

Capítulo 5. Atmósfera





Atmósfera

La industrialización ha tenido impactos positivos en la sociedad al brindarle medios para que las personas disfruten una vida más cómoda. Sin embargo, también ha tenido efectos negativos al provocar la degradación ambiental, principalmente debido a la generación de contaminantes y su manejo y disposición inadecuados (WRI, 1998; PNUMA, 2003). Los residuos de las diferentes actividades humanas se han descargado al ambiente con la idea de que los ecosistemas tendrían la capacidad de absorberlos o “limpiarlos”, sin que generaran problemas posteriores. El resultado es que hoy en día las huellas de la actividad humana son evidentes en prácticamente cualquier lugar, por más alejado que se encuentre; ejemplo de ello son los problemas atmosféricos que se presentan a lo largo del planeta. Los más importantes, por sus efectos sobre la salud de la población y los ecosistemas naturales, son la disminución de la calidad del aire, el fenómeno de cambio climático global y la reducción del espesor de la capa de ozono estratosférico (WRI, 1998; UNEP, 1999; PNUMA, 2003).

La contaminación atmosférica tiene efectos a nivel local, regional y global. México enfrenta desde hace tiempo problemas de calidad del

aire en sus principales zonas metropolitanas, destacando el Valle de México como el caso más conocido y documentado. La calidad del aire es una preocupación permanente, ya que los signos más notorios de su deterioro, como la menor visibilidad y el incremento en las molestias y enfermedades asociadas a la contaminación, son ya cotidianos en las principales ciudades del país.

Además de los efectos locales asociados a la mala calidad del aire en la salud de las personas o en el estado de sus pertenencias (como el deterioro de los monumentos arquitectónicos), también se presentan efectos a nivel regional, como la afectación de los bosques y ecosistemas acuáticos debido a la lluvia ácida (como ocurrió en el norte de Europa y está sucediendo actualmente en China) o, incluso, a nivel mundial, como el cambio climático y la reducción del espesor de la capa de ozono estratosférico, cuyos efectos más evidentes se manifiestan en Antártica y otras regiones del planeta (PNUMA, 2002).

Ante este escenario, resulta fundamental contar con información confiable y actual de los temas más relevantes relacionados con la atmósfera. En particular es importante contar con un diagnóstico de la situación de la calidad del aire en México (en las principales ciudades y zonas urbanas del país), el cambio climático global y la reducción del espesor de la capa de ozono. En este contexto, el presente capítulo incluye información sobre el inventario de emisiones de contaminantes a la atmósfera, la normatividad vigente relacionada con los principales contaminantes y una descripción de la calidad del aire en las ciudades y zonas urbanas más importantes del país en los últimos años. Además, se añade información reciente del problema del cambio climático global y la disminución del espesor de la capa de ozono estratosférico, considerando tanto las acciones que ha tomado México al respecto, como las posibles consecuencias en el territorio nacional.

CALIDAD DEL AIRE

Una adecuada gestión de la calidad del aire requiere información tanto de los principales generadores de contaminantes como de la situación de la calidad del aire, para que sirva como base de programas tendientes a mejorar su calidad. Dicha información proviene principalmente de los inventarios y de las redes de monitoreo.

Inventarios de emisiones

La calidad del aire en una zona determinada, además de ser afectada por elementos climáticos y geográficos, está relacionada directamente con el volumen y características de los contaminantes emitidos local y regionalmente a la atmósfera. Por ello, un componente indispensable para el diseño y la aplicación de cualquier programa para controlar el problema de la contaminación del aire es la información sobre las principales fuentes de contaminantes atmosféricos y los volúmenes emitidos.

Los antecedentes de los inventarios de emisiones en México se remontan al año 1988, cuando se implementó el Sistema Nacional del Inventario de Emisiones de Fuentes Fijas, así como el estudio encaminado a cuantificar las emisiones en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM).

En 1995 inició un programa para incrementar la capacidad de México en la elaboración de inventarios de emisiones, el cual se amplió en 2001 orientándose a la elaboración del Inventario Nacional de Emisiones de México (INEM). El desarrollo del INEM constó de tres fases: I) planeación, II) desarrollo del inventario para seis estados del norte e III) inventario de los estados restantes. Los resultados de la segunda fase fueron publicados en 2005 con los datos del Inventario de Emisiones de los Estados de la Frontera Norte de México de 1999, que incluyó información sobre las emisiones en

En 1999 se emitieron 40.5 millones de toneladas de contaminantes atmosféricos (58% por fuentes naturales y 42% por fuentes antropogénicas).

Baja California, Coahuila, Chihuahua, Nuevo León, Sonora y Tamaulipas (Semarnat, 2005; Semarnat, INE, 2005). Finalmente, en el año 2006 se publicó el INEM, que incluye información del año 1999, desagregada por fuente de emisión de contaminantes y para todos los estados y municipios del país (Semarnat, INE, 2006b).

Aunque este capítulo se enfocará con mayor detalle a los resultados del INEM, existen inventarios locales previos que comenzaron a desarrollarse en los años noventa y que aportan valiosa información sobre algunas zonas metropolitanas y ciudades del país (ver Recuadro *Inventarios locales de emisiones*).

De acuerdo con el inventario nacional (INEM), en 1999 se emitieron 40.5 millones de toneladas de contaminantes, de los cuales, 58% fueron emitidos por fuentes naturales –es decir, el suelo, la vegetación y la actividad volcánica- y 42% por fuentes antropogénicas. La vegetación generó emisiones de compuestos orgánicos volátiles, los suelos de óxidos de nitrógeno y la actividad volcánica emitió bióxido de azufre y partículas. Aunque las emisiones de fuentes naturales fueron de mayor magnitud que las antropogénicas, estas últimas tienen gran importancia porque se generan en, o cerca de ciudades o poblados, por lo que se incrementa el número de personas expuestas a los efectos nocivos de los contaminantes.

En el INEM se señala que es posible que las emisiones de fuentes naturales estén sobreestimadas, debido a que la información con la que se calcularon las emisiones de la vegetación y los suelos –como son los datos de uso de suelo, cobertura de vegetación y temperatura- posee cierto grado de incertidumbre. En el caso de las emisiones provenientes de los volcanes, los métodos para su estimación, así como la variabilidad de las emisiones generan un amplio margen de error (Semarnat-INE, 2006b).

A mediados de los años noventa se elaboraron los inventarios de emisiones de las principales zonas metropolitanas del país: Valle de México (ZMVM, 1996), Guadalajara (ZMG, 1995), Monterrey (ZMM, 1995) y Valle de Toluca (ZMVT, 1996), y de algunas ciudades como Mexicali (1996), Ciudad Juárez (1996) y Tijuana-Rosarito (1998). Posteriormente, se publicaron los inventarios de Salamanca-Corredor Industrial El Bajío (2000), Zona Metropolitana del Valle de Puebla (ZMVP, 2004) y León (2006). Sin embargo, sólo la ZMVM, ZMVT, Ciudad Juárez y Salamanca cuentan con actualización de sus inventarios.

En la ZMVM se estimaron las emisiones para el periodo 1994-2004. Cabe señalar que la metodología empleada en el inventario de 2004 se utilizó para recalculer las emisiones de años anteriores de tal forma que se pudieran comparar; por esta razón, es posible encontrar diferentes estimaciones de emisiones a la atmósfera en el Valle de México para la misma fecha. En el caso de la ZMVT y Ciudad Juárez se cuenta también con los inventarios de emisiones de 2002, sin embargo dichos inventarios no son comparables con los anteriores ya que emplean metodologías diferentes e incorporan otras fuentes de emisión. Salamanca actualizó su inventario con datos de 2006.

La zona que emitió a la atmósfera la mayor cantidad de contaminantes fue la ZMVM con alrededor de 3.1 millones de toneladas (Figura a). Las otras zonas que tuvieron emisiones

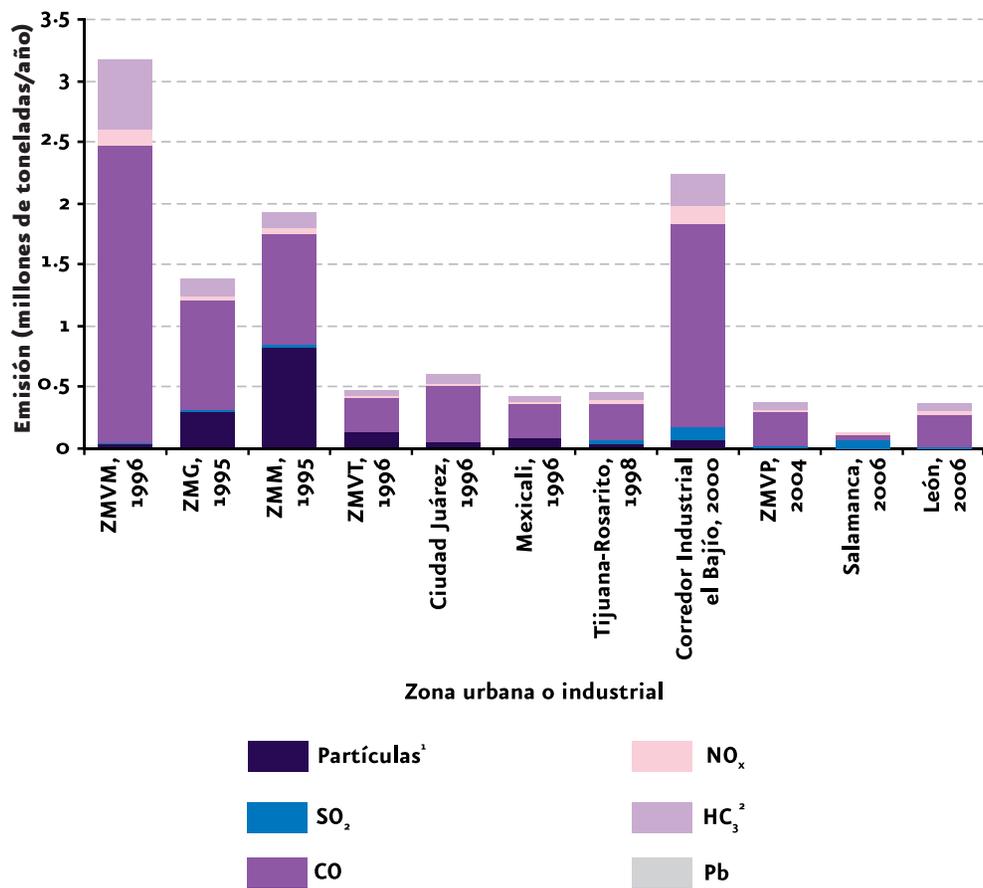
importantes fueron: el Corredor Industrial el Bajío con 2.2 millones de toneladas por año, la ZMM con 1.9 millones de toneladas por año y la ZMG con 1.4 millones de toneladas por año. A estas zonas les siguieron en magnitud de emisiones: Ciudad Juárez, la ZMVT, Tijuana-Rosarito, Mexicali, la ZMVP, León y, finalmente, Salamanca.

En todas las zonas, el monóxido de carbono (CO) fue el contaminante emitido en mayor proporción (entre 45 y 76%). En las ZMG, ZMM, ZMVT y Mexicali las partículas fueron el segundo contaminante más emitido, mientras que en ZMVM, ZMVP, Ciudad Juárez, Tijuana-Rosarito y Corredor Industrial el Bajío fueron los hidrocarburos (HC). En Salamanca el bióxido de azufre (SO₂) fue el segundo contaminante más emitido (37%) (Figura a).

Considerando a las fuentes generadoras de los contaminantes en las zonas urbanas o industriales examinadas, el transporte fue la principal fuente de contaminantes, con 76% del volumen total de las emisiones a la atmósfera, siendo el CO el principal contaminante emitido por este sector (Figura b). Las fuentes naturales (suelos y vegetación) contribuyeron con alrededor de 13% del total de emisiones, constituidas básicamente por partículas suspendidas y, en el caso de la ZMVM, Corredor Industrial el Bajío y León de HC, óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles, respectivamente. El sector servicios emitió 5.4% y el industrial alrededor de 4% del total de emisiones.

Figura a

Emisión de contaminantes en zonas urbanas e industriales, varios años



Notas:

¹ Para la ZMVM, Mexicali y Tijuana-Rosarito, Salamanca, Corredor Industrial el Bajío y la ZMVP sólo incluye a las partículas menores a 10 micrómetros.

² Para la ZMVP y León se refiere a compuestos orgánicos totales (COT) que incluyen hidrocarburos e isopreno y para Salamanca se refiere a compuestos orgánicos volátiles (COVs).

Fuentes:

Semarnat. Dirección General de Manejo Integral de Contaminantes. México. 2002. En: Semarnat. *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México, 2002. Compendio de Estadísticas Ambientales*. México. 2003.

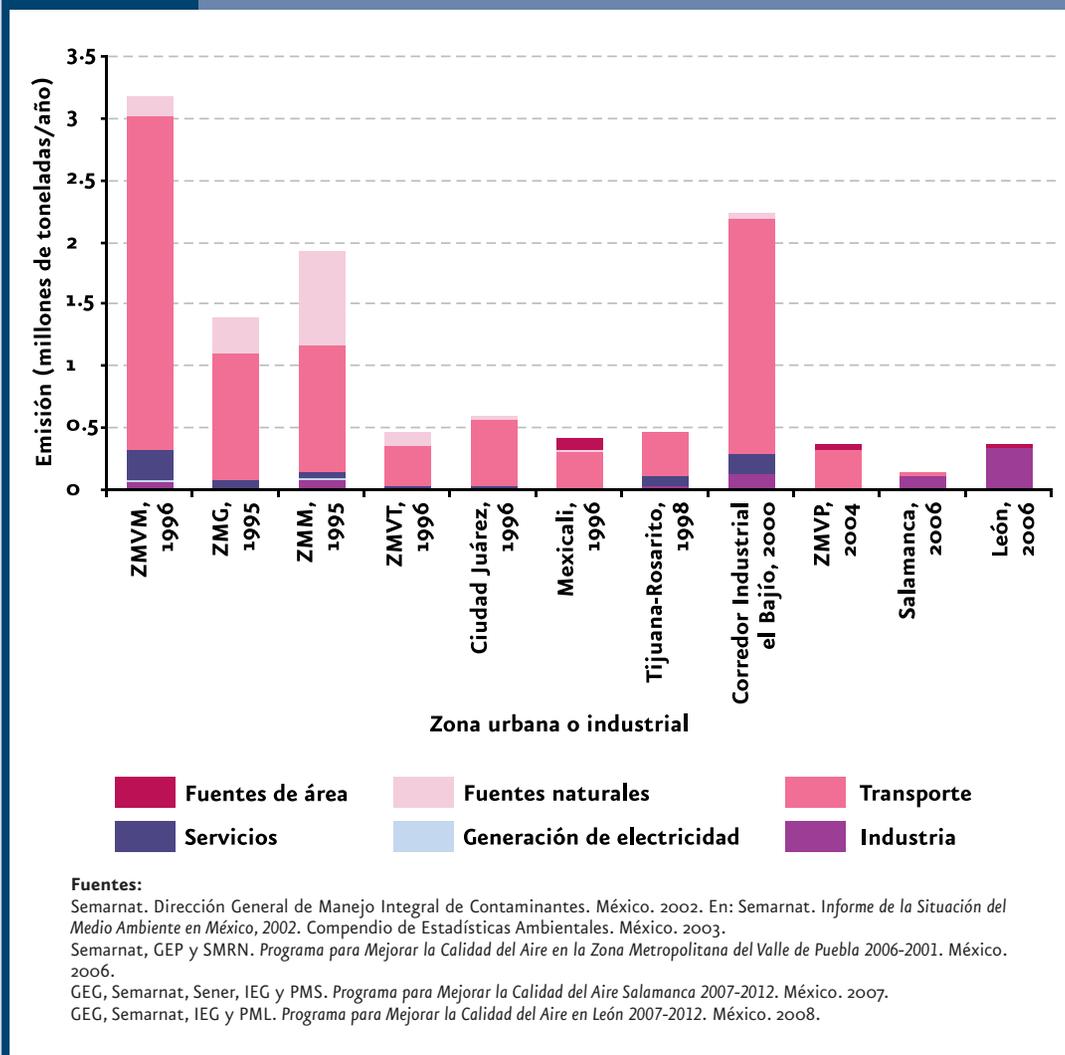
Semarnat, GEP y SMRN. *Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de Puebla 2006-2001*. México. 2006.

GEG, Semarnat, Sener, IEG y PMS. *Programa para Mejorar la Calidad del Aire Salamanca 2007-2012*. México. 2007.

GEG, Semarnat, IEG y PML. *Programa para Mejorar la Calidad del Aire en León 2007-2012*. México. 2008.

Figura b

Emisión de contaminantes en zonas urbanas e industriales por fuente, varios años



Referencias:

Semarnat. Dirección General de Manejo Integral de Contaminantes. México. 2002. En: Semarnat. *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México, 2002*. Compendio de Estadísticas Ambientales. México. 2003.

Semarnat, GEP y SMRN. *Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de Puebla 2006-2011*. México. 2006.

GEG, Semarnat, Sener, IEG y PMS. *Programa para Mejorar la Calidad del Aire en Salamanca 2007-2012*. México. 2007.

GEG, Semarnat, IEG y PML. *Programa para Mejorar la Calidad del Aire en León 2008 -2012*. México. 2008.

Considerando tan sólo las fuentes antropogénicas, los contaminantes emitidos en mayor proporción fueron el monóxido de carbono (CO; 7.5 millones de toneladas; 44% del total), óxidos de azufre (SO_x; 2.9 millones de toneladas; 17%) y los compuestos orgánicos volátiles (COV; 2.6 millones de toneladas; 15%; Figura 5.1). La mayor parte de las emisiones fueron generadas por los vehículos automotores (33.7% del total), otros usos de combustibles¹ (17.3%) y por las plantas de generación de electricidad (12%; Figura 5.2; IB 1.1-2).

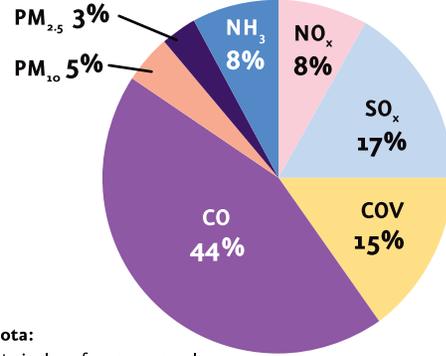


Los vehículos automotores emitieron principalmente CO (62% del total emitido

Las fuentes antropogénicas emitieron en mayor proporción CO (44%), SO_x (17%) y COV (15%).

Figura 5.1

Emisión nacional de contaminantes¹, 1999



Nota:

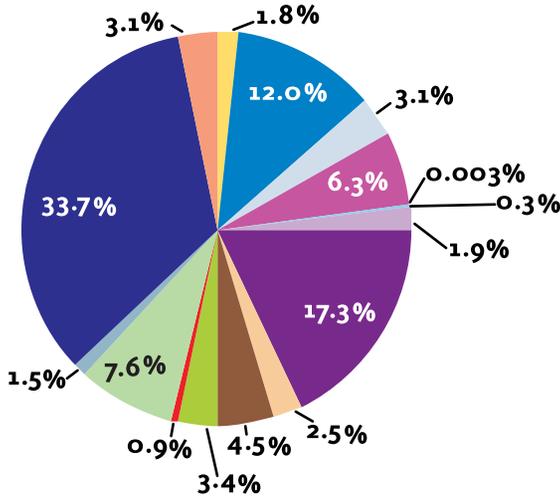
¹ No incluye fuentes naturales.

Fuente:

Semarnat, INE. *Inventario Nacional de Emisiones de México, 1999*. México. 2006.

Figura 5.2

Emisión nacional de contaminantes por categoría de fuente¹, 1999



Nota:

¹ No incluye fuentes naturales.

Fuente:

Semarnat, INE. *Inventario Nacional de Emisiones de México, 1999*. México. 2006.

- Minería
- Plantas de generación de electricidad
- Refinación de petróleo y otros combustibles fósiles
- Manufactura y otros procesos industriales
- Otros servicios
- Comercialización al mayoreo de bienes perecederos
- Combustión industrial de combustibles
- Otros usos de combustibles
- Distribución de combustible
- Uso de solventes
- Incendios y quemaduras
- Polvo fugitivo
- Fuentes de amoníaco
- Otras fuentes de área
- Vehículos automotores en ruta
- Fuentes móviles que no circulan por carreteras

¹ Otros usos de combustibles: incluye la combustión doméstica, agrícola y para el transporte de gas LP; combustión doméstica de gas natural y diáfano; combustión agrícola de diáfano y combustión de leña.



por todas las fuentes), óxidos de nitrógeno (NO_x ; 31%) y COV (22%; Figura 5.3; **IB 1.1-2**). Las plantas de generación de electricidad emitieron la mayor parte de los SO_x que se producen a nivel nacional por fuentes antropogénicas (56%), así como una cantidad importante de NO_x (18%). La categoría de otros usos de combustibles contribuyó con grandes cantidades de partículas menores a 2.5 micrómetros ($\text{PM}_{2.5}$; 38%), partículas menores a 10 micrómetros (PM_{10} ; 29%), CO_2 (27%) y COV (16%). En lo que se refiere al amoníaco (NH_3), fueron las actividades ganaderas, la aplicación de fertilizantes y la generación doméstica, las responsables de casi la totalidad (99%) de sus emisiones.

Por entidad federativa, la generación de contaminantes (Figura 5.4) fue mayor en el estado de México, Veracruz y Jalisco, así como el Distrito Federal (cuyas emisiones fueron originadas principalmente por el transporte y en el caso de Veracruz y Jalisco por transporte, combustión doméstica de leña y generación de electricidad). Cada una de estas entidades federativas generó entre 6.4 y 9.4% de las emisiones antropogénicas totales nacionales. En contraste, Baja California Sur, Quintana Roo, Nayarit, Tlaxcala y Aguascalientes emitieron cada una menos de 1% del total nacional.

Figura 5.3

Emisión nacional de contaminantes por categoría de fuente y contaminante, 1999

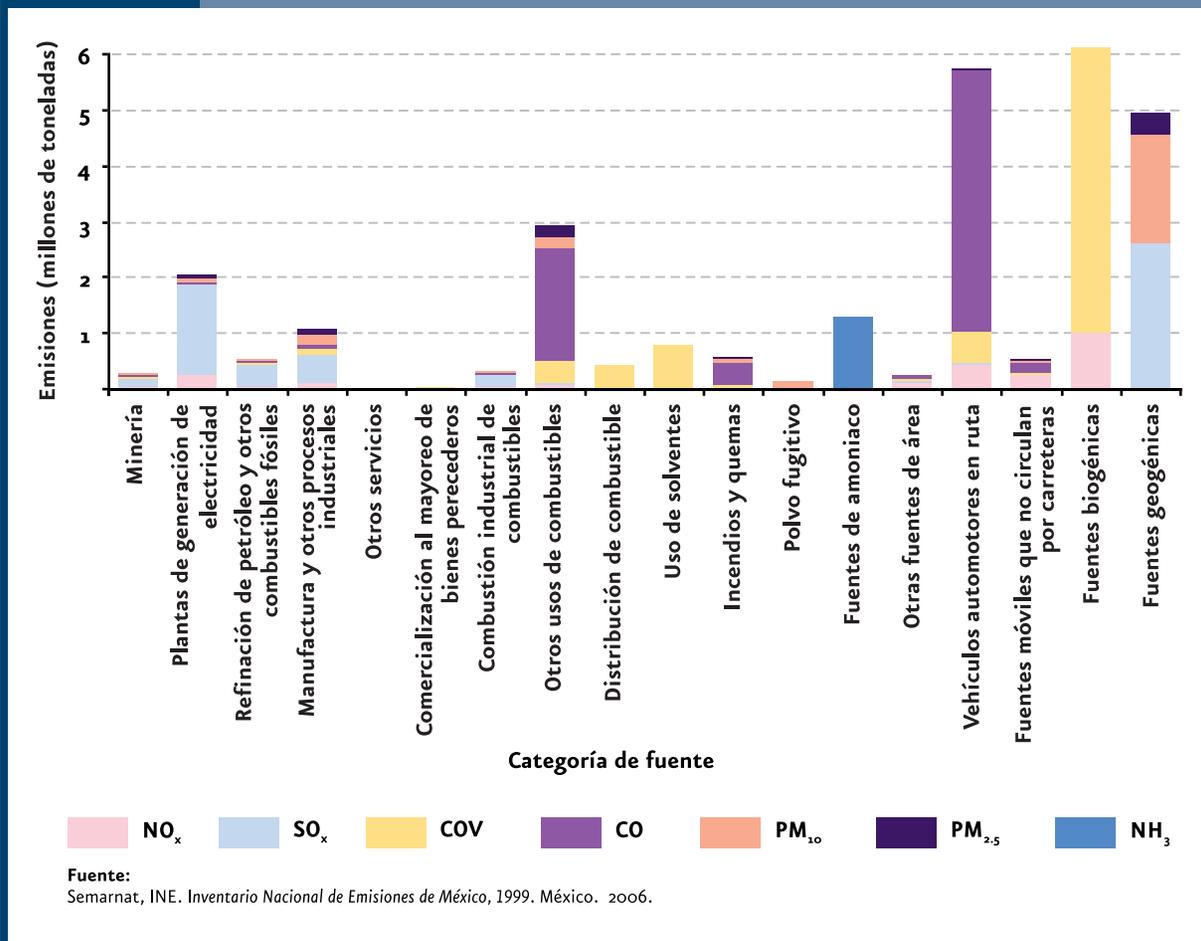
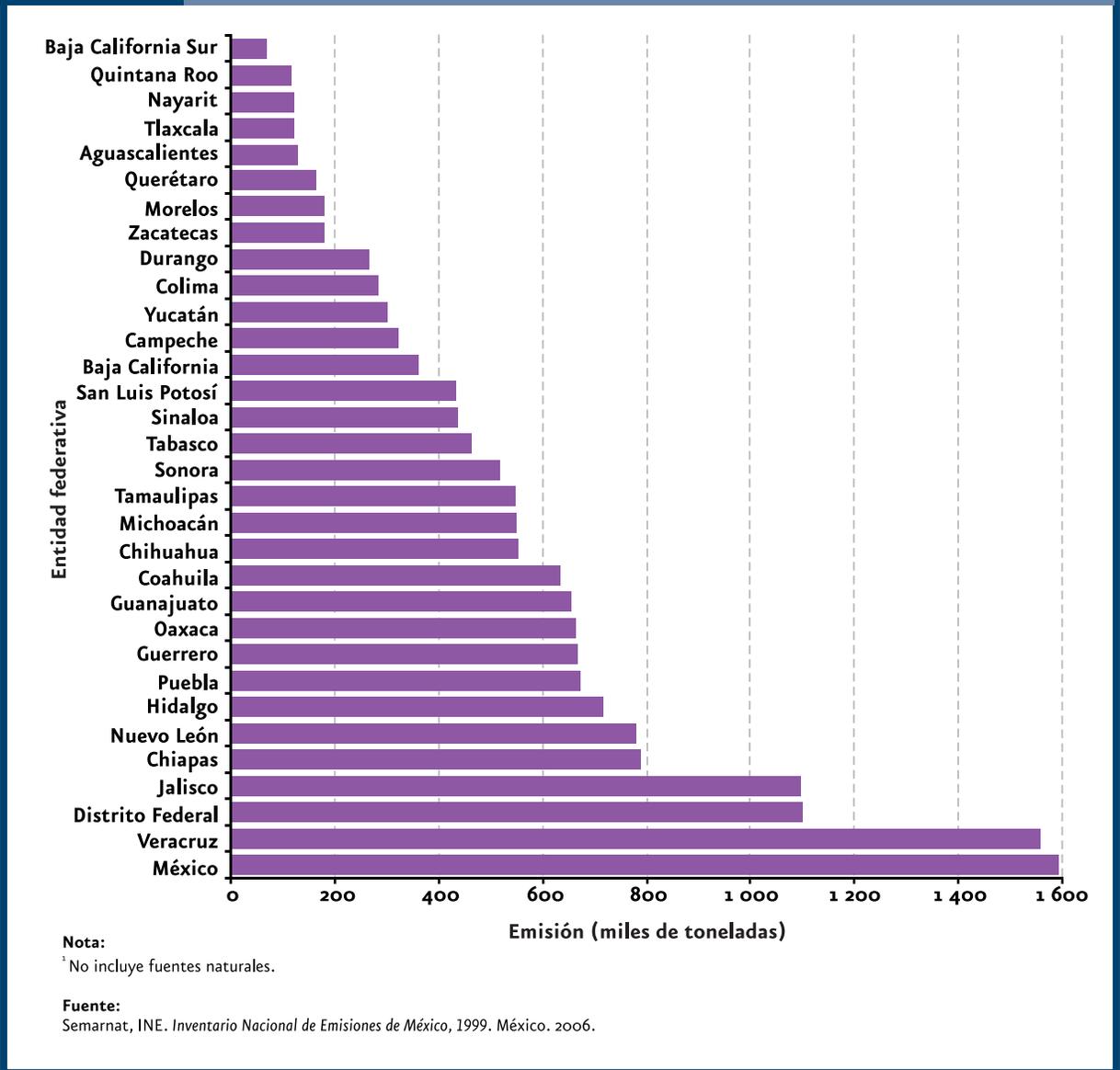


Figura 5.4

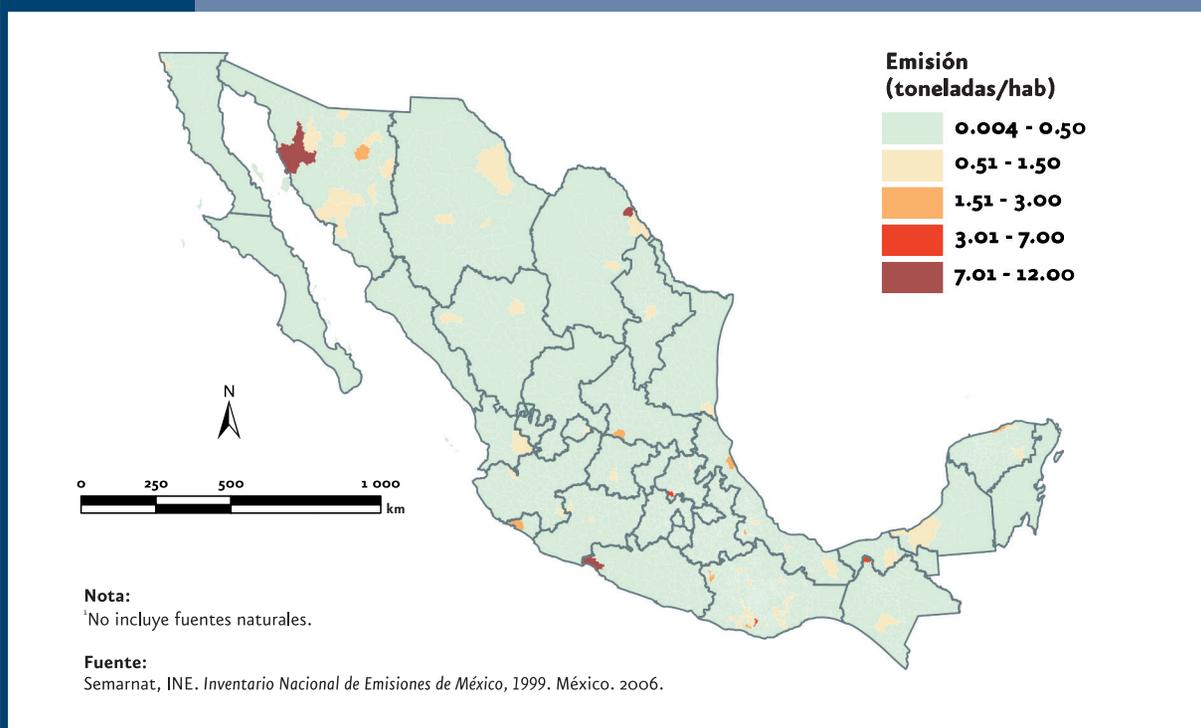
Emisión de contaminantes por entidad federativa¹, 1999



Cuando se analiza la emisión de contaminantes per cápita por municipio y delegación política, se obtiene que en 93% de ellos se generaron de 0.004 a 0.3 toneladas². Los tres municipios que reportaron una mayor emisión per cápita fueron: Nava (Coahuila), Pitiquito (Sonora) y La Unión de Isidoro Montes de Oca (Guerrero), con 11.9, 8.9 y

8.2 toneladas per cápita, respectivamente (Mapa 5.1). El resto de los municipios reporta emisiones per cápita menores a 5 toneladas. Si se considera el total de contaminantes generados en el año 1999 y la población total se obtiene que cada habitante emitió en promedio alrededor de 0.17 toneladas.

