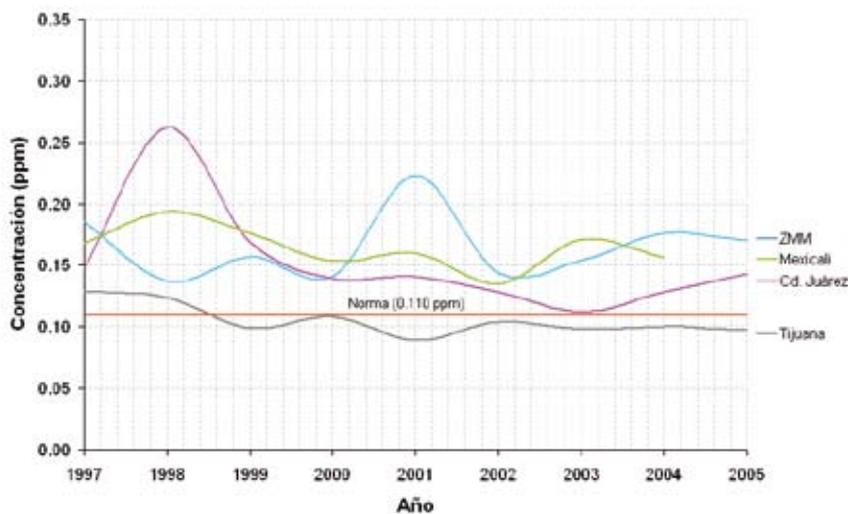


FIGURA 5.10 MÁXIMO HORARIO DE O₃ EN LA REGIÓN NORTE (1997-2005)



timos años. En los casos de la ZMM y Mexicali, no se advierte una tendencia temporal clara, pero sí que las concentraciones máximas rebasan consistentemente la norma horaria.

En las figuras 5.11 y 5.12 se presentan gráficamente los valores que permiten evaluar la norma anual (quinto máximo anual de los máximos diarios de los promedios móviles de 8 horas); en ellas se observa que, excepto para Puebla en el año 2004 y Tijuana de

1998 a 2005, las demás ciudades incumplieron con la norma en todos los años. En la región norte, por su parte, no se observa una tendencia clara.

En la ZMVM, de manera similar a los máximos horarios, se presenta una tendencia a la baja. En cambio, la ZMG y la ZMM muestran una ligera tendencia creciente en los últimos años. Cabe mencionar que en la ZMG los máximos horarios de O₃ son mayores que los de la ZMVM, aunque los promedios

FIGURA 5.11 QUINTO MÁXIMO DE LAS CONCENTRACIONES DIARIAS DE LOS PROMEDIOS MÓVILES DE 8 HORAS DE O₃ EN LA REGIÓN CENTRO (1997-2005)

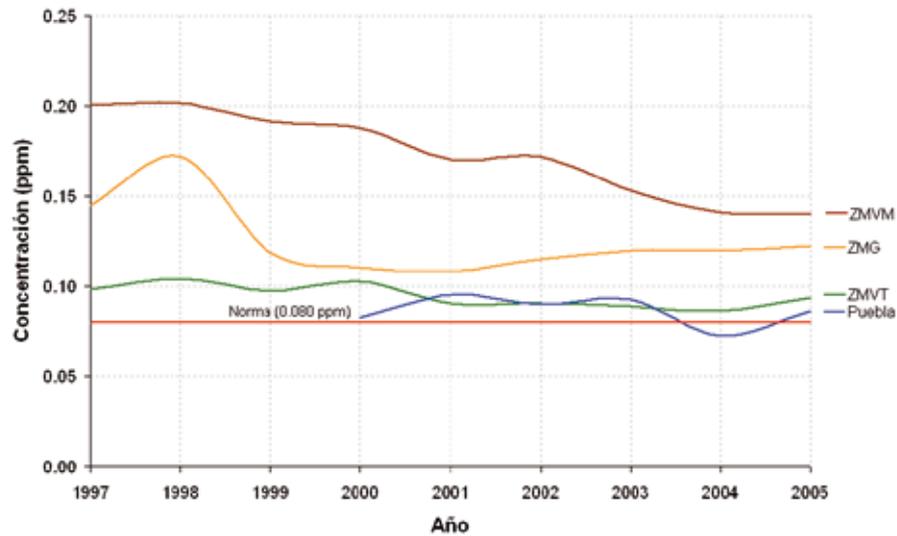
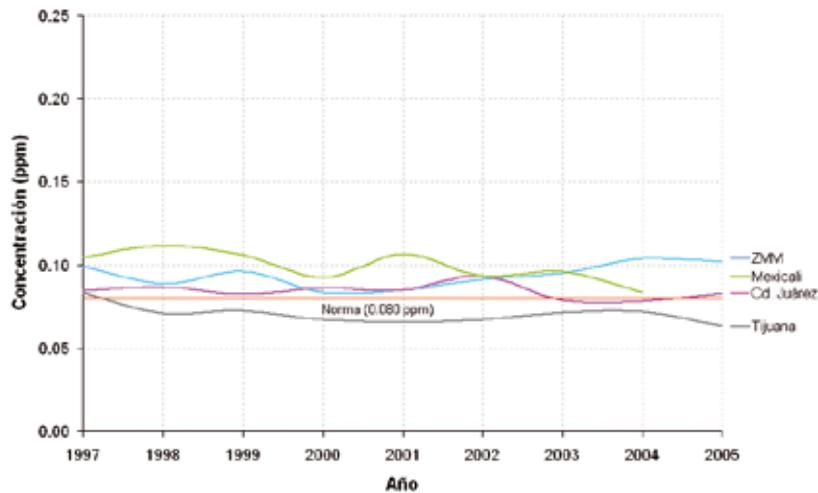


FIGURA 5.12 QUINTO MÁXIMO DE LAS CONCENTRACIONES DIARIAS DE LOS PROMEDIOS MÓVILES DE 8 HORAS DE O₃ EN LA REGIÓN NORTE (1997-2005)



móviles de 8 horas son menores; esto indica que en la ZMG los picos horarios son mayores, pero los niveles horarios en la ZMVM son predominantemente más elevados.

En el cuadro 5.2 se muestra el número de días en los que se rebasa el valor de la norma horaria de O₃ en cada una de las ocho ciudades. Del cuadro, destaca que la ZMVM es la ciudad que más rebasa en número

de días el valor de dicha norma; en menor magnitud, le sigue la ZMG. Se aprecia también que en la ZMG, la ZMVT, Puebla y Ciudad Juárez, el número de días en los que se excede el valor de la norma se incrementó en 2005 con respecto al año anterior.

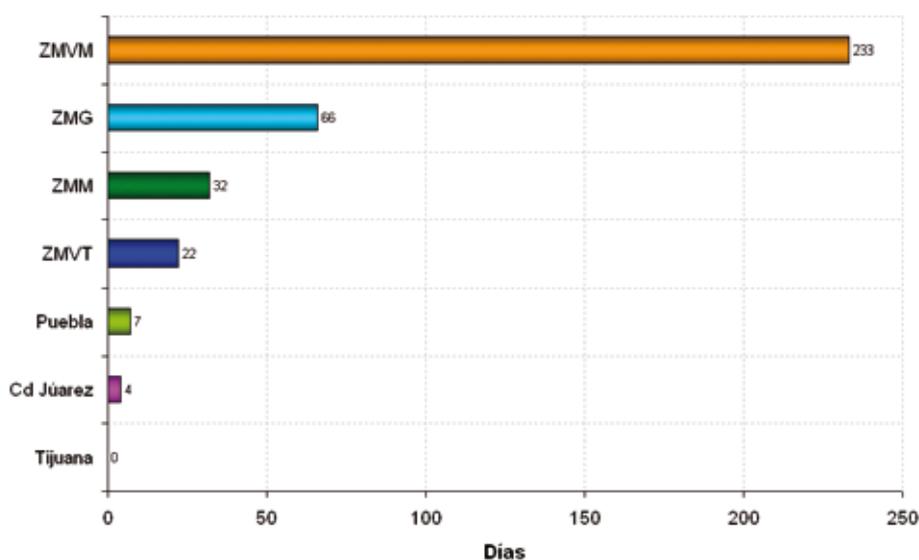
En la figura 5.13 se presenta gráficamente la información del cuadro 5.2, y se hace evidente la enorme diferencia en el número de días en los que la ZMVM

CUADRO 5.2 NÚMERO DE DÍAS EN LOS QUE SE REBASA EL VALOR DE LA NORMA HORARIA (0.11 PPM) DE O₃ EN OCHO CIUDADES MEXICANAS (1997-2005)

Año	ZMVM	ZMG	ZMVT	Puebla	ZMM	Ciudad Juárez	Tijuana	Mexicali
1997	322	169	22	SM	34	7	2	28
1998	320	138	32	SM	14	8	1	27
1999	300	59	32	SM	12	9	0	30
2000	323	64	39	DI	12	9	0	14
2001	296	36	15	33	13	6	0	15
2002	300	75	20	21	8	5	0	8
2003	284	68	14	20	14	1	0	8
2004	238	47	8	1	36	2	0	5
2005	233	66	22	7	32	4	0	SI

SM = sin medición DI = datos insuficientes SI = sin información.

FIGURA 5.13 NÚMERO DE DÍAS EN LOS QUE SE REBASA EL VALOR DE LA NORMA HORARIA DE O₃ (0.11 PPM) EN SIETE CIUDADES MEXICANAS (2005)



excede el valor de la norma con respecto a las demás ciudades.

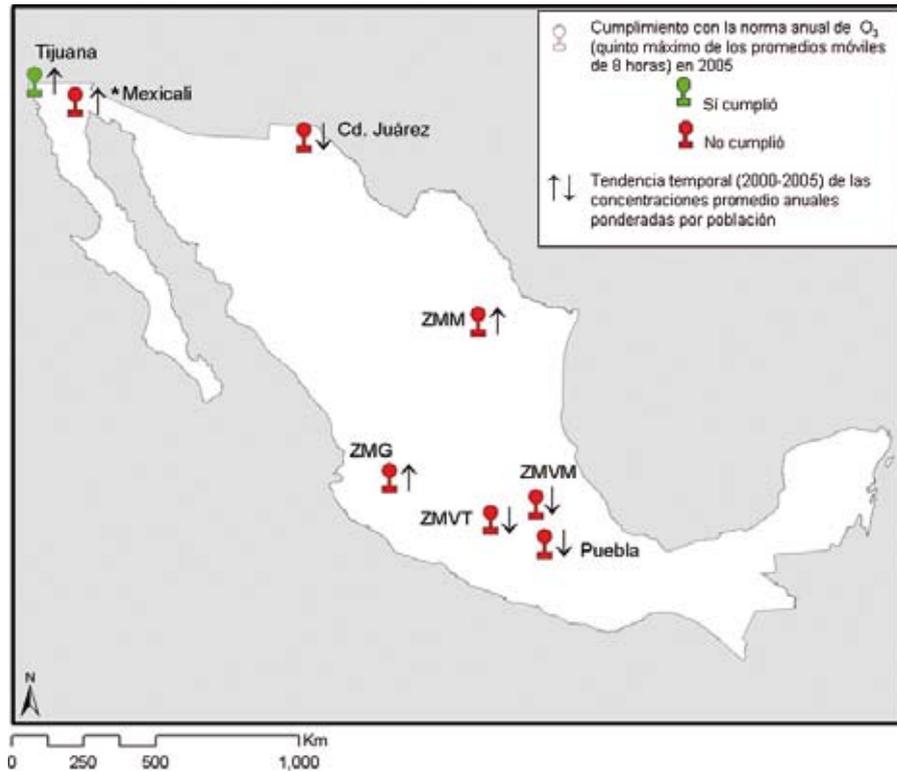
5.5 Conclusiones sobre el O₃

Finalmente, en la figura 5.14 se exhibe el cumplimiento con la norma anual en 2005, y la tendencia temporal (2000-2005) de la concentración promedio anual pon-

derada por población. Como se observa en el mapa, todas las ciudades, menos Tijuana, incumplieron con la norma anual de O₃ en 2005 y, además, la mitad de ellas (ZMG, ZMM, Mexicali y Tijuana) muestran una tendencia creciente en sus concentraciones promedio.

La clasificación de las ciudades en términos de su grado de contaminación por O₃ durante el año 2005 se estableció utilizando el número de días por arriba del

FIGURA 5.14 CUMPLIMIENTO CON LA NORMA ANUAL (2005) Y TENDENCIAS ANUALES DEL O₃ (2000-2005) EN OCHO CIUDADES MEXICANAS



*En Mexicali la información corresponde, para el cumplimiento de la norma, a 2004, y para la tendencia temporal, al periodo 2000-2004
Fuente: elaboración propia de los autores.

valor de la norma horaria, el máximo horario anual, el quinto máximo anual de los promedios móviles de 8 horas, y la concentración promedio anual ponderada por población. Así, se estima que la ciudad más contaminada por O₃ es la ZMVM (cuadro 5.3), y que le siguen la ZMG, la ZMM y la ZMVT. En contraposición, las ciudades menos contaminadas por O₃ son Ciudad Juárez, Mexicali, Puebla y Tijuana.

La ZMVM presentó en tres de los cuatro indicadores utilizados para el cálculo del indicador compuesto los valores más elevados, siendo el número de días por arriba de la norma horaria el más crítico en relación con las demás ciudades. Para la ciudad que ocupa el segundo lugar, la ZMG, el único indicador en el que presentó más problemas que la ZMVM es el máximo

CUADRO 5.3 CLASIFICACIÓN DE LAS CIUDADES SEGÚN SU GRADO DE CONTAMINACIÓN POR O₃

Ciudad	Clasificación
ZMVM	1°
ZMG	2°
ZMM	3°
ZMVT	4°
Ciudad Juárez	5°
Mexicali	6°
Puebla	7°
Tijuana	8°

horario. Tijuana, la ciudad menos contaminada por O₃, no ha rebasado los límites establecidos en las normas de calidad del aire en los últimos ocho años.

6 MONÓXIDO DE CARBONO

El monóxido de carbono (CO) es un gas incoloro e inodoro que en concentraciones elevadas puede ser letal. Se forma en la naturaleza mediante la oxidación del metano (CH₄), gas común producido por la descomposición de la materia orgánica. La fuente antropogénica del CO es la quema incompleta de combustibles (gasolina, gas, carbón, madera y combustóleo). En este sentido, para tener menos emisiones de CO es necesario tener procesos de combustión más completos, lo que requiere de una cantidad adecuada de oxígeno; cuando éste es insuficiente, se forma el CO. Los vehículos son la principal fuente de CO en áreas urbanas, por lo que en la actualidad los automóviles nuevos cuentan con un convertidor catalítico que permite reducir las emisiones de CO a la atmósfera, así como de otros gases contaminantes (USEPA, 1993).

El CO tiene una acción tóxica en el ser humano por su afinidad con la hemoglobina, a la que se enlaza

disminuyendo el transporte del oxígeno en el cuerpo. Entre los efectos en la salud que se asocian con la exposición al CO se encuentran una menor coordinación motora, agravamiento de enfermedades cardiovasculares, fatiga, dolores de cabeza, confusión, náuseas y mareos. En casos extremos, con exposiciones muy elevadas que superan por mucho los niveles que se presentan en la atmósfera de zonas urbanas, puede causar la muerte (NSC, 2005).

A continuación se muestran las tendencias espaciales y temporales del CO en ocho ciudades mexicanas para el periodo 1997-2005.

6.1 Comportamiento del CO en el tiempo

La concentración de CO en la atmósfera de las zonas urbanas presenta variaciones horarias y mensuales que se relacionan en gran medida con los patrones de tránsito vehicular; así, en la mañana y por la tarde se presentan niveles altos coincidiendo con los horarios

de mayor tráfico (particularmente en días hábiles). Las figuras 6.1 y 6.2 muestran el comportamiento horario del CO en las ciudades agrupadas en la región centro (ZMVM, ZMG, ZMVT y Puebla) y la región norte (ZMM, Ciudad Juárez, Mexicali y Tijuana). En ambos grupos se observa un comportamiento bimo-

dal asociado con el patrón del tránsito vehicular. En la región centro los valores más altos se presentan por la mañana entre las 6:00 y las 11:00 horas, y por la tarde-noche entre las 18:00 y las 23:00 horas.

Para la región norte, los valores más altos también ocurren por la mañana, aunque con un pico de menor

FIGURA 6.1 COMPORTAMIENTO HORARIO DEL CO EN LA REGIÓN CENTRO (1997-2005)

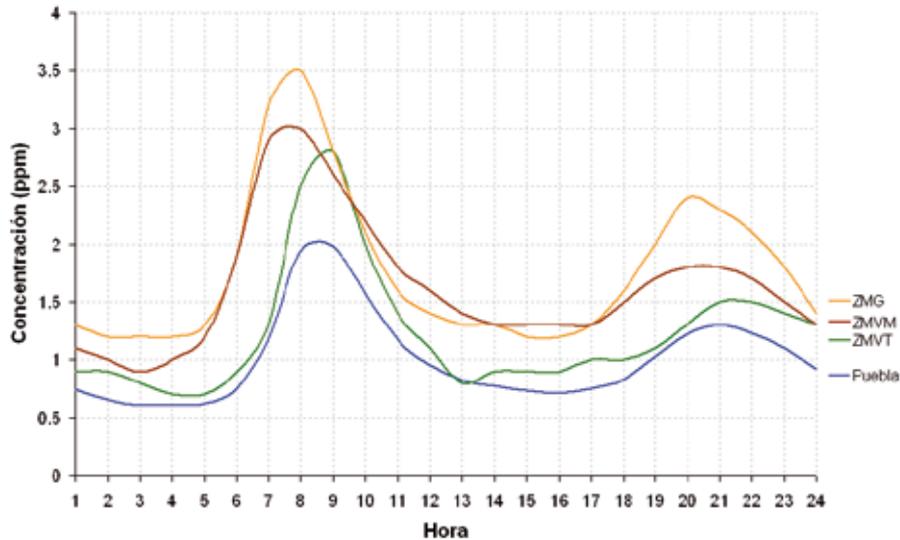


FIGURA 6.2 COMPORTAMIENTO HORARIO DEL CO EN LA REGIÓN NORTE (1997-2005)

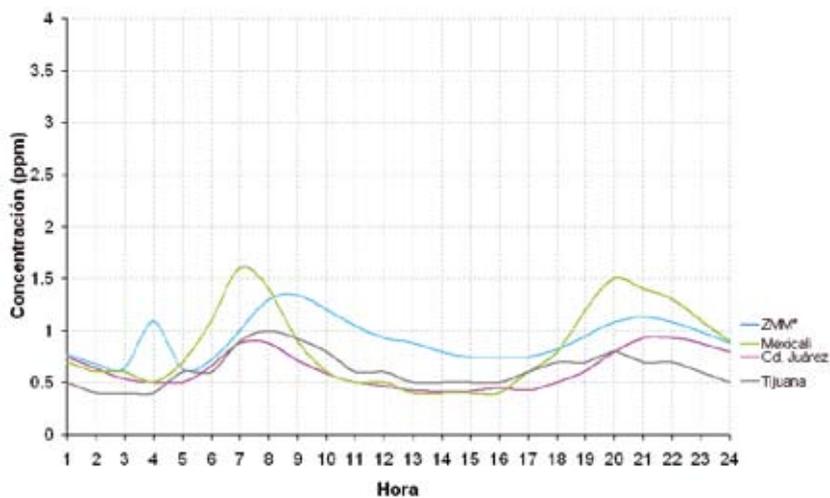


FIGURA 6.3 COMPORTAMIENTO MENSUAL DEL CO EN LA REGIÓN CENTRO DEL PAÍS (1997-2005)