² La emisión per cápita se calculó con base en los datos del INEM que corresponden a 1999 y la población por municipio del año 2000.

Mapa 5.1**Emisión per cápita de contaminantes por municipio³, 1999**

Si se examina la información de emisiones por municipio y contaminante, se observa que alrededor de 95% de los municipios del país emitieron entre 0.6 y 2000 toneladas de NO_x , acumulando poco más de 429 mil toneladas que representan 30% del total nacional emitido de ese contaminante (Mapa 5.2). Si a estos municipios se suman los que emitieron hasta 15 mil toneladas se alcanza 68.7% del total nacional. Destaca el caso del municipio de Nava en Coahuila que emitió alrededor de 7% nacional de NO_x , proveniente casi en su totalidad de las fuentes fijas³, principalmente de las plantas de generación de electricidad.

En lo que se refiere a la emisión nacional de SO_x , 38% se concentró en cinco municipios: Tula de

En 1999, cada habitante del país emitió en promedio alrededor de 170 kilogramos de contaminantes atmosféricos.

Allende (Hidalgo), Tuxpan (Veracruz), Manzanillo (Colima), La Unión de Isidoro Montes de Oca (Guerrero) y Nava (Coahuila). En todos

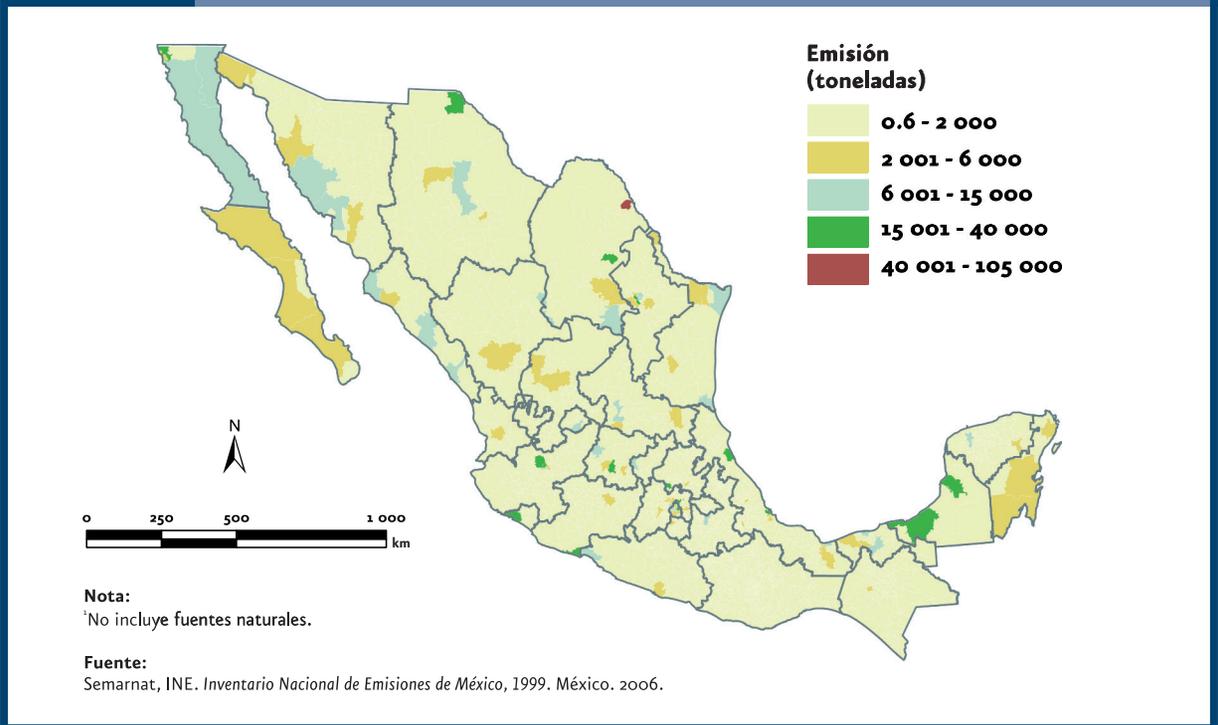
ellos, la mayor parte de las emisiones fueron generadas por las fuentes fijas, en particular por las plantas de generación de electricidad y por refinerías de petróleo (Mapa 5.3). La mayoría de los municipios en el país (95%) emitió entre 0.1 y mil toneladas de SO_x , que representan apenas 3.4% del total.

Por otro lado, los COV se generaron en cantidades que van de las cuatro a las mil toneladas en 83% de los municipios (Mapa 5.4). Los cuatro municipios y delegaciones que emitieron más COV fueron: Guadalajara (Jalisco), Juárez (Chihuahua),

³Fuentes fijas: minería, plantas de generación de electricidad, refinación de petróleo y otros combustibles fósiles, manufactura y otros procesos industriales, comercialización al mayoreo de bienes percederos y otros servicios (servicios educativos, hospitales, servicios de tintorería y lavandería, entre otros).

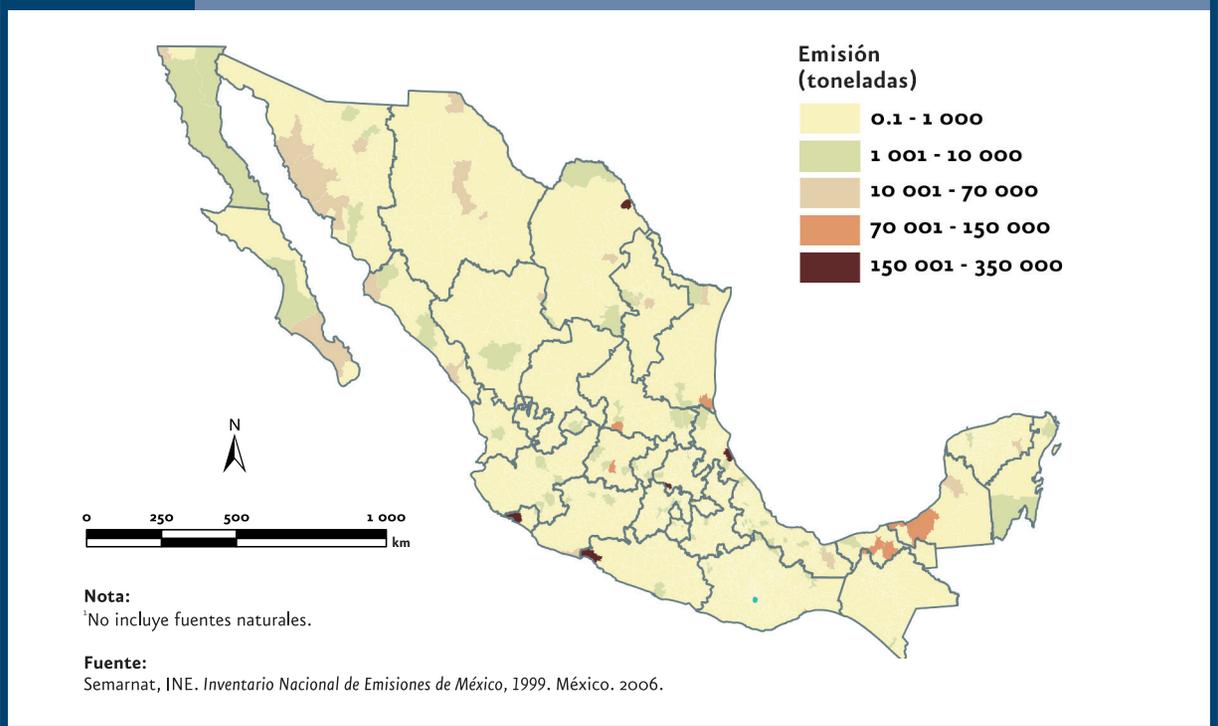
Mapa 5.2

Emisión de óxidos de nitrógeno por municipio¹, 1999



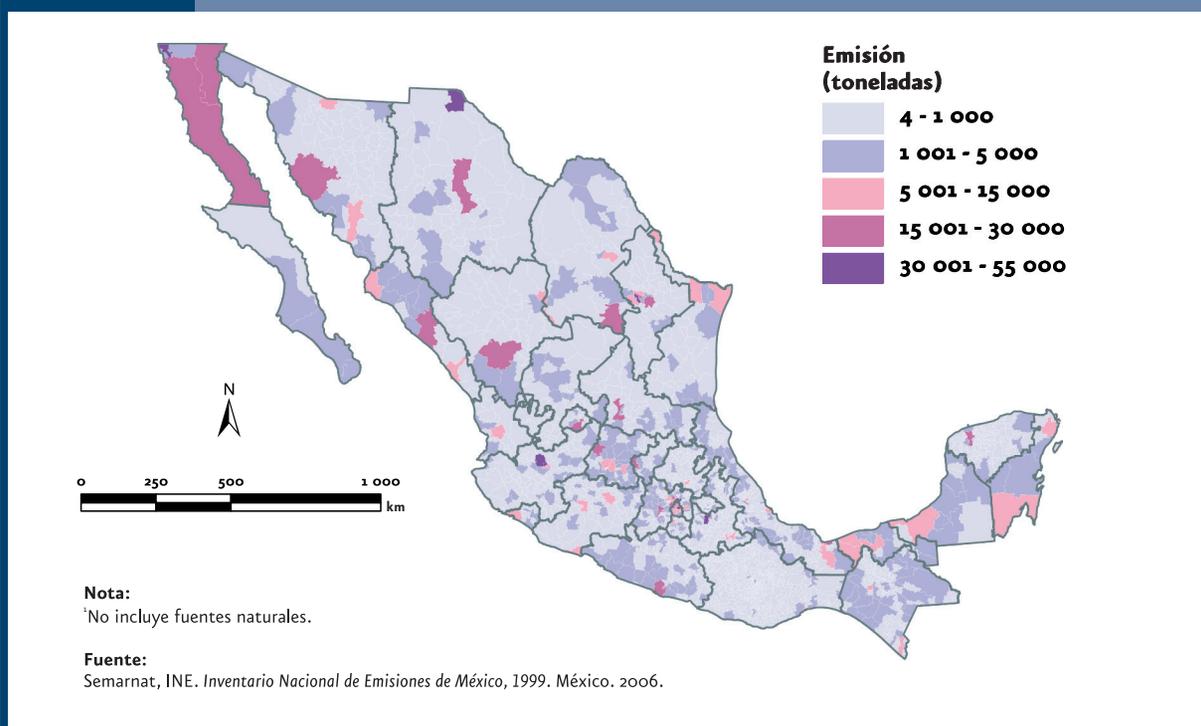
Mapa 5.3

Emisión de óxidos de azufre por municipio¹, 1999



Mapa 5.4

Emisión de compuestos orgánicos volátiles por municipio¹, 1999



Tijuana (Baja California) y Ecatepec de Morelos (México), así como la delegación Iztapalapa del Distrito Federal. Estos municipios y la delegación política generaron poco más de 222 mil toneladas de COV (equivalentes a 8.6% del total emitido), provenientes principalmente de las fuentes de área⁴ y los vehículos automotores.

Las cuatro entidades federativas que reportaron las mayores emisiones de contaminantes atmosféricos en 1999 fueron: México, Veracruz, Distrito Federal y Jalisco.

El CO fue generado en mayor cantidad en municipios pertenecientes a las grandes ciudades donde el número de vehículos es elevado. Los municipios que más CO emitieron fueron: Guadalajara (Jalisco), Ecatepec de Morelos (México), Monterrey (Nuevo León) y Zapopan (Jalisco), así como la delegación de Iztapalapa (Distrito Federal; Mapa 5.5).

En lo que se refiere a las PM₁₀, casi el total de

los municipios del país (98.6%) emitieron entre una y tres mil toneladas, acumulando 71% de la emisión total de este contaminante (Mapa 5.6).

Esto también se observa en el caso de la generación de PM_{2.5}, donde la mayor parte de los municipios (96%) emitieron de una a mil toneladas generando entre todos ellos 56% del total emitido (Mapa 5.7).

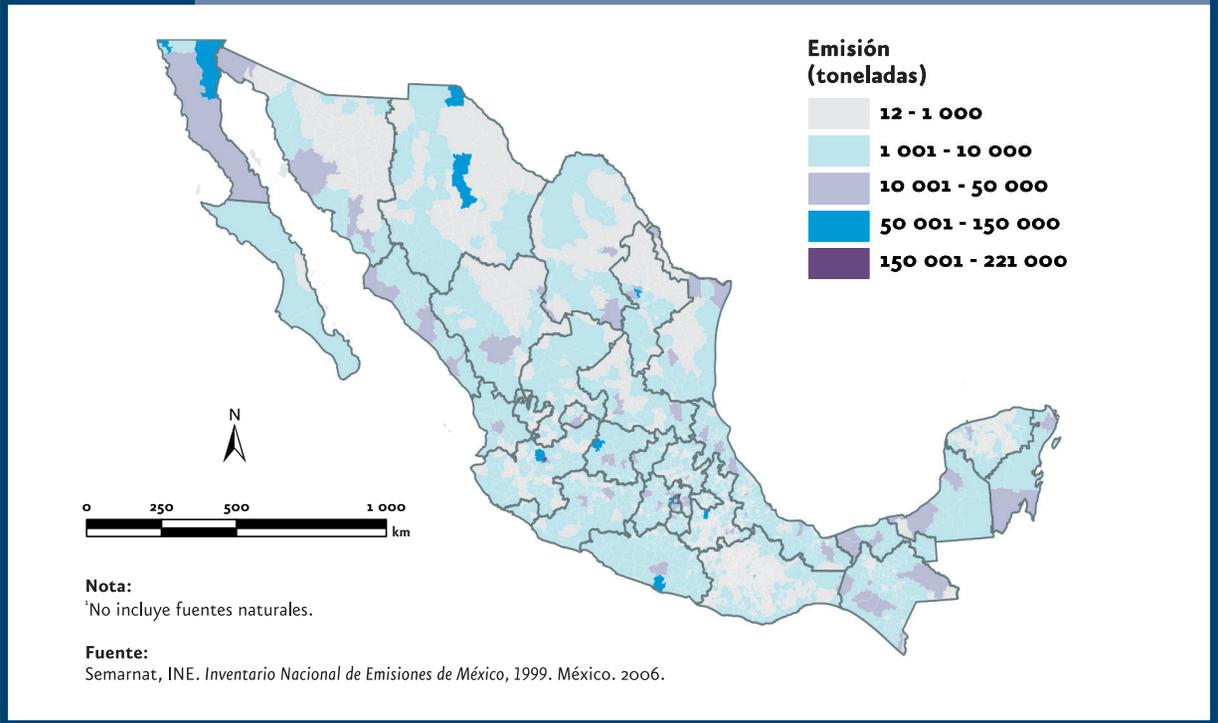
Ambos tipos de partículas fueron generados principalmente por las fuentes fijas y de área presentes en los municipios.

En lo que se refiere al amoníaco (NH₃), producido principalmente por las actividades ganaderas, 97% de los municipios produjeron entre 0.1 y 3 mil toneladas, acumulando un total de 962 mil 386 toneladas (que equivalen a 73.7% del total de NH₃ emitido; Mapa 5.8).

⁴Fuentes de área: combustión industrial de combustibles, otros usos de combustibles, distribución de combustible, uso de solventes, incendios y quemas, polvo fugitivo, fuentes de amoníaco y otras fuentes de área (locomotoras, aeronaves, panaderías y tratamiento de aguas residuales, entre otros).

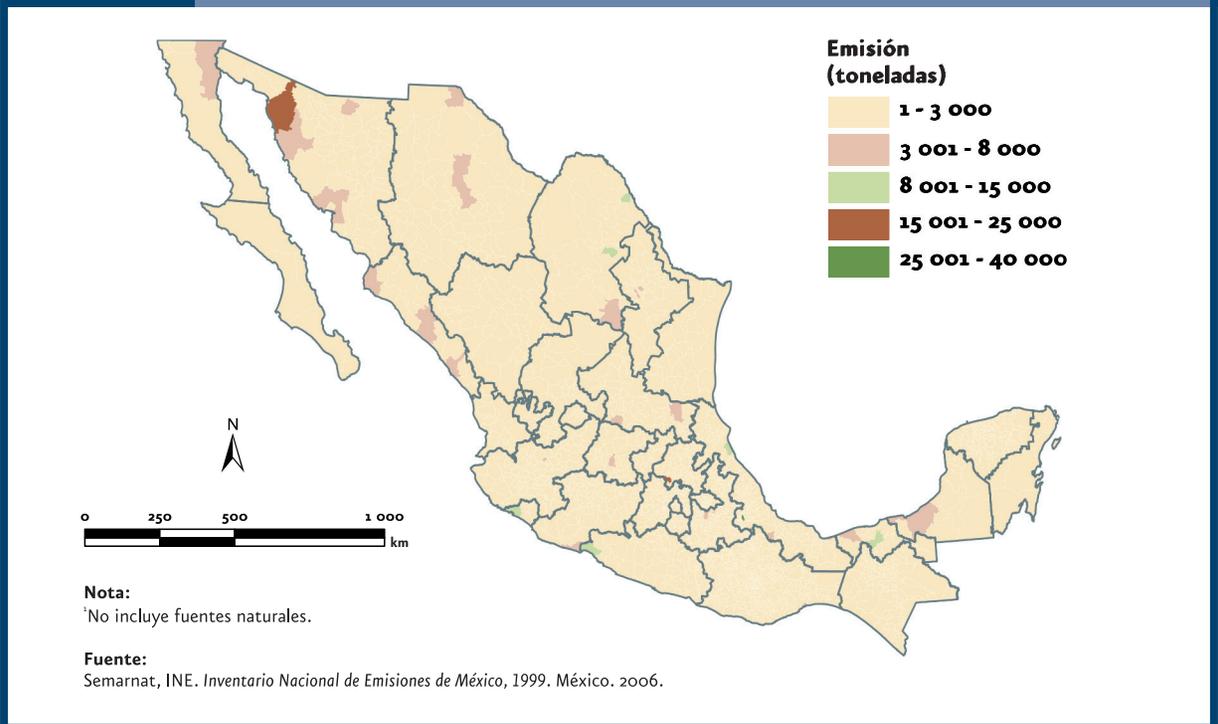
Mapa 5.5

Emisión de monóxido de carbono por municipio¹, 1999



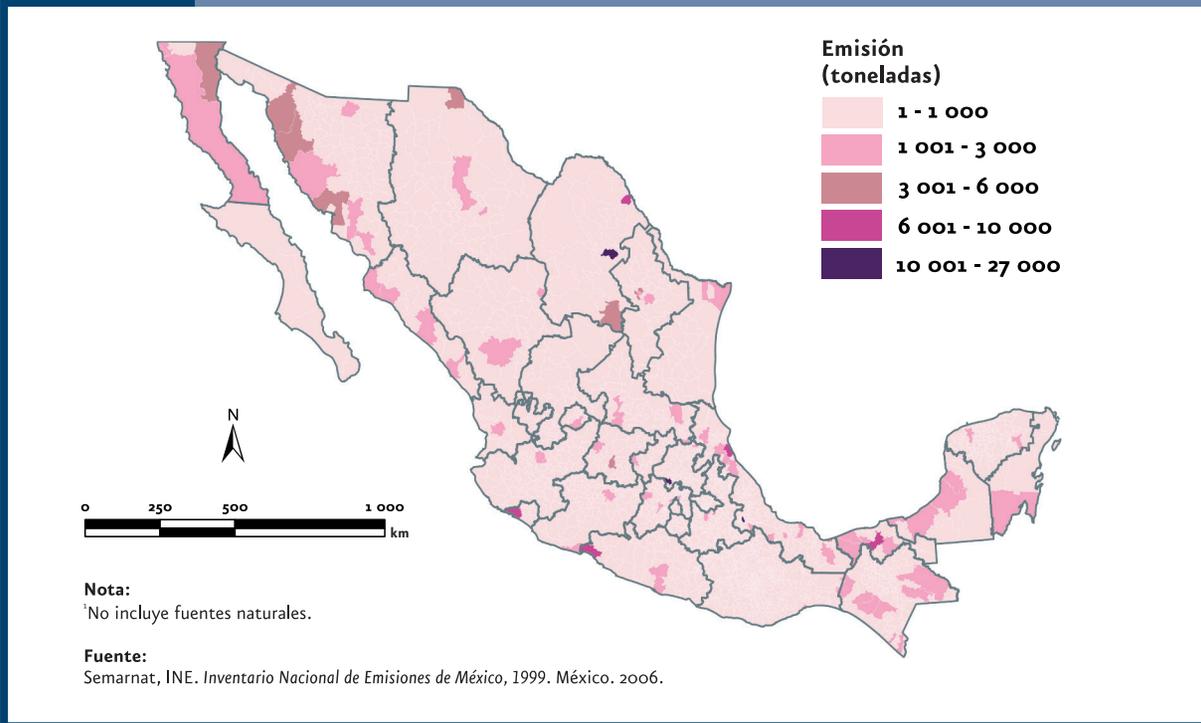
Mapa 5.6

Emisión de partículas menores a 10 micrómetros por municipio¹, 1999



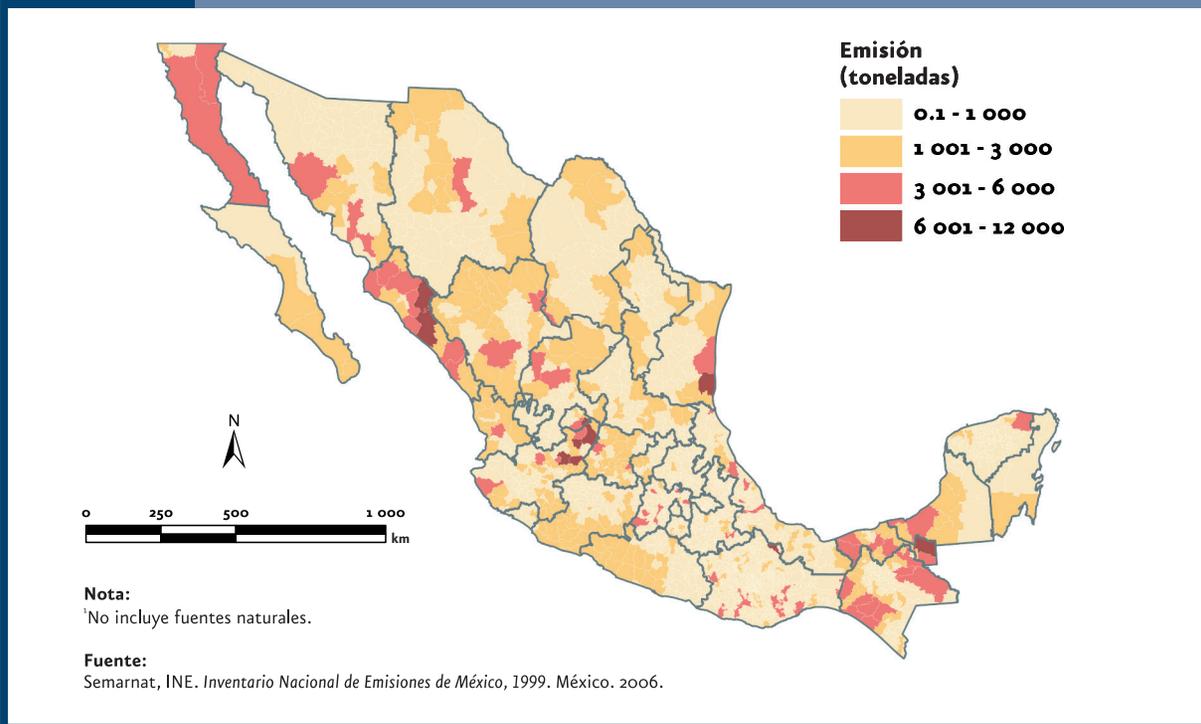
Mapa 5.7

Emisión de partículas menores a 2.5 micrómetros por municipio¹, 1999



Mapa 5.8

Emisión de amoníaco por municipio¹, 1999



Emisiones en la Zona Metropolitana del Valle de México

En la ZMVM se han estimado las emisiones de contaminantes, en intervalos de dos años, para el periodo 1994-2004, lo que permite hacer una descripción de los cambios en las emisiones en este periodo. Los resultados que se enfatizan en esta sección son los obtenidos en 2004, mientras que los cambios ocurridos toman como referencia el año 1994. La información para hacer este análisis fue la publicada en el inventario de emisiones de la ZMVM 2004, la cual incluye el recálculo de todos los años anteriores usando la misma metodología.

En la ZMVM, en el periodo 1994-2004 el CO fue el contaminante que más se emitió (50% del total) no obstante, sus volúmenes de emisión han disminuido.

En el año 2004 en la ZMVM, el transporte emitió el mayor volumen de contaminantes atmosféricos (75%).

Considerando el total de contaminantes emitidos entre 1994 y 2004, hubo una reducción importante entre 1994 y 1998, con cambios menos evidentes desde entonces (Figura 5.5). El CO ha sido consistentemente el contaminante que más se ha emitido, con valores superiores a 50% del total de las emisiones. No obstante, este gas es el que ha mostrado la disminución más drástica en su volumen de emisión, al pasar de 3.8 millones de toneladas en 1994 a 1.8 millones de toneladas en 2004, lo que sugiere que se trata del contaminante que marca la tendencia de las emisiones totales.

En lo que se refiere a las fuentes que generan los contaminantes, en 2004 las móviles generaron el mayor porcentaje (75%) (Figura 5.6). De las emisiones de ese año, producidas por dicha fuente, el CO representó la mayor proporción (83%). Las altas emisiones asociadas a las fuentes móviles pueden deberse a diversos factores, tales como el aumento del número de vehículos en circulación,

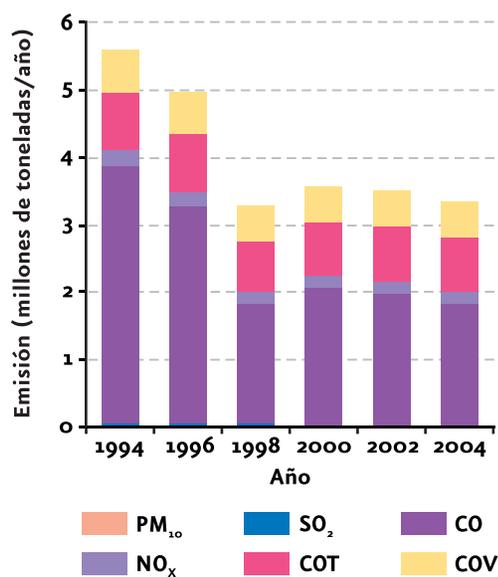
la cantidad de combustible que consumen y la baja proporción de vehículos con tecnologías de control incorporadas (por ejemplo, en el año 2004, 26% de los vehículos a gasolina no contaban aún con sistemas de control de emisiones).

A las fuentes móviles le siguen en importancia las fuentes de área, que emitieron 18.4% del total de los contaminantes. Las fuentes puntuales y la vegetación y el suelo contribuyeron con 6.1% de las emisiones.

El inventario de emisiones en la ZMVM también incluye los volúmenes de gases de efecto invernadero

Figura 5-5

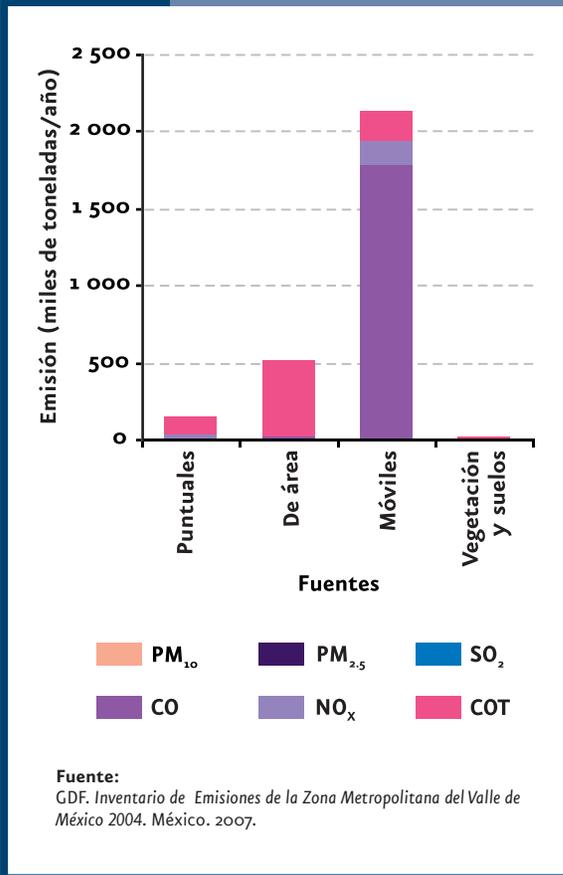
Emisión de contaminantes, en la Zona Metropolitana del Valle de México, 1994 - 2004



Fuente: GDF. Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2004. México. 2007.

Figura 5.6

Emisión de contaminantes atmosféricos por fuente en la Zona Metropolitana del Valle de México, 2004



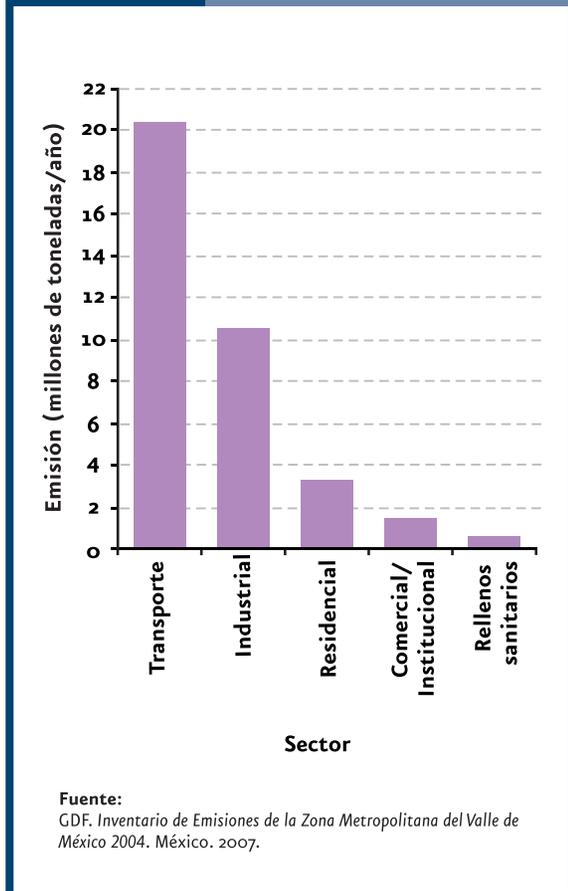
generados por los sectores transporte, industrial, residencial y comercial/institucional, estimados con la metodología propuesta por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). Además, el inventario considera el CO₂ generado por la degradación de los residuos sólidos urbanos en rellenos sanitarios. De acuerdo con este inventario, las emisiones totales de CO₂ en 2004 para la ZMVM ascendieron a 35.8 millones de toneladas, 98% (35.2 millones de toneladas) generadas por la quema de combustibles fósiles por los cuatro sectores considerados y alrededor de 2% (600 mil toneladas) por la degradación de residuos sólidos urbanos en los rellenos sanitarios.

De acuerdo con este inventario, el transporte es el mayor emisor de CO₂ (57% del total), principalmente por el consumo de gasolina; el sector industrial representa 30% de las emisiones, destacando por la combustión de gas natural (26%) y los sectores residencial y comercial/institucional emiten el restante 13% (Figura 5.7; GDF, 2006b).

Además, se emitieron a la atmósfera 235 mil 65 toneladas de metano (CH₄); cabe señalar que este volumen se encuentra considerado dentro de las emisiones antes mencionadas de compuestos orgánicos totales (COT). Alrededor del 95% (223 mil 346 toneladas) del metano se generó en los rellenos sanitarios de la ZMVM.

Figura 5.7

Emisión de CO₂ por sector en la Zona Metropolitana del Valle de México, 2004



Normatividad y monitoreo de la calidad del aire

Los contaminantes atmosféricos tienen efectos negativos sobre la salud de la población, entre ellos las enfermedades respiratorias y los problemas cardiovasculares. Por esta razón, en nuestro país se monitorea la concentración atmosférica de los principales contaminantes: SO_2 , CO, bióxido de nitrógeno (NO_2), ozono (O_3), PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, partículas suspendidas totales (PST) y plomo (Pb). Para cada uno se cuenta con un estándar o norma de calidad del aire que establece las concentraciones máximas que no deben sobrepasarse en un periodo definido, con la finalidad de garantizar la protección adecuada de la salud de la población, inclusive la de los grupos más susceptibles ([Cuadro D3_R_AIRE01_03](#)).

Las normas vigentes de calidad del aire fueron publicadas por la Secretaría de Salud en el Diario Oficial de la Federación en diciembre de 1994; en octubre de 2002

se publicó la modificación a la norma referente a ozono (DOF, 2002) y en septiembre de 2005 la modificación a la norma de partículas, en la que se incluyen por primera vez las $\text{PM}_{2.5}$ (DOF, 2005). Por otro lado, la Semarnat tiene la facultad de expedir las normas oficiales mexicanas que señalan los procedimientos para la medición y calibración del equipo destinado a determinar las concentraciones de los contaminantes, los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera y las especificaciones de los combustibles que se utilizan ([Cuadro D3_R_AIRE01_03](#)).

Los límites que establecen las normas deben estar basados en estudios epidemiológicos, toxicológicos y de exposición que identifiquen los niveles del contaminante capaces de causar un efecto negativo en la salud con un cierto margen de seguridad. Sin embargo, en nuestro país, debido principalmente a la falta de recursos para realizar los estudios mencionados, así como

a la gravedad del problema a principios de los años noventa, las normas de calidad del aire mexicanas tuvieron como base la revisión de normas establecidas por la Organización Mundial de la Salud y por la Agencia Ambiental de los Estados Unidos y no estudios particulares sobre la población de México.

Para conocer la concentración de contaminantes, se han establecido estaciones y redes de monitoreo atmosférico. Actualmente se cuenta con registros de contaminantes atmosféricos en 53 zonas metropolitanas y poblaciones (Mapa 5.9; [Cuadro D3_AIRE01_02](#); **IB 1.1-8**; **IC 7**). En todas ellas los contaminantes se miden aplicando procedimientos estandarizados a nivel internacional. La red más completa y antigua se localiza en la ZMVM, que cuenta con 36 estaciones

de monitoreo automático (EMA) y 13 estaciones de monitoreo manuales, que registran, entre otras variables, las concentraciones de O_3 , CO, SO_2 , NO_2 , PM_{10} y PST, considerados como

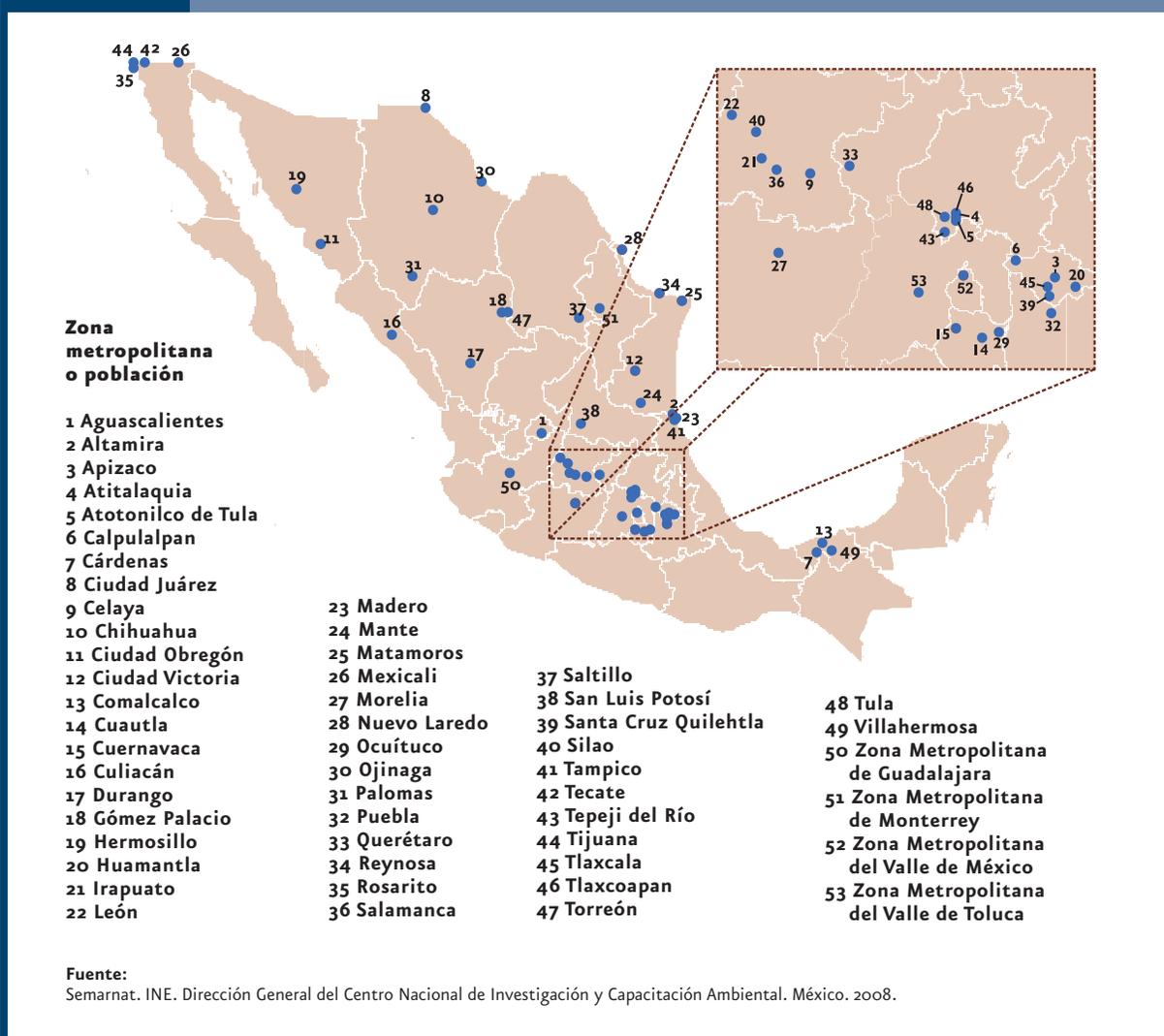
contaminantes criterio y de los cuales se tiene más información acerca de sus efectos sobre la salud. Debido a que la concentración de plomo en la ZMVM ha disminuido significativamente y se considera que está bajo control, no se incluye en este reporte.

Otras ciudades que cuentan con redes de monitoreo importantes y con registros relativamente antiguos (mediados de los noventa) son las zonas metropolitanas de Guadalajara, Monterrey, Toluca y ciudades fronterizas como Tijuana, Mexicali y Ciudad Juárez. Algunas ciudades se concentran en evaluar alguno o varios contaminantes de importancia local, como es el caso de la mayoría de las ubicadas en Hidalgo, Ciudad Obregón y Naco en Sonora, que se enfocan en la medición de partículas, mientras que en Matamoros se registran SO_2 y PM_{10} , sólo por citar algunos ejemplos. La lista completa de las estaciones de monitoreo y los contaminantes registrados se pueden consultar en el [Cuadro D3_AIRE01_02](#).



Mapa 5.9

Zonas metropolitanas o poblaciones con monitoreo de la calidad del aire, 2008



Con el fin de hacer más comprensible el nivel de contaminación del aire, en México se ha usado un índice conocido como Imeca (Índice Metropolitano de la Calidad del Aire), que consiste en una transformación de las concentraciones del contaminante a un número adimensional. En la escala utilizada por el Imeca, los valores están determinados en múltiplos de 50 Imeca ([Cuadro D3_R_AIRE01_04](#)).

La difusión del Imeca se inició en 1986 a través de diversos medios y actualmente se difunde por la radio, la prensa, la televisión y la Internet. Sin

embargo, al no existir un documento oficial que definiera el significado y utilidad del Imeca, así como los lineamientos para su generación, uso y difusión, se generó una falta de homologación de sus procedimientos entre los distintos generadores. Esto llevó a que en el Distrito Federal se elaborara la norma ambiental NADF-009-AIRE-2006 (GDF, 2006a), que establece los lineamientos que debe cumplir el Imeca. Dicha norma tiene aplicación en el Distrito Federal y se extiende a los municipios conurbados del Estado de México que comprenden la ZMVM. En este sentido, el Imeca tiene como objetivo

informar a la población de manera clara, oportuna y continua, sobre los niveles de contaminación atmosférica, los probables daños a la salud y las medidas de protección que puede tomar. Con esta nueva reglamentación la difusión del Imeca se realiza por medio de colores y calificativos sobre la calidad del aire de acuerdo con el grado de riesgo que represente para la salud humana (Tabla 5.1). El Imeca representa una herramienta muy valiosa para la evaluación inmediata durante la ocurrencia de episodios de contaminación del aire y facilita la comunicación de los mismos a la población. Sin embargo, para analizar el comportamiento histórico de la calidad del aire o el cumplimiento de las normas de calidad del aire en una región determinada, es más recomendable utilizar indicadores que se generen a partir de las bases de datos validadas por las redes de monitoreo atmosférico y con la aplicación de los mismos criterios durante el procesamiento de la información (INE, 2007).

Con base en los valores del Imeca, las autoridades pueden declarar una contingencia ambiental, que se refiere a una situación eventual y transitoria, en la que la concentración de contaminantes en la atmósfera alcanza niveles dañinos a la salud de la población en general. Algunas de las ciudades y zonas industriales que cuentan con programas de contingencias ambientales por contaminación atmosférica son el Valle de México, Guadalajara, Monterrey y Salamanca. En la ZMVM la última vez que se declaró una contingencia ambiental por ozono fue en el año 2002 y por PM_{10} en 2005.

En el Valle de México, algunas de las medidas que se aplican durante una contingencia son la suspensión de: actividades deportivas, cívicas y de recreo al aire libre, quemas a cielo abierto, actividades de bacheo y pintado, restricción a la circulación vehicular adicional al programa Hoy No Circula y restricción a la actividad industrial, entre otras.

Tabla 5.1 Interpretación del Imeca		
Imeca	Condición	Efectos a la salud
0 – 50	Buena	Adecuada para llevar a cabo actividades al aire libre.
51 – 100	Regular	Posibles molestias en niños, adultos mayores y personas con enfermedades.
101 – 150	Mala	Causante de efectos adversos a la salud de la población, en particular los niños y los adultos mayores con enfermedades cardiovasculares o respiratorias como el asma.
151 – 200	Muy mala	Causante de mayores efectos adversos a la salud de la población en general, en particular los niños y los adultos mayores con enfermedades cardiovasculares o respiratorias como el asma.
> 200	Extremadamente mala	Causante de efectos adversos a la salud de la población en general. Se pueden presentar complicaciones graves en los niños y los adultos mayores con enfermedades cardiovasculares o respiratorias como el asma.

Fuente:

GDF. Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. Imeca. 2008. Disponible en: www.sma.df.gob.mx/simat/pnimeca.htm Fecha de consulta: 04-11-2008.

Calidad del aire en las ciudades del país

Existen diversas formas de abordar el análisis de la calidad del aire. Este capítulo se enfoca en las principales ciudades del país que cuentan con información confiable que permite un análisis adecuado, para ello se utilizó el número de días al año en los que se excede el valor de la norma asociada a cada contaminante. Dicha información se acompaña de las tendencias de los promedios anuales de las concentraciones de PM_{10} , SO_2 , O_3 , NO_2 y CO ⁵. Los días en que se excede el valor de la norma reflejan la magnitud del problema, ya

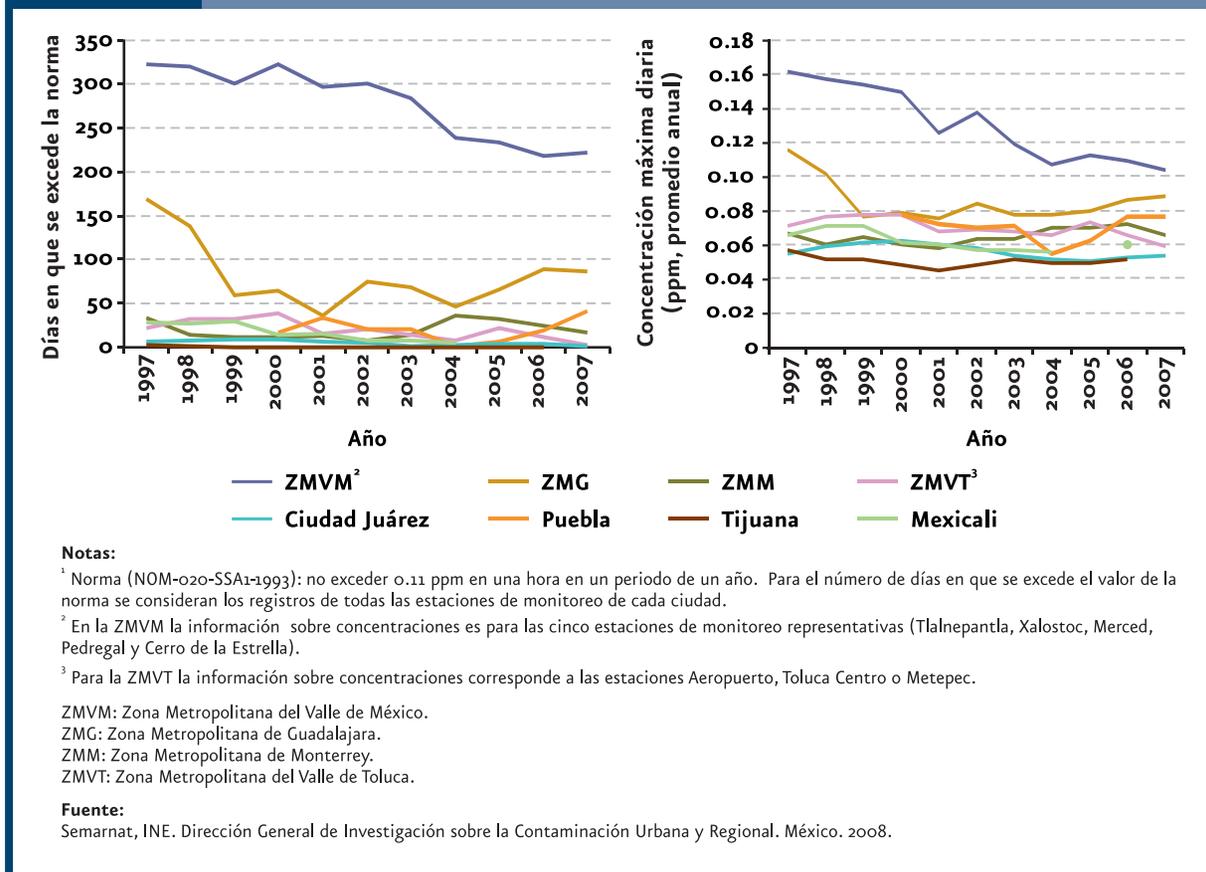
que muestran la frecuencia con la que se rebasa el umbral definido para proteger la salud; además, junto con las tendencias de los promedios anuales de las concentraciones, permiten tener una visión de la dinámica temporal de la calidad del aire y son un medio para evaluar la efectividad de las medidas que se toman para controlar el problema.

Si se examina la frecuencia con la que se exceden los límites establecidos en las normas, es evidente que los dos contaminantes más importantes en el país son el O_3 (Figura 5.8; IB 1.1-7) y las PM_{10} (Figura 5.9; IB 1.1-5), ya que todas las ciudades



Figura 5.8

Número de días en que se excede el valor de la norma horaria de ozono¹ y promedio anual de las concentraciones máximas diarias, 1997 - 2007



⁵Promedios de 24 horas para PM_{10} y SO_2 ; concentraciones máximas diarias para O_3 y NO_2 y concentraciones máximas diarias de los promedios móviles de 8 horas para CO .

rebasaron al menos una vez al año las concentraciones máximas permitidas. El O_3 es el principal problema en la ZMVM, ya que el número de días que se rebasa la norma horaria (0.11 ppm) aún es elevado (222 días en 2007, que representan 61% del año), aunque es considerablemente más bajo hoy día si se compara con los registros de finales de los noventa, cuando se mantuvieron alrededor de 86%. La ZMG disminuyó la frecuencia con la que excede la norma de O_3 de 169 días en 1997 a 87 días en 2007. Las demás ciudades mantuvieron valores inferiores a 41 días en el año 2007. Las ZMVM y

Los dos principales contaminantes en el país son el O_3 y las PM_{10} , ya que todas las ciudades para las que existe información rebasaron al menos una vez al año las concentraciones máximas permitidas.

ZMG muestran una tendencia muy clara de reducción de los promedios anuales de las concentraciones diarias de O_3 , aunque la ZMG volvió a mostrar un incremento a partir del año 2004. En el resto de las ciudades las

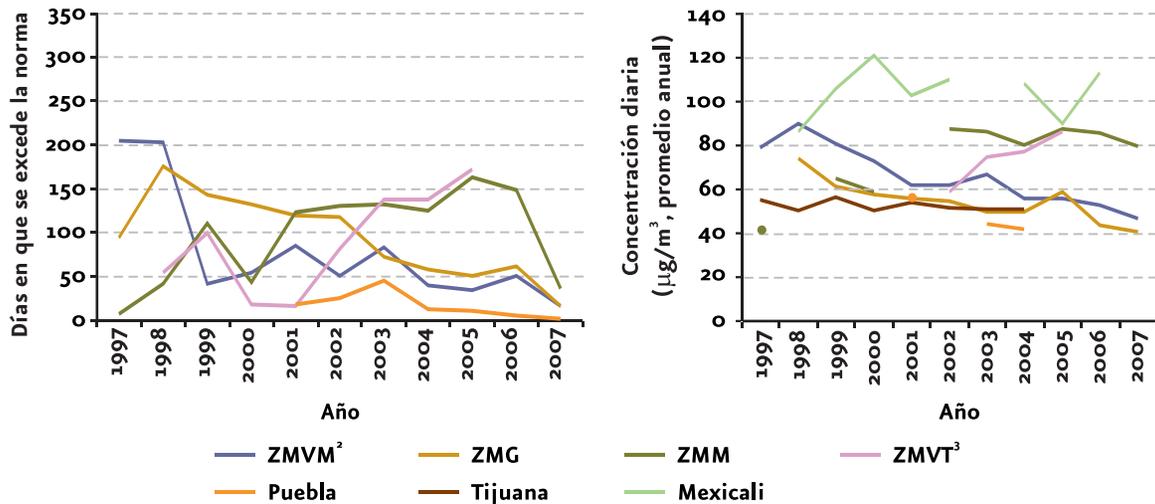
concentraciones se mantienen relativamente constantes con pequeñas variaciones (Figura 5.8; **IB 1.1-7**).



En el caso de las PM_{10} , la ZMVM ha dejado de ser la zona que excede con más frecuencia el límite establecido en la norma diaria (120 $\mu g/m^3$, 24 horas), ya que redujo su ocurrencia de 206

Figura 5.9

Número de días en que se excede el valor de la norma de 24 horas de partículas menores a 10 micrómetros² y promedio anual de las concentraciones diarias, 1997 - 2007



Notas:

¹ Modificación a la NOM-025-SSA1-1993: no exceder 120 $\mu g/m^3$ en 24 horas en más del 2% de las mediciones realizadas. Para el número de días en que se excede el valor de la norma se consideran los registros de todas las estaciones de monitoreo de cada ciudad.

² En la ZMVM la información sobre concentraciones es para las cinco estaciones de monitoreo representativas (Tlalnepantla, Xalostoc, Merced, Pedregal y Cerro de la Estrella).

³ Para la ZMVT la información sobre concentraciones corresponde a las estaciones Aeropuerto, Toluca Centro o Metepec.

ZMVM: Zona Metropolitana del Valle de México.

ZMG: Zona Metropolitana de Guadalajara.

ZMM: Zona Metropolitana de Monterrey.

ZMVT: Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

Fuente:

Semarnat, INE. Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana y Regional. México. 2008.

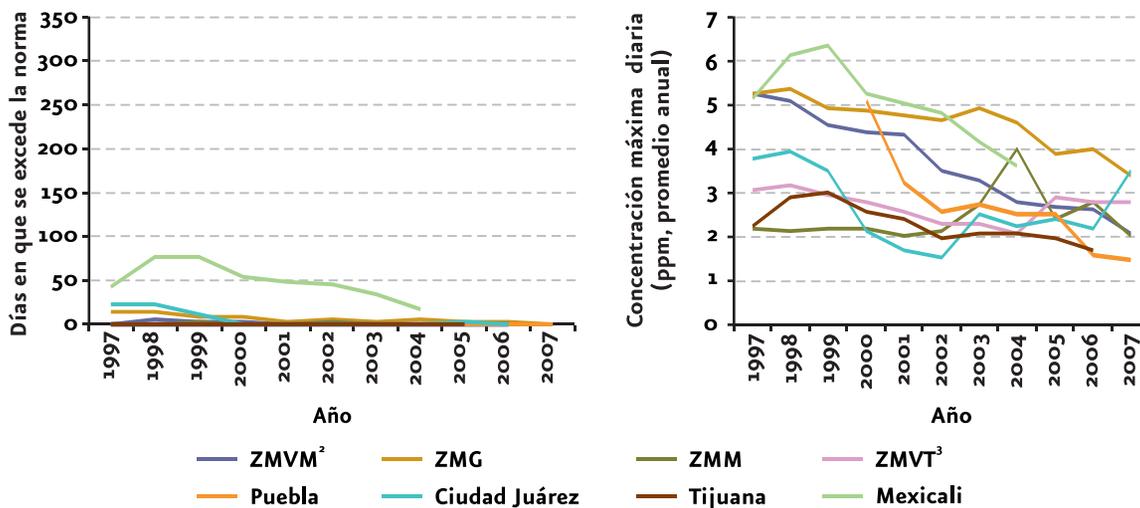
días (56%) en 1997 a sólo 17 días (5%) en 2007. En contraste, en el año 2005, la ZMVT rebasó la norma correspondiente 173 días (47%), mostrando una tendencia creciente en el número de días en los que se excede el valor de la norma (Figura 5.9; **IB 1.1-5**). En el caso de la ZMG, su tendencia es a la baja, registrándose 17 días por arriba de la norma en 2007. Los promedios anuales de las concentraciones diarias también disminuyeron: a partir de 1999 la ZMVM reporta concentraciones menores que las detectadas en la ZMM e incluso en varios años que las de ZMVT y Mexicali. Se observa un incremento en la ZMVT y ZMM, en contraste con la disminución registrada en la ZMG a partir de 1999. Por otro lado, Puebla registra valores por debajo de las cifras reportadas en las ciudades arriba mencionadas (Figura 5.9; **IB 1.1-5**).