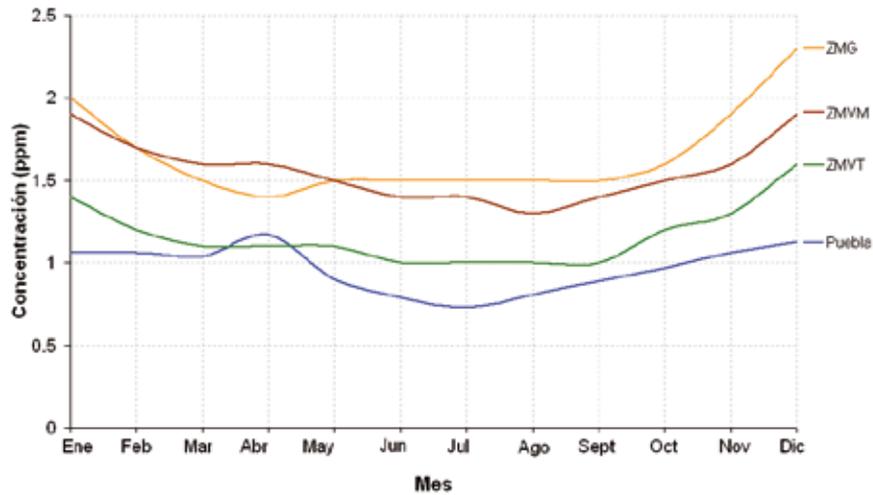
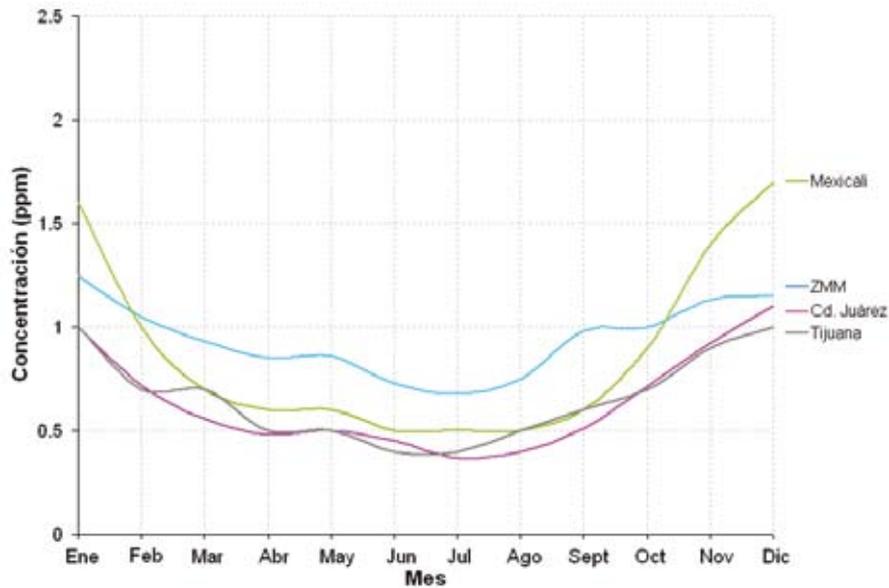


FIGURA 6.4 COMPORTAMIENTO MENSUAL DEL CO EN LA REGIÓN NORTE DEL PAÍS (1997-2005)



duración entre las 6:00 y las 9:00 horas, y por la tarde-noche el pico es menos acentuado pero igualmente prolongado, extendiéndose de las 17:00 a las 22:00 horas. Mexicali presenta un patrón similar al resto de las ciudades, pero desfasado, empezando más temprano el pico de la mañana.

El comportamiento del CO en la atmósfera también presenta variaciones estacionales que dependen de las condiciones meteorológicas y de la actividad vehicular. En las figuras 6.3 y 6.4 se muestra el comportamiento del CO durante el año en las ocho ciudades mexicanas. En ambas regiones del país las concen-

traciones más elevadas se registran en los meses más fríos (noviembre, diciembre y enero), lo que podría relacionarse con inversiones térmicas, o con el uso de calefacción durante estos meses.

Por otra parte, en las figuras se observan concentraciones más bajas entre mayo y septiembre, lo que se pudiera asociar parcialmente con la temporada de vacaciones escolares de verano, y con temperaturas más elevadas, lo que lleva a una mayor mezcla vertical de contaminantes.

6.2 Distribución espacial del CO

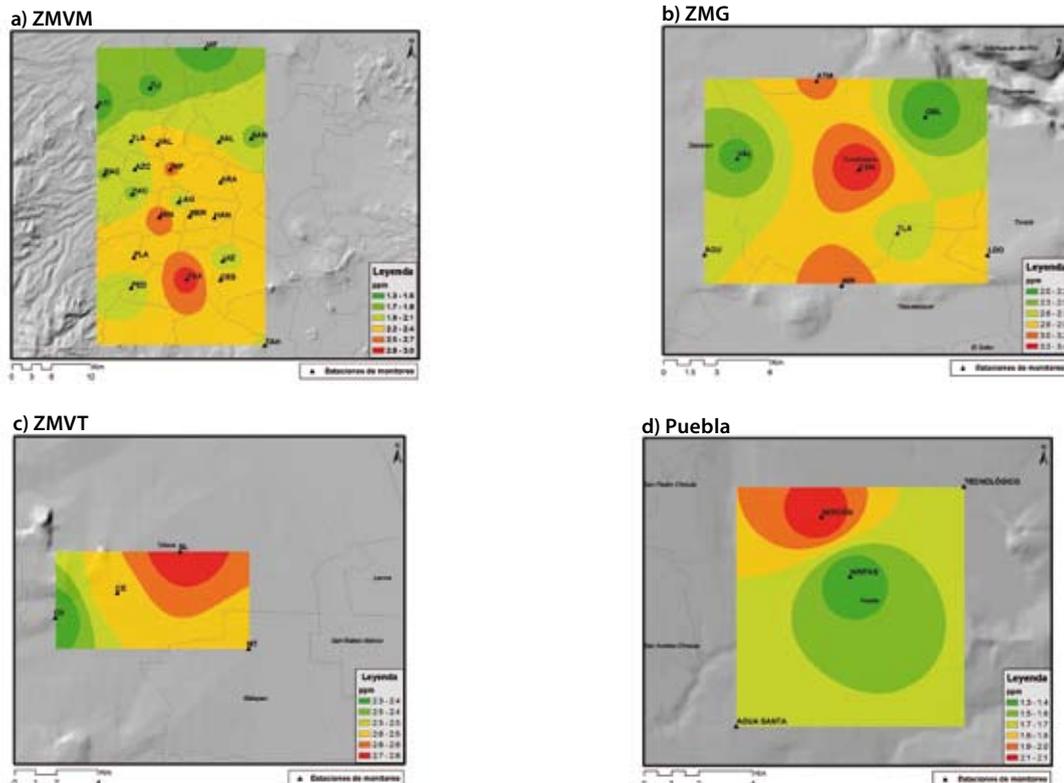
Con la finalidad de presentar la distribución espacial del CO en las ciudades, se muestran mapas de contorno con los promedios anuales de CO para el año 2005, calculados a partir de los datos horarios de los promedios móviles de 8 horas.

En la ZMVM (figura 6.5a) las concentraciones más elevadas de CO se presentan en la parte sur de la ciudad, alrededor de la estación Taxqueña, siguiendo en magnitud las concentraciones alrededor del Metro Insurgentes (centro) y el Instituto Mexicano del Petróleo (noroeste), situación que puede explicarse por su ubicación tan cercana a vialidades con intenso flujo vehicular.

En cuanto a la ZMG (figura 6.5b), los mayores niveles de CO se encuentran alrededor de las estaciones de monitoreo Centro y Miravalle; la primera estación se encuentra ubicada en una zona comercial con elevado tránsito vehicular, y la segunda, en una zona industrial cerca del cruce de dos avenidas.

En la ZMVT (figura 6.5c) las concentraciones más elevadas se generan en los alrededores de la estación San Lorenzo Tepaltitlán, la cual se encuentra ubicada en una zona urbana con tráfico vehicular intenso, es-

FIGURA 6.5 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL CO EN LAS CIUDADES DE LA REGIÓN CENTRO (2005)



pecialmente de carga y transporte público, muy cerca del corredor industrial Toluca-Lerma.

En Puebla (figura 6.5d) los niveles altos de CO se presentan en el norte de la ciudad, alrededor de la estación Serdán, cerca de un área de mucha actividad comercial y vialidades con intenso flujo vehicular.

En la ZMM (figura 6.6a) las concentraciones más altas de CO se registran en las zonas noreste y suroeste; la primera está ubicada a favor del viento de un corredor industrial, y la segunda, a favor del viento de la mayoría de las fuentes industriales de Monterrey, como son San Pedro Garza García y Santa Catarina.

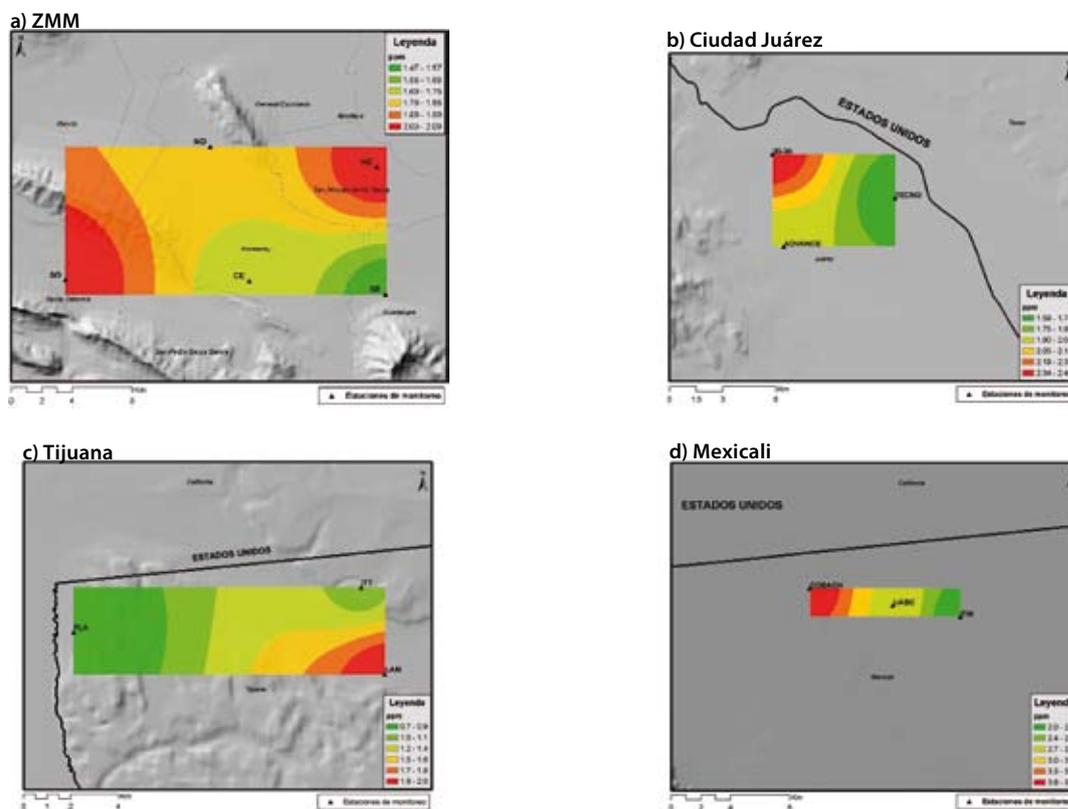
En Ciudad Juárez (figura 6.6b) las concentraciones de CO más elevadas se registraron alrededor de la estación 20-30, disminuyendo gradualmente hacia el sur y el oriente. La estación 20-30 se ubica

cerca de una de las intersecciones viales más transitadas en Ciudad Juárez (Av. Américas y 16 de Septiembre).

En Tijuana (figura 6.6c) los niveles más altos de CO se registran alrededor de la estación de monitoreo La Mesa, que se ubica cerca de calles con tráfico vehicular medianamente intenso durante el día. En contraposición, los niveles más bajos de CO se registran en los alrededores de la estación de monitoreo Playas, localizada a 1 km del mar, lo que favorece la ventilación y la dispersión de los contaminantes.

En Mexicali (figura 6.6d) la estación alrededor de la que se ubican las mayores concentraciones de CO es COBACH, ubicada en una zona de tipo mixto (industrial, habitacional, comercial y de servicios), con alta circulación vehicular y muy cercana a instalaciones industriales (3 km).

FIGURA 6.6 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL CO EN LAS CIUDADES DE LA REGIÓN NORTE (2005)



6.3 Exposición de la población al CO

Con el fin de caracterizar la exposición de la población al CO, se muestran las concentraciones promedio anuales ponderadas por población, estimadas con información sobre la distribución espacial de la contaminación y de la población. Así, del cuadro 6.1 y de la

figura 6.7 se observa que Mexicali presenta, entre 1997 y 2002, los niveles más altos de todas las ciudades. A partir del año 2000, Mexicali presenta una tendencia decreciente; en cambio, en la ZMG se registran los niveles más altos a partir de 2003.

En la figura 6.7 se muestra el indicador de la concentración ponderada por población del año 2005. Las

CUADRO 6.1 PROMEDIO ANUAL DE CONCENTRACIONES¹ (PPM) DE CO PONDERADO POR POBLACIÓN EN OCHO CIUDADES MEXICANAS (1997-2005)

Año	ZMVM	ZMG	ZMVT	Puebla	ZMM	Ciudad Juárez	Tijuana	Mexicali
1997	3.49	3.69	2.52	SM	1.57	2.83	1.61	4.60
1998	3.55	3.48	2.56	SM	1.60	2.66	1.66	4.56
1999	3.15	3.62	2.49	SM	1.45	2.83	1.70	4.95
2000	3.32	3.19	2.27	DI	1.53	2.02	1.57	4.72
2001	2.98	3.04	2.15	2.29	1.37	1.61	1.43	DI
2002	2.67	3.21	1.85	2.02	1.37	DI	1.39	4.42
2003	2.46	3.41	1.91	1.87	2.11	2.10	1.45	3.26
2004	2.22	3.19	1.74	1.68	2.74	1.76	1.28	2.93
2005	2.14	2.68	2.50	1.63	1.86	1.99	1.16	SI

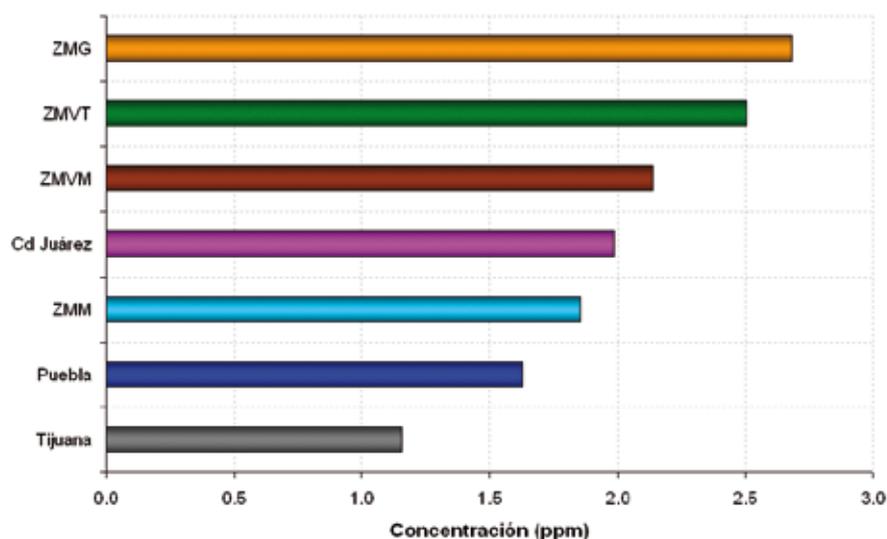
¹ Promedio anual calculado a partir de las concentraciones de promedios móviles de 8 horas

SM = sin medición

DI = datos insuficientes

SI = sin información.

FIGURA 6.7 PROMEDIO ANUAL DE CONCENTRACIONES DE CO PONDERADO POR POBLACIÓN EN SIETE CIUDADES MEXICANAS (2005)



tres grandes zonas metropolitanas del país presentan las mayores concentraciones ponderadas (ZMG, ZMVT y ZMVM); en cambio, la ciudad ubicada en la costa del Pacífico, Tijuana, es la que presenta las menores concentraciones ponderadas por población.

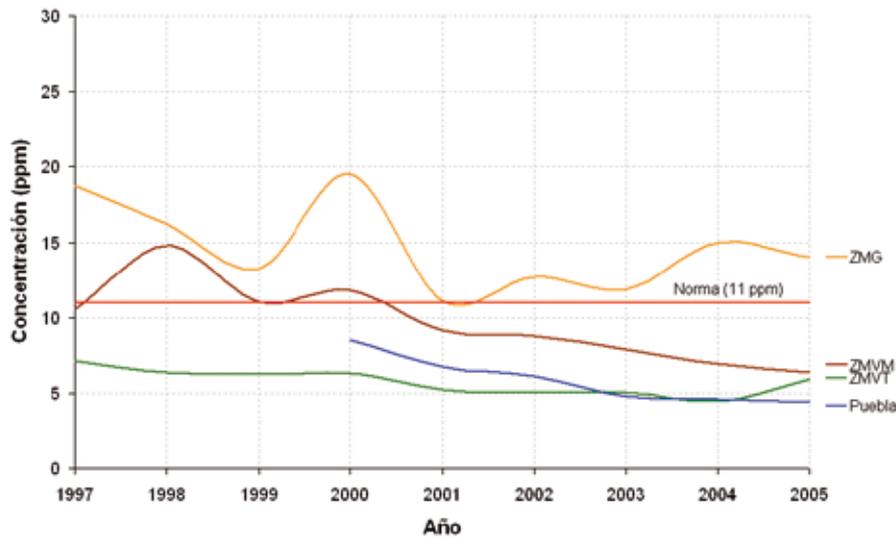
6.4 Evaluación del cumplimiento de la NOM de CO

En esta sección se muestran las tendencias de las concentraciones ambientales de CO en comparación con los límites establecidos en la norma de calidad del aire, y el número de días con concentraciones que rebasan el nivel máximo permisible.

En la región norte se observa que Mexicali no cumple con la norma durante todo el periodo de análisis, aunque se aprecia una tendencia a la baja. En Ciudad Juárez se observa una tendencia decreciente en el periodo 1997-2000, llegando incluso a cumplir con la norma en el año 2000 y manteniéndola de esta manera hasta 2004, pero rebasándola en 2005. En la ZMM no se cumple con la norma: en 1999 y 2002 ocurren valores ligeramente por arriba de ésta.