La contaminación por CO no es actualmente un problema, a pesar de los valores tan altos de emisión (véase el Recuadro *Inventarios locales de emisiones*), ya que en 2007 ninguna ciudad reportó días fuera de la norma (Figura 5.10; **IB 1.1-3**). Los promedios anuales de las concentraciones diarias de este contaminante han disminuido en los últimos años en la mayoría de las ciudades que cuentan con información.

El SO₂ también parece estar controlado en casi todas las ciudades en las que se mide, ya que de 2003 a la fecha ninguna ciudad registró días por arriba del valor de la norma, con excepción de ZMM y Salamanca, que en el año 2005 reportaron 1 y 29 días respectivamente (Figura 5.11; **IB 1.1-6**). En todas las ciudades se observan concentraciones

Figura 5.10

Número de días en que se excede el valor de la norma de monóxido de carbono¹ y promedio anual de las concentraciones máximas diarias, 1997 - 2007



Notas:

¹ Norma (NOM-021-SSA1-1993): no exceder 11 ppm en promedio móvil de 8 horas una vez al año. Para el número de días en que se excede el valor de la norma se consideran los registros de todas las estaciones de monitoreo de cada ciudad.

² En la ZMVM la información sobre concentraciones es para las cinco estaciones de monitoreo representativas (Tlalnepantla, Xalostoc, Merced, Pedregal y Cerro de la Estrella).

³ Para la ZMVT la información sobre concentraciones corresponde a las estaciones Aeropuerto, Toluca Centro o Metepec.

ZMVM: Zona Metropolitana del Valle de México.

ZMG: Zona Metropolitana de Guadalajara.

ZMM: Zona Metropolitana de Monterrey.

ZMVT: Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

Fuente:

Semarnat, INE. Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana y Regional. México. 2008.

diarias relativamente bajas; sólo Salamanca reporta niveles altos.

El problema de la contaminación por NO_2 ha disminuido de manera importante, en 2007 sólo la ZMG reportó exceder la norma 23 días (Figura 5.12;



IB 1.1-4). De la misma manera, la concentración de NO_2 muestra una tendencia a la baja desde finales de los años noventa en la ZMVM y ZMG; mientras que el resto de las ciudades mantienen relativamente constantes sus niveles, aunque siempre por debajo del Valle de México y Guadalajara.

Si bien hoy en día existen estaciones de monitoreo de los principales contaminantes en otras ciudades,

no son suficientes para contar con una cobertura nacional y en algunos casos la información aún no tiene las características necesarias para hacer un análisis confiable.

En el caso del monitoreo de la lluvia ácida, aún no se cuenta con información a nivel nacional para evaluar la

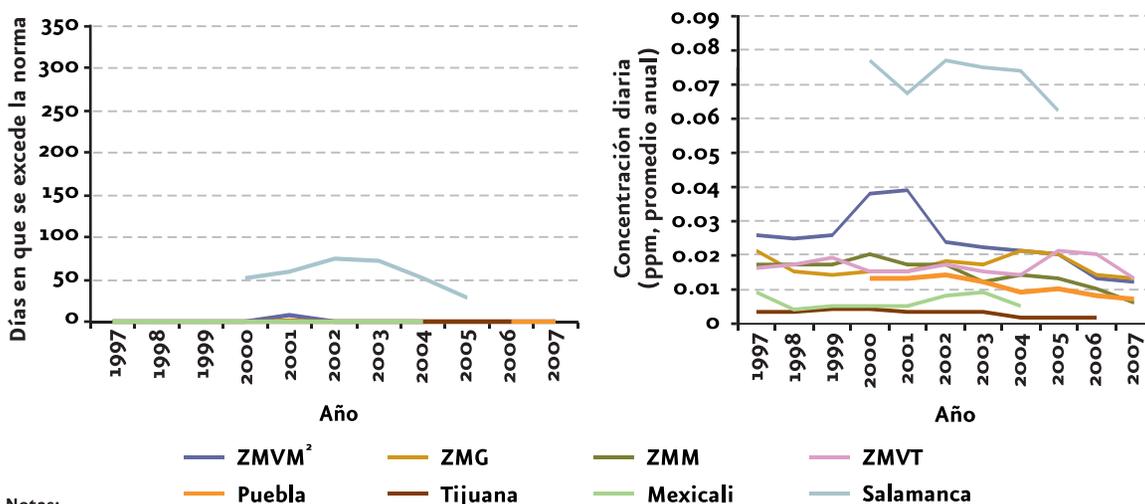
situación, sin embargo en la ZMVM ya existe una red de monitoreo que cuenta con datos históricos (ver Recuadro *Lluvia ácida: causas y consecuencias*).

El análisis de las tendencias de los principales contaminantes, sugiere que en general la calidad del aire en las principales ciudades del país ha mejorado. A pesar de que en la ZMVM la calidad del aire aún es deficiente, en particular debido a los niveles que alcanza el O_3 , es importante resaltar

Las concentraciones y el número de días en que se exceden las normas de CO , SO_2 y NO_2 han disminuido significativamente en la mayoría de las ciudades monitoreadas.

Figura 5.11

Número de días en que se excede el valor de la norma de 24 horas de bióxido de azufre¹ y promedio anual de las concentraciones diarias, 1997 - 2007



Notas:

¹ Norma (NOM-022-SSA1-1993): no exceder 0.13 ppm en 24 horas una vez al año. Para el número de días en que se excede el valor de la norma se consideran los registros de todas las estaciones de monitoreo de cada ciudad.

² En la ZMVM la información sobre concentraciones es para las cinco estaciones de monitoreo representativas (Tlalnepantla, Xalostoc, Merced, Pedregal y Cerro de la Estrella).

ZMVM: Zona Metropolitana del Valle de México.

ZMG: Zona Metropolitana de Guadalajara.

ZMM: Zona Metropolitana de Monterrey.

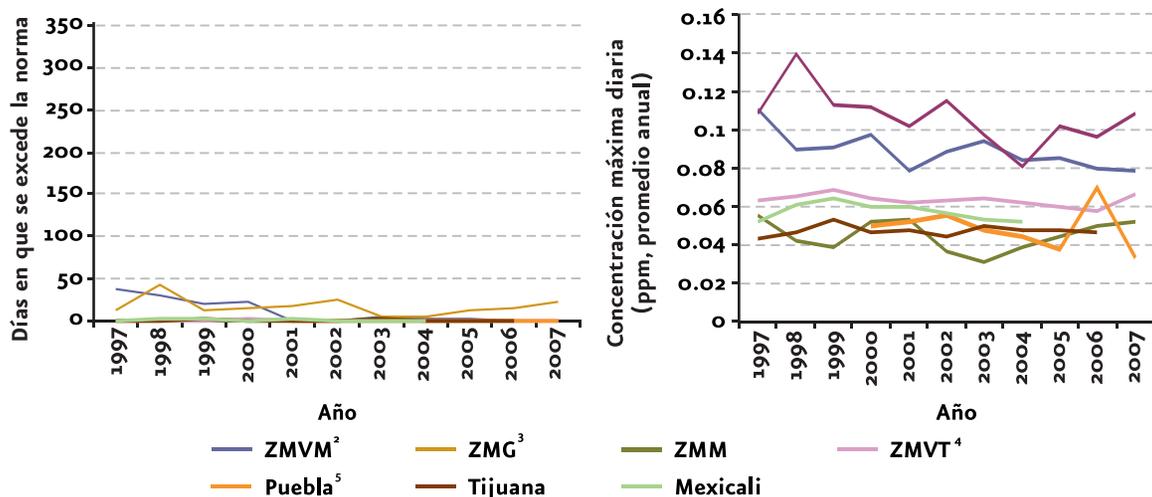
ZMVT: Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

Fuente:

Semarnat, INE. Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana y Regional. México. 2008.

Figura 5.12

Número de días en que se excede el valor de la norma horaria de bióxido de nitrógeno¹ y promedio anual de las concentraciones máximas diarias, 1997 - 2007



Notas:

¹ Norma (NOM-023-SSA1-1993): no exceder 0.21 ppm en una hora una vez al año. Para el número de días en que se excede el valor de la norma se consideran los registros de todas las estaciones de monitoreo de cada ciudad.

² En la ZMVM la información sobre concentraciones es para las cinco estaciones de monitoreo representativas (Tlalnepantla, Xalostoc, Merced, Pedregal y Cerro de la Estrella).

³ En el caso de ZMG no se considera la información sobre concentraciones de las estaciones LDO y ATM en 1997 y la de LDO de 1996, ya que no cumplen con el porcentaje de datos requeridos.

⁴ Para la ZMVT la información sobre concentraciones corresponde a las estaciones Aeropuerto, Oxtotitlán, Toluca Centro, Metepec y San Mateo Atenco.

⁵ En Puebla, el área eliminó la información sobre concentraciones de la estación Serdán del 2000, pues no tiene un comportamiento típico.

ZMVM: Zona Metropolitana del Valle de México.

ZMG: Zona Metropolitana de Guadalajara.

ZMM: Zona Metropolitana de Monterrey.

ZMVT: Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

Fuente:

Semarnat, INE. Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana y Regional. México. 2008.

el hecho de que se presenta una tendencia a la baja en la concentración de los contaminantes y el número de días en los que se exceden las normas. Sin duda, la eliminación del plomo de la gasolina, la reducción del contenido de azufre, tanto de la gasolina como del diesel, la introducción al mercado de gasolina oxigenada y reformulada, el establecimiento de límites de emisión más estrictos para los vehículos nuevos, así como la adopción de tecnologías vehiculares cada vez más eficientes, han contribuido de manera significativa a que el plomo ya no sea un problema de contaminación en el aire y que los niveles de SO₂, CO y NO₂ raramente sobrepasen los valores de las normas.

Como respuesta al problema de la contaminación del aire, el gobierno federal -en coordinación

con autoridades estatales y municipales y con la participación del sector académico- a establecido programas para mejorar la calidad del aire conocidos como Proaires. Estos programas representan uno de los principales instrumentos desarrollados para revertir las tendencias de deterioro. Además, incorporan una visión de mediano y largo plazos y proponen acciones concretas para la reducción y control de las emisiones (Semarnap-INE, 2000; Semarnat, 2003). Los Proaires se han aplicado en zonas metropolitanas que por sus características, como número de habitantes, actividades industriales, parque vehicular y condiciones climáticas y geográficas, entre otras, presentan los mayores problemas de contaminación atmosférica. Las zonas metropolitanas para las que se ha desarrollado por lo menos un Proaire

La lluvia, deposición o precipitación ácida son términos que se refieren a la caída de compuestos ácidos que se forman a partir de la reacción química entre sus precursores -dióxido de azufre (SO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x)- y la humedad atmosférica. Los ácidos sulfúrico y nítrico que se forman se depositan en construcciones y monumentos, vegetación, suelo y aguas superficiales y subterráneas a través de gases o partículas (deposición seca) o de lluvia, nieve o niebla (deposición húmeda). Para detectar la presencia de lluvia ácida en una región determinada, se utiliza como referencia el valor de pH del agua de lluvia, que es de 5.65.

Los precursores de la lluvia ácida provienen de fuentes naturales, como los volcanes y la materia orgánica en descomposición, o de fuentes antropogénicas relacionadas con la quema de combustibles fósiles en la industria, la generación de energía y el sector transporte (EPA, 2008). Los efectos de la deposición ácida (seca y húmeda) dependen de diversos factores, como el nivel de acidez del agua, la composición química y la capacidad de amortiguamiento de los materiales donde cae, así como la susceptibilidad de la vegetación y de los organismos expuestos a ella (INE, 2008).

Efectos de la lluvia ácida

La lluvia ácida puede afectar prácticamente a todos los ecosistemas. Llega a los cuerpos de agua directamente por los eventos pluviales o por las escorrentías de las zonas aledañas

(EPA, 2008). Puede producir la acidificación de lagos y arroyos con baja capacidad de amortiguamiento. Las escorrentías pueden arrastrar elementos tóxicos como el aluminio, el cual agrava el problema de la acidificación de las aguas porque afecta directamente a los organismos (Xu y Ji, 2001). Los lagos que tienen pH entre 6 y 8 pueden amortiguar el efecto ácido de la lluvia; mientras que en los que son naturalmente ácidos, la capacidad de amortiguamiento se ve disminuida (EPA, 2008).

La acidificación de los cuerpos de agua tiene diversas consecuencias en las redes tróficas. Por ejemplo, se ha observado la disminución de las poblaciones de invertebrados acuáticos así como del peso y talla de los peces (EPA, 2008). Esto a su vez impacta el éxito reproductivo y la abundancia de la aves que se alimentan de ellos (Graveland, 1998).

En los ecosistemas terrestres la acidez de la lluvia disuelve los nutrientes antes de que las plantas puedan aprovecharlos, provoca daños en las hojas y alteraciones fotosintéticas y en la fisicoquímica del suelo (Calva *et al.*, 1991; Saavedra-Romero *et al.*, 2003). Entre 7 y 17% de los ecosistemas terrestres del mundo están en riesgo crítico de acidificación (Bouwman *et al.*, 2002).

En México se han realizado diversos estudios para evaluar el efecto de la lluvia ácida en los ecosistemas, particularmente en los bosques que rodean a la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). En el Parque Nacional

del Desierto de los Leones, en los bosques de *Abies religiosa* se registró un pH¹ de entre 5.11 y 6.64 (Saavedra-Romero *et al.*, 2003). Esta acidez está relacionada con diferentes tipos de daño a la vegetación como pérdida de hojas y ramas, necrosis foliar, clorosis, descortezamiento y deficiencia nutrimental (Saavedra-Romero *et al.*, 2003). Otro estudio registró pH promedio de 4.91 en otra zona del Desierto de los Leones y de 4.72 y 5.32 en bosques con dominancia de encinos en Chapa de Mota y San Luis Ayucan al noreste del Valle de México (Velasco-Saldaña *et al.*, 2002).

Además del efecto en los ecosistemas boscosos, la lluvia ácida también está dañando a la roca caliza de edificios y monumentos históricos. Por ejemplo, en la zona arqueológica de El Tajín, en Veracruz, se registraron valores de pH menores a 5.62 en 85% de los eventos de lluvia comprendidos en el muestreo. El Tajín está rodeado de fuentes potenciales de precursores de lluvia ácida con alto contenido de azufre (plantas eléctricas y refinerías), los cuales son transportados por las corrientes de viento que usualmente atraviesan el sureste del Golfo de México (Bravo *et al.*, 2006).

Monitoreo de la lluvia ácida en la ZMVM

A nivel nacional no hay un programa de monitoreo específico para la lluvia ácida; sin embargo, en la década de los ochenta se realizaron las primeras investigaciones sobre su presencia, caracterización y efectos

en la ZMVM. En 1987 comenzó su monitoreo sistematizado, pero es hasta 2001 que se consolidó la Red de Depósito Atmosférico (Redda), y posteriormente se integró al Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (Simat). En el año 2006, la ReddaA estaba formada por 16 estaciones de monitoreo distribuidas en las áreas urbana, rural y de conservación ecológica de toda la ZMVM. Actualmente en estas estaciones se registra el pH y la concentración de iones presentes en la deposición húmeda (Muñoz Cruz *et al.*, 2008).

Los registros históricos en la ZMVM entre 1987 y 1993 indican que en los primeros años del monitoreo, el pH registraba valores menos ácidos y fue en 1989, cuando se registró el valor más ácido (3.4; INE, 2005). Datos más recientes de la Redda muestran valores de pH en un rango de 3.65 a 7.58 en 2006 y de 3.89 a 9.36 en 2007 (GDF, 2008). Con respecto a las emisiones de precursores de lluvia ácida, el Inventario de Emisiones 2004 señala que las emisiones de SO₂ y NO_x son mayores en la regiones centro, noreste y noroeste, lo cual está asociado con la mayor afluencia vehicular y la mayor concentración de industrias asentadas en estas zonas (GDF, 2006).

Durante la mayor parte del año, la dirección predominante de los vientos en la ZMVM es de norte a sureste. Esto propicia que los precursores de lluvia ácida que se emiten en la parte norte sean trasladados a la región sur de la Ciudad de México, donde las condiciones de presión y temperatura

favorecen la condensación de la humedad atmosférica, dando lugar a la precipitación pluvial con mayor acidez en las zonas agrícolas y forestales (GDF, 2006).

Nota:

¹ Es una medida que determina la acidez o alcalinidad de cualquier solución. La escala va de 0 (ácido) a 14 (básico). El 7 es neutro.

Referencias:

Bravo, H. R. Soto, R. Sosa, P. Sánchez, A. L. Alarcón, J. Kahl y J. Ruíz. Effect of acid rain on building material of the El Tajín archaeological zone in Veracruz, México. *Environmental Pollution* 144: 655-660. 2006.

Bouwman, A. F., D. P. Van Vuuren, R. G. Derwent y M. Posch. A global analysis of acidification and eutrophication of terrestrial ecosystems. *Water, Air, and Soil Pollution* 141: 349-382. 2002.

Calva, V. G., V. C. Flores., R. German., L. V. Ruz, R. M. Sánchez., T. A. Soto y R. Vázquez. Un fenómeno degradatorio de los bosques del Valle de México, la lluvia ácida. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 7: 105. 1991.

EPA. *Lluvia ácida*. Disponible en: www.epa.gov/acidrain/spanish/index.html Fecha de consulta: 05-12-2008.

GDF. *Inventario de emisiones a la atmósfera de la Zona Metropolitana del Valle de México 2004*. México. 2006. Disponible en: www.sma.df.gob.mx/sma/index.php?opcion=10 Fecha de consulta: 05-12-2008.

GDF. SIMAT. Disponible en: www.sma.df.gob.mx/simat/home_base.php Fecha de consulta: 02-12-2008.

Graveland, J. Effects of acid rain on bird populations. *Environmental Review* 6:41-54. 1998.

INE. Aire. 2005. Disponible en: www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/16/parte4_17.html Fecha de consulta: 05-12-2008.

INE. *Lluvia ácida*. Disponible en: www.ine.gob.mx/dgicur/calaire/lluvia_acida.html Fecha de consulta: 05-12-2008.

Muñoz-Cruz, R., G. S. López-Venegas y A. Campos-Díaz. *Estado de la lluvia ácida en la zona metropolitana del Valle de México*. 2008. Disponible en: www.sma.df.gob.mx/simat/pdf/edo_lluvia_acida_zmvm.pdf Fecha de consulta: 02-12-2008.

Saavedra-Romero, D. Alvarado-Rosales, J. Vargas-Hernández y T. Hernández-Tejeda. Análisis de la precipitación pluvial en bosques de *Abies religiosa*, en el sur de la Ciudad de México. *Agrociencia* 37: 57-64. 2003.

Velasco-Saldaña, H. E., E. Segovia-Estrada, M. Hidalgo-Navarro, S. Ramírez-Vallejo, H. García-Romero, I. Romero, A. M. Maldonado, F. Ángeles, A. Retama, A. Campos, J. Montañón y A. Wellens. *Lluvia ácida en los bosques del poniente del Valle de México*. XXVIII Congreso Internacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. 2002.

Xu, R. K. y G. L. Ji. Effects of H₂SO₄ and HNO₃ on soil acidification and aluminum speciation in variable and constant charge soils. *Water, Air, and Soil Pollution* 129: 33-43. 2001.

son el Valle de México, Monterrey, Guadalajara, Toluca, Ciudad Juárez, Mexicali, Tijuana-Rosarito, Salamanca, Michoacán, Puebla y León. En todos los casos, su elaboración tuvo como base la información de la calidad del aire y de las fuentes de emisiones. Las acciones contenidas en los Proaires están orientadas a las fuentes con mayor aporte de contaminantes e incluyen medidas de reducción factibles en su costo y con un beneficio significativo en la calidad del aire.

Como parte de las medidas para controlar el problema de la contaminación del aire, en enero de 2006 se publicó la norma NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, que establece nuevas especificaciones para los combustibles que se venden en México, principalmente lo relacionado con el contenido de azufre, olefinas y benceno. En enero de 2005 se introdujo al mercado la gasolina Magna de 300 partes por millón (ppm) promedio de azufre y 500 ppm máximo; en octubre de 2006

se incorporó al mercado gasolina Premium UBA (ultra bajo azufre) de 30 ppm promedio de azufre y 80 ppm máximo para su consumo en todo el país. Además, a principios de 2007 se introdujo, en la zona fronteriza norte, el diesel UBA de 15 ppm máximo y se planea que en 2009 se distribuya en las zonas metropolitanas del Valle de México, Guadalajara y Monterrey, y posteriormente en todo el territorio nacional.

Otras acciones emprendidas a nivel local, como la reforestación y pavimentación, los apoyos para la renovación del parque vehicular y el mayor control sobre la emisión de fuentes fijas también han sido importantes. No obstante, se requiere una mayor inversión para controlar y abatir la contaminación del aire. El gasto del sector público destinado en 2004 a prevenir y controlar la contaminación atmosférica, reportado por el INEGI, ascendió a 198 mil 910 millones de pesos, que representaron apenas 0.5% del gasto ambiental total, el cual incluye también actividades en materia de aguas residuales, residuos, suelos y agua subterránea, biodiversidad y paisaje, programas ecológicos de regulación y preservación, infraestructura ecológica, regulación humana de los establecimientos y educación ambiental, entre otras actividades (INEGI, 2007).

CAMBIO CLIMÁTICO

El cambio climático es uno de los principales problemas ambientales globales en la actualidad, con implicaciones que rebasan al ambiente, ya que sus efectos proyectados podrían tener consecuencias económicas, sociales y políticas importantes. Para comprender este fenómeno es necesario conocer tanto las bases científicas del problema como las causas y posibles efectos que trae consigo.

La atmósfera está constituida de manera natural principalmente por oxígeno y nitrógeno

que, en conjunto, representan el 99.03% de la composición de la atmósfera. El argón representa 0.93% del total. Existen además otros gases en concentraciones más bajas –bióxido de carbono (CO_2), vapor de agua, ozono (O_3), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O)–, que por su capacidad de absorber calor se conocen como gases de efecto invernadero (GEI).

El clima y particularmente la temperatura de la superficie de la Tierra dependen del balance entre la energía solar que recibe el planeta y el calor (radiación infrarroja) que emite. Los GEI dejan pasar la radiación solar a través de la atmósfera casi sin obstáculo, pero absorben la radiación infrarroja que emite la superficie de la Tierra; incluso, estos gases irradian nuevamente una parte de calor hacia ella, produciendo un efecto neto de calentamiento de manera similar al que ocurre en los invernaderos (Figura 5.13; [Cuadro D3_R_AIRE02_01](#)). Sin este fenómeno, la temperatura de la Tierra sería en promedio 33°C más fría y muy probablemente la vida no se hubiera desarrollado o sería muy distinta de como la conocemos hoy en día.

El clima es un fenómeno complejo que dista de ser constante pues aunque existen tendencias de largo plazo, también hay variaciones naturales que se manifiestan en intervalos de tiempo variables. Los cambios anuales en el clima (estaciones), así como aquéllos que han ocurrido en periodos más largos son resultado de la variación natural (ver el Recuadro [¿Qué motiva el cambio en el clima?](#)). A lo largo de la historia de la Tierra se han registrado épocas en las que se han presentado periodos de glaciación o de mayores temperaturas. Sin embargo, el cambio en el clima que se experimenta hoy día se atribuye a las actividades humanas.

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) definió el cambio climático como “...todo cambio en el clima

Figura 5.13

Efecto invernadero



Fuente:

Okinagan University College, University of Oxford, United States Environmental Agency. *The Science of Climate Change Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. UNEP, WMO. Cambridge University Press. U.S.A. 1996.

a través del tiempo, ya sea debido a la variabilidad natural o como resultado de actividades humanas” (IPCC, 2007b). A pesar de que existen varios factores que pueden afectar el clima, el IPCC concluyó en su Cuarto Informe de Evaluación de 2007 que el incremento de temperatura promedio observado desde mediados del siglo XX a la fecha se debe *muy probablemente*⁶ al incremento de las concentraciones de origen antropogénico de gases de efecto invernadero (IPCC, 2007a).

Emisiones antropogénicas de GEI

Los gases de efecto invernadero son emitidos tanto por fuentes naturales como por actividades humanas. Sin embargo, dentro de estas últimas, la fuente más importante es la quema de combustibles fósiles. A partir de la Revolución Industrial, iniciada en el siglo XVIII, se incrementó significativamente la producción de bienes y servicios, lo que generó una mayor

⁶De acuerdo con el IPCC “muy probablemente” corresponde a una probabilidad mayor a 90%.

El clima de la Tierra es todo menos simple, ya que una gran variedad de factores y procesos tienen influencia sobre él, ya sea de manera local o regional. Dichos elementos van desde cambios en la actividad solar, hasta erupciones volcánicas o fenómenos como El Niño. Por ello, es incorrecto atribuirle el cambio del clima únicamente a la presencia de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

Cuando ocurren erupciones volcánicas se puede modificar el clima de forma importante durante periodos cortos, ya que incorporan a la estratosfera grandes concentraciones de gases con azufre (principalmente SO_2) que son transformados en aerosoles de sulfatos que reflejan la radiación solar y producen un enfriamiento a corto plazo. Los aerosoles, que son partículas microscópicas o gotas suspendidas en el aire (que también se producen por la quema de combustibles fósiles y de biomasa) si son de colores claros pueden reflejar la radiación que proviene del Sol, produciendo un efecto de enfriamiento; en contraste, si son de color oscuro, como las partículas de hollín, absorben la radiación e inducen el calentamiento.

Otra causa de variabilidad climática está relacionada con las oscilaciones en la cantidad de radiación que emite el Sol hacia la Tierra. La más conocida es la que tiene un periodo aproximado de 11 años, pero las más importantes se presentan con ciclos de miles de años y son la causa de cambios muy profundos en el clima. Estos ciclos están asociados a variaciones en la órbita terrestre¹ que modifican la cantidad de radiación que recibe un sitio. El resultado más evidente de estas variaciones son las glaciaciones, las

cuales se presentaron recurrentemente en la Tierra durante el Pleistoceno.

Otro ejemplo de la variabilidad climática del planeta es el fenómeno conocido como El Niño². Este es un fenómeno más o menos cíclico que ocurre en un periodo que oscila entre tres y siete años. El Niño es resultado de una interacción compleja entre la atmósfera y el océano (en el Pacífico tropical), en el cual una masa de agua cálida se desplaza de su posición habitual en el oeste hacia las costas del continente americano, ocasionando, por ejemplo, un incremento de lluvias en Perú y sequías en los bosques tropicales de Indonesia.

Debido a la diversidad de factores que pueden inducir cambios en el clima e, incluso, lo complejo que son las interacciones en el mismo sistema climático, es importante que cualquier cambio presuntamente inducido por el hombre se sitúe en el contexto de la variación climática natural, tratando de identificar las señales inequívocas del factor antropogénico.

Notas:

¹Esta idea fue planteada en 1930 por el matemático Milutin Milankovitch para explicar la ocurrencia de la Edad del Hielo y las glaciaciones y fue demostrada hasta después de 1970 cuando se examinaron depósitos de foraminíferos en el fondo del mar.

²El Niño forma parte de un fenómeno más grande conocido como ENOS (El Niño Oscilación del Sur) el cual incluye también al fenómeno conocido como La Niña.

Referencia:

IPCC. *Climate change 2001. Technical summary*. IPCC. United Kingdom. 2001.

demanda y consumo de combustibles fósiles que, al ser incorporados a la atmósfera, ocasionaron el incremento en la concentración de GEI, lo que, de acuerdo con la evidencia científica, promueve el calentamiento global y el cambio climático (IPCC, 2007a).

El CO₂ es el GEI más importante debido a los grandes volúmenes emitidos, a su larga vida en la atmósfera (entre 5 y 200 años), a su forzamiento radiativo⁷ (1.3-1.5 Wm⁻²) y al notable incremento de su concentración en la atmósfera (35% mayor respecto a la época preindustrial).

A este gas se le ha asignado un potencial de calentamiento de 1 y es usado como referencia para establecer el potencial del resto de los GEI (IPCC, 2001; NAS, 2001).

El incremento de temperatura promedio observado desde mediados del siglo XX se debe muy probablemente al incremento de las concentraciones de GEI de origen antropogénico.