En cuanto al número de días en los que se rebasa el valor de la norma de CO, el cuadro 6.2 muestra que Mexicali es la ciudad con más días por arriba del límite establecido en la norma de calidad del aire, alcanzando en 1999 el valor más alto (78 días), y a partir

FIGURA 6.8 SEGUNDO MÁXIMO DEL PROMEDIO MÓVIL DE 8 HORAS DE CO EN LA REGIÓN CENTRO (1997-2005)



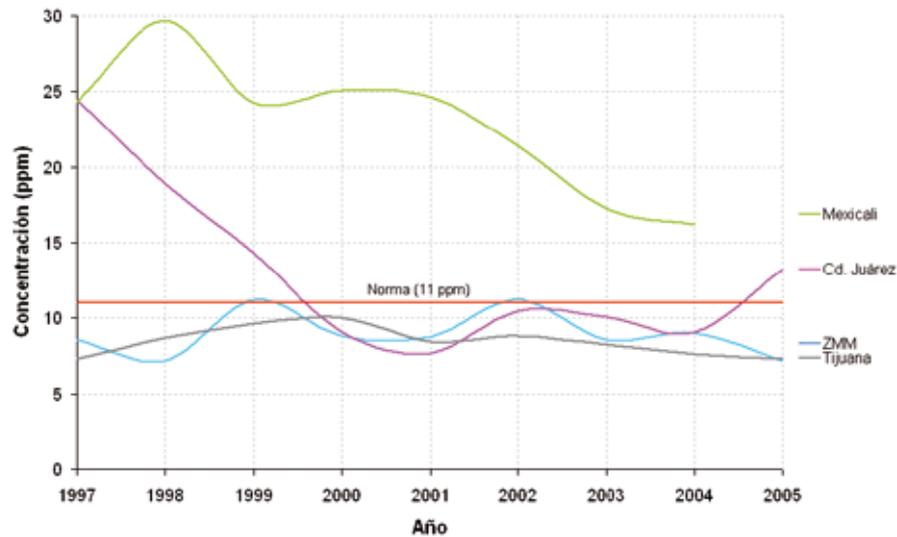
En las figuras 6.8 y 6.9 se muestra el valor del segundo máximo de los promedios móviles de CO para las regiones centro y norte, respectivamente; si el segundo máximo es mayor que 11 ppm, se infiere que no se cumple con la norma. Así, lo que se observa es que en la región centro la ZMG no ha cumplido la norma en ninguno de los años que comprende el periodo de análisis. En la ZMVM no se cumplió en 1998 ni en 2000, presentándose después de este último año una clara tendencia decreciente.

de ese año se observa una tendencia decreciente. Cabe destacar que para el último año del periodo de análisis, la norma sólo se excedió en dos y tres días en la ZMG y Ciudad Juárez, respectivamente.

6.5 Conclusiones sobre el CO

Por último, se presentan en la figura 6.10 la representación gráfica del cumplimiento de la norma de 8 horas para 2005 y la tendencia temporal de la concentración

FIGURA 6.9 SEGUNDO MÁXIMO DEL PROMEDIO MÓVIL DE 8 HORAS DE CO EN LA REGIÓN NORTE (1997-2005)



CUADRO 6.2 NÚMERO DE DÍAS EN LOS QUE SE REBASA EL VALOR DE LA NORMA PARA CO (11 PPM) EN OCHO CIUDADES MEXICANAS (1997-2005)

Año	ZMVM	ZMG	ZMM	ZMVT	Puebla	Ciudad Juárez	Tijuana	Mexicali
1997	1	14	1	0	SM	24	0	43
1998	6	15	0	0	SM	23	0	76
1999	2	8	2	0	SM	10	0	78
2000	2	9	0	0	DI	1	0	53
2001	0	3	0	0	0	0	1	48
2002	1	5	2	0	0	0	1	46
2003	0	4	0	0	0	0	0	33
2004	0	6	0	0	0	0	0	17
2005	0	2	0	0	0	3	0	SI

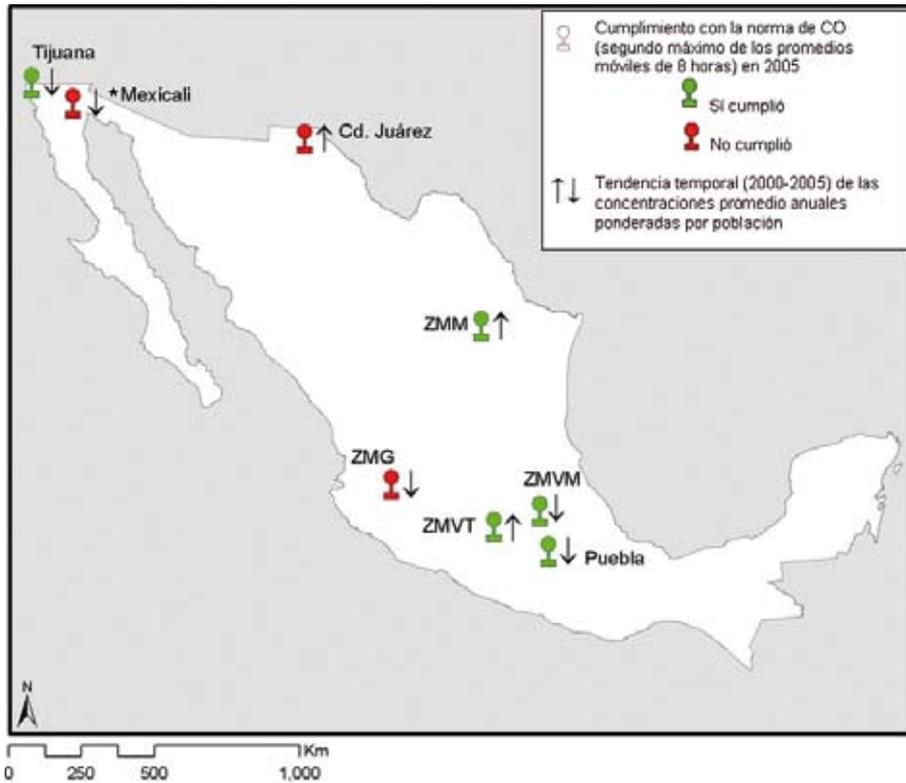
SM = sin medición DI = datos insuficientes SI = sin información.

promedio anual ponderada por población para 2000-2005. Como se observa en el mapa, sólo tres ciudades -Mexicali, Ciudad Juárez y la ZMG- incumplen con la norma, lo que se puede deber a que se cuenta con un parque vehicular en circulación en el que aún hay un número importante de vehículos con tecnologías caducas y sin convertidor catalítico. Asimismo, nuevamente Ciudad Juárez, la ZMVT y la ZMM presentan concentraciones de CO en aumento para el periodo 2000-2005.

La clasificación de las ciudades en términos de su grado de contaminación por CO se estableció utilizando el número de días por arriba del valor de la norma, el segundo máximo anual de los promedios móviles de 8 horas, y la concentración promedio anual ponderada por población, todos para 2005.

De acuerdo con los resultados (cuadro 6.3), la ciudad más contaminada por CO es Mexicali; le siguen la ZMG y Ciudad Juárez. Estas tres ciudades son las que no cumplen con la norma de 8 horas; Mexicali presen-

FIGURA 6.10 CUMPLIMIENTO CON LA NORMA DE 8 HORAS PARA CO (2005) Y TENDENCIAS EN OCHO CIUDADES MEXICANAS (2000-2005)



*En Mexicali la información corresponde, para el cumplimiento de la norma, a 2004, y para la tendencia temporal, al periodo 2000-2004
 Fuente: elaboración propia de los autores.

tó, en los tres indicadores con los que se generó el índice compuesto, los valores más altos. Por otra parte, las ciudades menos contaminadas por CO son Tijuana y Puebla, que cumplen con la norma de calidad del aire y presentan tendencias decrecientes de los promedios anuales ponderados por población.

CUADRO 6.3 CLASIFICACIÓN DE LAS CIUDADES SEGÚN SU GRADO DE CONTAMINACIÓN POR CO

Ciudad	Clasificación
Mexicali	1°
ZMG	2°
Ciudad Juárez	3°
ZMVT	4°
ZMVM	5°
ZMM	6°
Tijuana	7°
Puebla	8°

7 BIÓXIDO DE AZUFRE

Los gases de la familia de los óxidos de azufre (SO_x), entre los que se encuentra el bióxido de azufre (SO_2), son incoloros y de olor irritante; se forman al quemar combustibles con azufre, y tienden a disolverse fácilmente en agua. La fuente primaria de emisiones de SO_2 es la quema de combustibles fósiles que contienen azufre, tales como combustóleo, diesel y carbón.

Las fuentes naturales de SO_2 incluyen erupciones volcánicas, decaimiento biológico e incendios forestales. El SO_2 es, además, precursor de otros contaminantes, como el trióxido de azufre (SO_3), el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y los sulfatos, que contribuyen a la formación de partículas finas en la atmósfera y de la lluvia ácida.

La exposición al SO_2 se ha asociado con daños respiratorios temporales en niños y adultos asmáticos que realizan actividades al aire libre. Se ha observado que la exposición aguda de los individuos asmáticos a magnitudes elevadas de SO_2 al realizar ejercicio moderado,

puede causar reducción de la función pulmonar, estado que se puede acompañar de síntomas como estornudos, opresión en el pecho y falta de aire (Evans *et al.*, 2000). Por otra parte, los efectos que se han asociado con exposiciones crónicas aunadas a concentraciones elevadas de partículas en el ambiente, incluyen enfermedades respiratorias, alteraciones en las defensas pulmonares y agravación de enfermedades cardiovasculares preexistentes. En la Ciudad de México se encontró que en niños menores de 16 años una exposición a 50 ppb de SO_2 está asociada con un incremento del 5% en el número de visitas a salas de emergencias por sintomatología de asma (Romieu *et al.*, 1995).

A continuación se muestran las tendencias espaciales y temporales del SO_2 en las ocho ciudades que se han incluido en este almanaque para el periodo 1997-2005. Como un caso especial se incluye también Salamanca, dado el problema de contaminación por SO_2 en esta localidad.

7.1 Comportamiento del SO₂ en el tiempo

En las figuras 7.1 y 7.2 se muestra el comportamiento del SO₂ durante el día. La primera muestra las ciudades agrupadas de la región centro, que ahora incluye Salamanca, y la segunda, las de la región norte.

En todas las ciudades de la región centro se observa, como patrón predominante, una distribución unimodal con los niveles más elevados de SO₂ por la mañana, entre las 8:00 y las 11:00 horas. En Salamanca se observa que los niveles más altos superan por mucho las concentraciones de las otras ciudades.

FIGURA 7.1 COMPORTAMIENTO HORARIO DEL SO₂ EN LA REGIÓN CENTRO DEL PAÍS (1997-2005)

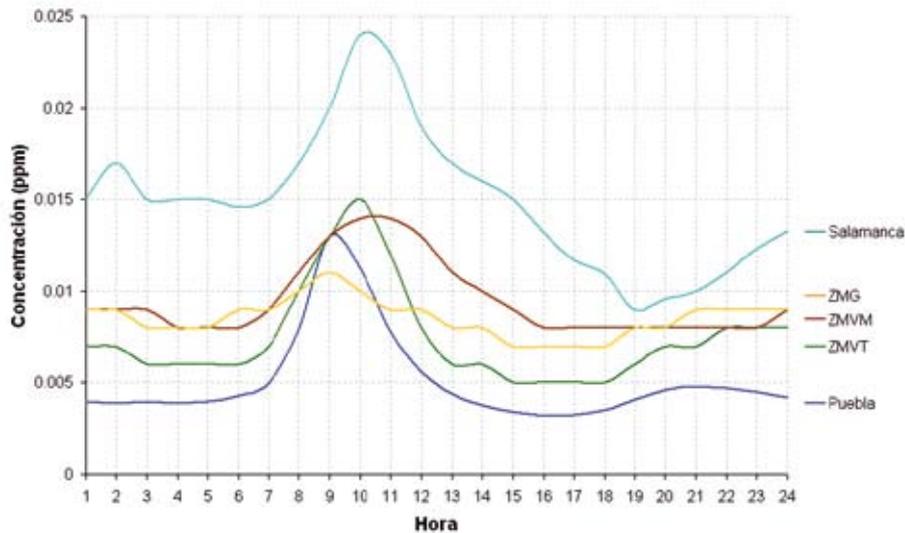
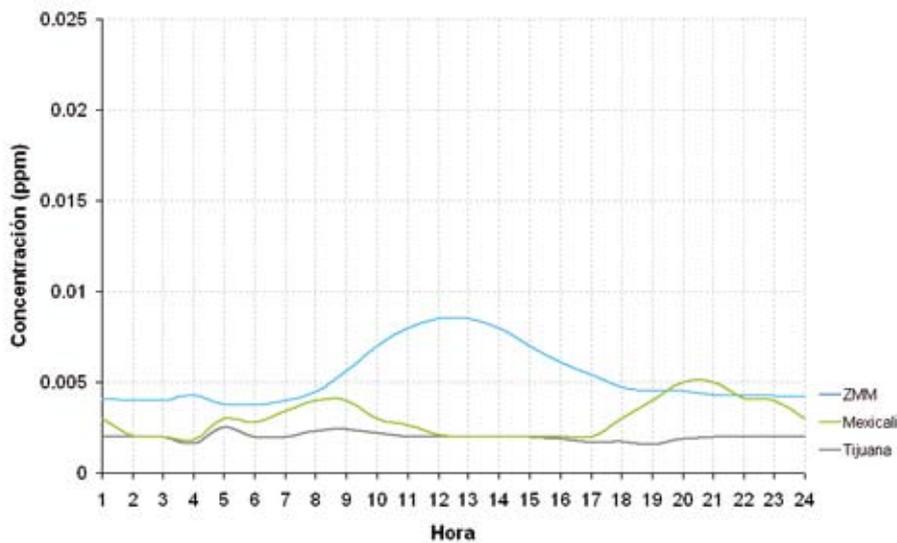


FIGURA 7.2 COMPORTAMIENTO HORARIO DEL SO₂ EN LA REGIÓN NORTE DEL PAÍS (1997-2005)



En la región norte las tres ciudades presentan un comportamiento diferente entre sí. En la ZMM se observa un comportamiento unimodal, similar a las concentraciones de la región centro, con niveles más elevados alrededor del medio día, y que podría asociarse con la actividad industrial debido a que ésta es la principal emisora de SO_x . En cambio, en Mexicali se presenta una distribución bimodal con un pico por la mañana y otro por la tarde; y por último, en Tijuana, las concentraciones son más o menos constantes durante todo el día.

En relación con el comportamiento del SO_2 durante el año, se aprecian en la ZMVM, la ZMG, la ZMVT y Puebla (figura 7.3) concentraciones más elevadas de noviembre a enero, y más bajas durante los meses de

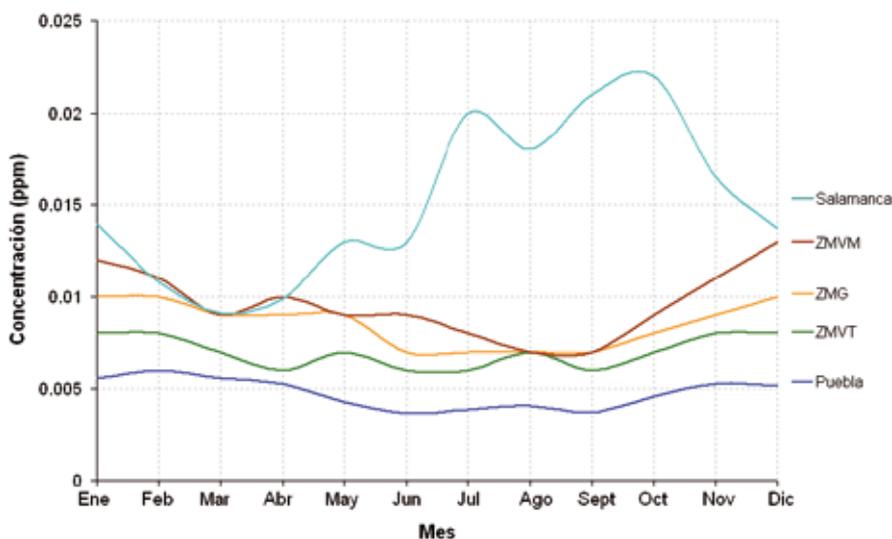
en este semestre, en comparación con el primero, un aumento del consumo de combustóleo de un 28 y un 21%, respectivamente (SENER, 2006).

De las ciudades que comprenden la región norte, sólo Mexicali muestra un comportamiento parecido al descrito para las ciudades de la región centro, mientras que en la ZMM y Tijuana se observa únicamente que los niveles de SO_2 se incrementaron a partir de octubre hasta diciembre.

7.2 Distribución espacial del SO_2

La distribución espacial de las concentraciones de SO_2 se presenta con mapas de contorno de los promedios anuales de las concentraciones horarias en 2005.

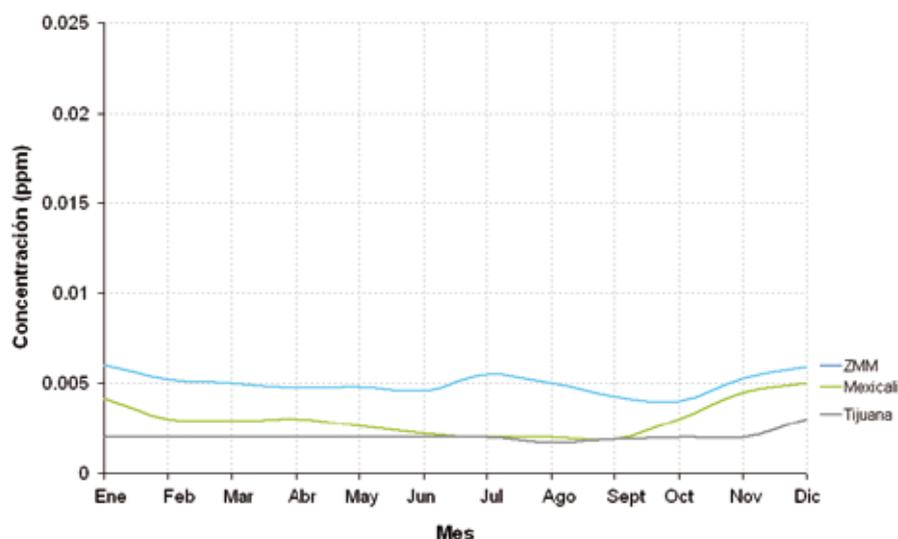
FIGURA 7.3 COMPORTAMIENTO MENSUAL DEL SO_2 EN LA REGIÓN CENTRO DEL PAÍS (1997-2005)



verano. Esto puede deberse a que durante los meses de mayo a agosto se presentan condiciones meteorológicas que promueven la depositación húmeda de este y otros contaminantes. En cambio, en Salamanca las concentraciones más altas se registran en el segundo semestre del año, que corresponde al consumo más alto de combustóleo. De acuerdo con datos de la Secretaría de Energía, durante 2004 y 2005 se registró

En la ZMVM (figura 7.5a) los niveles más altos se ubican en los alrededores de la estación Merced, en el centro del Distrito Federal, y en las estaciones Xalostoc, Tlalnepantla, Tultitlán y Villa de las Flores, en el Estado de México. Las altas concentraciones de SO_2 registradas en las estaciones del norte de la ZMVM pueden estar asociadas con procesos industriales en los que se utilizan combustibles con un elevado con-

FIGURA 7.4 COMPORTAMIENTO MENSUAL DEL SO₂ EN LA REGIÓN NORTE DEL PAÍS (1997-2005)



tenido de azufre; también existe la posibilidad de que estén asociados con emisiones de industrias, termoeléctricas y refinerías fuera del límite de la ZMVM, que bajo ciertas condiciones meteorológicas podrían transportarse a la ZMVM.

En la ZMG (figura 7.5b) las concentraciones más elevadas se encuentran en los alrededores de la estación de monitoreo Loma Dorada, en el sureste de la zona metropolitana.

En la ZMVT (figura 7.5c) los niveles más elevados se presentan en las inmediaciones de la estación de monitoreo Aeropuerto, disminuyendo gradualmente hacia el suroeste. La estación Aeropuerto se localiza dentro de una zona industrial y colinda con varias instalaciones industriales, además de que hay un intenso flujo vehicular.

Para Puebla (figura 7.5d), las concentraciones más altas se registran cerca de la estación Serdán, al norte de la ciudad, y disminuyen gradualmente hacia el sur. La estación Serdán, como ya se había mencionado, se ubica cerca de un área de mucha actividad comercial y vialidades con intenso flujo vehicular.

En Salamanca (figura 7.5e) los niveles más elevados se generan alrededor de la estación de monitoreo Cruz Roja, que se localiza en un área predominantemente habitacional; sin embargo, hacia el este y a una

distancia aproximada de 1500 metros se ubica la zona industrial donde se encuentran la Refinería Ing. Antonio M. Amor y la Central Termoeléctrica Salamanca.

En la región norte, la ZMM (figura 7.6a) presenta las mayores concentraciones de SO₂ en la estación ubicada en el noroeste (San Bernabé), y disminuyen hacia el noreste. La estación San Bernabé está ubicada a favor del viento de salida de la mayoría de las fuentes industriales y del tráfico de la zona metropolitana.

Con respecto a Tijuana (figura 7.6b), los niveles más altos se localizan en los alrededores de la estación de monitoreo Instituto Tecnológico.

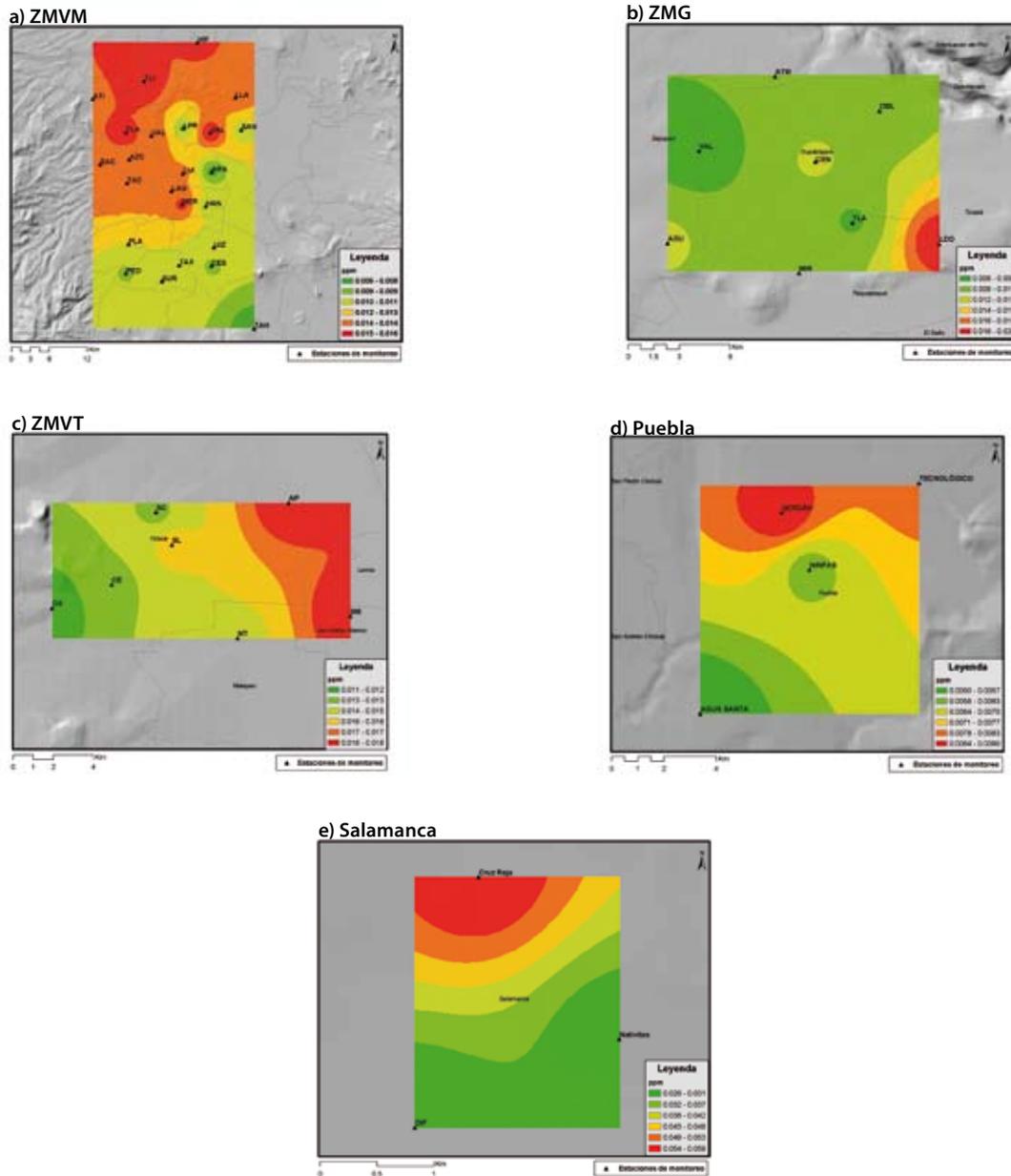
En Mexicali (figura 7.6c) las concentraciones más elevadas se registran cerca de la estación de monitoreo UABC, disminuyendo gradualmente hacia el este y el oeste.

7.3 Exposición de la población al SO₂

La exposición de la población al SO₂ en las ciudades incluidas en este capítulo se estimó combinando la información de la distribución espacial del SO₂ con la correspondiente a la población.

En el cuadro 7.1 se observa que la ZMVM presenta, después de Salamanca, los niveles más altos; le siguen la ZMG, la ZMM y Puebla (figura 7.7). Para la ZMVT es

FIGURA 7.5 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL SO₂ EN LAS CIUDADES DE LA REGIÓN CENTRO (2005)



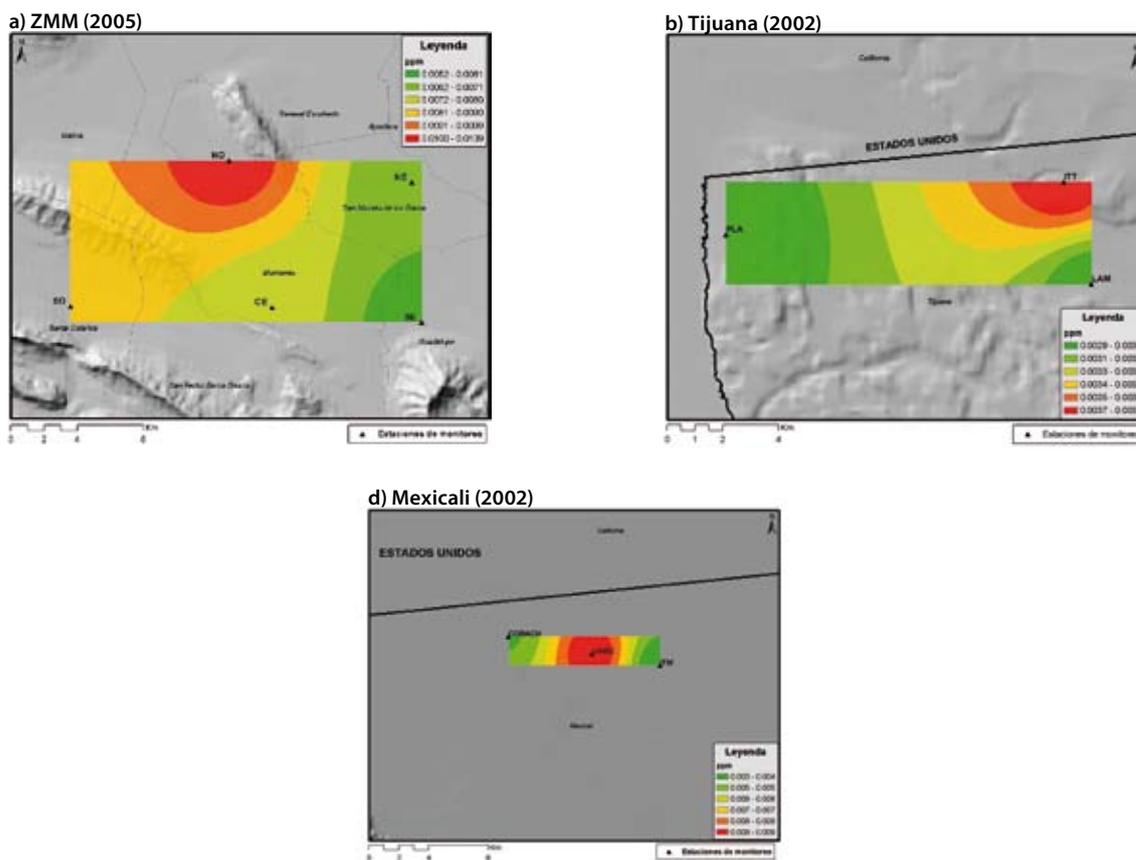
notorio el incremento de cerca del 50% en este indicador de 2004 a 2005. La situación de Salamanca destaca por exhibir las mayores concentraciones anuales ponderadas por población, con valores alrededor de dos veces por arriba del valor más elevado de las otras ciudades.

Cabe mencionar que debido a la insuficiencia de información en Tijuana y Mexicali, no se muestran los datos para los años 2003 a 2005.

7.4 Evaluación del cumplimiento de la NOM de SO₂

En esta sección se evalúa el cumplimiento de las ciudades incluidas en este documento con respecto a los límites establecidos en la NOM correspondiente a SO₂ (cuadro 1.2).

FIGURA 7.6 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL SO₂ EN LAS CIUDADES DE LA REGIÓN NORTE

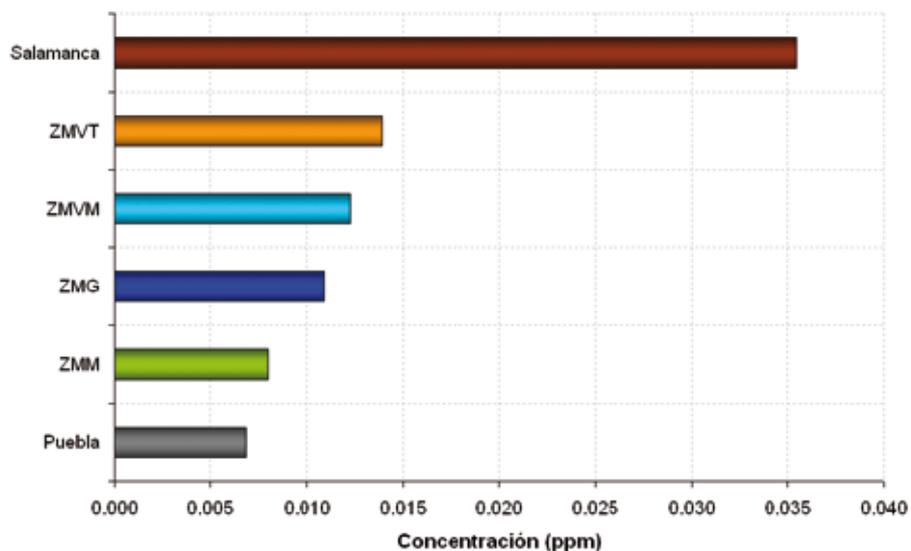


CUADRO 7.1 PROMEDIO ANUAL DE CONCENTRACIONES¹ (PPM) DE SO₂ PONDERADO POR POBLACIÓN EN OCHO CIUDADES MEXICANAS (1997-2005)

Año	ZMVM	ZMG	ZMVT	Puebla	Salamanca	ZMM	Tijuana	Mexicali
1997	0.0123	0.0106	0.0091	SM	SM	0.0104	0.0034	0.0074
1998	0.0140	0.0085	0.0096	SM	SM	0.0103	0.0024	0.0033
1999	0.0140	0.0097	0.0103	SM	DI	0.0107	0.0035	0.0043
2000	0.0177	0.0089	0.0091	DI	0.0524	0.0120	0.0039	0.0044
2001	0.0154	0.0084	0.0093	0.0079	0.0443	0.0116	0.0031	0.0039
2002	0.0123	0.0096	0.0089	0.0071	0.0525	0.0093	0.0031	0.0064
2003	0.0120	0.0103	0.0082	0.0065	0.0400	0.0071	DI	DI
2004	0.0125	0.0109	0.0090	0.0054	0.0410	0.0078	DI	DI
2005	0.0123	0.0109	0.0139	0.0068	0.0355	0.0080	DI	SI

¹ Promedio anual calculado a partir de las concentraciones horarias de SO₂
 SM = sin medición
 DI = datos insuficientes
 SI = sin información.

FIGURA 7.7 PROMEDIO ANUAL DE CONCENTRACIONES DE SO₂ PONDERADO POR POBLACIÓN EN SEIS CIUDADES MEXICANAS (2005)



En las figuras 7.8 y 7.9 se presentan los segundos máximos de los promedios de 24 horas de SO₂ en las regiones centro y norte, respectivamente, de tal forma que aquellos que rebasan una concentración de 0.13 ppm indican el incumplimiento con el valor normativo. Así, de la primera figura destaca que la ZMVM y ZMG sólo incumplieron la norma en el año 2001, y

que Salamanca, en cambio, incumplió durante todos los años con el límite establecido.

En relación con las ciudades de la región norte, las tres cumplen con la norma, a pesar de que en la ZMM la tendencia es creciente en los últimos dos años.

Con respecto al límite anual, todas las ciudades cumplen con él, excepto Salamanca (figura 7.10 y 7.11).

FIGURA 7.8 SEGUNDO MÁXIMO DE LOS PROMEDIOS DE 24 HORAS DE SO₂ EN LA REGIÓN CENTRO (1997-2005)

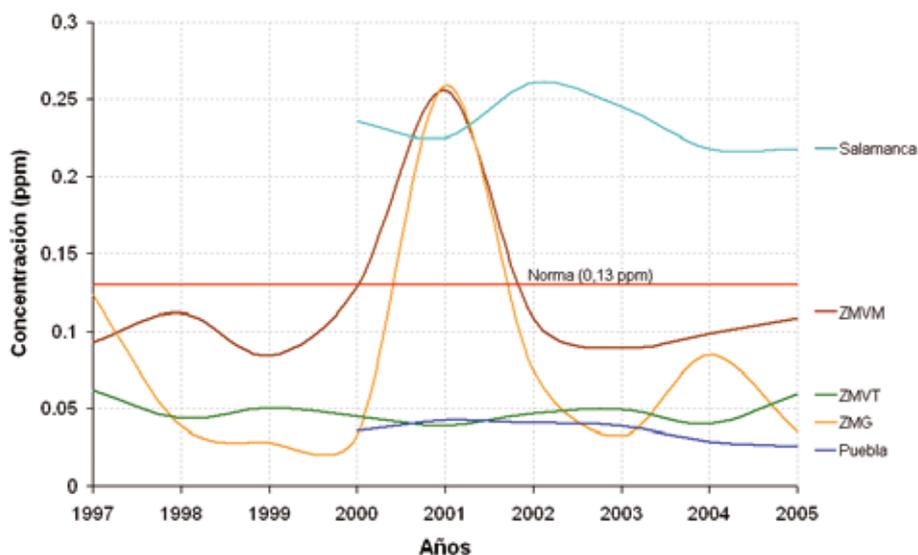


FIGURA 7.9 SEGUNDO MÁXIMO DE LOS PROMEDIOS DE 24 HORAS DE SO₂ EN LA REGIÓN NORTE (1997-2005)

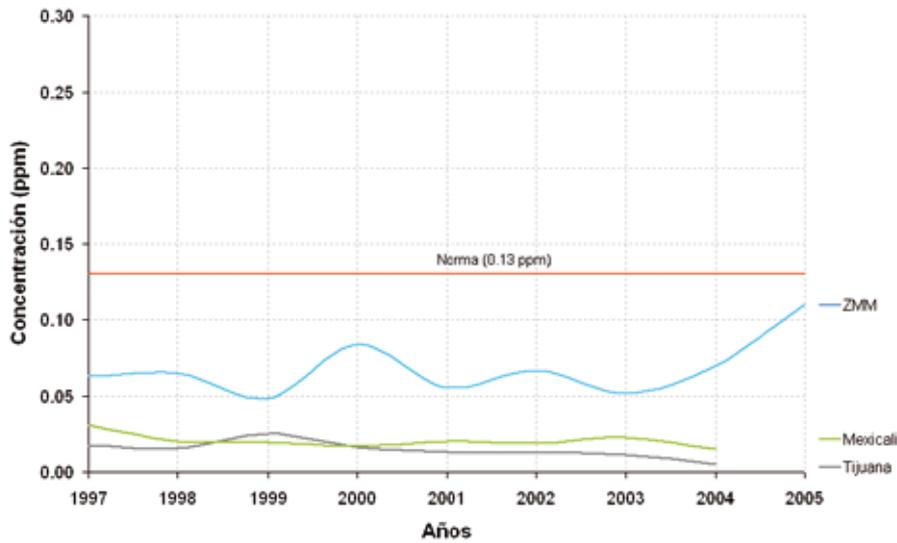
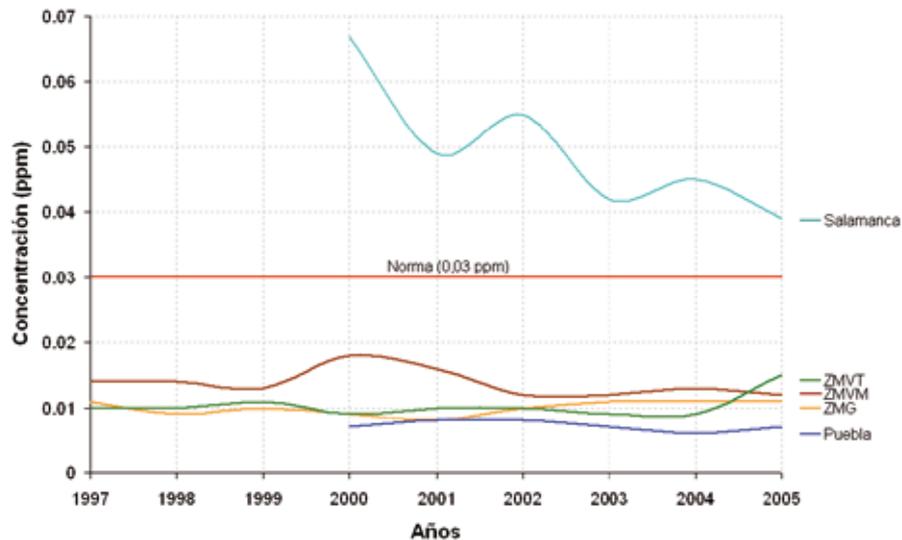


FIGURA 7.10 PROMEDIO ANUAL DE SO₂ EN LA REGIÓN CENTRO (1997-2005)

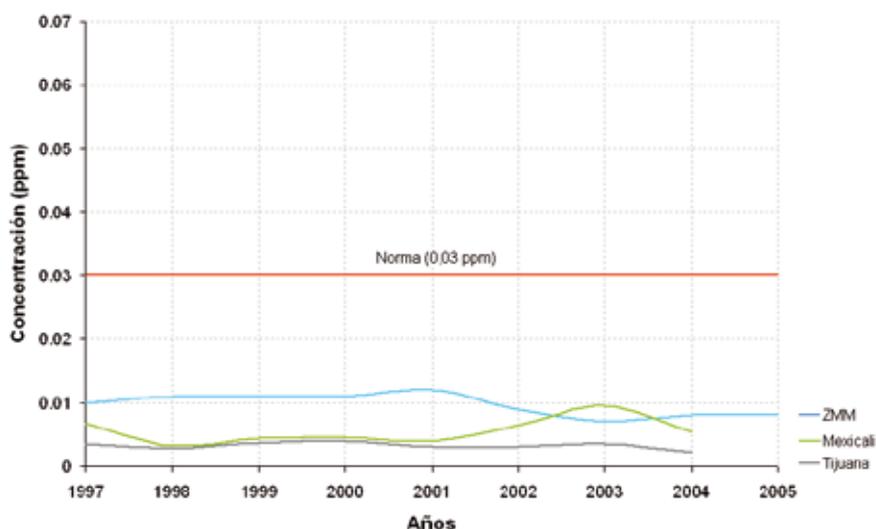


Para Salamanca el promedio anual más alto es poco más de cuatro veces el promedio anual de las demás ciudades.