Emisiones mundiales

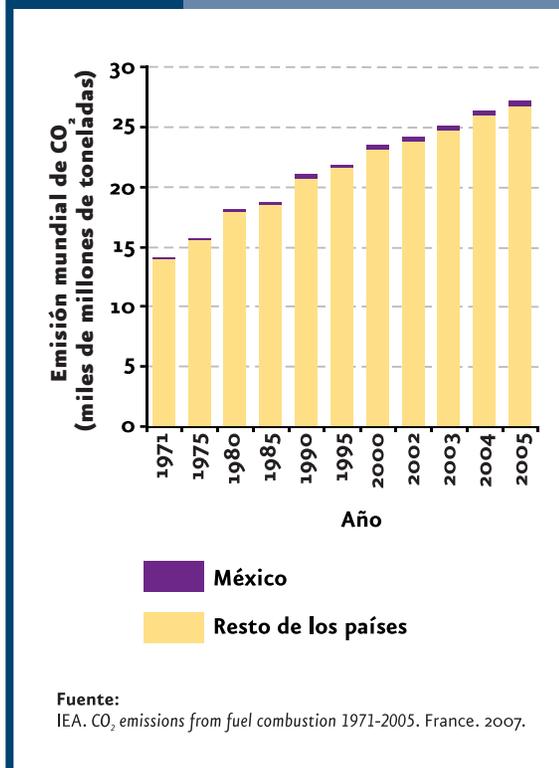
La emisión de CO₂ se ha incrementado de manera directa con la quema de combustibles fósiles y el cambio de uso del suelo. Durante el periodo 1971-2005, la emisión mundial derivada del consumo y quema de combustibles fósiles aumentó alrededor de 90% (Figura 5.14, IB 1.2-1). México contribuyó, en 2005, con alrededor de 1.4% de las emisiones de GEI a nivel mundial, lo que lo ubica entre los primeros quince países por su volumen de emisión.

En 2005, cinco países fueron responsables de poco más de la mitad del CO₂ emitido a nivel mundial por consumo y

La emisión mundial derivada del consumo y quema de combustibles fósiles aumentó alrededor de 90% en el periodo 1971-2005. En 2005, México contribuyó con 1.4% de las emisiones globales de GEI.

Figura 5.14

Emisión mundial de CO₂ por consumo de combustibles fósiles, 1971 - 2005



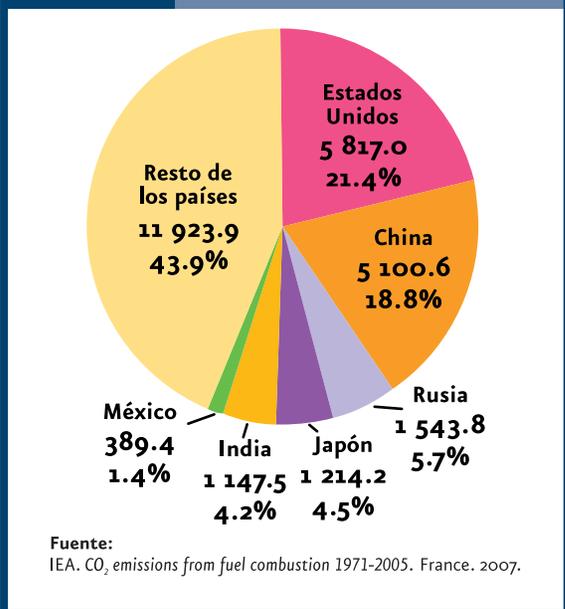
quema de combustibles fósiles (Figura 5.15). En ese año se generaron alrededor de 27 mil millones de toneladas de bióxido de carbono, de las cuales 14 mil 823 (54.6%) provinieron de Estados Unidos, China, Rusia, Japón e India. Destacan los casos de Estados Unidos y China, que fueron responsables de aproximadamente 22 y 19%, respectivamente, de las emisiones totales del planeta en ese año. La contribución de México ha representado entre

0.7 y 1.43% de las emisiones totales (Figuras 5.14 y 5.15). Si se considera la emisión de bióxido de carbono, metano y óxido nítrico, en el contexto regional sobresalen, además de Norteamérica (que en

⁷Índice del peso del factor (en este caso el CO₂) como mecanismo potencial de cambio climático. Se refiere al cambio en el flujo neto de energía radiativa hacia la superficie de la Tierra como resultado de cambios internos en la composición de la atmósfera, o cambios en el aporte externo de energía solar. Un forzamiento radiativo positivo contribuye a calentar la superficie terrestre, mientras que uno negativo favorece su enfriamiento.

Figura 5.15

Contribución de los principales países emisores y México a la emisión mundial de CO₂ por consumo y quema de combustibles fósiles, 2005. Millones de toneladas de CO₂ y porcentaje



2002 contribuyó con 26% del total de emitido), el este de Asia (15% del total), Europa occidental (14%) y Medio Oriente (13%; Mapa 5.10).

Si se examinan las emisiones por habitante, se observa que Estados Unidos posee una emisión (19.5 toneladas de CO₂ por persona) casi cinco veces mayor a la emisión per cápita mundial (4.12 toneladas de CO₂ por persona; Figura 5.16). Rusia y Japón poseen emisiones per cápita de poco más del doble que el valor mundial, mientras que China e India tienen valores menores que la emisión per cápita mundial (IEA, 2007; UNFPA, 2005). En el caso de México, la cifra puede variar entre 3.6 y 3.9 toneladas de CO₂ por persona

(ubicando a México en el lugar 69 a nivel mundial), dependiendo de la fuente de datos de emisión que se empleé (IEA, 2007; Semarnat, INE, 2006a).

Emisiones nacionales

La primera estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero para México se publicó en 1995 con datos de 1990. Los resultados se presentaron ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático en 1997 como parte de la Primera Comunicación Nacional de México ante la Convención. Posteriormente, en la Segunda Comunicación Nacional (2001) se calcularon las emisiones de 1994, 1996 y 1998 con la metodología revisada del IPCC de 1996. En el año 2006 se presentó la Tercera Comunicación Nacional, la cual incluye el inventario nacional recalculado para el periodo 1990-2002. Cabe señalar que debido al cambio de método, las comparaciones entre inventarios no son recomendables, por lo que en este texto haremos referencia sólo a los datos reportados en el último inventario publicado.

De acuerdo con el último Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (INEGI), la emisión total de GEI aumentó alrededor de 30% entre 1990 y el año 2002. En el año 2002, las emisiones nacionales de GEI fueron de alrededor de 553 millones de toneladas de CO₂ equivalente⁸ (sin considerar las emisiones por el uso de suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura).

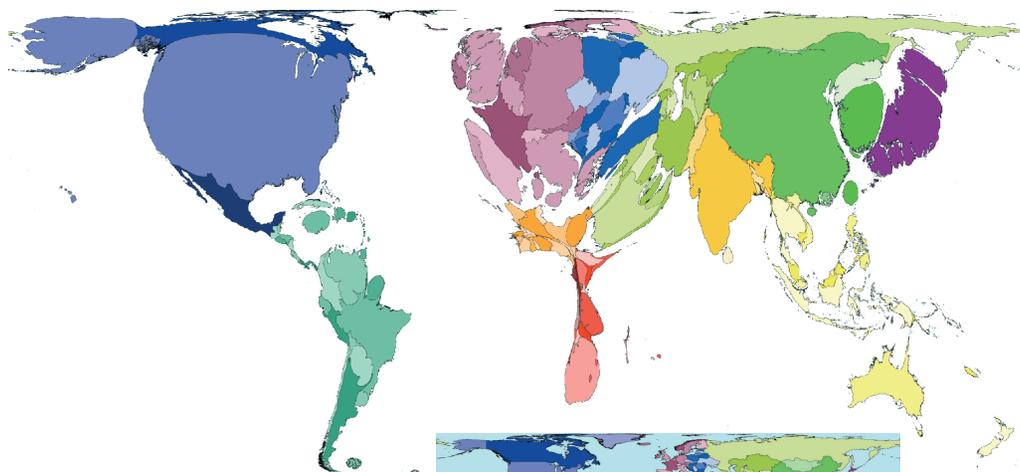
En el INEGI se indica que el sector energético (que incluye el consumo de combustibles fósiles y las emisiones fugitivas⁹) emitió en el 2002 más del 70% (389.5 millones de toneladas de CO₂ equivalente) del total de GEI (Figura 5.17, Cuadro D3_AIRE02_01). Dentro de este sector, el consumo de combustibles fósiles representó la principal fuente de emisiones de GEI en el país, ya que cada año ha contribuido con poco más del 63% de las emisiones totales.

⁸CO₂ equivalente: concentración de bióxido de carbono que podría causar el mismo grado de forzamiento radiativo que una mezcla determinada de bióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero.

⁹Aquellas emisiones que se generan en las actividades antes, durante y después del minado del carbón, así como las registradas en la producción, transmisión, almacenamiento y distribución de petróleo y gas natural.

Mapa 5.10

Contribución regional a la emisión global de gases de efecto invernadero¹, 2002



El área de las regiones es proporcional a su emisión de gases de efecto invernadero. A la derecha se muestra el mapa con las proporciones reales.

Nota:

¹ Incluye la emisión de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso ponderada por su potencial de calentamiento.

Fuente:

SASI Group y M. Newman. 2006. Disponible en: www.worldmapper.org/textindex/text_index.html Fecha de consulta: 05-10-2008.

En el 2002, las emisiones derivadas de los desechos (disposición de residuos sólidos en suelo, manejo y tratamiento de aguas residuales e incineración de residuos) contribuyeron con 11.9% del total de GEI (65.6 millones de toneladas de CO₂ equivalente), mientras que los procesos industriales y la agricultura emitieron 9.4 y 8.3% (52.1 y 46.1 millones de toneladas de CO₂ equivalente) respectivamente, del total nacional.

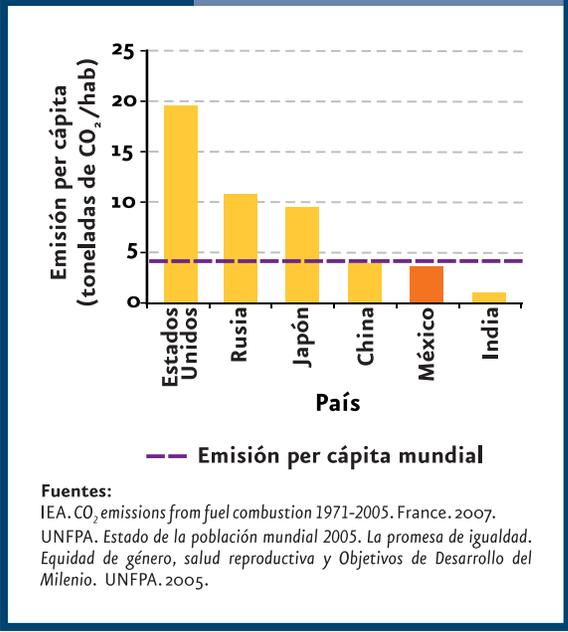
En el año 2002, México emitió alrededor de 553 millones de toneladas de CO₂ equivalente (sin considerar las emisiones por el uso del suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura). Si se consideran todas las fuentes esta cifra asciende a 643.2 millones de toneladas de CO₂ equivalente.

Si el análisis se hace considerando los seis principales GEI contemplados por el Protocolo de Kioto¹⁰ -CO₂ (bióxido de carbono), CH₄ (metano), N₂O (óxido nitroso), HFC (hidrofluorocarbonos), PFC (perfluorocarbonos) y SF₆ (hexafluoruro de azufre)-, el CO₂ es el contaminante que se emitió en mayor proporción a nivel nacional (71% del total de GEI emitidos; Figura 5.18, Cuadro D3_AIRE02_01), seguido por el metano, con alrededor del 25% del total.

¹⁰ Convenio internacional que busca reducir las emisiones de GEI.

Figura 5.16

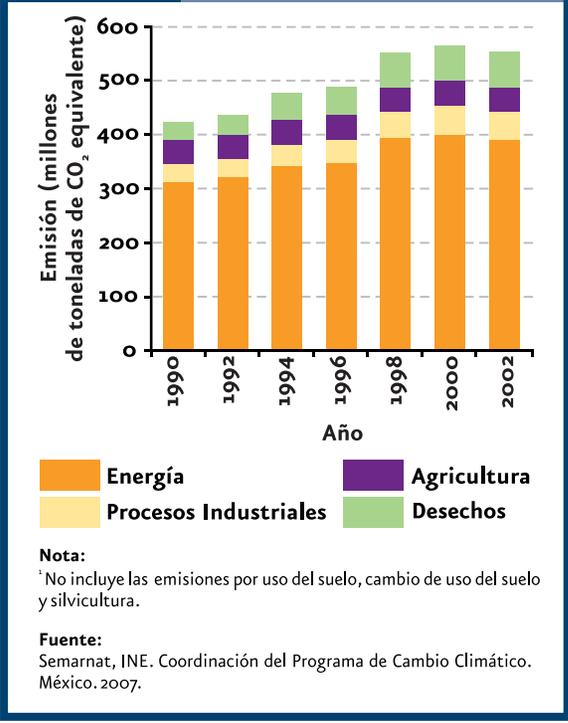
Emisión per cápita de CO₂ en los principales países emisores y México, 2005



Fuentes: IEA. CO₂ emissions from fuel combustion 1971-2005. France. 2007. UNFPA. Estado de la población mundial 2005. La promesa de igualdad. Equidad de género, salud reproductiva y Objetivos de Desarrollo del Milenio. UNFPA. 2005.

Figura 5.17

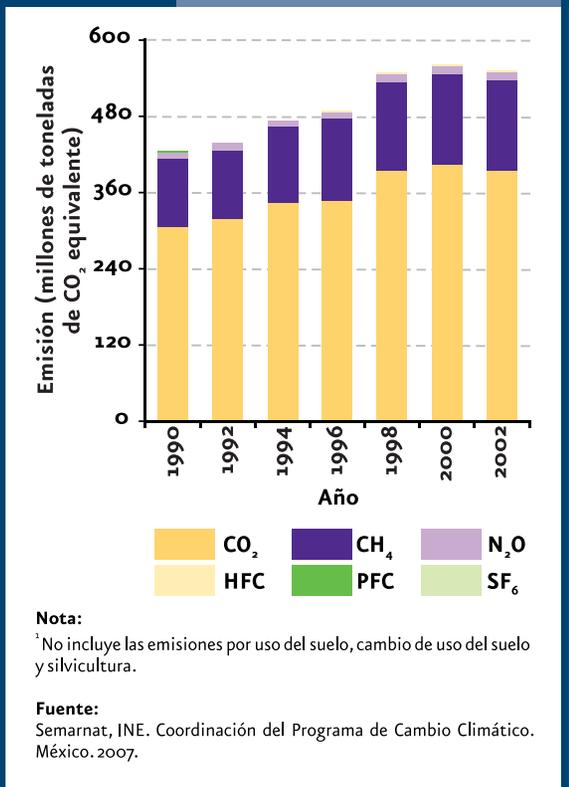
Emisión nacional de gases de efecto invernadero, por fuente¹, 1990 - 2002



Nota: ¹No incluye las emisiones por uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura. Fuente: Semarnat, INE. Coordinación del Programa de Cambio Climático. México. 2007.

Figura 5.18

Emisión nacional de gases de efecto invernadero, por gas¹, 1990 - 2002



Nota: ¹No incluye las emisiones por uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura. Fuente: Semarnat, INE. Coordinación del Programa de Cambio Climático. México. 2007.

Alrededor del 88% del CO₂ emitido provino del consumo de combustibles fósiles. El metano se generó principalmente (44%) por la disposición final de residuos sólidos en suelo y el manejo y tratamiento de aguas residuales ([Cuadro D3_AIRE02_01](#)), aunque la agricultura y las emisiones fugitivas de combustibles contribuyeron también con cantidades significativas (alrededor de 27% de la emisión total, cada una).

El CO₂ emitido a nivel nacional provino principalmente del consumo de combustibles fósiles (88%).

El cálculo de las emisiones de GEI para el periodo 1990-2002, que se reporta en el INEGI, no incluye las emisiones derivadas del uso de suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura (USCUSS). En el INEGI se reporta una estimación preliminar,

para el periodo 1993-2002, de 89.8 millones de toneladas de CO₂ equivalente promedio al año. La estimación incluye como principales fuentes a la combustión y descomposición de biomasa asociada a los procesos de conversión de bosques y superficies de vegetación natural a otros usos. Si se consideran todas las fuentes (incluyendo el USCUS), el total nacional de GEI emitidos en 2002 ascendería a 643.2 millones de toneladas de CO₂ equivalente y la contribución relativa de la categoría USCUS representaría 14% del total. Dicha estimación es importante ya que, además de significar un elevado porcentaje de las emisiones, existe evidencia de que el cambio de uso del suelo ha contribuido en el pasado con importantes cantidades de GEI, pues se calcula que los niveles de carbono en el suelo se reducen entre un 50 y 60% después de 50 a 100 años de uso agrícola (Stewart y Robinson, 2000).

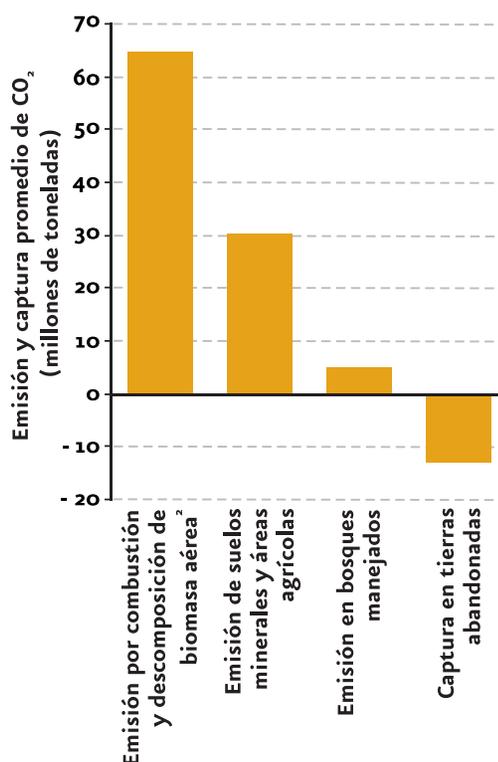
Si se consideran únicamente las emisiones de CO₂, la categoría USCUS aporta un total de 86.9 millones de toneladas. Estas emisiones son el resultado de un balance entre emisión y captura de CO₂; por un lado se contabilizan las emisiones provenientes de combustión y descomposición de biomasa aérea (64.5 millones de toneladas), suelos minerales y áreas agrícolas (30.4 millones de toneladas), así como bosques manejados (4.9 millones de toneladas); mientras que se descuenta la captura de CO₂ en tierras abandonadas (12.9 millones de toneladas; Figura 5.19; IB 1.2-3; Semarnat, INE, 2006a).



De acuerdo con el INEGI, entre 1990 y 2002 se incrementaron las emisiones nacionales de casi todos los gases de efecto invernadero, resaltando por su importancia en volumen las de CO₂, que aumentaron 28%. El CH₄ tuvo un incremento de 34% y el N₂O de 16%. En contraste, se redujeron las emisiones de PFC en 42%. Aunque los HFC y el SF₆ muestran un gran incremento (alrededor de 10 mil y 541% respectivamente) entre 1990 y 2002, debe considerarse que sus volúmenes emitidos son muy pequeños comparados con los otros gases.

Figura 5.19

Emisión y captura nacional de CO₂ por uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura, 1993 - 2002¹



Nota:

¹ La emisión presentada corresponde al promedio anual del periodo 1993-2002.

² Emisión asociada con los procesos de conversión de bosques a otros usos.

Fuente:

Semarnat, INE. *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2002*. México. 2006.

En el contexto mundial, si se examina la generación de CO₂ con referencia al Producto Interno Bruto (PIB) del país, México (con un valor de 0.61 kg de CO₂ por dólar a precio de 2000) ocupó en 2005 el treceavo lugar dentro de los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) después de la República Checa, Polonia, Eslovaquia y Hungría, entre otros (OECD, 2007). Dicha intensidad de emisiones fue menor si se compara con la reportada para 2000 y

2002 (0.96 y 0.97 kg de CO₂ por dólar a precio de 1995; OCDE, 2002, 2004), lo que significaría una mayor eficiencia en la producción. De acuerdo con la OCDE, la emisión neta de CO₂ por habitante en México fue de 3.7 toneladas por año en 2005, lo que coloca al país como el segundo más bajo en emisiones de CO₂ per cápita dentro de los países de la OCDE, muy por debajo de la cifra de Luxemburgo, Estados Unidos, Australia y Canadá que reportan 24.83, 19.61, 18.4 y 17 toneladas por año, respectivamente (OECD, 2007). En el contexto latinoamericano, países como Trinidad y Tobago y Venezuela superan a México en los volúmenes de emisiones por habitante (IEA, OECD, 2008).

Existen otros gases de efecto invernadero que, no obstante ser emitidos en mucho menor volumen que el CO₂, contribuyen de manera significativa al calentamiento global, ya que su acción combinada de retención de calor y tiempo de permanencia en la atmósfera hace que sus efectos sean importantes. Por ejemplo, los clorofluorocarbonos (CFC), considerados sustancias que destruyen la capa de ozono estratosférico, pueden permanecer en la atmósfera hasta mil 700 años, mientras que los fluorocarbonos lo pueden hacer por 50 mil años. Los halocarbonos, que incluyen halones y CFC, tienen un forzamiento radiativo de 0.34 Wm⁻², que es equivalente al 14% del forzamiento radiativo de todos los GEI mezclados mundialmente (ver el Recuadro *¿Están relacionados el cambio climático y el adelgazamiento de la capa de ozono?* en la sección Ozono estratosférico de este capítulo; IPCC, 2001).

Concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera

La acumulación de CO₂ en la atmósfera se debe a que los sumideros naturales (por ejemplo,

la vegetación y los cuerpos de agua) no son suficientes para capturar las crecientes emisiones de este gas. Como consecuencia, su concentración en la atmósfera ha aumentado de manera considerable. Debido a que el CO₂ se dispersa fácilmente, las mediciones hechas en cualquier parte del planeta son representativas. El registro histórico más extenso y confiable corresponde a la zona del Mauna Loa en Hawái, por lo que los datos recogidos en este lugar se consideran representativos de la concentración global de este gas (Keeling y Whorf, 2005). La Figura 5.20 (IB 1.2-4) muestra que la concentración atmosférica de CO₂ se mantuvo relativamente constante durante la época preindustrial y se incrementó de manera clara a partir del siglo XVIII, con una aceleración muy marcada durante la segunda mitad del siglo XX. La concentración preindustrial de CO₂ fue de alrededor de 280 partes por millón (ppm) y en el año 2008 alcanzó las 386 ppm, lo que significa un incremento de 38%. De acuerdo con el IPCC, la concentración atmosférica de CO₂

en 2005 excedió por mucho la concentración natural de los últimos 650 mil años (180 a 300 ppm; IPCC, 2007a).

Otros gases, como el óxido nitroso (N₂O) y el metano (CH₄) también han aumentado significativamente su concentración en los últimos años. El CH₄ pasó de 715 partes por mil millones (ppmm) en la era preindustrial a mil 725 ppmm en 2006 (Figura 5.21). La concentración de N₂O pasó de 270 a 319 ppmm en el mismo periodo.

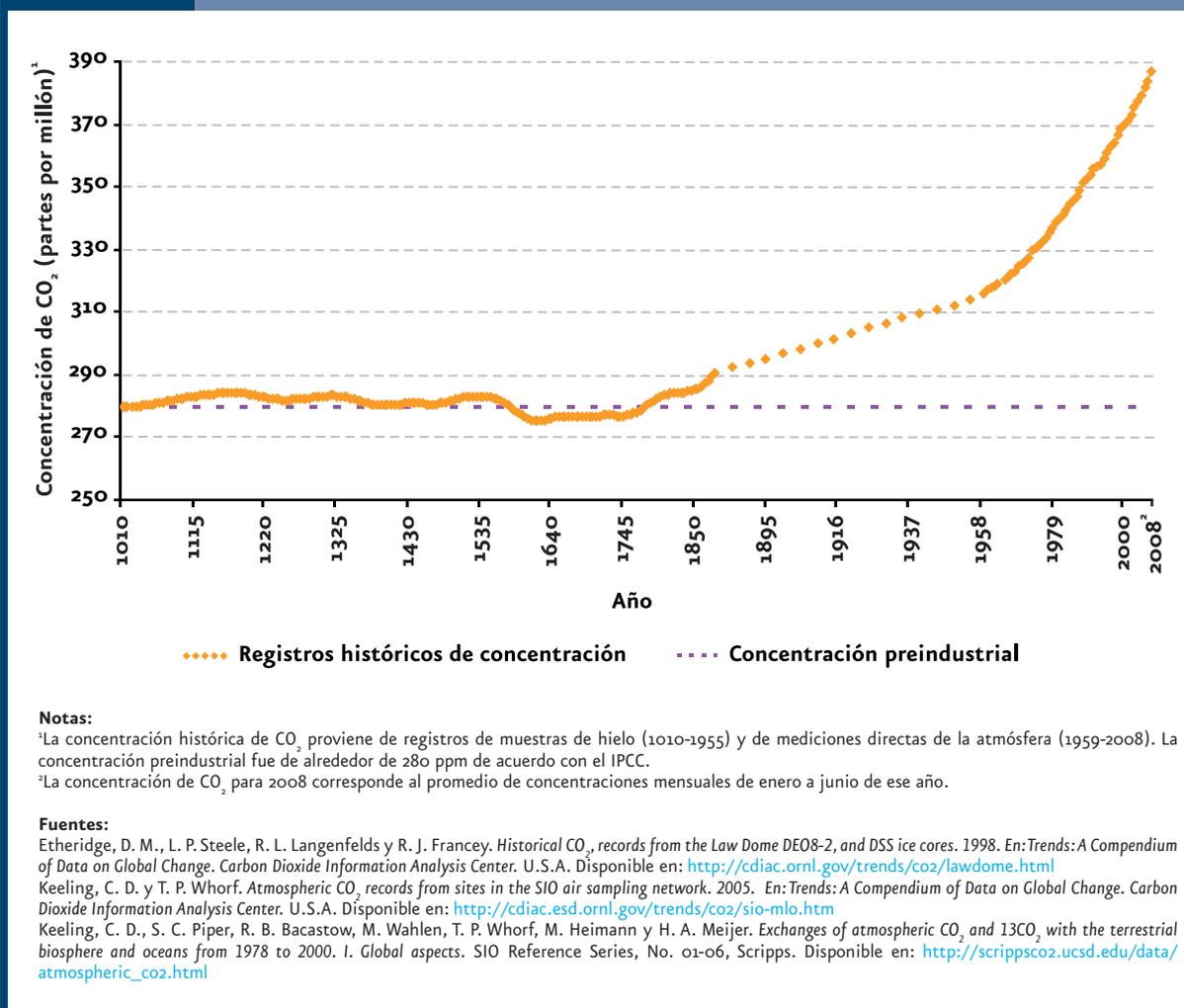
En términos generales, se ha estimado que el CO₂ es responsable de aproximadamente 60% del efecto invernadero acumulado desde el siglo XVIII, el CH₄ de 20%, el N₂O de 6% y los halocarbonos de 14% (IPCC, 2001; PNUMA, 2002). El forzamiento radiativo del CO₂ se incrementó 20% de 1995 a 2005, lo que representa el mayor



La concentración de CO₂ en el año 2008 alcanzó las 386 ppm, 38% mayor a la concentración preindustrial.

Figura 5.20

Concentración global atmosférica de CO₂, 1010 - 2008



cambio por década en los últimos 200 años (IPCC, 2007a). De acuerdo con la última evaluación del IPCC, el forzamiento radiativo combinado, debido al incremento de CO₂, CH₄ y N₂O es de 2.30 Wm⁻² y su tasa de incremento a lo largo de la era industrial es muy probable que no tenga precedente en los últimos 10 mil años.