En el cuadro 7.2 se muestra el número de días en los que se rebasa el valor de la norma de 24 horas para SO₂ en cada una de las ciudades. En la ZMM, aunque

se rebasó el valor de 0.13 ppm en un día en 2005, no hay incumplimiento dado que la NOM establece que dicho valor puede excederse una vez al año. Así, Salamanca es la única ciudad que rebasa consistentemente el límite establecido, con una clara tendencia hacia la baja en los últimos dos años.

FIGURA 7.11 PROMEDIO ANUAL DE SO₂ EN LA REGIÓN NORTE (1997-2005)



CUADRO 7.2 NÚMERO DE DÍAS EN LOS QUE SE REBASA EL VALOR DE LA NORMA (0.13 PPM, 24 HORAS) PARA SO₂ EN OCHO CIUDADES MEXICANAS (1997-2005)

Año	ZMVM	ZMG	ZMVT	Puebla	Salamanca	ZMM	Tijuana	Mexicali
1997	0	1	0	SM	SM	0	0	0
1998	0	0	0	SM	SM	0	0	0
1999	0	0	0	SM	DI	0	0	0
2000	1	0	0	DI	51	0	0	0
2001	8	3	0	0	60	0	0	0
2002	1	1	0	0	75	0	0	0
2003	0	0	0	0	73	0	0	0
2004	0	0	0	0	51	0	0	0
2005	0	0	0	0	29	1	SI	SI

SM = sin medición DI = datos insuficientes SI = sin información.

7.5. Conclusiones sobre el SO₂

Finalmente, en la figura 7.12 se muestra un mapa del país, donde se representa el cumplimiento de la norma anual de SO₂ para el año 2005, así como las tendencias temporales de acuerdo con el promedio anual ponderado por población para el periodo 2000-2005.

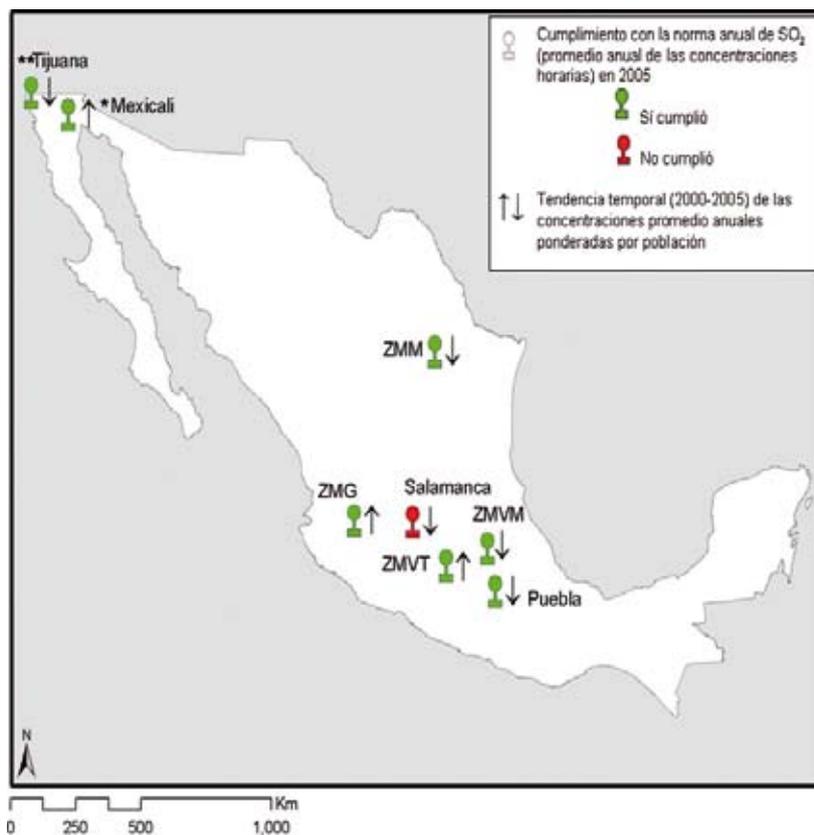
Como se observa en el mapa, sólo Salamanca incumplió con la norma en 2005; sin embargo, cabe hacer notar que la ZMVT, la ZMG y Mexicali muestran

tendencias crecientes en las concentraciones anuales ponderadas por población.

La clasificación de las ciudades en términos de su grado de contaminación por SO₂ se estableció utilizando el número de días por arriba del valor de la norma, el segundo máximo anual de los promedios de 24 horas, y la concentración promedio anual ponderada por población, todos para 2005.

De acuerdo con los resultados (cuadro 7.3), la ciudad más contaminada por SO₂ es Salamanca, pues los tres indicadores considerados para generar el indica-

FIGURA 7.12 CUMPLIMIENTO CON LA NORMA ANUAL PARA SO₂ (2005) Y TENDENCIAS EN OCHO CIUDADES MEXICANAS (2000-2005)



*En Mexicali la información corresponde, para el cumplimiento de la norma, a 2004, y para la tendencia temporal, al periodo 2000-2002.

**En Tijuana la información para la tendencia temporal corresponde al periodo 2000-2002.

Fuente: elaboración propia de los autores.

dor compuesto fueron los más elevados; le siguen en la clasificación la ZMVM, la ZMVT y la ZMM, aunque estas tres ciudades cumplieron con la norma anual y no mostraron días con valores por arriba del límite de 24 horas. Por otra parte, las ciudades menos contaminadas por SO₂ fueron Mexicali y Tijuana, que han cumplido con las normas de calidad del aire para este contaminante en los años de análisis.

CUADRO 7.3 CLASIFICACIÓN DE LAS CIUDADES SEGÚN SU GRADO DE CONTAMINACIÓN POR SO₂

Ciudad	Clasificación
Salamanca	1°
ZMVM	2°
ZMVT	3°
ZMM	4°
ZMG	5°
Puebla	6°
Mexicali	7°
Tijuana	8°

8 BIÓXIDO DE NITRÓGENO

El bióxido de nitrógeno (NO_2) es un gas que pertenece a los óxidos de nitrógeno (NO_x), término genérico comúnmente empleado para referirse a un grupo de gases sumamente reactivos que contienen diferentes cantidades de oxígeno y nitrógeno, como el óxido nítrico (NO) y el NO_2 . El NO_2 es un gas incoloro, inodoro y muy corrosivo, precursor del ozono troposférico y de partículas suspendidas, tales como nitratos.

El NO_2 se forma cuando se quema combustible a altas temperaturas y dicho combustible contiene compuestos nitrogenados, como la gasolina o el keroseno. Las principales fuentes antropogénicas de NO_2 son los vehículos automotores, plantas de generación de electricidad y otras fuentes industriales, comerciales y residenciales que queman combustibles. El NO_2 puede formarse también de manera natural por la descomposición bacteriana de nitratos (GENL *et al.*, 1997; WDHFS, 2006).

La exposición al NO_2 puede causar irritación pulmonar, problemas de percepción olfativa, molestias respiratorias, dolores agudos en vías respiratorias y edema pulmonar; además, la exposición prolongada a este gas se asocia con daños a la percepción sensorial, agravamiento de los síntomas en asmáticos y de los síntomas relacionados con enfermedades pulmonares crónicas. Los resultados de los estudios llevados a cabo en la ZMVM son congruentes con la literatura internacional, ya que encontraron una asociación entre un incremento del número de visitas a hospitales por síntomas de infecciones respiratorias agudas, y la exposición al NO_2 (Tellez Rojo *et al.*, 1997; Torres-Meza, 2000).

A continuación se exhiben las tendencias espaciales y temporales del NO_2 en siete ciudades mexicanas agrupadas en la región centro (la ZMVM, la ZMG, la ZMVT y Puebla) y la región norte (la ZMM, Tijuana y Mexicali).

8.1 Comportamiento del NO₂ en el tiempo

En general, las concentraciones de los NO_x son atribuibles a la actividad vehicular y, en menor medida, a la industria, por lo que su comportamiento horario refleja ambos patrones de actividad. El NO aparece cuando empieza el tránsito vehicular, y al comenzar la radiación solar se oxida, produciendo NO₂. Las concentraciones de NO₂ aumentan para alcanzar su valor

máximo cuando se establece un equilibrio entre su velocidad de formación y su velocidad de eliminación, con la formación de ácido nítrico, nitratos orgánicos y O₃. Aproximadamente al mismo tiempo que el NO₂ alcanza su concentración máxima, comienza a formarse el O₃; que cuando éste, a su vez, alcanza su concentración máxima, permite la reconstitución del NO₂.

En las figuras 8.1 y 8.2 se muestra el comportamiento típico del NO₂ durante el transcurso del día.

FIGURA 8.1 COMPORTAMIENTO HORARIO DEL NO₂ EN LA REGIÓN CENTRO (1997-2005)

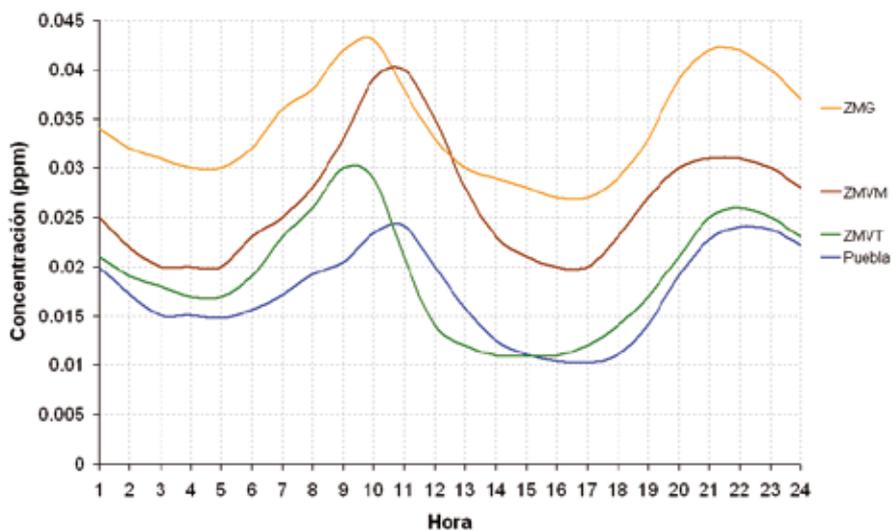
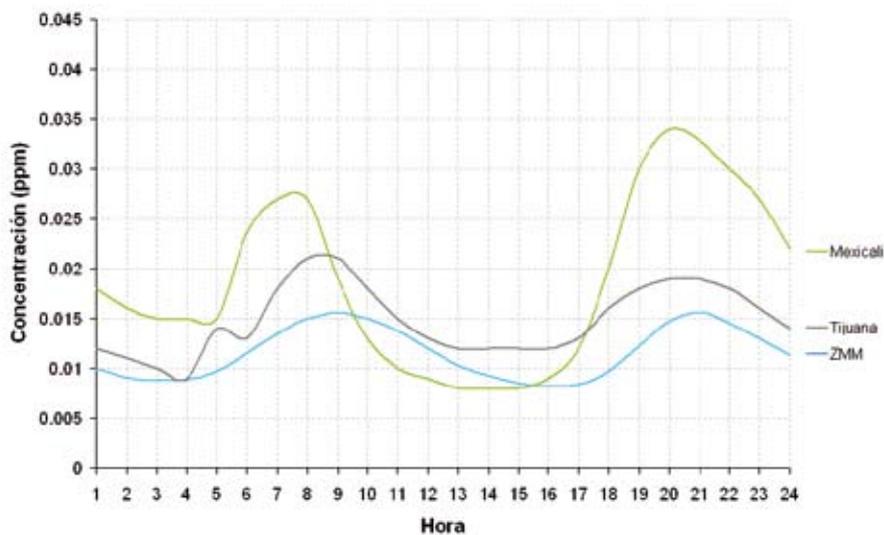


FIGURA 8.2 COMPORTAMIENTO HORARIO DEL NO₂ EN LA REGIÓN NORTE (1997-2005)



El comportamiento del contaminante en ambas zonas del país es bimodal; las concentraciones más altas se aprecian por la mañana y por la noche en las horas de más tráfico vehicular.

Con respecto al comportamiento anual del NO₂, las figuras 8.3 y 8.4 muestran que en ambas regiones las concentraciones más altas ocurren en los meses fríos (noviembre, diciembre y enero). Este patrón pudiera ser resultado de las actividades propias de fin de

año, que se traducen en un uso más intenso de los vehículos en las ciudades de la región centro, al que se suma el uso de la calefacción en la región norte.

8.2 Distribución espacial del NO₂

Las figuras 8.5 y 8.6 representan los mapas de contorno de los promedios anuales de las concentraciones diarias (máximo horario) en el último año de análisis.

FIGURA 8.3 COMPORTAMIENTO MENSUAL DEL NO₂ EN LA REGIÓN CENTRO DEL PAÍS (1997-2005)

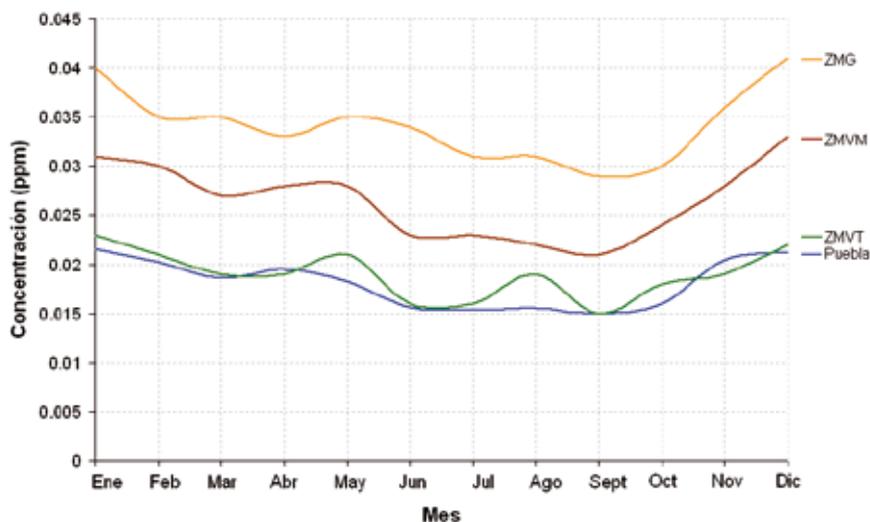
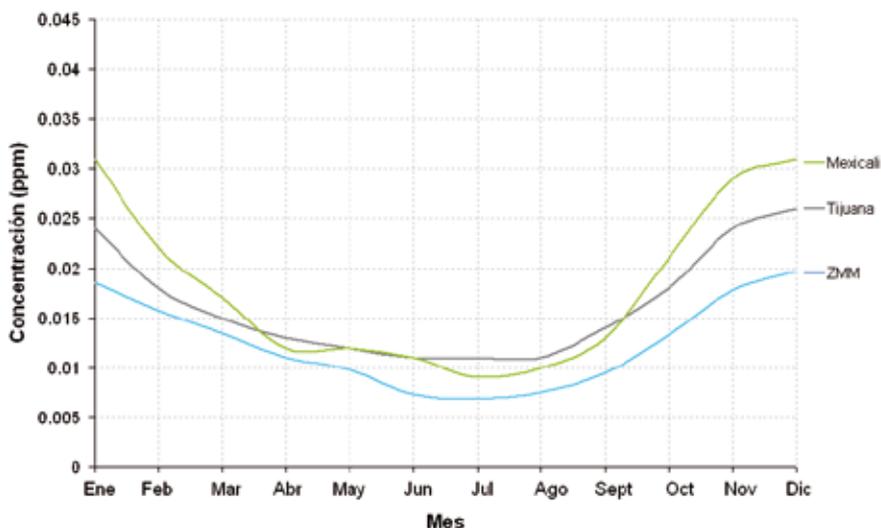


FIGURA 8.4 COMPORTAMIENTO MENSUAL DEL NO₂ EN LA REGIÓN NORTE DEL PAÍS (1997-2005)



Tanto en las ciudades de la región centro como en las de la norte, las mayores concentraciones de NO_2 se presentan en las estaciones de monitoreo que se encuentran ubicadas cerca de vialidades con flujo vehicular que va de moderado a intenso. Las concentraciones más elevadas de NO_2 en la ZMVM (figura 8.5a) se observan en las cercanías de las estaciones Taxqueña y Tláhuac; en la ZMG (figura 8.5b) se observan alrededor de la estación de monitoreo Vallarta, con concentraciones entre un 24 y un 45% más altas que las de otras estaciones de monitoreo. Cabe mencionar, sin embargo, que los niveles registrados en Vallarta podrían asociarse con fuentes cercanas, dado que enfrente se ubican la chimenea de la caldera de un hospital y un tanque de gas LP.