Evidencias del cambio climático

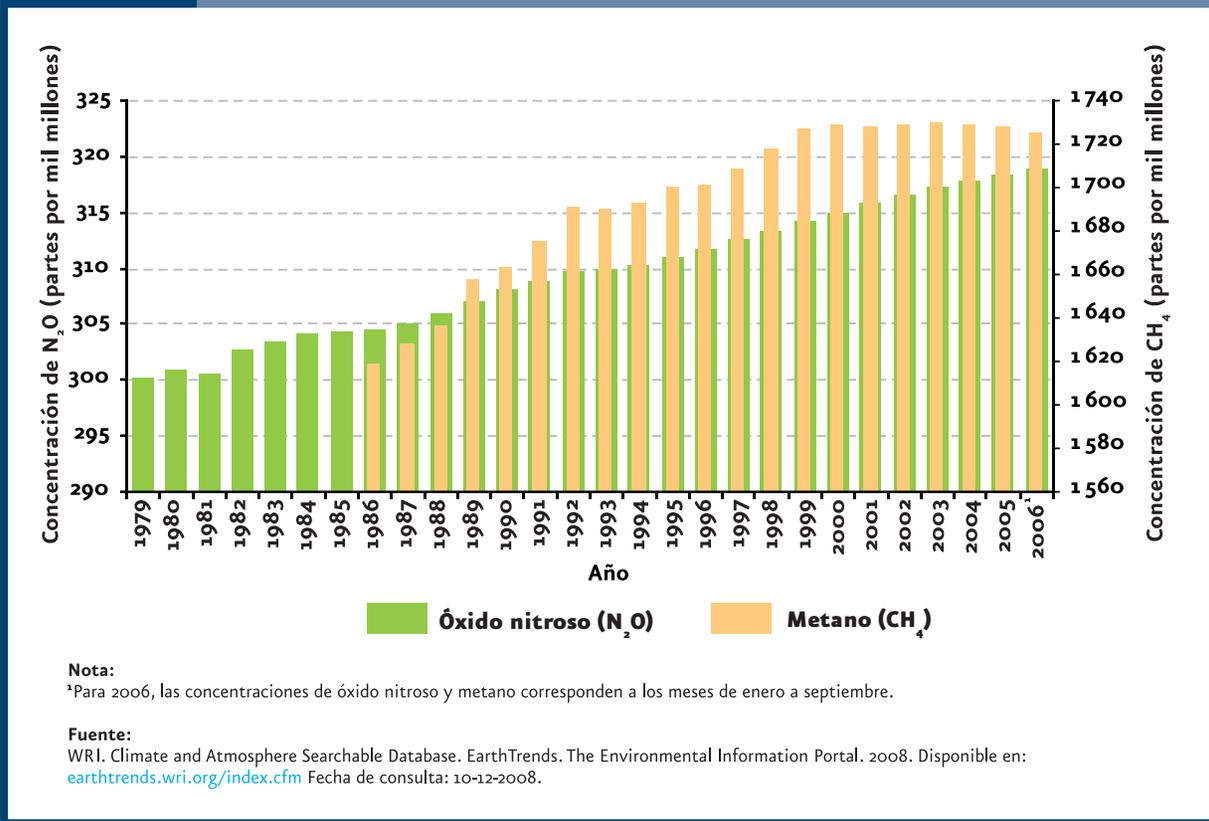
Las evidencias de cambios en el clima tanto a escala global como regional incluyen básicamente, incrementos de la temperatura (atmosférica y marina superficial), vapor de agua en la atmósfera

y nivel del mar, así como cambios en los patrones de precipitación, vientos y pautas de circulación atmosférica y oceánica (mayor frecuencia, persistencia e intensidad de los fenómenos de El Niño-Oscilación del Sur; Magaña, 1999; NAS, 2001; IPCC, 2007b).

El incremento de temperatura es una de las evidencias más contundentes sobre la existencia del cambio climático. Tan sólo en el periodo 1995-2006 se registraron once de los doce años más cálidos desde 1850. De acuerdo con los registros de temperatura global en los últimos diez años, la variación promedio fue de cerca de 0.5°C por arriba

Figura 5.21

Concentración global atmosférica de óxido nítrico y metano, 1979 - 2006



de la media del periodo 1951-1980; siendo 2005 el año en que se registró el mayor incremento (0.62°C), incluso superior a 1998 que había sido el año más caliente (0.57°C) hasta entonces registrado, influenciado por el fenómeno de El Niño de 1997–1998. En 2007, el incremento de temperatura fue de 0.57°C respecto a la media (Figura 5.22; **IB 1.2-5**). De acuerdo con el IPCC, la tendencia de calentamiento de los últimos 50 años (0.13°C por década) es casi el doble de la tendencia observada en los últimos 100 años. El incremento total de temperatura del periodo 1850-1899 con respecto al periodo 2001-2005 fue de 0.76°C (IPCC, 2007a).

El incremento total de temperatura de los periodos 1850 - 1899 a 2001 - 2005 fue de 0.76°C.

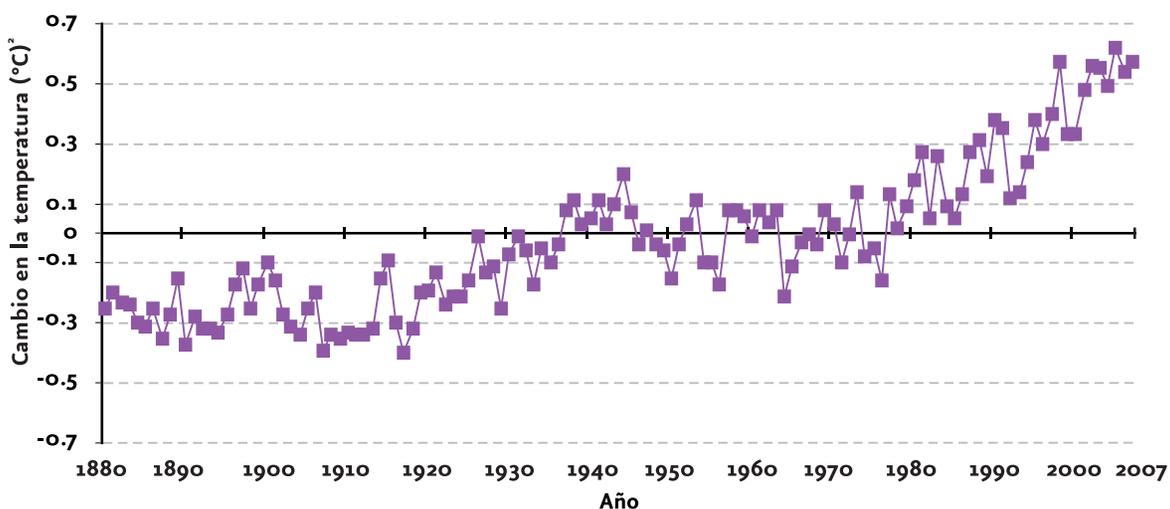
Regionalmente, la evaluación del IPCC señala que el incremento de la temperatura ha sido mayor en el hemisferio norte. La tasa de incremento de la temperatura promedio en el Ártico fue casi

del doble que la tasa registrada a nivel global en los últimos 100 años. Por su parte, las regiones terrestres se han calentado más rápido que los océanos, siendo más acelerado en Norteamérica, Europa y Asia (Figura 5.23).

Los registros demuestran que las olas de calor en el mundo aumentaron en frecuencia y duración. En el verano de 2003, Europa occidental y central enfrentaron una intensa ola de calor que mató a 35 mil personas. Ese verano fue el más cálido registrado desde 1780.

Además de los registros instrumentales de temperatura, también existen estimaciones de la temperatura del planeta miles de años atrás. Los paleoclimatólogos han reconstruido el clima del pasado a partir de muestras de hielo conocidas como “testigos de hielo”, que contienen burbujas



Figura 5.22**Variación de la temperatura global, 1880 - 2007¹****Notas:**

¹La serie de tiempo presenta el registro combinado de la temperatura global superficial terrestre y marina.

²El valor de cero representa la temperatura media de 30 años (1951-1980), por lo que los datos se refieren a la variación anual respecto a esa media.

Fuente:

NASA. GISS Surface Temperature Analysis. Global Annual Mean Surface Air Temperature Change. Global Land+Ocean Surface Temperature Anomaly (Base: 1951-1980). 2008. Disponible en: www.data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs Fecha de consulta: 02-10-2008.

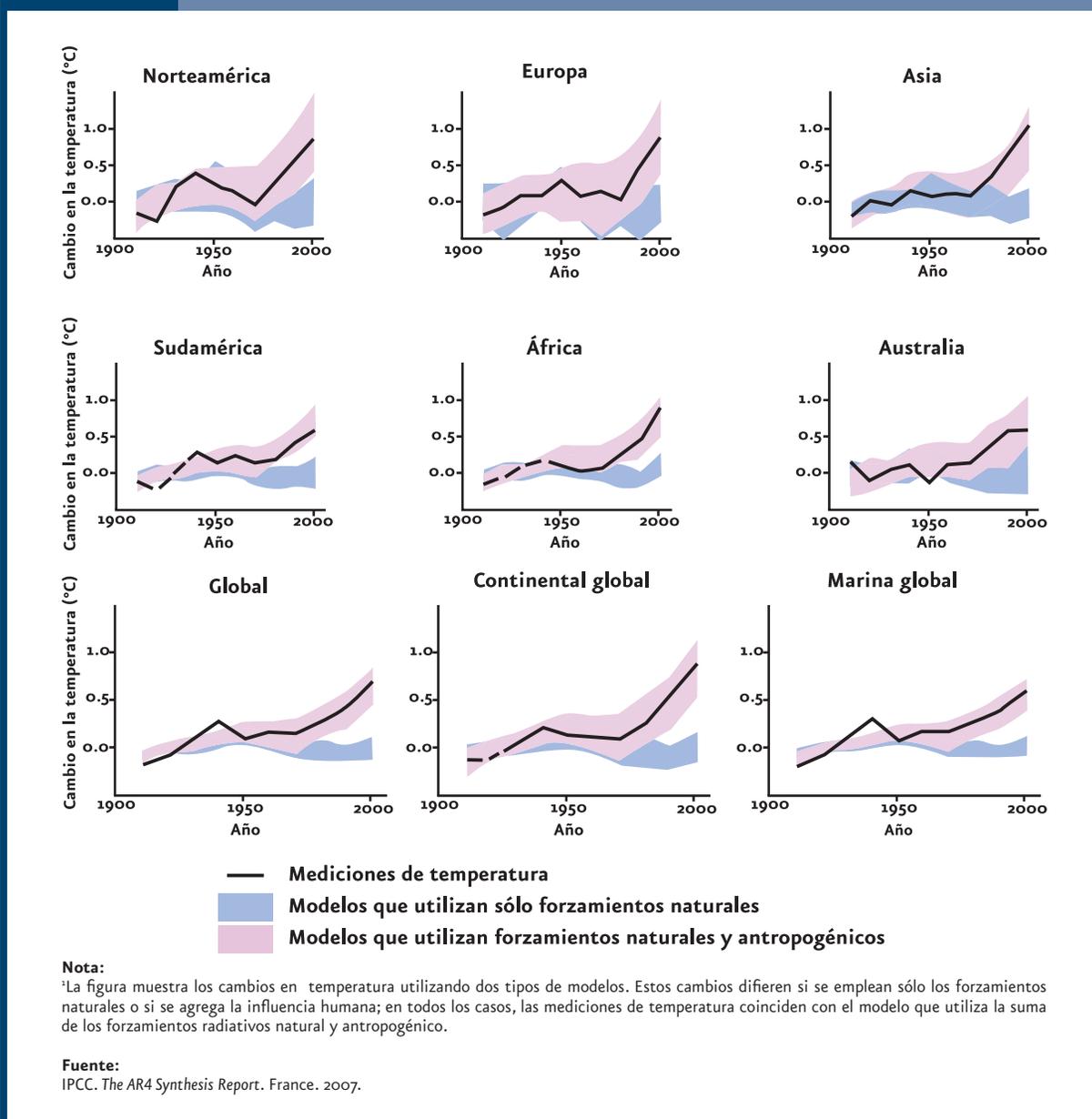
que atraparon una fracción de la atmósfera de la época en que se formaron. Al analizarlas se puede estimar la temperatura, concentración de oxígeno, CO₂, CH₄ y óxidos de azufre (entre otras variables). Esta información ha permitido establecer, además de una correlación positiva entre la temperatura y la concentración de gases de efecto invernadero (particularmente la de CO₂), que los niveles actuales de las concentraciones, no tienen precedente al menos en el último medio millón de años. Cuando se revisan tanto los registros instrumentales como los datos estimados de temperatura se observa que la Tierra ha pasado por ciclos de temperaturas muy bajas –llamados glaciaciones– y picos en los que la temperatura ha aumentado. Sin embargo, las temperaturas promedio globales de los últimos años están por arriba de cualquiera de los picos de temperatura observados al menos 20 mil años atrás.

Los registros instrumentales desde 1961 indican que la temperatura promedio global de los océanos ha aumentado, detectándose cambios incluso hasta los 3 mil metros de profundidad. Este calentamiento se debe a que los océanos han absorbido alrededor del 80% del calor que se ha adicionado al sistema climático (IPCC, 2007b). Este incremento en la temperatura ocasiona la expansión de los cuerpos de agua marina, lo cual contribuye al aumento del nivel del mar. A pesar de la tendencia mundial de calentamiento, es importante señalar que esto no ha ocurrido en todo el planeta. Por ejemplo, zonas del Atlántico Norte, Pacífico Norte y Pacífico ecuatorial se enfriaron durante los últimos 50 años (IPCC, 2007b), siguiendo un patrón opuesto a la tendencia global de calentamiento.

Debido a que la intensidad de los huracanes está influenciada por la temperatura de los océanos,

Figura 5.23

Cambios en las temperaturas marina y continental global, 1906 - 2000¹



el número de huracanes intensos ha aumentado desde 1970. A nivel global, el número de huracanes de categoría 1¹¹ ha sido relativamente constante, pero cuando se considera como porcentaje del total de huracanes registrados

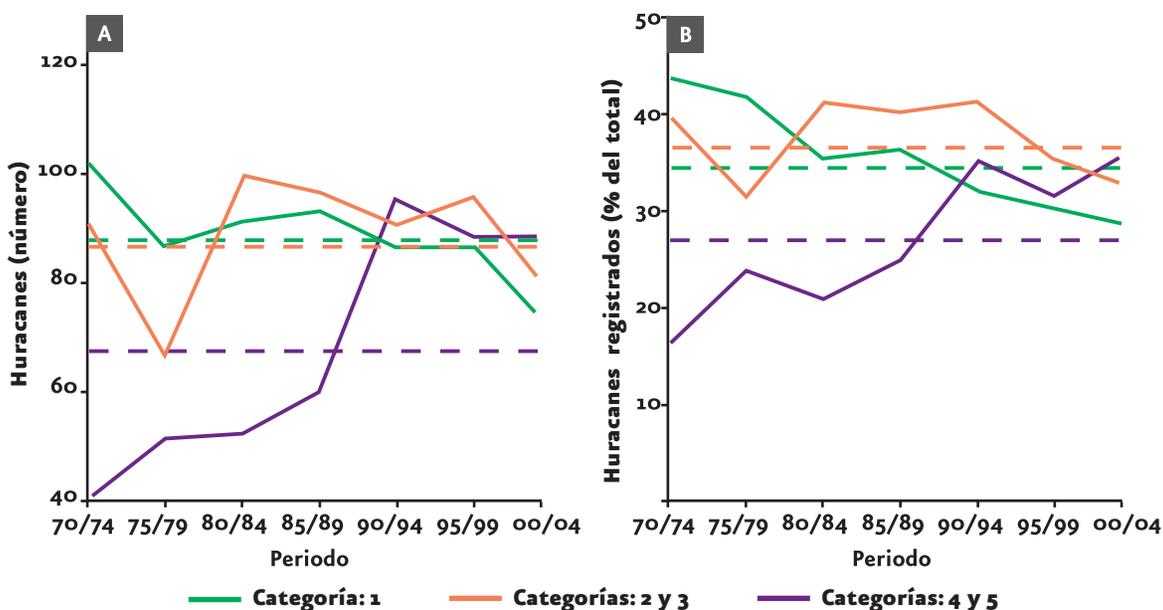
Los huracanes más intensos duplicaron su número y proporción durante la década pasada.

esta cifra muestra una clara disminución. En contraste, los huracanes de las categorías más fuertes (4 y 5) prácticamente duplicaron su número y proporción durante la década pasada (Webster et al., 2005; Figura 5.24).

¹¹ La escala Saffir-Simpson clasifica a los huracanes de acuerdo con la intensidad del viento; las categorías van de 1 a 5.

Figura 5.24

Ocurrencia de huracanes en el mundo, 1970 - 2004



Nota:
Las líneas punteadas representan el número promedio (A) y porcentaje promedio (B) de huracanes del periodo 1970-2004 para cada categoría.

Fuente:
Webster, P. J., G. J. Holland, J. A. Curry y H. R. Chang. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science* 309:1844-1846. 2005.

El aumento del nivel medio del mar es consistente con las consecuencias previstas en un escenario de calentamiento global. El promedio mundial de incremento del nivel del mar fue, en el periodo 1961-2003, de 1.8 mm por año (con un rango de 1.3 a 2.3 mm; Tabla 5.2). Pero en el periodo 1993-2003, la tasa promedio de incremento alcanzó los 3.1 mm (2.4 a 3.8 mm) por año. La Tabla 5.2 muestra las contribuciones al incremento del nivel medio del mar asociadas al deshielo de los casquetes polares, los glaciares y las placas de hielo de Groenlandia y Antártica. El incremento total del nivel medio del mar para el siglo XX se ha estimado en 17 cm (12 a 22; IPCC, 2007a). Tal vez este incremento parezca mínimo, pero si se considera que

El nivel medio del mar aumentó 1.8 mm por año en el periodo 1961-2003.

existen numerosas ciudades ubicadas en zonas costeras bajas e incluso por debajo del nivel del mar (como es el caso de Ámsterdam, en Holanda que está en promedio a 4 metros por debajo del nivel del mar) aun pequeños cambios en el nivel del mar pueden tener efectos importantes.

Durante el siglo XX, los glaciares y casquetes polares experimentaron una amplia pérdida de masa y contribuyeron al aumento del nivel del mar. La cobertura de los glaciares montañosos y la nieve ha disminuido en ambos hemisferios: el área máxima cubierta por terreno congelado estacionalmente ha disminuido cerca de 7% en el hemisferio norte desde 1900. Por su parte, datos

Tabla 5.2
Incremento del nivel medio del mar, 1961 - 2003

Fuentes de incremento del nivel del mar	Tasa de incremento del nivel medio del mar (metros por siglo)	
	1961 – 2003	1993 – 2003
Expansión térmica	0.042 ± 0.012	0.16 ± 0.05
Derretimiento de los glaciares y casquetes polares	0.050 ± 0.018	0.077 ± 0.022
Derretimiento de la placa de hielo de Groenlandia	0.05 ± 0.12	0.21 ± 0.07
Derretimiento de la placa de hielo de Antártica	0.14 ± 0.41	0.21 ± 0.35
Suma de las contribuciones individuales al incremento del nivel del mar	0.11 ± 0.05	0.28 ± 0.07
Incremento total observado del nivel del mar	0.18 ± 0.05 ¹	0.31 ± 0.07 ¹
Diferencia (incremento observado menos la suma de las contribuciones individuales estimadas)	0.07 ± 0.07	0.03 ± 0.10

Nota:

¹ Los datos anteriores a 1993 provienen de mediciones con mareógrafo costero, mientras que los posteriores a 1993 de mediciones satelitales.

Fuente:

IPCC. *The AR4 Synthesis Report*. France. 2007

provenientes de satélites muestran que la extensión del hielo marino ártico ha disminuido desde 1978 en 2.7% (con un rango de 2.1 a 3.3%) por década.

En el continente antártico, en el año 2002 se fracturó la plataforma Larsen B, con lo que se desprendió y deshizo una superficie de hielo de 3 mil 240 kilómetros cuadrados (Figura 5.25). Los deshielos también han afectado zonas altas de montañas y volcanes. Por ejemplo, los glaciares de los Alpes suizos perdieron un tercio de su superficie y al menos la mitad de su masa en el periodo 1850-1980. Se ha calculado que de seguir esa tendencia, para el 2050, el 75% de los glaciares de los Alpes desaparecerá (EEA, 2004). En México, los glaciares del Iztaccíhuatl sufrieron reducciones de hasta el 40% entre 1960 y 1983. El Pico de Orizaba y el Popocatepetl muestran

una tendencia similar, aunque en este último la reducción se aceleró por su actividad volcánica. Si se mantienen las tasas actuales de reducción de los glaciares mexicanos, es posible que desaparezcan por completo en menos de 30 años (Delgado, 2007).

También la temperatura en la superficie de la capa del permafrost¹² del Ártico ha aumentado (hasta 3°C) desde la década de los ochenta. Los cambios en las condiciones del permafrost pueden afectar la escorrentía de los ríos, el suministro de agua, el intercambio de carbono, la estabilidad del paisaje y la infraestructura de caminos (IPCC, 2007b).

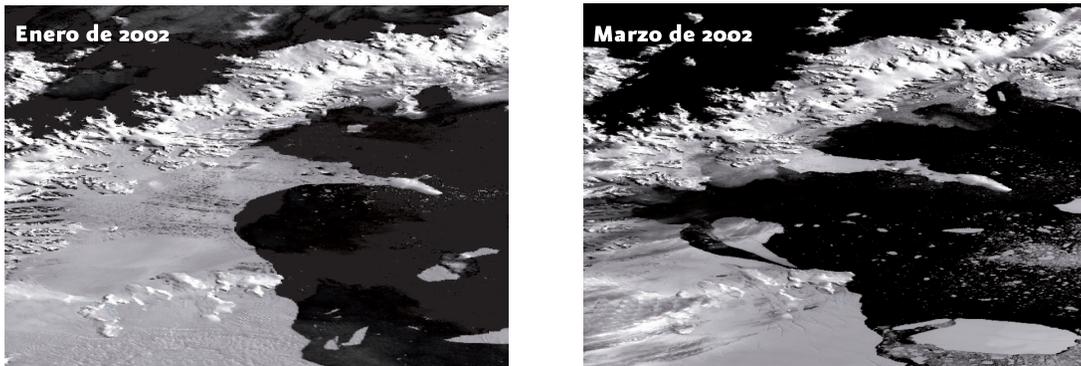
En lo que se refiere a la alteración del ciclo hidrológico, la humedad específica superficial aumentó en estrecha relación con el incremento de las temperaturas terrestres y oceánicas. La

¹² Permafrost: capa del suelo permanentemente congelado en las regiones muy frías.

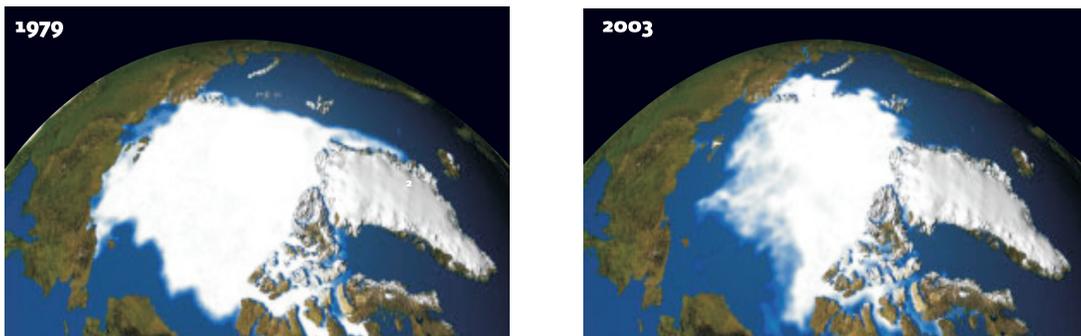
Figura 5.25 Deshuelos en Alpes suizos, Península Antártica y Ártico



Los glaciares de los Alpes suizos perdieron un tercio de la superficie y al menos la mitad de su masa.



Colapso de 3 240 km² de la Plataforma Larsen B en la Península Antártica.



Reducción del hielo en el casquete polar Ártico.

Fuentes:

ACIA. *Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment*. Cambridge University Press. Canada. 2004.
UNEP. *Selected Satellite Images of our Changing Environment*. Kenya. 2003.

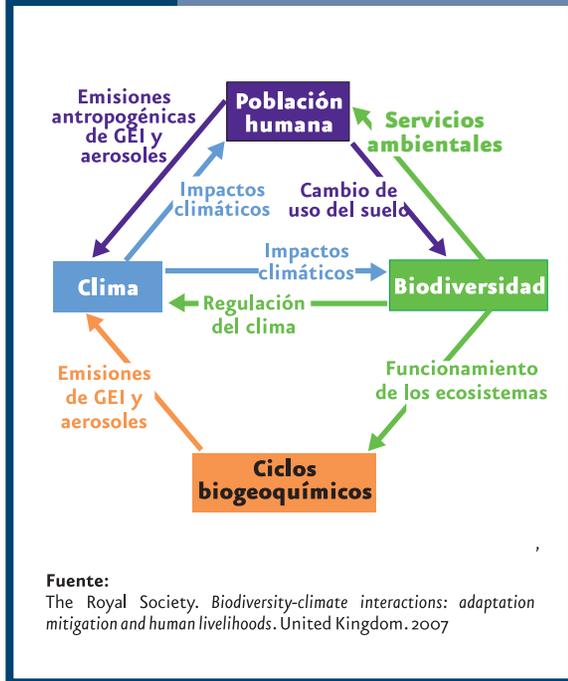
columna de vapor de agua total aumentó en los océanos mundiales 1.2% por década entre 1988 y 2004. El vapor de agua atmosférico adicional implica un aumento en la disponibilidad de humedad para las precipitaciones en algunas zonas del mundo. Por ejemplo, se ha observado un incremento significativo de las precipitaciones en zonas orientales de América del Norte y América del Sur, Europa septentrional y en Asia septentrional y central. Es probable¹³ que las precipitaciones intensas hayan aumentado en muchas regiones de la Tierra a partir del año 1950, incluso en las regiones donde se redujo la cantidad total de precipitación. Se han registrado también sequías más intensas y prolongadas, principalmente en los trópicos y subtropicos a partir de 1970 (IPCC, 2007a). En México en las últimas décadas se aprecia una tendencia a una mayor precipitación, principalmente en los estados del norte, mientras que en los estados en los que las lluvias dependen de lo que ocurre en el Pacífico (por ejemplo, Jalisco y Oaxaca) la tendencia parece ser en sentido opuesto.

Efectos del cambio climático sobre la biodiversidad

El desarrollo socioeconómico de la sociedad está inevitablemente ligado a la provisión de los servicios ambientales de los ecosistemas y, a fin de cuentas, a la biodiversidad que los constituye. No obstante, el balance entre la provisión de los servicios ambientales, el mantenimiento de la biodiversidad y los ecosistemas, así como el bienestar y desarrollo de la sociedad, depende a su vez de otros componentes ambientales dinámicos no menos importantes, como son los ciclos biogeoquímicos y el clima (Figura 5.26). En este sentido, la compleja red de interacciones que los vincula trae como consecuencia que la alteración y/o pérdida de alguno producirá consecuencias, con frecuencia difíciles de predecir, sobre los demás elementos.

La acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera, resultado de la intensa actividad humana de los últimos 250 años –principalmente por la quema de combustibles fósiles, la agricultura y el cambio de uso del suelo–, ha traído consigo, como se ha mencionado en las secciones anteriores, alteraciones importantes en el clima global, las cuales no han pasado inadvertidas para la biodiversidad. Esto resulta obvio si se toma en cuenta que el clima es uno de los principales factores que determinan globalmente los patrones de vegetación, estructura, composición florística y faunística y la productividad primaria. Al efecto del cambio climático sobre los ecosistemas deben sumarse aquéllos previamente derivados de los cambios de uso del suelo, de la urbanización y de la sobreexplotación de los recursos naturales, entre otros factores.

Figura 5.26 Relación entre biodiversidad, cambio climático y bienestar humano



Fuente: The Royal Society. Biodiversity-climate interactions: adaptation mitigation and human livelihoods. United Kingdom. 2007

¹³ De acuerdo con el IPCC probable se refiere a una probabilidad mayor a 66%.

Durante la última década se han acumulado una cantidad importante de estudios que demuestran los efectos del cambio climático global sobre la biodiversidad y los ecosistemas (ver por ejemplo, IPCC, 2001). A nivel de los ecosistemas, los cambios regionales del clima han ocasionado principalmente: i) la modificación de su distribución (bosques boreales que migran hacia el norte en latitudes altas del hemisferio), ii) el reemplazo por ecosistemas distintos (humedales por bosques de coníferas en Alaska), iii) la degradación (como la de los arrecifes de coral en todo el mundo por el incremento de la temperatura marina) y iv) la modificación de su composición de especies (como se ha observado en bosques, comunidades alpinas y arrecifes de coral, entre otras). A lo anterior deben sumarse los efectos que el incremento de la frecuencia de eventos meteorológicos extremos (e.g. huracanes, sequías, inundaciones, granizos y rachas de vientos), y la presencia de plagas y enfermedades han tenido en la estructura, composición y dinámica de muchos ecosistemas a lo largo del mundo.

Si se estudian los efectos a nivel de las especies, las evidencias indican alteraciones en la fenología y los patrones morfológicos, fisiológicos y conductuales de un número significativo de especies. Con respecto a la fenología, se han observado cambios en los tiempos de reproducción (vistos ya sea como la floración en las plantas, la puesta de huevos o el inicio del cortejo en los animales), en la migración o en el desacoplamiento de los ciclos de vida de depredadores y presas. Morfológicamente, se han observado alteraciones en los patrones de crecimiento en reptiles (The Royal Society, 2007).

Las consecuencias de las afectaciones a la biodiversidad por el cambio climático podrían ser muy significativas ambientalmente y tener graves impactos sobre el bienestar humano. Según la última evaluación del IPCC, si el incremento de la temperatura excede en el futuro entre 1.5 y 2.3°C, tan sólo entre el 20 y 30% de las especies de plantas y animales que han sido monitoreadas y para las que existen datos de largo plazo, podrían estar

en riesgo de extinción (IPCC, 2007b; Parmesan y Yohe, 2003). La extinción de especies de algunos grupos como los anfibios, ya se asocia al cambio climático global (ver en el capítulo de *Biodiversidad* el Recuadro *Crisis global de los anfibios*). Debe tenerse en mente que la pérdida de especies no significa sólo reducir numéricamente la biodiversidad de una región o país, sino también comprometer la capacidad de los ecosistemas para proveer de todos los servicios ambientales con que benefician y sostienen a las sociedades humanas. Para conocer cómo el cambio climático afecta directamente a la sociedad, se recomienda leer el Recuadro *Impactos sociales del cambio climático*.

El clima del futuro y sus consecuencias

Impactos futuros globales

La gran cantidad de factores que intervienen para determinar el clima de un lugar traen consigo cierto grado de incertidumbre en las extrapolaciones obtenidas de las tendencias registradas en el pasado para predecir el clima del futuro. Las proyecciones sobre el clima se realizan por medio de modelos numéricos complejos que predicen la respuesta ante diferentes escenarios como, por ejemplo, diferentes volúmenes de emisiones de CO₂ o cambios en la dinámica de absorción por parte de la vegetación y los océanos. A pesar de la incertidumbre asociada, los escenarios más conservadores predicen serias consecuencias sobre aspectos tan importantes para el bienestar social como la salud humana, los ecosistemas y la disponibilidad de los recursos hídricos, lo que ha provocado que a nivel mundial se tomen acciones decididas para evitar que las actividades humanas alteren más el clima del planeta.

De acuerdo con el IPCC, la concentración de CO₂ en el año 2100 podría ser de entre 540 y 970 partes por millón (ppm), muy superiores a las 280 ppm registradas en el periodo 1000-1750. Como consecuencia, se prevé que el aumento de la temperatura media superficial del planeta

Como consecuencia de los cambios en el clima y las alteraciones sobre los ecosistemas, la sociedad a nivel mundial también ha resentido los efectos del cambio climático, tanto en su vida cotidiana como a través de las pérdidas en las actividades productivas generadoras de riqueza. Por ejemplo, en el caso de la agricultura, la prevalencia de condiciones de altas temperaturas y sequía en el Sahel africano pudieron reducir la época de crecimiento de los cultivos y con ello el volumen de las cosechas. Asimismo, se ha encontrado, por ejemplo, que a pesar de que la elevada concentración de CO₂ provoca que en el corto plazo algunos cultivos sean más productivos, también genera que su calidad nutricional se reduzca de manera importante (IPCC, 2007). Un estudio reciente encontró que el incremento de CO₂ en la atmósfera reduce la concentración de proteínas en los cultivos de cebada, arroz, trigo y papa entre 10 y 15% (Taub *et al.*, 2008). En el caso de los recursos forestales, se ha observado que las alteraciones en los regímenes de fuego, así como la expansión de plagas y enfermedades forestales, podrían alterar negativamente la producción forestal en los países de latitudes ubicados muy al norte en el hemisferio norte (IPCC, 2007). El fenómeno meteorológico El Niño que se presentó en 1997-1998 redujo la producción nacional de erizo, langosta, abulón y camarón (Magaña y Gay, 2002).

Los efectos directos sobre la población son diversos, y van desde la elevada mortalidad que causan los llamados “golpes de calor” –situación en la que el cuerpo es incapaz de perder el calor excedente– y los efectos de la mayor incidencia de enfermedades transmitidas por vectores, hasta las pérdidas humanas y materiales producidas por los

eventos meteorológicos extremos. En México, los estados con mayor mortalidad por “golpes de calor” están en el norte del país, principalmente Sonora y Baja California. En 2003, una ola de calor causó 35 mil muertes en Francia, Bélgica, República Checa, Alemania, Italia, Portugal, Suiza, Holanda y Reino Unido y generó pérdidas en el sector agrícola por 15 mil millones de dólares (IPCC, 2007).

Otro efecto se refiere al cambio de distribución de especies animales que son transmisores de enfermedades, conocidos como vectores, como son los mosquitos y garrapatas que transmiten el dengue y el paludismo. Con el aumento de la temperatura global, se espera que las áreas de distribución de los vectores se amplíen y con ello las zonas de afectación de las enfermedades que transmiten.

La frecuencia e intensidad de los huracanes es, sin duda, otro de los fenómenos que se asocian comúnmente al cambio climático global y que impacta directamente a la sociedad (p.e., Emily en Yucatán, Katrina en el sureste de Estados Unidos y Stan y Wilma en el sureste de México que causaron importantes víctimas mortales y daños materiales cuantiosos). La frecuencia de huracanes de categorías 4 y 5 –las más fuertes– se ha incrementado y con ello la magnitud de las pérdidas.

Destacan también el incremento del nivel de mar y de la intensidad de las precipitaciones, que en algunas regiones del mundo han causado graves inundaciones. Los habitantes de algunos países de islas bajas han tenido que abandonar sus hogares como consecuencia del aumento del nivel del mar.

Recuadro

Impactos sociales del cambio climático (conclusión)

Por ejemplo, los residentes de Tuvalu, una isla localizada en el Pacífico entre Australia y Hawaii, han comenzado a migrar hacia otros países, debido a las constantes inundaciones. (Ralston et al., 2004).

De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial, el número de víctimas en el mundo por desastres naturales aumentó de 147 millones en 1991 a 211 millones en 2000. El 90% de esos desastres estuvieron relacionados con el agua. La magnitud de los daños causados por desastres relacionados con el agua representó en 2005 aproximadamente 200 mil millones de dólares (Conagua, 2007). El 50% de los desastres naturales por agua fueron ocasionados por inundaciones, 28% por epidemias y 11% por sequías. Los

desastres se ubicaron principalmente en Asia y África (35 y 29% respectivamente), aunque en América y Europa también hubo una alta incidencia (Figura a).

Referencias:

Conagua. *Estadísticas del Agua en México*. México. 2007.

IPCC. *The AR4 Synthesis Report*. France. 2007.

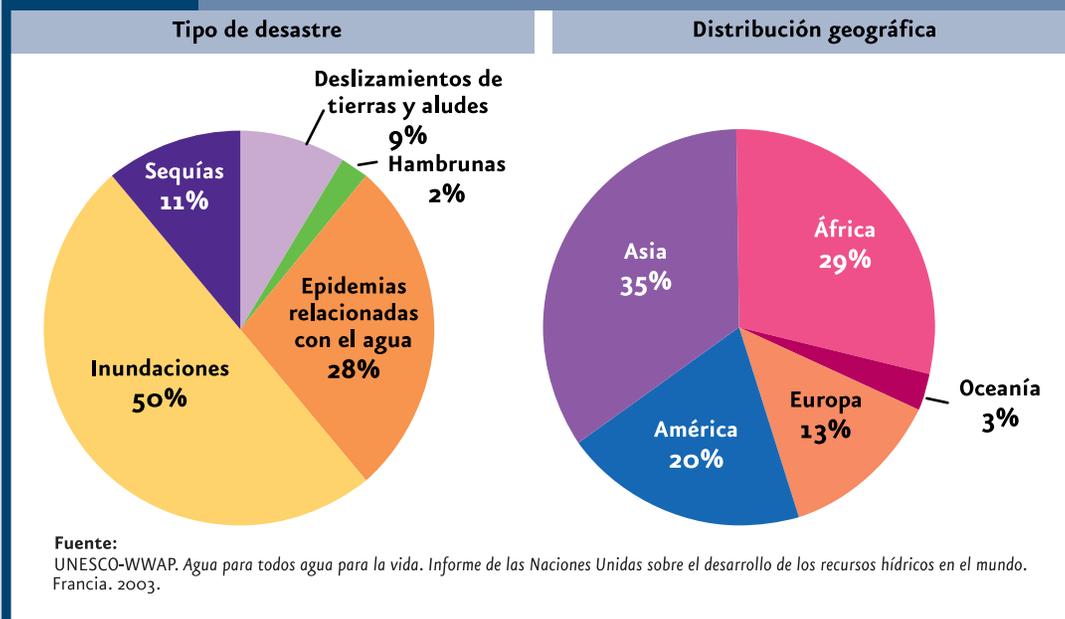
Magaña, V. O. y C. Gay. Vulnerabilidad y adaptación regional ante el cambio climático y sus impactos ambientales, sociales y económicos. *Gaceta Ecológica* 65: 7-23. 2002.

Ralston, H., B., Horstmann y C. Hol. *Climate change changes Tuvalu*. Germanwatch. 2004.

Taub, D. R, Miller, B. y Allen, H. Effects of elevated CO₂ on the protein concentration of food crops: a meta analysis. *Global Change Biology* 14: 565-575. 2008.

Figura a

Tipos y distribución de los desastres naturales relacionados con el agua, 1990 - 2001



sea de entre 1.8 y 4°C para fines de este siglo. Si se considera la incertidumbre asociada a los distintos escenarios de emisiones modelados, la temperatura podría variar de 1.1 a 6.4°C. Dicho calentamiento será diferencial, es decir, será mayor sobre la superficie y en latitudes más boreales y menor sobre el océano Antártico y el norte del océano Atlántico. El incremento de temperatura en los próximos veinte años se prevé de 0.2°C por década.

Es probable que la temperatura aumentará más en las latitudes norteñas, lo que traerá consigo que a finales del siglo XXI, el hielo marino del Ártico prácticamente desaparezca durante el verano. Las proyecciones a nivel global, indican que para fines del siglo XXI, como consecuencia del derretimiento del hielo, el nivel medio del mar se elevará entre 18 y 59 centímetros, aunque con importantes variaciones regionales (IPCC, 2007a). Se prevé que el derretimiento de la placa de hielo de Groenlandia continúe contribuyendo con la elevación del nivel del mar, por lo menos hasta el año 2100 (IPCC, 2007a).

También es probable que los ciclones tropicales sean más intensos, con mayor cantidad de lluvia y velocidad del viento y que las ondas de calor sean más frecuentes. Las precipitaciones se incrementarán muy probablemente en latitudes altas, mientras que en regiones subtropicales disminuirán hasta en un 20% hacia el año 2100 (IPCC, 2007a).

Entre los posibles impactos del cambio climático sobre la biodiversidad se ha planteado, por ejemplo, la reducción e incluso la pérdida de poblaciones y ecosistemas; mayores tasas de blanqueamiento en los arrecifes de coral; la reducción o expansión de las áreas

Las proyecciones indican que la concentración global de CO₂ podrá ser de entre 540 y 970 partes por millón (ppm), la temperatura media superficial del planeta será de entre 1.8 y 4°C más alta y el nivel medio del mar se elevará entre 18 y 59 centímetros para fines de este siglo.

La temperatura promedio de México será entre 2 y 4°C más elevada alrededor del año 2080.

de distribución de diversas especies de invertebrados, peces, insectos, aves y plantas; el adelanto de la floración en muchas especies de plantas y el anticipo en la llegada y reproducción de aves migratorias.

En la cuestión social se ha proyectado, que puede ocurrir un incremento del número de muertes de personas en el mundo por efecto de las ondas cálidas y que enfermedades como el paludismo y el dengue se conviertan en un problema de salud pública mundial, ya que el área de distribución de sus organismos vectores podría extenderse (IPCC, 2001; NAS, 2001; Townsend *et al.*, 2002; CBD, 2003; Smith *et al.*, 2003).

Impactos futuros en México

En México también se han construido posibles escenarios de cambio climático. De acuerdo con la Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, se prevé que la temperatura promedio de México sea entre 2 y 4°C más elevada alrededor del año 2080 (este incremento incluso podría registrarse desde el 2050) y que la región norte sea la que registre los mayores incrementos. Como consecuencia del aumento de temperatura también se espera un mayor número de incendios forestales (Semarnat, INE, 2006c). En el Caribe, Golfo de México y Pacífico mexicano, la temperatura superficial del mar podría aumentar entre 1 y 2°C, incrementando la probabilidad de que los ciclones tropicales alcancen categorías mayores en la escala Saffir-Simpson.

En lo que se refiere a las lluvias, el grado de incertidumbre de las proyecciones es del mismo orden de magnitud que los cambios proyectados. Algunos modelos advierten ligeros aumentos de

precipitación, mientras que otros han proyectado disminuciones drásticas. No obstante, la mayoría de ellos prevén que en invierno se reduzcan las precipitaciones hasta 15% en regiones del centro de México, y 5% en la zona del Golfo. También se prevén retrasos en el inicio de las lluvias, con una prolongación de la temporada hacia los meses de otoño, para gran parte del país (Semarnat, INE, 2006c).

Se espera que el número de tormentas severas aumente, pero que también se puedan producir periodos de sequía más extremos y prolongados. Considerando lo anterior y las proyecciones de las variables socioeconómicas (por ejemplo, población, producto interno bruto, agricultura, etcétera) que determinan la intensidad de uso de los recursos hídricos, se prevé que la disponibilidad de agua entre los años 2020 y 2030 pueda reducirse 10% respecto a sus valores del

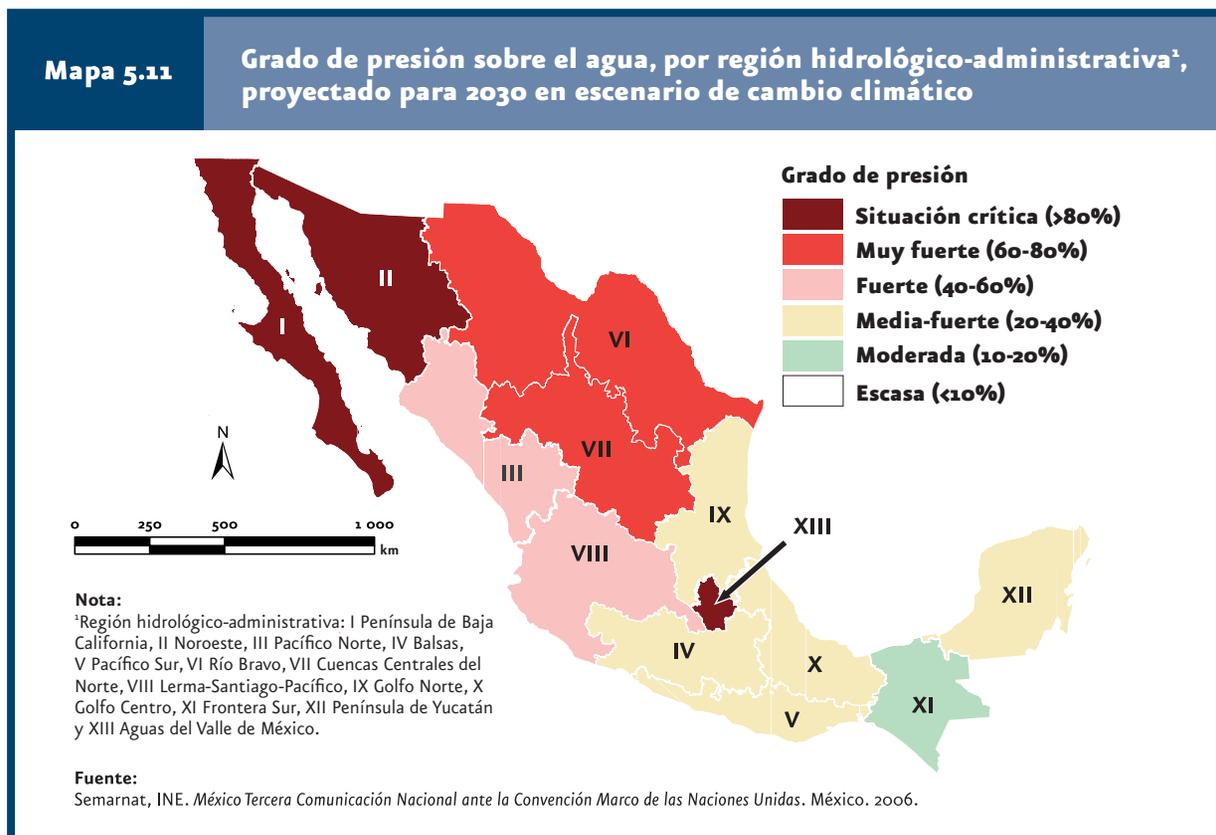
año 2000. En este escenario tanto Baja California como Sonora pasarán a una situación crítica en la presión sobre el recurso agua (Mapa 5.11).

Respecto a los ecosistemas, las proyecciones a nivel nacional indican que se afectará severamente la distribución de los pastizales, matorrales xerófilos y los bosques de encino, ya que entre 53 y 62% de la superficie de estas comunidades vegetales estará expuesta a condiciones climáticas distintas a las actuales (Semarnat, INE, 2006c).

Los escenarios del clima para el 2020 señalan reducciones moderadas en la aptitud para el cultivo de maíz de temporal e incrementos en la superficie no apta para este cultivo de hasta 4.2%.

La Canícula -temporada del año en que el calor es más fuerte- llegará sin agua con mayor frecuencia y con ello los efectos en cultivos de temporal serán negativos (Semarnat, INE, 2006c).

La disponibilidad nacional de agua podrá disminuir 10% entre los años 2020 y 2030 respecto al año 2000. Baja California y Sonora pasarán a una situación crítica en la presión sobre el recurso agua.



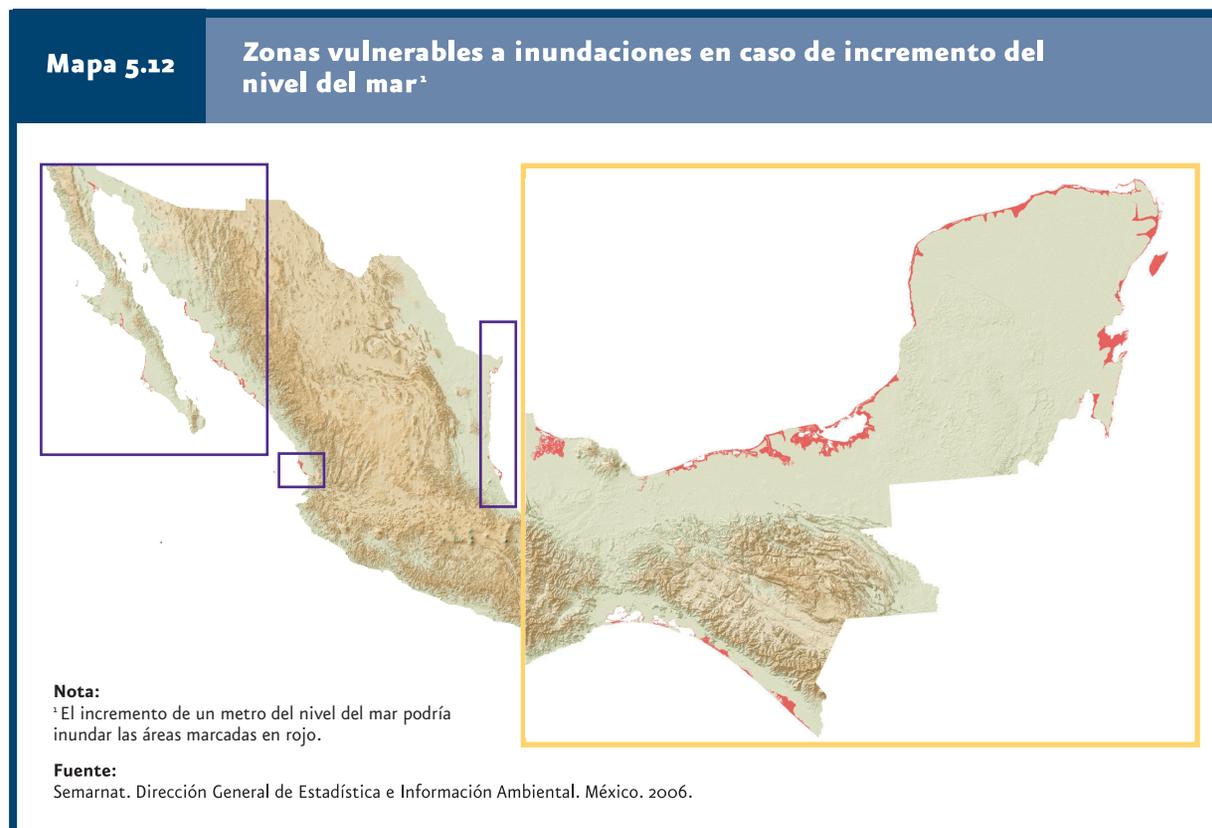
En el país existen diversas zonas costeras que pueden ser afectadas si el nivel del mar continúa aumentando (Mapa 5.12; Semarnat, 2007). De acuerdo con Magaña y Gay (2002), en México existen cerca de 20 millones de habitantes asentados en lugares de alto riesgo de inundación, lo que los hace especialmente vulnerables a las variaciones climáticas y eventos extremos como los huracanes.

Medidas para frenar y enfrentar el cambio climático

Como respuesta a esta problemática mundial surgió, en 1992, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC, por sus siglas en inglés), cuyo objetivo es lograr la estabilización de las concentraciones de GEI en la atmósfera a un nivel que minimice las interferencias antropogénicas en el sistema climático. México firmó y ratificó este acuerdo en 1992 y 1993, respectivamente (Semarnat, INE, 1999; UNEP, 2002).

Como instrumento de la UNFCCC surgió, en 1997, el Protocolo de Kioto, que estableció como obligación para los países desarrollados y las economías en transición (pertenecientes al Anexo I) la reducción en 5% de sus emisiones de GEI –tomando como base sus emisiones de 1990– para el periodo comprendido entre 2008 y 2012. Para los países en desarrollo, el Protocolo, no estableció metas cuantificables de reducción de emisiones de GEI, pero sí existen compromisos particulares, entre ellos la elaboración de inventarios nacionales de emisiones de GEI y de comunicaciones nacionales, así como estudios de mitigación y adaptación al cambio climático. México firmó este protocolo en 1998 y lo ratificó en el 2000 como país No Anexo I (países en desarrollo; Semarnat, INE, 1999).

A octubre de 2008, 182 países habían ratificado, aprobado o aceptado el Protocolo de Kioto que en conjunto representan el 63.7% de la emisión total de gases de efecto invernadero de los países desarrollados o con economías en transición (UNFCCC, 2008). Algunos de los países que más



GEI emiten a la atmósfera se han negado a ratificar el Protocolo de Kioto, entre ellos Estados Unidos, responsable de aproximadamente el 22% de las emisiones globales de CO₂. Cabe destacar que a pesar de que el Protocolo surgió en 1997, no fue sino hasta el año 2005 que entró en vigor, ya que se requería que fuera aceptado por un grupo de países Anexo I que en conjunto hubieran emitido el 55% de los GEI de 1990. Esta cifra se alcanzó a finales de 2004, cuando Rusia, responsable del 17.4% de las emisiones totales de los países Anexo I (a nivel mundial contribuye con el 6%), ratificó su adhesión al Protocolo.

En el marco de estos acuerdos internacionales, México ha impulsado distintas medidas de mitigación y adaptación al cambio climático. El país se ha destacado a nivel internacional por su participación activa para enfrentar este problema, lo que lo sitúa como la cuarta nación que más esfuerzos dedica para combatir el cambio climático. Un breve resumen de las medidas tomadas por México se presenta en la Tabla 5.3.

Ante el escenario que se presenta es evidente la necesidad de que los gobiernos tomen medidas para reducir sus emisiones de GEI y se preparen con estrategias de adaptación y mitigación al cambio climático. Se estima que los riesgos y los costos de los mayores impactos del cambio climático podrían reducirse significativamente si la humanidad logra estabilizar las concentraciones de GEI en la atmósfera entre 450 y 550 ppm de CO₂ equivalente (CO₂e). De no ser así, si la concentración supera las 550 ppm de CO₂e, los riesgos y los costos podrían incrementarse de manera exponencial. Para lograr dicha estabilización, se requiere que para el 2050 se reduzcan las emisiones globales entre 20 y 70% respecto a los niveles actuales (Stern, 2007).

De acuerdo con el Informe Stern (*Stern review: the economics of climate change*), si no actuamos el costo total por los impactos del cambio climático

A finales de 2008, 182 países habían ratificado, aprobado o aceptado el Protocolo de Kioto; estos representan el 67.7% de la emisión del GEI de los países desarrollados.

podría ser equivalente al menos al 5% anual del PIB global, ahora y para siempre. Es importante destacar que si se consideran los riesgos y los costos de escenarios menos optimistas de cambio climático el costo estimado

asciende a más de 20% del PIB global. En contraste, si se toman medidas para reducir las emisiones globales de GEI, el costo podría ser de alrededor del 1% anual del PIB global (Stern, 2007). Ante este escenario, México prepara su propio Estudio sobre las Implicaciones Económicas del Cambio Climático, el cual permitirá evaluar la magnitud de los efectos económicos del cambio climático sobre los diferentes sectores.

OZONO ESTRATOSFÉRICO

La reducción del espesor de la capa de ozono representa otro de los problemas ambientales globales más importantes, ya que esta capa regula el paso de los rayos ultravioleta (UV) emitidos por el Sol. Los rayos UV son de tres tipos: UV-A, UV-B y UV-C. La radiación UV-A es la menos nociva y la que llega en menor cantidad a la superficie terrestre. Los rayos UV-C son los más nocivos, ya que son altamente energéticos, pero la capa de ozono no permite su paso. Por último, los rayos UV-B, también muy dañinos, son en su mayor parte retenidos por la capa de ozono, aunque una pequeña parte la atraviesa alcanzando la superficie de la Tierra pudiendo causar daños a las células y tejidos de los organismos.

La capa de ozono se ha adelgazado como resultado de la acción de varios agentes, conocidos genéricamente como sustancias agotadoras del ozono (SAO). Éstos contienen en su estructura átomos de cloro, bromo y flúor que se generan principalmente como resultado de las actividades humanas. Las SAO más conocidas son los clorofluorocarbonos (CFC), pero también destacan los hidroclorofluorocarbonos (HCFC), halones, bromuro de metilo (MBR), tetracloruro

Tabla 5.3

Acciones tomadas por México en materia de cambio climático

Medidas, compromisos o acciones tomadas	Observaciones
Programa Especial de Cambio Climático (PECC; próximo a publicarse).	Este programa se basa en la Estrategia Nacional de Cambio Climático. Incluirá las medidas de acción climática (mitigación y adaptación) contenidas en los programas sectoriales o institucionales de las dependencias involucradas.
Estudio sobre las Implicaciones Económicas del Cambio Climático en México.	El estudio proveerá insumos estratégicos para el PECC y su realización. Se basa en el Informe Stern (<i>Stern review: the economics of climate change</i>), que analiza los impactos económicos globales del cambio climático.
Propuesta mexicana para la creación de un Fondo Multinacional de Cambio Climático.	México propuso la creación de este Fondo que, en principio, tendrá la participación de todos los países bajo el principio de responsabilidades compartidas pero diferenciadas. Esto significa que la aportación de cada nación se determinará considerando sus emisiones totales, sus emisiones per cápita y su Producto Interno Bruto. El propósito fundamental del Fondo será apoyar tanto acciones dirigidas a reducir la emisión de GEI, como de adaptación, así como brindar asistencia técnica para formular proyectos y programas de mitigación y adaptación en sectores prioritarios.
Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENACC).	En mayo de 2007 se publicó la ENACC, cuyos objetivos son: <ul style="list-style-type: none"> • Identificar oportunidades de reducción de emisiones y desarrollar proyectos de mitigación. • Reconocer la vulnerabilidad de los respectivos sectores y áreas de competencia e iniciar proyectos para el desarrollo de capacidades nacionales y locales de respuesta y adaptación. • Proponer líneas de acción, políticas y estrategias, que sirvan de base para la elaboración del Programa Especial de Cambio Climático que se encuentra en desarrollo.
Inventarios Nacionales de Emisiones de GEI 1990, 1994-1998 y 1990-2002.	Se han publicado tres inventarios de emisiones acompañando a sus respectivas comunicaciones nacionales. En el último inventario (1990-2002) se calcularon nuevamente las emisiones de todo el periodo.

Tabla 5.3

Acciones tomadas por México en materia de cambio climático (continúa)

Medidas, compromisos o acciones tomadas	Observaciones
Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (2006).	Hasta mayo de 2008, sólo cuatro países no Anexo I habían presentado su segunda comunicación nacional (México, Corea, Uruguay y Argentina); México es el único país en desarrollo que ha entregado su tercera comunicación nacional.
Programa Voluntario de Contabilidad y Reporte de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero.	En el año 2004, la Semarnat firmó un convenio de colaboración con el Instituto de Recursos Mundiales (WRI, por sus siglas en inglés) y el Consejo Mundial Empresarial para el Desarrollo Sustentable (WBCSD, por sus siglas en inglés) para iniciar un programa voluntario en el que las empresas reporten anualmente sus emisiones de gases de efecto invernadero. Actualmente el Programa ha sido suscrito por 52 empresas o instituciones mexicanas, entre las que destacan Pemex y dos Secretarías (la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y la Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México).
Comité Mexicano para Proyectos de Reducción y Captura de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (Comegei) y la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático.	El Comegei se creó en 2004 y funciona como un grupo de trabajo de la Comisión y su función principal es promover, difundir y evaluar proyectos del Mecanismo para un Desarrollo Limpio (previsto en el Protocolo de Kioto). La Comisión se creó en 2005 y tiene como fin formular políticas públicas y estrategias transversales de mitigación y adaptación. Está integrada por los titulares de las Secretarías de Medio Ambiente y Recursos Naturales (quien la preside y tiene a su cargo el Secretariado Técnico); Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación; Comunicaciones y Transportes; Economía; Desarrollo Social; Energía; Relaciones Exteriores y la Secretaría de Hacienda y Crédito Público como miembro invitado permanente.
Investigación científica y desarrollo tecnológico.	México es el tercer país receptor de ayuda financiera del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF, por sus siglas en inglés). De un total de casi 389 millones de dólares recibidos, México ha destinado casi 250 millones al apoyo de la investigación científica y el desarrollo tecnológico en materia de cambio climático.