Con respecto a la ZMVT (figura 8.5c), los valores más altos de NO_2 se aprecian en los alrededores de la

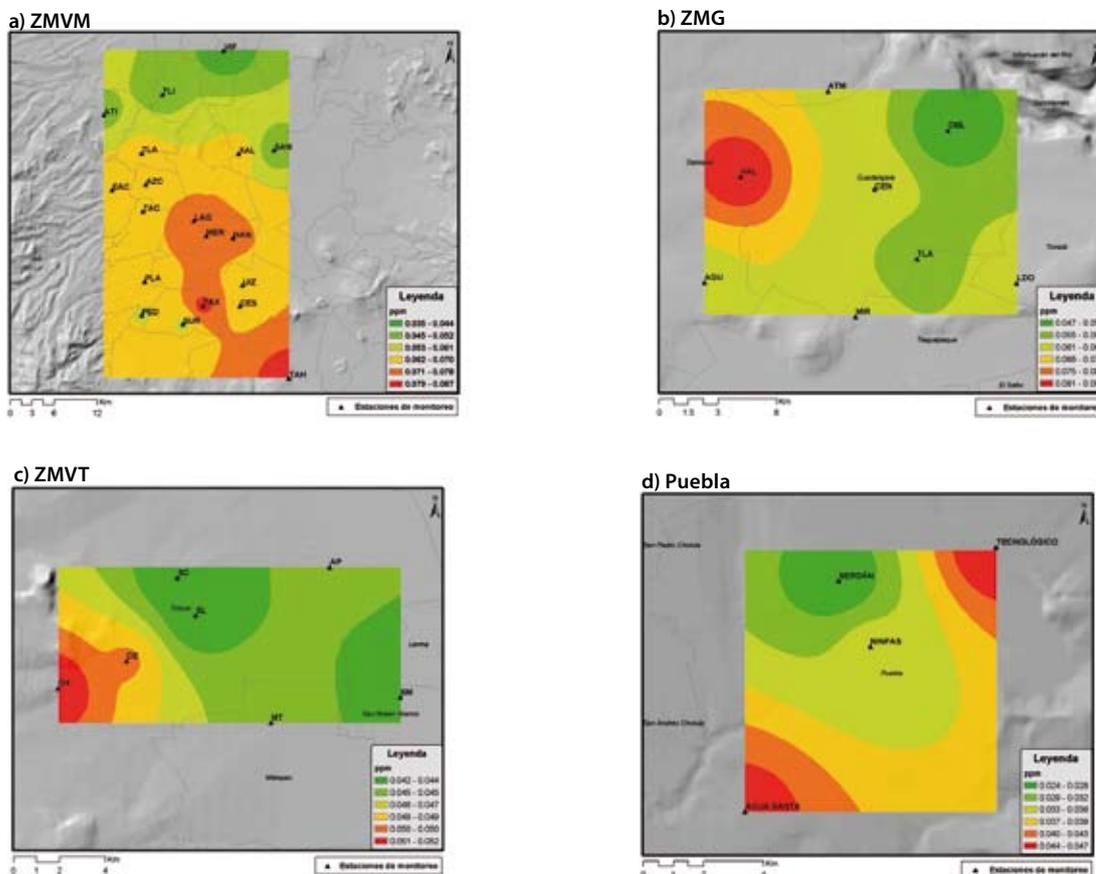
estación Oxtotitlán, mientras que en Puebla (figura 8.5d) las concentraciones más altas de NO_2 se localizan en los alrededores de las estaciones de Agua Santa y Tecnológico.

Con respecto a las ciudades agrupadas en la región norte, los mayores promedios anuales de la ZMM se observan en el centro (Obispedo); en Tijuana la parte más contaminada por NO_2 se ubicó en los alrededores de la estación de monitoreo La Mesa, y por último, en Mexicali los niveles más elevados de NO_2 se presentaron en las inmediaciones de la estación de monitoreo UABC.

8.3 Exposición de la población al NO_2

La exposición promedio de la población, estimada como las concentraciones anuales de NO_2 ponderadas

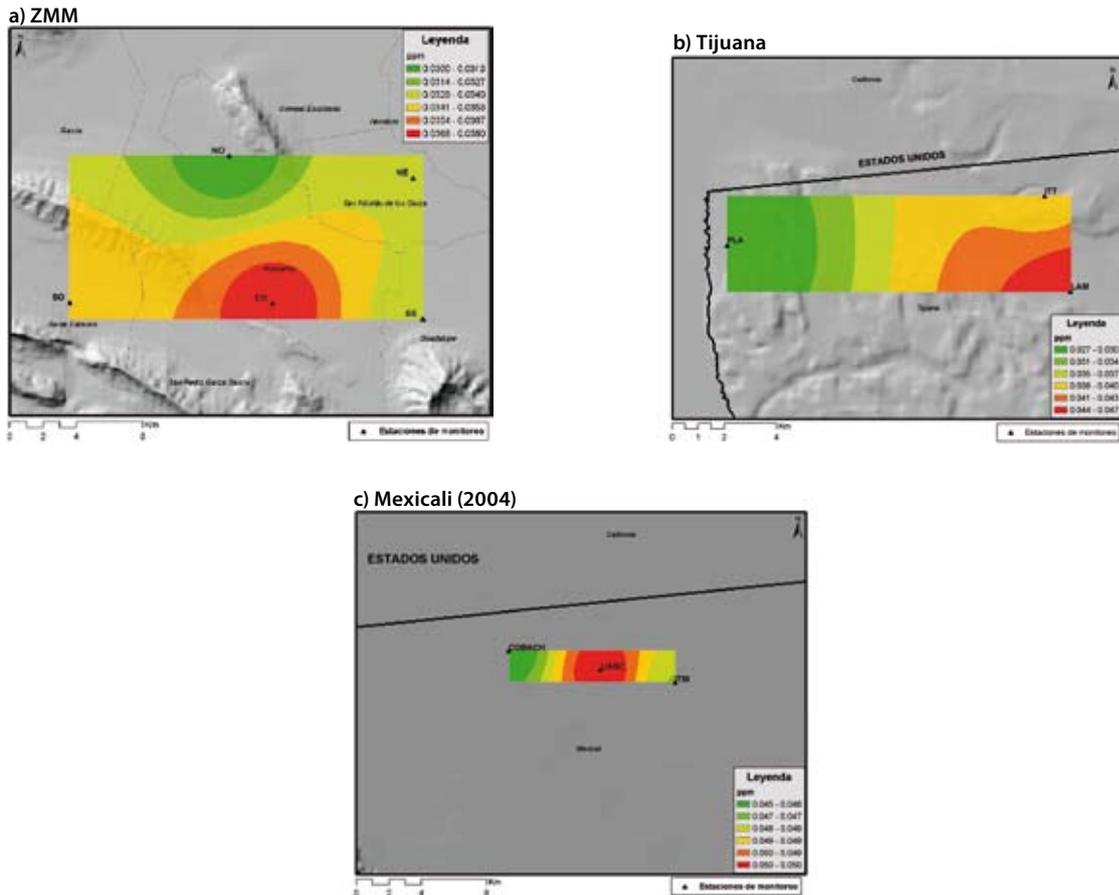
FIGURA 8.5 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL NO_2 EN LAS CIUDADES DE LA REGIÓN CENTRO (2005)



por población, se presenta en el cuadro 8.1, y se complementa con la representación gráfica en la figura 8.7. En ambos se observa que la ZMVM y la ZMG presentan los valores más elevados, seguidas por Mexicali y la ZMVT.

a 2005. En situación más crítica se encuentra la ZMG, ya que no cumplió con el límite establecido durante todo el periodo de análisis, a pesar de una importante reducción de las concentraciones horarias en los últimos dos años. En cambio, la ZMVT y Puebla han

FIGURA 8.6 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL NO₂ EN LAS CIUDADES DE LA REGIÓN NORTE (2005)



8.4 Evaluación del cumplimiento de la NOM de NO₂

En esta sección se evalúa el cumplimiento de la NOM con las segundas concentraciones máximas horarias de NO₂; así, no se cumple con la norma cuando estos segundos máximos rebasan concentraciones de 0.21 ppm. Para la ZMVM se observa una tendencia decreciente a partir de 1998, logrando el cumplimiento de la norma sólo en 2001, y rebasándola de nuevo de 2003

cumplido con la norma en todos los años analizados.

Dentro de las ciudades agrupadas en la región norte (figura 8.9) destaca la ciudad de Mexicali, que presentó en 2003 el segundo máximo más elevado del periodo analizado.

En forma complementaria, el cuadro 8.2 exhibe el número de días en los que se excedió el valor de la norma en cada ciudad. Se observa que son las ZMVM y ZMG las que consistentemente exceden la norma durante el periodo de estudio. Para la ZMVM se ha

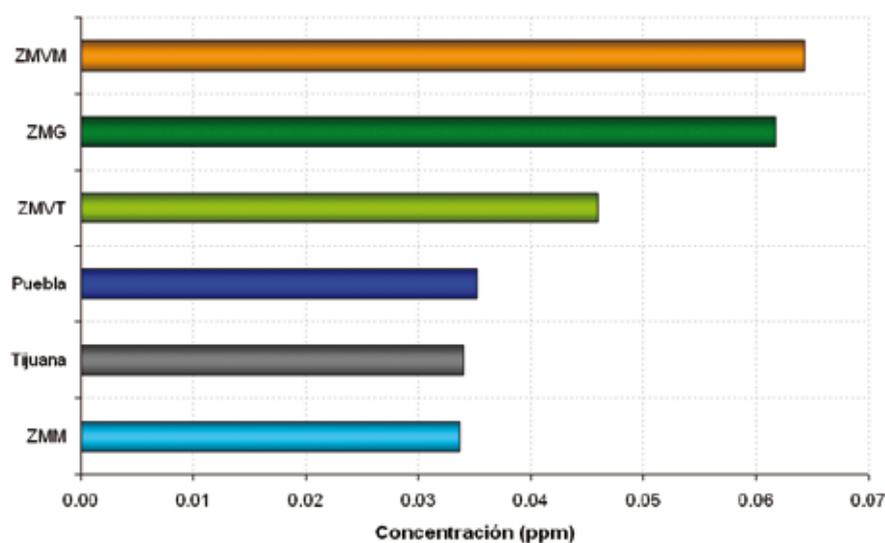
CUADRO 8.1 PROMEDIO ANUAL DE CONCENTRACIONES ¹ (PPM) DE NO₂ PONDERADO POR POBLACIÓN EN SIETE CIUDADES MEXICANAS (1997-2005)

Año	ZMVM	ZMG	ZMVT	Puebla	ZMM	Tijuana	Mexicali
1997	0.069	0.067	0.045	SM	0.039	0.032	0.046
1998	0.065	0.078	0.052	SM	0.036	0.033	0.051
1999	0.058	0.063	0.051	SM	0.026	0.038	0.056
2000	0.065	0.062	0.048	DI	0.030	0.035	0.051
2001	0.054	0.055	0.046	0.039	0.034	0.035	0.050
2002	0.058	0.064	0.047	0.043	0.024	0.031	0.049
2003	0.069	0.065	0.048	0.038	0.023	0.035	0.048
2004	0.065	0.057	0.047	0.037	0.027	0.035	0.048
2005	0.064	0.062	0.046	0.035	0.034	0.034	SI

¹ Promedio anual calculado a partir de las concentraciones diarias (máximo de los datos horarios en un día)

SM = sin medición DI = datos insuficientes SI = sin información.

FIGURA 8.7 PROMEDIO ANUAL DE NO₂ PONDERADO POR POBLACIÓN EN SEIS CIUDADES MEXICANAS (2005)



presentado una disminución considerable, aunque aún se reportan tres días por arriba del límite establecido en los últimos dos años. En cambio, en la ZMG el comportamiento de este contaminante es un tanto errático, cerrando el año 2005 con un mayor número de días que exceden la norma, que en los dos años precedentes.

8.5. Conclusiones sobre el NO₂

Las representaciones gráficas del cumplimiento de la norma horaria para 2005 y la tendencia temporal de la concentración promedio anual ponderada por población para 2000-2005 se presentan en la figura 8.10. Como se observa en dicha figura, sólo dos zonas metropolitanas –la ZMVM y la ZMG– no cumplen con la norma; y estas dos zonas junto con Puebla también

FIGURA 8.8 SEGUNDO MÁXIMO HORARIO DE NO₂ EN LA REGIÓN CENTRO (1997-2005)

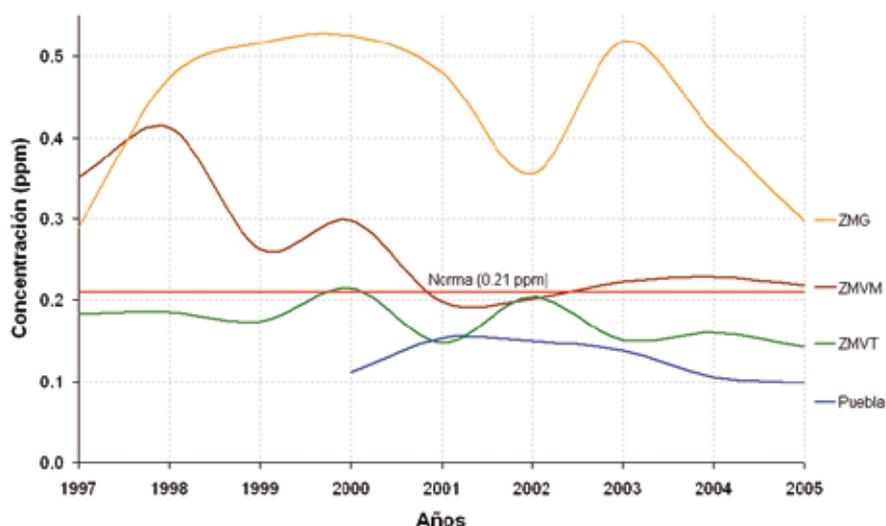
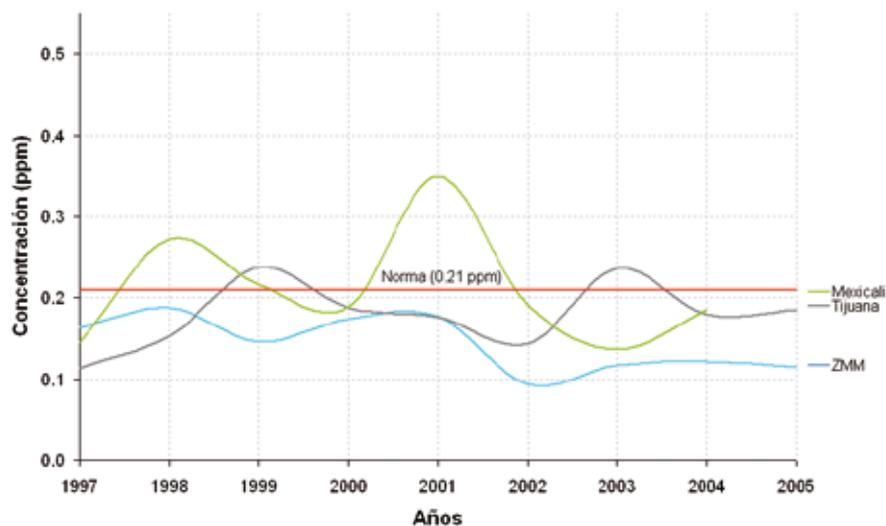


FIGURA 8.9 SEGUNDO MÁXIMO HORARIO DE NO₂ EN LA REGIÓN NORTE (1997-2005)



presentan tendencias crecientes en las concentraciones de NO₂.

La clasificación de las ciudades -en términos del número de días por arriba de valor de la norma, el segundo máximo horario y la concentración promedio anual ponderada por población para 2005- indica que la ciudad más contaminada por NO₂ es la ZMG, siguiendo en orden decreciente la ZMVM y Mexicali.

En cambio, las ciudades menos contaminadas son la ZMM y Puebla, que destacan por no haber rebasado la norma en todo el periodo de análisis. (cuadro 8.3).

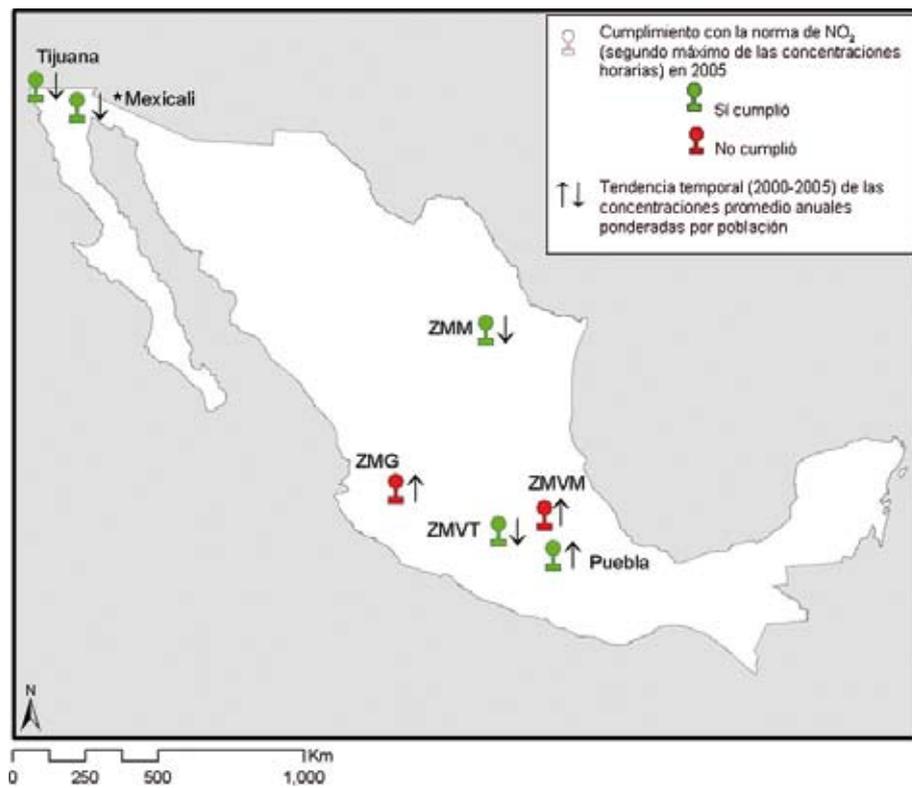
Como se mencionó en la sección sobre distribución espacial, la estación Vallarta es la que consistentemente registra las concentraciones más altas de NO₂ en la ZMG, lo que podría asociarse con fuentes cercanas, y no necesariamente representar los niveles de NO₂ de

CUADRO 8.2 NÚMERO DE DÍAS EN LOS QUE SE REBASA EL VALOR DE LA NORMA PARA NO₂ (0.21 PPM) EN SIETE CIUDADES MEXICANAS (1997-2005)

Año	ZMVM	ZMG	ZMVT	Puebla	ZMM	Tijuana	Mexicali
1997	39	12	0	SM	0	0	0
1998	30	42	1	SM	0	1	2
1999	19	12	0	SM	0	2	2
2000	23	15	2	DI	0	1	0
2001	1	18	0	0	0	0	3
2002	0	26	1	0	0	0	1
2003	6	6	0	0	0	2	0
2004	3	4	1	0	0	0	0
2005	3	13	0	0	0	0	SI

SM = sin medición DI = datos insuficientes SI = sin información.

FIGURA 8.10 CUMPLIMIENTO CON LA NORMA HORARIA (2005) PARA NO₂ Y TENDENCIAS EN SIETE CIUDADES MEXICANAS (2000-2005)



*En Mexicali la información corresponde, para el cumplimiento de la norma, a 2004, y para la tendencia temporal, al periodo 2000-2004
Fuente: elaboración propia de los autores.

la zona. Por lo tanto, sería recomendable evaluar la representatividad de la estación Vallarta y decidir la conveniencia de su reubicación.

CUADRO 8.3 CLASIFICACIÓN DE LAS CIUDADES
SEGÚN SU GRADO DE CONTAMINACIÓN POR NO₂

Ciudad	Clasificación
ZMG	1°
ZMVM	2°
Mexicali	3°
ZMVT	4°
Tijuana	5°
ZMM	6°
Puebla	7°

9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este *Tercer almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire* se analizaron los datos del monitoreo atmosférico para los contaminantes PM₁₀, O₃, CO, SO₂, NO₂ y CO en nueve ciudades mexicanas, que incluyeron la ZMVM, la ZMG, la ZMVT, Puebla, la ZMM, Ciudad Juárez, Tijuana, Mexicali y Salamanca (en la ZMVM se incluyó también el análisis de PM_{2.5}), para el periodo 1997-2005. Para el análisis se calcularon indicadores para cada contaminante y ciudad, de tal forma que fuera posible evaluar y comparar la situación de la contaminación atmosférica entre las nueve ciudades. Así, el presente almanaque muestra que la calidad del aire en las ciudades incluidas no es satisfactoria, dado que en ellas se rebasó la norma de al menos uno de los contaminantes en cada año del periodo evaluado.

Dependiendo de su entorno, sus características geográficas y su desarrollo urbano-industrial, las ciudades presentan diferentes patrones temporales y espaciales en cuanto a principales fuentes de emisión,

formación de contaminantes secundarios, dispersión y transporte de contaminantes, concentraciones en la atmósfera, así como a características y magnitud de la exposición de las poblaciones asentadas en ellas. A continuación se retoman algunos puntos relevantes de las ciudades evaluadas, y se comentan algunas recomendaciones para el control de emisiones y para mejorar la calidad del aire de nuestras ciudades.

La ZMVM lleva ya una larga historia en su lucha contra la contaminación atmosférica, gracias a lo cual se han logrado controlar los niveles de CO y SO₂. En cambio, las concentraciones de PM y O₃ siguen rebasando las normas de calidad del aire. A pesar de la reducción en un 30% de las concentraciones máximas horarias de O₃ en los últimos ocho años, la norma horaria se rebasó en 233 días en 2005 y, en términos de la norma anual, el valor del quinto máximo superó a la norma en un 75%. En forma similar, las PM_{2.5} rebasaron la norma anual con valores casi dos veces superiores al límite especificado en la norma correspondiente,

para los años 2004 y 2005. Según el inventario de emisiones más reciente de la ZMVM (SMA-GDF, 2004), las fuentes móviles emiten el 56%, el 82% y el 35% de $PM_{2.5}$, NO_x y COV, respectivamente, siendo los últimos dos contaminantes precursores de O_3 . Las fuentes de área, especialmente el uso de solventes, son responsables del 41% de los COV. En esta metrópolis se conjugan diversos factores que influyen en la calidad del aire: su ubicación al interior de un valle, su altitud, las características y lo numeroso de la flota vehicular, así como también su intensa actividad, todo lo cual resulta en una pobre dispersión de contaminantes, una radiación solar muy intensa, procesos de combustión incompletos y elevadas emisiones vehiculares.

Por su parte, la ZMG muestra tendencias crecientes para el O_3 , el SO_2 y el NO_2 ; además, se rebasan las normas de calidad del aire para estos tres contaminantes y es una de las pocas ciudades donde no se cumple con la norma de calidad del aire para CO. De esta forma, lo que se observa es que en el año 2005 los picos máximos de O_3 superaron a los registrados en la ZMVM y que los niveles de NO_2 (estación de monitoreo Vallarta) fueron los más altos de todas las ciudades incluidas en este almanaque. Cabe mencionar que las emisiones de los contaminantes primarios en la ZMG se originan en las fuentes móviles, que contribuyeron al 96%, el 85% y el 49% de las emisiones de CO, NO_x y COV, respectivamente (INE-DGICURG, 2006).

En la ZMVT los niveles de PM_{10} representan el problema más serio: los promedios anuales son los más elevados de la región centro del país, registrando una tendencia creciente en los últimos cinco años y con 173 días por arriba del valor de norma en 2005. En esta zona metropolitana también se rebasaron las normas diaria y anual para O_3 durante el periodo de análisis. Según el inventario de emisiones de la ZMVT (SE-GEM, 2004), estas emisiones se originan en las fuentes erosivas (60%) y los campos agrícolas, aunque sabemos que las emisiones de vehículos automotores que utilizan diesel también pueden contribuir fuertemente, sobre todo a la fracción fina ($PM_{2.5}$) de las PM_{10} . En cuanto a las fuentes de emisión de los precursores de O_3 , los HC y NO_x , los vehículos automotores aportaron un 69% y un 81%, respectivamente, siendo los

autos particulares y las *pick-up* los vehículos que más contribuyen en el sector transporte.

Puebla, además de tener una de las redes de monitoreo más modernas (INE-DGCENICA, 2004a), es una de las ciudades con el aire más limpio de las nueve incluidas en este almanaque. Su atmósfera relativamente limpia se ve opacada, no obstante, por los niveles registrados de O_3 , que rebasan el valor de las normas de calidad del aire horaria y anual; aun así, cabe mencionar que en los últimos años se aprecia una reducción en las concentraciones máximas horarias. En contraposición, para el NO_2 se registra una tendencia creciente, pero las concentraciones más altas se encuentran muy por debajo del valor normado.

Para Salamanca sólo se incluyó el SO_2 , quizás el contaminante más preocupante para esta ciudad, debido a la quema de combustibles con alto contenido de azufre en la industria y la refinación del petróleo. A pesar de la tendencia decreciente en los promedios anuales de SO_2 desde el año 2000, Salamanca es la única ciudad que no cumple con la norma anual de calidad del aire y en 2005 rebasó el valor de la norma diaria durante 29 días.

La ZMM es una de las ciudades más contaminadas por PM_{10} , hecho que se refleja en los registros del año 2005, en el que se rebasa la norma en 163 días y el percentil 98 de los promedios diarios casi duplica el límite especificado en la norma. También en el año 2005, para esta zona metropolitana se registra la falta de cumplimiento con las normas de O_3 , rebasándose la norma horaria en 32 días. De acuerdo con el inventario de emisiones más reciente para la ZMM –el Inventario Nacional de Emisiones de México (INEM)-, la gran mayoría de las emisiones de PM_{10} provinieron de fuentes fijas (62%), aunque el total no considera las fuentes naturales, que contribuyen al contaminante en las zonas áridas de una manera importante, y que de acuerdo con el inventario de emisiones 1997 de la ZMM, contribuyen en un 93%. Para los precursores de ozono, las fuentes móviles tienen la mayor contribución, emitiendo un 44% de los COV y un 69% de NO_x (INE-DGICURG, 2006).

En Ciudad Juárez los tres contaminantes que se miden en la ciudad, PM_{10} , O_3 y CO, rebasaron las normas

de calidad del aire en 2005. De 2003 a 2005 se rebasa la norma de PM_{10} , aunque se observa una disminución importante asociada con la reubicación de la estación Zenco en 2004 –dicha estación se encontraba ubicada cerca de un campo de fútbol, lo que afectaba los registros de la estación y los hacía poco representativos de las condiciones urbanas. Así, las concentraciones de PM_{10} rebasan la norma anual en un 7 y un 12% para los años 2004 y 2005, respectivamente. En cuanto al CO, se observa una tendencia creciente en los niveles de este contaminante en los últimos años y el incumplimiento con la norma en 2005; estos elevados niveles de CO pueden asociarse, al menos parcialmente, con emisiones de vehículos con tecnologías caducas, como son los autos con carburador que circulan en la ciudad. Se estima que el 88% de la flota de vehículos particulares en Ciudad Juárez son de origen estadounidense, y que la edad promedio de la flota vehicular es de 16 años (INE-DGIPEA, 2006). Dada la distribución de edades de la flota vehicular, se puede suponer que la mayoría de estos vehículos no cuentan con convertidores catalíticos, por lo que sus emisiones contaminantes son alrededor de un 90% superiores a las de los vehículos que sí cuentan con ellos.

Tijuana registra los niveles más bajos para los contaminantes evaluados de entre las nueve ciudades analizadas. Lo anterior puede estar relacionado con su ubicación geográfica, es decir, en la costa, lo que permite la ventilación continua de la brisa. En esta ciudad se presentan, a pesar de su ubicación costera, niveles de PM_{10} que rebasaron la norma de calidad del aire en todos los años de análisis. De acuerdo con el inventario de emisiones de esta ciudad, la mayoría de las emisiones de PM_{10} provinieron de fuentes de área, y, específicamente, de caminos no pavimentados (60%) (GEBC *et al.*, 2000).

Por último, Mexicali es una de las ciudades con mayores problemas de calidad del aire en cuanto a PM_{10} y CO, presentando las concentraciones más elevadas para ambos contaminantes. En cuanto a las partículas, en 2005 se registraron niveles casi dos veces superiores a los valores de la norma anual y tres veces por arriba del valor de la norma diaria. Cabe mencionar que durante todos los años de análisis las concentra-

ciones más elevadas se reportaron en la estación de monitoreo Progreso, con niveles que duplican los de las demás estaciones. Dicha estación se ubica en una calle de terracería de una zona con intenso flujo vehicular, lo que puede afectar los niveles registrados y no necesariamente ser representativa de la zona. Al problema de las partículas se suma el del CO, que afortunadamente muestra una clara tendencia decreciente en el periodo de análisis. Las emisiones de PM_{10} se pueden relacionar con la ubicación de Mexicali en una zona árida y con el hecho de que casi un 40% de las calles y los caminos se encuentran sin pavimentar (BDAM, 2003). Para el CO, la situación es análoga a la de Ciudad Juárez, ya que las emisiones en Mexicali podrían asociarse con el alto porcentaje de la flota vehicular con tecnologías caducas; se estima que más del 45% de los vehículos tienen más de 15 años de edad (GEBC *et al.*, 1999) y que más del 70% de las emisiones totales provienen de los vehículos con más de 10 años de edad (Tejada-Honstein *et al.*, 2005).

Como parte de la gestión de la calidad del aire, es primordial continuar midiendo, analizando y reportando los niveles de los contaminantes atmosféricos. En este almanaque se utilizaron datos de las redes locales de nueve ciudades, pero existen datos en por lo menos 44 localidades más, que, por no tener suficientes datos históricos que permitieran evaluar sus tendencias, no se incluyeron en este documento. Sin embargo, algunas de estas localidades ya cuentan con redes consolidadas y han incorporado sus datos al SINAIICA, por lo que podrán incluirse en análisis y publicaciones futuros.

Como ya se mencionó en el capítulo 2, en México hay una gran variabilidad en el diseño y operación de las redes de monitoreo atmosférico, por lo que la confiabilidad de la información generada por éstas queda, en gran parte, supeditada a la calidad del trabajo operacional y a la rigurosidad de las instituciones responsables.

Debido a lo anterior, es sumamente importante seguir estandarizando y homologando los procedimientos de operación de las redes y de verificación de los datos, como se plantea en el Programa Nacional de Monitoreo Atmosférico (INE-DGCENICA, 2004b),

con la finalidad de asegurar que la información de monitoreo generada en el país cumpla con los criterios de calidad, cantidad, uniformidad y comparabilidad. En tal contexto, el aseguramiento y el control de calidad (AC/CC) son esenciales en todo sistema de medición; en este caso, ambos incluyen la secuencia de actividades que garantizan que el monitoreo cumpla con normas de calidad definidas con un nivel establecido de confiabilidad. Dentro de los primeros pasos para estandarizar la información generada por las redes de monitoreo, está el diseño de un formato único de reporte que facilite el procesamiento y el análisis de los datos.

Adicionalmente, se hace necesario lograr que las redes de monitoreo generen información con la calidad y la cantidad necesarias, de acuerdo con los criterios de suficiencia para evaluar el cumplimiento con las normas de calidad del aire. Mientras que en algunas redes de monitoreo el porcentaje de información para la mayoría de sus estaciones es de más del 75% de los días del año, en otras, la información es escasa y, en la peor de las situaciones, no se cuenta con ella durante varios meses (ver CD anexo).

Por otra parte, es indispensable caracterizar, evaluar y reportar la representatividad de las estaciones de monitoreo, lo que permitiría una mejor y más adecuada interpretación de los indicadores de calidad del aire. En este sentido, con el objeto de obtener datos representativos de las condiciones urbanas, se debe cumplir con una serie de criterios de ubicación del sitio y de toma de muestras, tales como la altura y la distancia mínima de la estación a las carreteras o avenidas con flujo vehicular intenso, la vegetación y otras fuentes menores, que puedan causar interferencias o sesgar las mediciones de los contaminantes. En forma similar, las estaciones ubicadas al lado de una fuente conocida, que monitorean condiciones en una zona crítica o *hot spot*, no representan las condiciones ambientales de una ciudad ni se deben utilizar para el cálculo de indicadores. Así, dado el dinamismo del crecimiento urbano e industrial, es necesario evaluar y adecuar los sistemas de monitoreo, llevando a cabo revisiones periódicas de la representatividad de las estaciones de acuerdo con su entorno y con los objetivos

específicos de las redes de monitoreo atmosférico, definidos por las autoridades ambientales.

El cumplimiento y el desarrollo de las actividades mencionadas en los párrafos anteriores se encuentran estrechamente relacionados con la disponibilidad de recursos económicos y humanos de cada una de las redes de monitoreo atmosférico. La falta de recursos económicos imposibilita la adquisición de refacciones, consumibles, equipo auxiliar, pago de servicios, contratación de personal técnico para las tareas de campo (por ejemplo, operación, mantenimiento y calibración de equipos), supervisión, control de calidad, manejo de la información y evaluación periódica de la representatividad de las estaciones que conforman las redes de monitoreo. En este sentido es muy importante que los gobiernos locales asignen los recursos necesarios, tanto financieros como humanos, e identifiquen posibles fuentes y mecanismos de financiamiento alternativos para las redes de monitoreo atmosférico (INE-DGCENICA, 2004a).

El análisis que se incluye en este almanaque pone en evidencia la necesidad de continuar en la lucha para mejorar la calidad del aire en las ciudades mexicanas, mediante la inversión en programas y estrategias para asegurar el cumplimiento de las normas que tenemos en el país; el desarrollo de programas y estrategias de comunicación de riesgos de la contaminación atmosférica; así como, el establecimiento de mecanismos regulatorios y no regulatorios para el control más estricto de las emisiones vehiculares y de fuentes fijas.

Como se mencionó en el capítulo de antecedentes, para varios de los contaminantes atmosféricos no se ha encontrado un umbral para algunos efectos finales en la salud. Por lo tanto, la tendencia internacional, e incluso de la Organización Mundial de la Salud, ha sido generar normas o guías de calidad del aire más estrictas para establecer niveles de riesgo sumamente bajos y tener mayor certidumbre de que se protege a la población (WHO, 2005). Aunque en México la Secretaría de Salud ha actualizado en años recientes las normas para O₃ y PM, es importante evaluar los riesgos que los niveles establecidos en dichas normas representan para la población mexicana y tratar de armonizarlas con las normas y guías internacionales.

Al mismo tiempo, sin embargo, se requiere evaluar las posibilidades reales que tienen las ciudades para cumplir con las normas de calidad del aire y, en caso necesario, establecer metas intermedias que permitan alcanzar paulatinamente las metas de mediano y largo plazo. La clave en la elaboración de normas de calidad del aire en muchos países es acompañarlas con programas que aseguren su cumplimiento, que incluyen incentivos y sanciones, así como esquemas de evaluación de desempeño.

En el ámbito político, la calidad del aire ha perdido la atención de los tomadores de decisiones y, en algunas ciudades, también de la población general. En la ZMVM, por ejemplo, en años recientes no se han registrado concentraciones de O₃ que requieran de la activación de contingencias, como sucedía en los 1990, hecho que ha resultado en una percepción general de que la contaminación atmosférica ya está controlada. Es importante que esta pérdida de atención no se traduzca en pérdida de interés y compromiso para lograr una calidad del aire más satisfactoria, tanto en la ZMVM, como en el resto de las ciudades mexicanas con problemas de contaminación atmosférica. Una forma de recuperar y mantener el interés político y del público es mediante la educación y comunicando los niveles de contaminación y los riesgos asociados para la salud humana.

Actualmente, pocas ciudades reportan de manera pública sus niveles de contaminación; sin embargo, existen ya algunos esfuerzos en este sentido. El SINAICA, desarrollado e instrumentado por el INE, es una herramienta que permite el acceso vía Internet de los datos de contaminación atmosférica a escala nacional en tiempo semi-real, lo que puede ser muy valioso para el diagnóstico y la evaluación inmediatos durante la ocurrencia de episodios de contaminación del aire. Por otro lado, los índices de calidad del aire, como el IMECA utilizado en la ZMVM, son herramientas que facilitan comunicarle a la población los niveles de los contaminantes. Estos índices podrían usarse también en otras ciudades mexicanas.

Como se mencionó en este documento, los inventarios de emisiones desarrollados en las diferentes ciudades han identificado que la principal fuente de

contaminación para la mayoría de las ciudades es el sector transporte. Aunque se ha logrado actualizar las normas para regular las emisiones de vehículos ligeros a gasolina y diesel (NOM-042) y la calidad de los combustibles vehiculares (NOM-086), la estimación de que la flota vehicular en el país se duplicará en 15 años obliga a desarrollar e instrumentar una estrategia integral para reducir las emisiones vehiculares. En ésta se deberá incluir el contar con estándares más estrictos de emisiones para vehículos nuevos en planta; controlar más eficientemente las emisiones de los vehículos en circulación, para lo cual se pueden instrumentar programas de verificación vehicular; acelerar la renovación de la flota, sobre todo en ciudades donde se comercializan vehículos importados con tecnologías caducas, que no cuentan con sistemas para el control de emisiones y emiten grandes volúmenes de contaminantes a la atmósfera; y, también, desarrollar programas para proveer de un sistema de transporte público de alta capacidad, eficiente, poco contaminante, seguro, cómodo y accesible, a las ciudades mexicanas, además de promover el uso de transporte no motorizado (como caminar y andar en bicicleta) para minimizar el uso de autos privados y reducir sus emisiones.

El control de las emisiones de fuentes fijas siempre ha sido una de las prioridades en la gestión de la calidad del aire, pues como se documenta en este almanaque para la ciudad de Salamanca, las emisiones de las plantas de generación de electricidad, industrias, refinerías, etcétera, han afectado significativamente la calidad del aire en la zona. La necesidad de controlar las emisiones de fuentes puntuales se ha exacerbado con las evidencias internacionales y nacionales sobre sus posibles efectos en la salud de las poblaciones circunvecinas (Levy *et al.*, 2002; EC, 1995; SEMARNAT y CEPAL, 2004; López *et al.*, 2005). La reducción de emisiones de fuentes fijas puede lograrse continuando con los esfuerzos para mejorar la calidad de los combustibles industriales, promover el uso de combustibles más limpios, así como optimizar los procesos de operación y el control de emisiones. Estas medidas deben ir a la par del desarrollo de herramientas para dar a conocer al público la calidad del aire en zonas industriales y su influencia en las ciudades aledañas,

por constituir un avance para proteger la salud de la población, como se ha observado en los países en los que se garantiza el principio del “derecho de la comunidad a saber”.

Este *Tercer almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire* presenta indicadores que permitieron el análisis de la calidad del aire en nueve ciudades mexicanas, así como sus tendencias espaciales y temporales. A través de este documento se ha ilustrado que todas las ciudades y zonas metropolitanas analizadas rebasan al menos una de las normas de calidad del aire; también, se ha resaltado que existen y deben buscarse opciones para seguir apoyando y mejorando los sistemas de monitoreo atmosférico locales y, al mismo tiempo, asegurar el

cumplimiento de las normas y la reducción de las emisiones de contaminantes, con el fin de proteger a las poblaciones actuales y también a las generaciones futuras.

Así, el INE, al elaborar este almanaque, da un valor agregado a los datos colectados en las redes de monitoreo de nueve ciudades con un diagnóstico de la calidad del aire, con el fin de contribuir con información útil para diseñar, aplicar y evaluar medidas y estrategias para el control de la contaminación atmosférica. También la intención es poner esta información al alcance de todos aquellos interesados y así exhortarlos a trabajar y continuar con los esfuerzos para lograr una mejor calidad del aire que todos, inevitablemente, respiramos.

ANEXO

Muchos países y organizaciones del mundo cuentan con normas de calidad del aire de los contaminantes criterio, entre otros, los Estados Unidos de América (USEPA, 2006), la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2006) y la Unión Europea (UE) (AEMA, 2003; OJEC, 1999). En el cuadro AI.1 se presenta un resumen de la normatividad de los países y organizaciones mencionados.

CUADRO AI.1 RESUMEN DE LOS VALORES LÍMITE PERMISIBLES DE LOS CONTAMINANTES CRITERIO EN ALGUNOS PAÍSES Y ORGANIZACIONES DEL MUNDO

Contaminante	Tiempo promedio	Unidades	OMS	UE	EUA	México
PM ₁₀	1 año	µg/m ³	20	40	50	50
	24 horas	µg/m ³	50	50	150	120
PM _{2.5}	1 año	µg/m ³	10	25	15	15
	24 horas	µg/m ³	25	40	65	65
O ₃	8 horas	µg/m ³	100	120	157	157
		ppm	0.05	0.06	0.08	0.08
	1 hora	µg/m ³				216

CUADRO A1.1 RESUMEN DE LOS VALORES LÍMITE PERMISIBLES DE LOS CONTAMINANTES CRITERIO
EN ALGUNOS PAÍSES Y ORGANIZACIONES DEL MUNDO (continúa)

Contaminante	Tiempo promedio	Unidades	OMS	UE	EUA	México
CO	8 horas	mg/m ³		10	10	13
		ppm		9	9	11
	1 hora	mg/m ³		40		
		ppm		35		
SO ₂	1 año	μg/m ³			78	
		ppm			0.03	0.03
	24 horas	μg/m ³	20	125	366	341
		ppm	0.007	0.047	0.14	0.13
	3 horas	μg/m ³			1300	
		ppm			0.5	
	10 minutos	μg/m ³	500			
		ppm	0.19			
NO ₂	1 año	μg/m ³	40	40	100	
		ppm	0.021	0.021	0.05	
	1 hora	μg/m ³	200	200		395
		ppm	0.1	0.1		0.21

BIBLIOGRAFÍA

- AEMA (Agencia Europea del Medio Ambiente) y Ministerio de Medio Ambiente de España. 2003. Calidad del aire en Europa. Situación actual y tendencias 1990-99. Informe temático. España.
- BDAM (Banco de Desarrollo de América del Norte). 2003. [en línea]. Disponible en: http://www.nadbank.org/reports/press_releases/spanish/2003/08-15-03.pdf.
- Bell, M.L., A. McDermott, S.L. Zeger, J.M. Samet y F. Dominici. 2004. Ozone and Short-term Mortality in 95 US Urban Communities, 1987-2000. *Journal of the American Medical Association* 292: 2372-2378.
- Borja-Aburto, V.H., M. Castillejos, D.R. Gold, S. Bierzwinski y D. Loomis. 1998. Mortality and ambient fine particles in southwest Mexico City, 1993-1995. *Environmental Health Perspectives* 106: 849-856.
- Castillejos M., V. Borja-Aburto, D. Dockery y D. Loomis. 2000. Coarse particles and mortality in Mexico City. *Inhalation Toxicology* 12 (Suppl. 1): 61-72.
- Castillejos, M., D.R. Gold, A.I. Damokosh, P. Serrano, G. Allen, W.F. McDonnell, D. Dockery, S.R. Velasco, M. Hernandez y C. Hayes. 1995. Acute effects of ozone on the pulmonary function of exercising schoolchildren from Mexico City. *American Journal of Respiratory & Critical Care Medicine* 152: 1501-1507.
- Damokosh, A., M. Castillejos, S. Bierzwinski y D. Gold. 2000. Acute effects of air pollution on emergency room visits for respiratory disease in children living in southwest Mexico City.
- Dockery, D.W., C.A. Pope, X.P. Xu, J.D. Spengler, J.H. Ware, M.E. Fay, B.G. Ferris y F.E. Speizer. 1993. An Association between Air-Pollution and Mortality in 6 United-States Cities. *New England Journal of Medicine* 329(24): 1753-1759.
- DOF. 1994a. Norma Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-1993. *Diario Oficial de la Federación* del 23 de diciembre de 1994, SEGOB, México.
- . 1994b. Norma Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-1993. *Diario Oficial de la Federación* del 23 de diciembre de 1994, SEGOB, México.

- DOF 1994c. Norma Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-1993. *Diario Oficial de la Federación* del 23 de diciembre de 1994, SEGOB, México.
- . 2002. Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-1993. *Diario Oficial de la Federación* del 30 de octubre de 2002, SEGOB, México.
- . 2005. Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993. *Diario Oficial de la Federación* del 26 de septiembre de 2005, SEGOB, México.
- . 2006. *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. Modificaciones al Título cuarto, capítulo II, artículo 112, fracción VI.
- EC (European Commission). 1995. ExternE: External Costs of Energy: Oil and Gas. Directorate-General XII, Science, Research and Development, Brussels vol. 4.
- Evans, J., J. Spengler, J. Levy, J. Hammitt, H. Suh, P. Serrano-Trespacios, L. Rojas-Bracho, C. Santos-Burgoa, H. Rojas-Rodríguez, M. Caballero-Ramírez y M. Castillejos. 2000. Contaminación Atmosférica y Salud Humana en la Ciudad de México, MIT-IPURGAP Reporte No. 10, 109 pp.
- Finlayson-Pitts, B.J. y J.N. Pitts. 2000. *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere*. Academic Press, EE.UU.
- FTCJ (Fondo de Fomento Turístico de Ciudad Juárez). 2006. Juárez comercial e industrial [en línea]. Disponible en: <http://www.visitajuarez.com/pag21.html>.
- Gauderman, W.J., E. Avol, F. Gilliland, H. Vora, D. Thomas, K. Berhane, R. McConnell, N. Kuenzli, F. Lurmann, E. Rappaport, H. Margolis, D. Bates y J. Peters. 2004. The Effect of Air Pollution on Lung Development from 10 to 18 Years of Age. *The New England Journal of Medicine* 352: 11.
- GEBC (Gobierno del Estado de Baja California), Gobierno Municipal de Tijuana, SEMARNAP y SSA. 2000. *Programa para Mejorar la Calidad del Aire Tijuana-Rosarito 2000-2005*. México. 244 pp.
- . 1999. *Programa para Mejorar la Calidad del Aire de Mexicali 2000-2005*, México. 243 pp.
- GECH (Gobierno del Estado de Chihuahua), Gobierno municipal de Ciudad Juárez y SEMARNAT. 2006. *Programa de Gestión de la Calidad del Aire de Ciudad Juárez 2006-2012*. México. 81 pp.
- GEG (Gobierno del Estado de Guanajuato), Gobierno municipal de Salamanca, SEMARNAT, SENER e Instituto de Ecología de Guanajuato. 2004. *Programa para Mejorar la Calidad del Aire en Salamanca*. México. 166 pp.
- GEJ (Gobierno del Estado de Jalisco), SEMARNAP y SSA. 1997. *Programa para el Mejoramiento de la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana de Guadalajara 1997-2001*, México. 176 pp. Disponible en: <http://www.ine.gob.mx/publicaciones/new.consultaListaPub.php>.
- GENL (Gobierno del Estado de Nuevo León), SEMARNAP y SSA. 1997. *Programa de la administración de la calidad del aire del área metropolitana de Monterrey 1997-2000*. México. 172 pp. Disponible en: <http://www.ine.gob.mx/publicaciones/new.consultaListaPub.php>.
- Gold, D.R., A.I. Damokosh, C.A. Pope, D.W. Dockery, W.F. McDonnell, P. Serrano, A. Retama y M. Castillejos. 1999. Particulate and ozone pollutant effects on the respiratory function of children in southwest Mexico City. *Epidemiology* 10: 8-16.
- Holguin, F., M.M. Téllez-Rojo, M. Hernandez, M. Cortez, J.C. Chow, J.G. Watson, D. Mannino y I. Romieu. 2003. Air Pollution and Heart Rate Variability among the Elderly in Mexico City. *Epidemiology* 14(5): 521-527.
- HSW (How Stuff Works). 2006. How Ozone Pollution Works [en línea]. Disponible en: <http://science.howstuffworks.com/ozone-pollution1.htm>.
- IISD. 2006. Measurement and Assessment [en línea][fecha de consulta: octubre de 2006]. Disponible en: <http://www.iisd.org/measure>.
- INE-DGCENICA. 2004a. Programa Nacional de Monitoreo Atmosférico. INE, México, D.F. 53 pp.
- . 2004b. Situación Actual del Monitoreo Atmosférico en México, INE, México, D.F.
- . 2006. Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire [en línea]. Disponible en: <http://sinaica.ine.gob.mx>.
- INE-DGICURG, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, United States Environmental Protection Agency, Western Governors' Association y North American Commission for Environmental Cooperation. 2006. *Inventario Nacional de Emisiones de México, 1999*. México. 337 pp.
- INE-DGIPEA. 2006. Levantamiento de datos para estimar los impactos económicos y ambientales de la aplicación de instrumentos económicos para mejorar el desempeño ambiental de los vehículos usados. Resultados preliminares.

- INEGI. 2000. *XII Censo general de población y vivienda 2000* [en línea]. Disponible en: <http://www.inegi.gob.mx/inegi/default.asp>.
- . 2006a. *Censos Económicos 2004* [en línea]. Disponible en: <http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/proyectos/censos/ce2004/cuadrosce04.asp>.
- . 2006b. II Conteo de Población y Vivienda 2005 con estimación [en línea]. Disponible en: <http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/proyectos/conteos/conteo2005>.
- Instituto de Ecología de Guanajuato y SEMARNAT. 2006. Inventario de Emisiones 2004. Tejeda, Le Blanc & Cía., S.C. Guanajuato, Gto. 60 pp.
- Juárez. 2006. Paso del Norte: Hoy Ciudad Juárez [en línea]. Disponible en: <http://www.juarezonline.com/ciudad>.
- Levy, J. y J. Spengler. 2002. Modeling the benefits of power plant emission controls in Massachusetts. *Journal of Air and Waste Management Association* 52: 5–18.
- Levy, J., J. Spengler, D. Hlinka, D. Sullivan y D. Moon. 2002. Using CALPUFF to evaluate the impacts of power plant emissions in Illinois: model sensitivity and implications. *Atmospheric Environment* 36: 1063–1075.
- Lippmann, M. y R. Maynard. 1999. Air Quality Guidelines and Standards in Holgate. En: S. J. Samet, H. Korean y R. Maynard (eds). *Air Pollution and Health*. Academic Press; Londres. Pp. 983-1017.
- Loomis, D., M. Castillejos, D. R. Gold, W. McDonnell y V. H. Borja-Aburto. 1999. Air pollution and infant mortality in Mexico City. *Epidemiology* 10(2): 118-123.
- López, M.T., M. Zuk, V. Garibay, G. Tzintzun, R. Iniestra y A. Fernández. 2005. Health impacts from power plant emissions in Mexico. *Atmospheric Environment* 39: 1199-1209.
- Monterrey Virtual. 2006. Industria [en línea]. Disponible en: <http://www.mtyol.com/industria/index.html>.
- NSC, National Safety Council. 2005. Carbon Monoxide [en línea]. Disponible en: <http://www.nsc.org/library/facts/carbmono.htm>.
- OJEC (Official Journal of the European Communities). 2006. European Union, Limit Values 1999 [en línea]. Disponible en: http://europa.eu.int/eur-lex/pri/en/oj/dat/1999/l_163/l_16319990629en00410060.pdf.
- O'Neill, M., S.D. Loomis y V.H. Borja-Aburto. 2004. Ozone, area social conditions, and mortality in Mexico City. *Environmental Research* 94: 234-242.
- Pope, C.A., R.T. Burnett, M.J. Thun, E.E. Calle, D. Krewski, K. Ito y G.D. Thurston. 2002. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *Journal of the American Medical Association* 287(9): 1132-1141.
- Romano, S.P. 2000. Sintomatología respiratoria asociada a partículas menores de 10 µg (PM₁₀) en el centro de la Ciudad de México. Tesis de maestría, Instituto Nacional de Salud Pública. Morelos, México.
- Romieu, I., F. Meneses, J.J.L. Sienna-Monge, J. Huerta, S.R. Velasco, M. C. White, R. A. Etzel y M. Hernandez-Avila. 1995. Effects of urban air pollutants on emergency visits for childhood asthma in Mexico City. *American Journal of Epidemiology* 141: 546-553.
- Romieu, I., F. Meneses, S. Ruiz, J. Huerta, J.J. Sienna, M. White, R. Etzel, y M. Hernandez. 1997. Effects of intermittent ozone exposure on peak expiratory flow and respiratory symptoms among asthmatic children in Mexico City. *Archives of Environmental Health* 52: 368-376.
- Romieu, I., F. Meneses, S. Ruiz, J.J. Sienna, J. Huerta, M.C. White y R. A. Etzel. 1996. Effects of air pollution on the respiratory health of asthmatic children living in Mexico City. *American Journal of Respiratory & Critical Care Medicine*. 154: 300-307.
- Romieu, I., M.C. Lugo, S.R. Velasco, S. Sanchez, F. Meneses y M. Hernandez. 1992. Air pollution and school absenteeism among children in Mexico City. *American Journal of Epidemiology* 136(12):1524-31.
- SEDESOL, INEGI y CONAPO. 2004. Delimitación de las zonas metropolitanas de México. México.
- SE-GEM, Secretaría de Ecología, Gobierno del Estado de México. 2004. Inventario de Emisiones a la Atmósfera de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, 2000, México. 45 pp.
- SEGOB-GEP (Secretaria de Gobernación, Gobierno del Estado de Puebla). 2006a. Puebla [en línea]. Disponible en: <http://gepdb1.puebla.gob.mx/segob/municipios/puebla>.
- . Secretaria de Gobernación, Gobierno del Estado de Puebla. 2006b. Capítulo 4: Inventario de emisiones [en línea]. Disponible en: <http://www.remapuebla.gob.mx/aireprogramas.php>.
- SEMARNAT y CEPAL, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y la Comisión Económica para

- América Latina y el Caribe. 2004. Evaluación de las externalidades ambientales de la generación termoeléctrica en México. Reporte no. LC/MEX/L.644. México, D.F. 55 pp.
- SEMARNAT-INE. 2003. *Segundo Almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en seis ciudades mexicanas*. México, 220 pp. Disponible en: <http://www.ine.gob.mx/publicaciones/new.consultaListaPub.php>.
- SENER (Secretaría de Energía). 2006. Emisiones del sector eléctrico [en línea]. Disponible en: <http://www.sener.gob.mx/wb2/SenerNva/ibEse>.
- SMA-GDF (Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal) 2004. Inventario de Emisiones de la ZMVM 2004, México.
- . Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal. 2006b Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México [en línea]. Disponible en: <http://www.sma.df.gob.mx/simat/pnhistoria.htm>.
- . Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal. 2006a. Proyecto Piloto RETROFIT en vehículos a diesel en la Ciudad de México [en línea]. Disponible en: <http://www.sma.df.gob.mx/retrofit>.
- SMRN-Puebla. 2006. Programa de mejoramiento de la calidad del aire en la zona metropolitana de la ciudad de Puebla, Puebla. México.
- Tejeda-Honstein D.D., P.C. Montúfar-Ortíz, J.A. Aguilar-Gómez, I. González-Merino. Inventario de Emisiones a la Atmósfera de Fuentes Móviles en la Zona Metropolitana de Mexicali. Reporte final del Tecnológico de Monterrey como parte de las actividades para llevar a cabo el Programa de Reducción del Ozono y Mejora de la Calidad del Aire en la Frontera entre México y Estados Unidos, Mexicali, Baja California, en marzo de 2005. 49 pp.
- Tellez-Rojo M.M., I. Romieu, M. Polo-Pena, S. Ruiz-Velasco, F. Meneses-Gonzalez y M. Hernandez-Avila. 1997. Effect of environmental pollution on medical visits for respiratory infections in children in Mexico City. *Salud Publica de México* 39: 513-22.
- Toledo, C. 1998. La tragedia de los incendios forestales [en línea]. Disponible en: www.planeta.com/ecotravel/México/ecología/98/0798.
- Torres-Meza, V. 2000. Acute Morbidity at Primary Care Settings and Air Pollution in Mexico City. Instituto Nacional de Salud Pública. Cuernavaca, Morelos.
- USEPA. 1993. Automobiles and Carbon Monoxide [en línea]. Disponible en: <http://www.epa.gov/oms/consumer/03-co.pdf>.
- . . 2006. History of PM Standards [en línea]. Disponible en: <http://www.epa.gov/air/particlepollution/history.html>.
- WDHFS (Wisconsin Department of Health and Family Services). 2006. Nitrogen Dioxide [en línea]. Disponible en: <http://www.dhfs.state.wi.us/eh/Air/fs/NtrDioxide.htm>.
- WHO (World Health Organization) 1999. Monitoring Ambient Air Quality for Health Impact Assessment. Regional Publications. European Series No. 85.
- . 2000. Use of the Guidelines in Protecting Public Health. En: *Air Quality Guidelines for Europe*. WHO Regional Publications, Copenhagen. Pp. 41-55.
- . 2006. Air quality guidelines global update 2005 [en línea]. Disponible en: <http://www.euro.who.int/Document/E87950.pdf>.

*Este Tercer Almanaque de datos
y tendencias de la calidad del aire
en nueve ciudades mexicanas,*
de Miriam Zuk, María Guadalupe
Tzintzun Cervantes y Leonora Rojas Bracho,
y que contó con la colaboración de Georgina Echaniz Pellicer,
Verónica Garibay Bravo, Rodolfo Iniestra Gómez,
María Tania López Villegas, Jorge Martínez y María Fernanda Padilla Stevenel,
se terminó de imprimir y encuadernar en los talleres de
Impresora y Encuadernadora Progreso, S.A. de C.V. (IEPSA),
Calzada de San Lorenzo 244, 09830, México, D.F.
durante el mes de julio de 2007.

Se tiraron 500 ejemplares
más sobrantes para reposición