Tabla 5.3

Acciones tomadas por México en materia de cambio climático (continúa)

Medidas, compromisos o acciones tomadas	Observaciones
<p>Proyectos registrados ante el Mecanismo para un Desarrollo Limpio (MDL).</p>	<p>Hasta mediados de mayo de 2008, México ocupaba el cuarto lugar mundial con 105 proyectos registrados, ante la Junta Ejecutiva del MDL, de un total mundial de mil 59 proyectos; el quinto por el volumen de Reducciones Certificadas de Emisiones (RCE) esperadas por año (7.4 megatoneladas –Mt– de un total mundial de 214.7 Mt) y el sexto por las ya obtenidas, que ascienden a 3.8 Mt (de un total mundial de 147.5 Mt).</p>
<p>Programas de gobierno que apoyan las acciones tomadas en materia de cambio climático y programas de adaptación, mitigación, comunicación y difusión del cambio climático.</p>	<p>Existe una gran cantidad de programas, estudios e iniciativas en la materia. Con el fin de ejemplificar se enlistan algunos de ellos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Entre los programas que apoyan la protección de los ecosistemas forestales y con ello a los sumideros de carbono existentes, se encuentran el ProÁrbol de Conafor, los de conservación de hábitat de la Conanp, las Unidades de Manejo Sustentable de Vida Silvestre (Uma), así como las acciones desplegadas junto con la Profepa, el ejército mexicano y las autoridades locales para evitar la tala clandestina y los incendios forestales. • Estudios para una adecuada adaptación al cambio climático a nivel nacional, sectorial, estatal, local y regional. Por ejemplo: Escenarios de cambio climático para México; Programa de modelación del clima: vulnerabilidad y adaptación en el sector agua; Vulnerabilidad del sector energía; Estudio de adaptación en el sector agua urbana en Hermosillo, Sonora y Fomento de las Capacidades para la Etapa II de Adaptación al Cambio Climático en Centroamérica, México y Cuba: sectores agrícola, forestal e hídrico. • Programas para mitigar el cambio climático en los sectores energético, transporte, social, forestal y agrícola, así como programas transversales. Por ejemplo: Aprovechamiento de fuentes renovables; Estudios de aprovechamiento de biogás; Esfuerzos de acción climática en el subsector autotransporte foráneo de carga y pasaje; Programa para desarrollar el mercado de servicios ambientales por captura de carbono,

Tabla 5.3

Acciones tomadas por México en materia de cambio climático (conclusión)

Medidas, compromisos o acciones tomadas	Observaciones
<p>Programas de gobierno que apoyan las acciones tomadas en materia de cambio climático y programas de adaptación, mitigación, comunicación y difusión del cambio climático.</p>	<p>los derivados de la Biodiversidad y para fomentar el establecimiento y mejoramiento de los Sistemas Agroforestales (PSA-CABSA); Proyecto de energías renovables para la agricultura (FIRCO) y el Fondo Mexicano de Carbono (FOMECAAR).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Programas de difusión y participación en actividades internacionales e integración del tema en políticas nacionales. Por ejemplo: Portal de cambio climático: www.ine.gob.mx/cclimatico/index.html; Centro Nacional de Observación Climática de Gran Altitud; Participación en el Panel Intergubernamental de Cambio Climático y Autoevaluación de Capacidades Nacionales para la Implementación de las Convenciones sobre Diversidad Biológica, Cambio Climático y Combate a la Desertificación.

Nota:

Para ampliar la información sobre las medidas, programas e iniciativas aquí mencionadas se recomienda visitar la página electrónica de la Semarnat y las de otras dependencias involucradas.

Fuente:

Semarnat. *Acciones de México de mitigación y adaptación ante el cambio climático global*. México. 2008. Disponible en: www.semarnat.gob.mx/queessemarnat/politica_ambiental/cambioclimatico/Pages/estrategia.aspx Fecha de consulta: 05-12-2008.

de carbono (TET) y metil cloroformo. Las SAO se utilizan comúnmente en los sistemas de refrigeración, aire acondicionado, espuma rígida de poliuretano, solventes, insecticidas, aerosoles y extintores, entre otros. Al ser emitidas, las SAO alcanzan la estratosfera, donde participan en una serie de reacciones que conducen a la liberación de átomos de cloro y bromo que destruyen el ozono; una molécula de cloro o bromo puede destruir cien mil moléculas de ozono (WMO y UNEP, 2003).

Aunque las emisiones de SAO se generan en todo el planeta y el adelgazamiento de la capa de ozono ocurre a nivel global, la circulación atmosférica desplaza la mayoría de las SAO hacia los polos. Las condiciones climáticas del Polo Sur favorecen las reacciones que convierten a las SAO en gases

reactivos que destruyen el ozono. Esta destrucción ocurre sobre la superficie de las partículas de hielo de las nubes estratosféricas que se forman sobre la Antártica en el invierno. Durante dichas reacciones se liberan cloro y bromo en formas activas que se acumulan en las nubes polares. En la primavera, cuando aumenta la temperatura, las nubes se disgregan y liberan cloro y bromo activos, que destruyen rápidamente el ozono. Por esta razón, aunque el problema es global, sus efectos son menores cerca del ecuador y se incrementan con la latitud hacia los polos, en particular hacia el Polo Sur (PNUMA, 2002, 2003; WMO y UNEP, 2003).

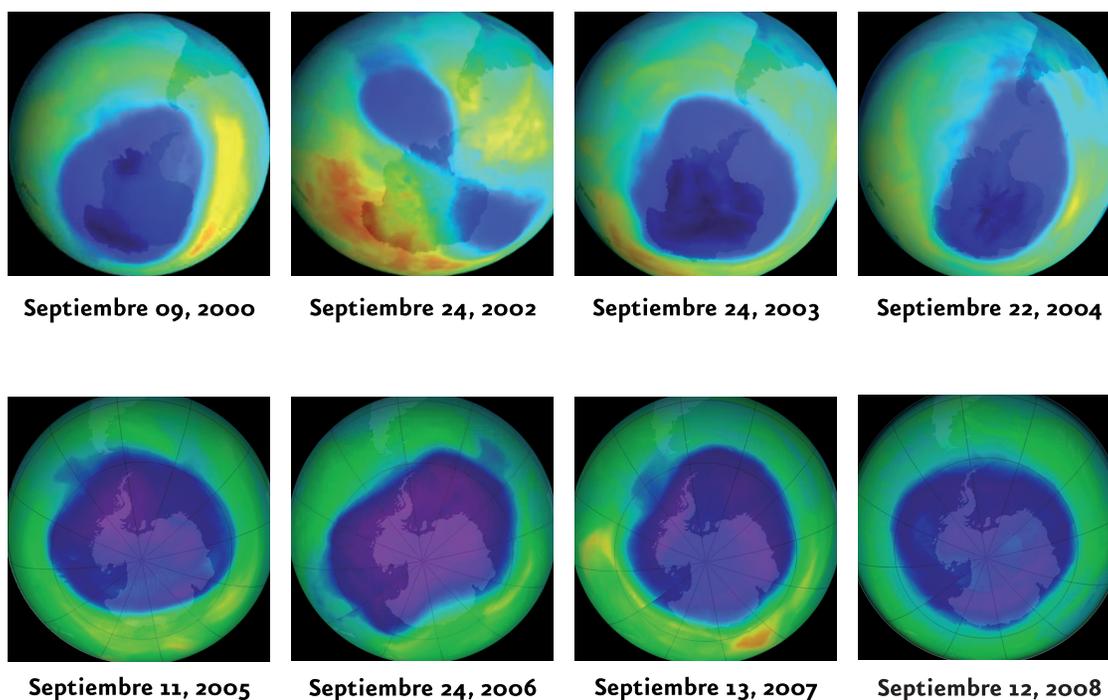
El adelgazamiento de la capa de ozono en Antártica ha producido lo que se conoce como el “agujero de ozono”¹⁴, observado por primera vez a principios

¹⁴Se considera que existe un “agujero” en la capa de ozono cuando la concentración de ozono estratosférico es menor a 220 unidades Dobson (UD) -la concentración global es de alrededor de 300 UD-. Cien unidades Dobson representan una cantidad equivalente a un milímetro de grosor de la capa de ozono, a nivel del mar y a 0°C, y es la medida para expresar el grosor de la capa (PNUMA, 2003; WMO y UNEP, 2003).

de los años ochenta y que presentó su máximo tamaño registrado en el año 2000, cubriendo cerca de 29.4 millones de km² (Figura 5.27 y Tabla 5.4). En 2008, el tamaño máximo fue de 27 millones de km², una superficie ligeramente más grande que Norteamérica (NASA, 2008).

En la Figura 5.28 se observan las concentraciones de ozono estratosférico global, para Antártica, Ciudad de México y Guadalajara, entre 1979 y 2008. Es evidente la baja concentración que se registra desde principios de los años ochenta (en el mes de octubre) en Antártica, comparada con

Figura 5.27 Imágenes del agujero de ozono, 2000 - 2008



Nota:
El área en azul representa el "agujero de ozono".

Fuentes:

- NASA. Goddard Space Flight Center. *Largest-ever ozone hole observed over Antarctica*. 2000. Disponible en: www.gsfc.nasa.gov/topstory/20000908largest_ozone_hole.html Fecha de consulta: 15-11-2000.
- NASA. *Waves in the atmosphere batter south pole, shrink 2002 ozone hole*. 2002. Disponible en: www.gsfc.nasa.gov/topstory/20021206ozonehole.html Fecha de consulta: 13-11-2000.
- NASA. *Looking at earth. NASA and NOAA Announce Ozone Hole is a Double Record Breaker*. 2006. Disponible en: www.nasa.gov/vision/earth/lookingatearth/ozone_record.html Fecha de consulta: 20-11-2006.
- NASA. *Looking at earth. NASA Date Reveals 'Average' Ozone Hole in 2007*. 2007. Disponible en: www.nasa.gov/vision/earth/environment/ozone_2007.html Fecha de consulta: 06-12-2007.
- NASA. *The ozone hole*. 2008. Disponible en: www.theozonehole.com/ozonehole2008.htm Fecha de consulta: 18-03-2009.
- NASA. *2003 Ozone 'Hole' Approaches, But Falls Short Of Record*. Nasa News. 2003. Disponible en: www.gsfc.nasa.gov/topstory/2003/0925ozonehole.html Fecha de consulta: 18-11-2003.
- NASA. *Looking at earth. 2004 Antarctic Ozone Hole*. 2004. Disponible en: www.nasa.gov/vision/earth/lookingatearth/ozone_hole_2004.html Fecha de consulta: 23-11-2004.
- NASA. *Looking at earth. NASA's Aura Satellite Peers Into Earth's Ozone Hole*. 2005. Disponible en: www.nasa.gov/vision/earth/lookingatearth/ozone_five.html Fecha de consulta: 02-12-2005.

Tabla 5.4		Superficie máxima cubierta por el agujero de ozono, 2000 - 2008
Año	Superficie máxima¹ (millones de km²)	
2000	29.4	
2001	25	
2002	20.7	
2003	28.4	
2004	24.2	
2005	24.1	
2006	27.1	
2007	24.8	
2008	27.0	

Nota:
¹ Todas las superficies presentadas en la tabla corresponden al mes de septiembre de cada año.

Fuentes:
 NASA. Goddard Space Flight Center. Largest-ever ozone hole observed over Antarctica. 2000. Disponible en: www.gsfc.nasa.gov/topstory/20000908largest_ozone_hole.html
 NASA. 2003 Ozone 'Hole' Approaches, But Falls Short Of Record. NASA News. 2003. Disponible en: www.gsfc.nasa.gov/topstory/2003/0925ozonehole.html
 British Antarctic Survey. The Ozone Hole. 2004. Disponible en: www.antarctica.ac.uk/Key_Topics/The_Ozone_Hole/index.html
 NASA. Looking at earth. 2004 Antarctic Ozone Hole. 2004. Disponible en: www.nasa.gov/vision/earth/lookingatearth/ozone_hole_2004.html
 NASA. Looking at earth. NASA's Aura Satellite Peers Into Earth's Ozone Hole. 2005. Disponible en: www.nasa.gov/vision/earth/lookingatearth/ozone_five.html
 NASA. Looking at earth. NASA and NOAA Announce Ozone Hole is a Double Record Breaker. 2006. Disponible en: www.nasa.gov/vision/earth/lookingatearth/ozone_record.html
 NASA. Looking at earth. NASA Data Reveals 'Average' Ozone Hole in 2007. Disponible en: www.nasa.gov/vision/earth/environment/ozone_2007.html
 NASA. The ozone hole. 2008. Disponible en: www.theozonhole.com/nasaoct2008.htm Fecha de consulta: 05-11-2008.

En 2008, el agujero de ozono cubrió una superficie de 27 millones de kilómetros cuadrados, que es una extensión ligeramente más grande que Norteamérica.

la concentración global (IB 1.3-3). En esa región se ha mantenido una tendencia decreciente en la concentración de ozono y aunque en algunos años



se han registrado incrementos, éstos siempre se han mantenido por debajo de la concentración global. En contraste, tanto la concentración global como la de las dos ciudades mexicanas que se muestran como referencia, no presentan cambios significativos en sus curvas de concentración, lo cual refuerza el hecho de que a pesar de que se trata de un problema generado a nivel global, sus consecuencias son regionales.

Consumo y concentración de SAO

Dado que el impacto de las SAO depende de su potencial de agotamiento del ozono¹⁵ (WMO y UNEP, 2003), en este capítulo se presentan el consumo, tanto global como nacional, ponderado por dicho potencial. Cabe mencionar que el consumo ponderado de SAO considera de manera integral el ciclo de vida de estas sustancias (producción, importación y exportación), así como su capacidad específica para destruir el ozono.

A pesar de que el consumo global de SAO disminuyó drásticamente a principios de los noventa (reducción de 90% en el periodo 1986-2004), esto no se ha reflejado en su concentración atmosférica (Figuras 5.29 y 5.30; IB 1.3-1 y 1.3-4). Esto se debe a que las SAO se han acumulado lentamente en la estratosfera, lo que ha generado que el incremento en su concentración se haya detenido y que sus niveles se mantengan relativamente



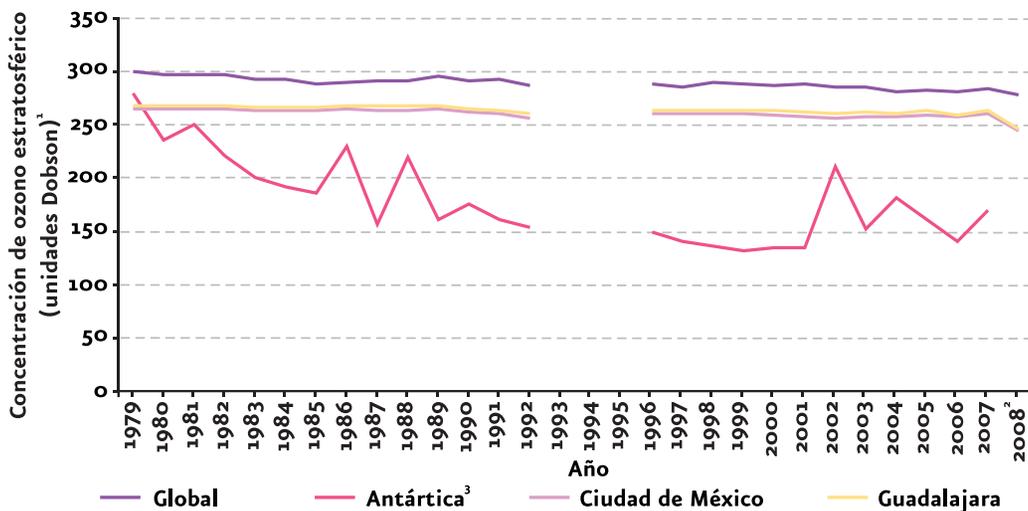
El consumo global de SAO disminuyó 90% en el periodo 1986-2004.

constantes desde principios de los años noventa (WMO y UNEP, 2003).

¹⁵Potencial de agotamiento del ozono: capacidad de cada SAO para destruir al ozono. El potencial de agotamiento del ozono (PAO) se calcula para cada sustancia, usando como referencia al CFC-11 con PAO igual a 1.

Figura 5.28

Concentración del ozono estratosférico global, en Antártica y en dos ciudades mexicanas, 1979 - 2008



Notas:

¹La unidad Dobson es una medida para estimar el grosor de la capa de ozono. Cien unidades Dobson representan una cantidad equivalente a un milímetro de grosor de la capa de ozono a 0°C y a una presión de 1 013 hectopascales, es decir a nivel del mar.

²Incluye mediciones sólo hasta marzo para el ozono global y abril para las ciudades de México y Guadalajara.

³Los promedios anuales corresponden al mes de octubre (mes en el que se registra el agujero de ozono) en Bahía Halley, Antártica.

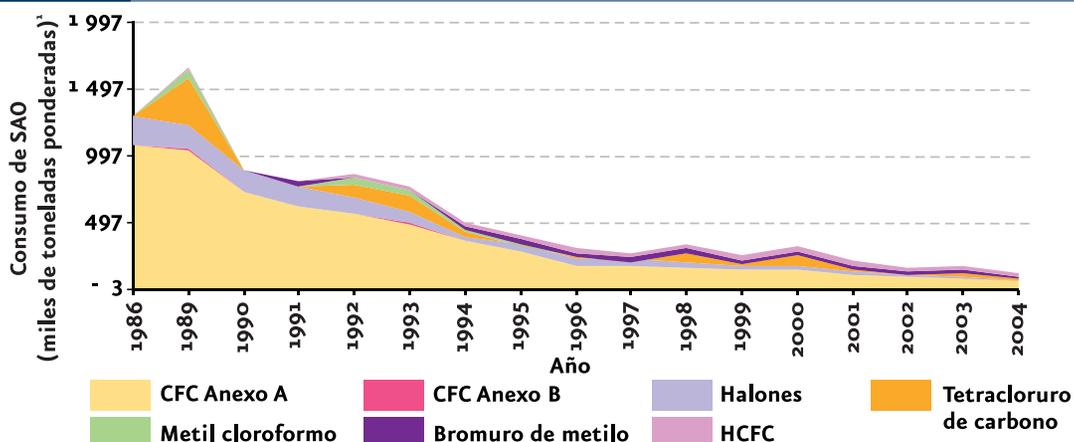
Fuentes:

NASA. Total Ozone Mapping Spectrometer. 2005. Disponible en: www.toms.gsfc.nasa.gov Fecha de consulta: 06-12-2005.

NASA. Aura Validation Center. 2008. Disponible en: www.avdc.gsfc.nasa.gov/ Fecha de consulta: 29-10-2008.

Figura 5.29

Consumo global ponderado de sustancias agotadoras del ozono, 1986 - 2004



Nota:

¹ El consumo es el resultado de la producción más la importación menos la exportación de SAO. Algunos datos de consumo son negativos debido a que la exportación fue mayor a la producción e importación. El consumo neto es ponderado por el potencial de agotamiento de la capa de ozono que posee cada sustancia.

Fuente:

UNEP. Production and Consumption of Ozone Depleting Substances under the Montreal Protocol 1986 – 2004. Ozone Secretariat, UNEP. Kenya. 2005.

En los escenarios más optimistas, se predice que la capa de ozono podría comenzar a recuperarse en 10 o 20 años y su recuperación plena no llegaría antes de la primera mitad del siglo XXI (PNUMA, 2002). Esta incertidumbre se debe, en parte, a que algunos estudios plantean que se requieren series históricas más largas y una mayor comprensión de los procesos atmosféricos y sus efectos sobre el ozono para poder predecir cuándo se recuperará la capa de ozono. Además de la concentración atmosférica de SAO, existen otros factores que influyen en la destrucción del ozono como la temperatura en la estratosfera, la actividad solar, la concentración atmosférica de

gases como el metano, vapor de agua y el óxido nítrico (Weatherhead y Andersen, 2006; ver el Recuadro *¿Están relacionados el cambio climático y el adelgazamiento de la capa de ozono?*).

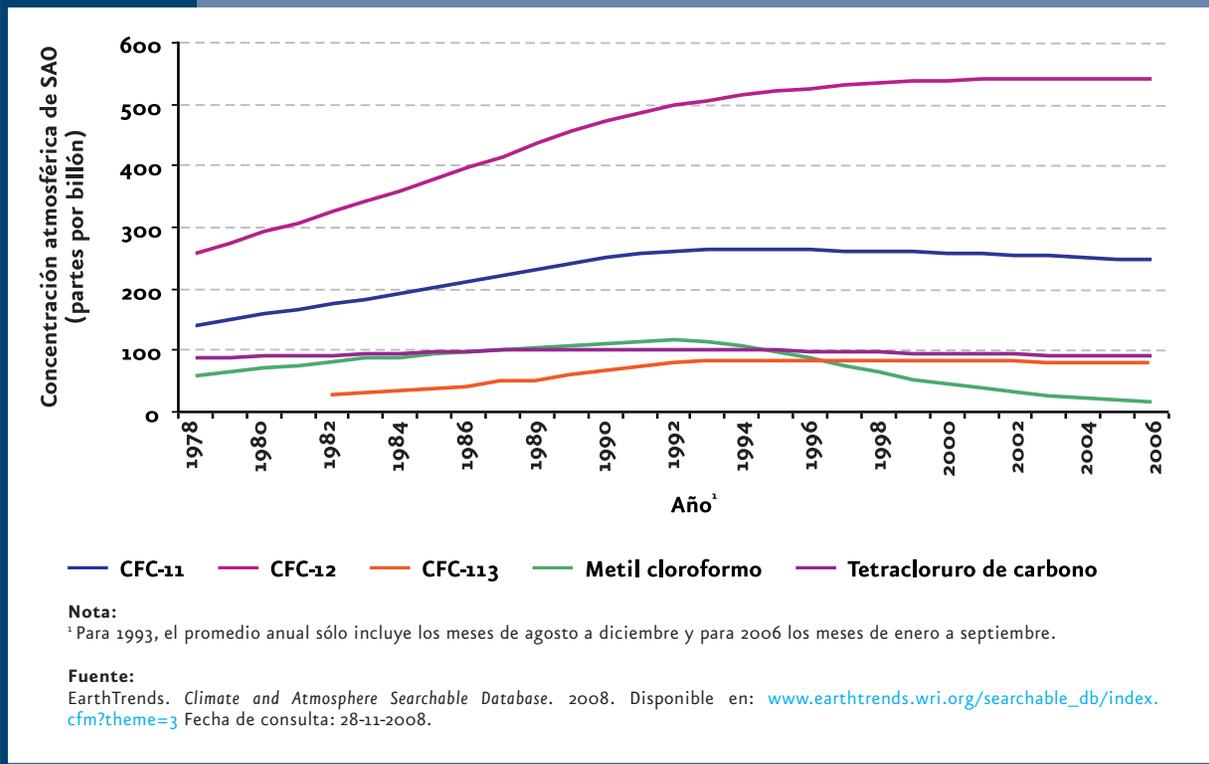
En México, el consumo total de SAO ponderado disminuyó 95% en 2007 (se consumieron 764 toneladas) comparado con el reportado en 1989 (15 mil toneladas en el año de entrada en vigor del Protocolo de Montreal¹⁶; Figura 5.31; IB 1.3-2; IC9). Esta disminución es debida principalmente a la eliminación del consumo de CFC como parte del cumplimiento de metas de México para proteger la capa de ozono.

El consumo nacional de SAO disminuyó 95% en el periodo 1989-2007.



Figura 5.30

Concentración atmosférica global de sustancias agotadoras del ozono, 1978 - 2006



¹⁶ Tratado internacional que establece los compromisos de reducción de la producción y el consumo de SAO con el fin de proteger la capa de ozono.

Recuadro

¿Están relacionados el cambio climático y el adelgazamiento de la capa de ozono?

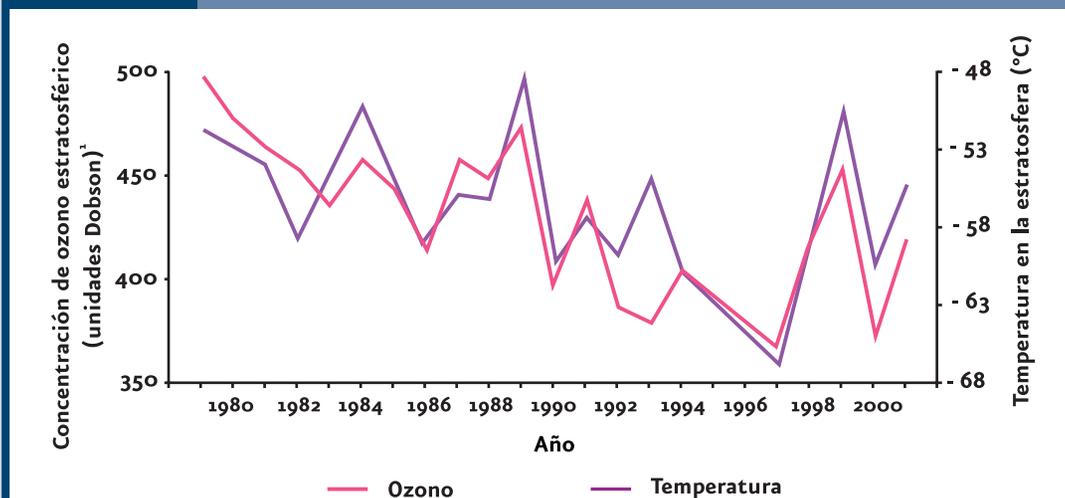
A pesar de que comúnmente el cambio climático y el problema del adelgazamiento de la capa de ozono se han visto como dos problemas globales independientes, recientes hallazgos demuestran que en realidad podrían existir complejas interacciones entre ellos.

El adelgazamiento de la capa de ozono, además de permitir una mayor penetración de la radiación UV-B, genera también el enfriamiento de las zonas altas de la atmósfera. El ozono normalmente retiene la radiación infrarroja (calor) que proviene de la superficie terrestre, por lo que al adelgazarse

la capa de ozono se reduce la cantidad de calor retenido, generándose temperaturas más bajas en la estratosfera. Esto se apoya en observaciones que muestran que zonas entre los 30 y 50 km de altura se han enfriado entre 1 y 6°C en décadas recientes (Figura a), paralelamente con el incremento de las concentraciones de GEI en la troposfera. El enfriamiento en la estratosfera es uno de los requisitos indispensables para la pérdida del ozono, ya que favorece, en ciertas zonas del globo –sobre Antártica, por ejemplo– la formación de las nubes polares que facilitan las reacciones químicas entre los clorofluorocarbonos (CFCs) y el ozono.

Figura a

Concentración de ozono y temperatura estratosféricas 1979 - 2001



Nota:

¹ La unidad Dobson es una medida para estimar el grosor de la capa de ozono. Cien unidades Dobson representan una cantidad equivalente a 1 milímetro de grosor de la capa de ozono a 0°C y a una presión de 1 013 hectopascales, es decir a nivel del mar.

Fuente:

NASA Earth Observatory. *The Ozone Hole. Ozone and Climate Change*. 2004. Disponible en: www.theozonehole.com/climate.htm
Fecha de consulta: 18-12-2008.

Recuadro

¿Están relacionados el cambio climático y el adelgazamiento de la capa de ozono? (conclusión)

Sin embargo, se ha sugerido que la acumulación de gases de efecto invernadero (GEI) en la troposfera podría favorecer la pérdida del ozono estratosférico. Una hipótesis sostiene que el calentamiento de la troposfera inducido por la acumulación de estos gases podría retener el calor en esta capa de la atmósfera e impedir el calentamiento natural de la estratosfera, produciendo un efecto de enfriamiento y con ello, la destrucción del ozono.

Todo lo anterior ha hecho pensar que, dadas la interacción entre fenómenos, la recuperación de la capa de ozono podría darse, no como se había previsto hacia

el año 2050, sino hasta el 2060 o 2070. No obstante, son necesarios muchos más estudios que comprueben la existencia de la relación entre la acumulación de los GEI y el adelgazamiento de la capa de ozono, los cuales permitan conocer con mayor detalle la dinámica de destrucción de las moléculas del ozono y con ello, su posible recuperación en el tiempo.

Referencias:

IPCC. *The AR4 Synthesis Report*. France. 2007.

NASA Earth Observatory. *The Ozone Hole. Ozone and Climate Change*. 2004. Disponible en: www.theozonehole.com/climate.htm Fecha de consulta: 18-12-2008.

Protección de la capa de ozono

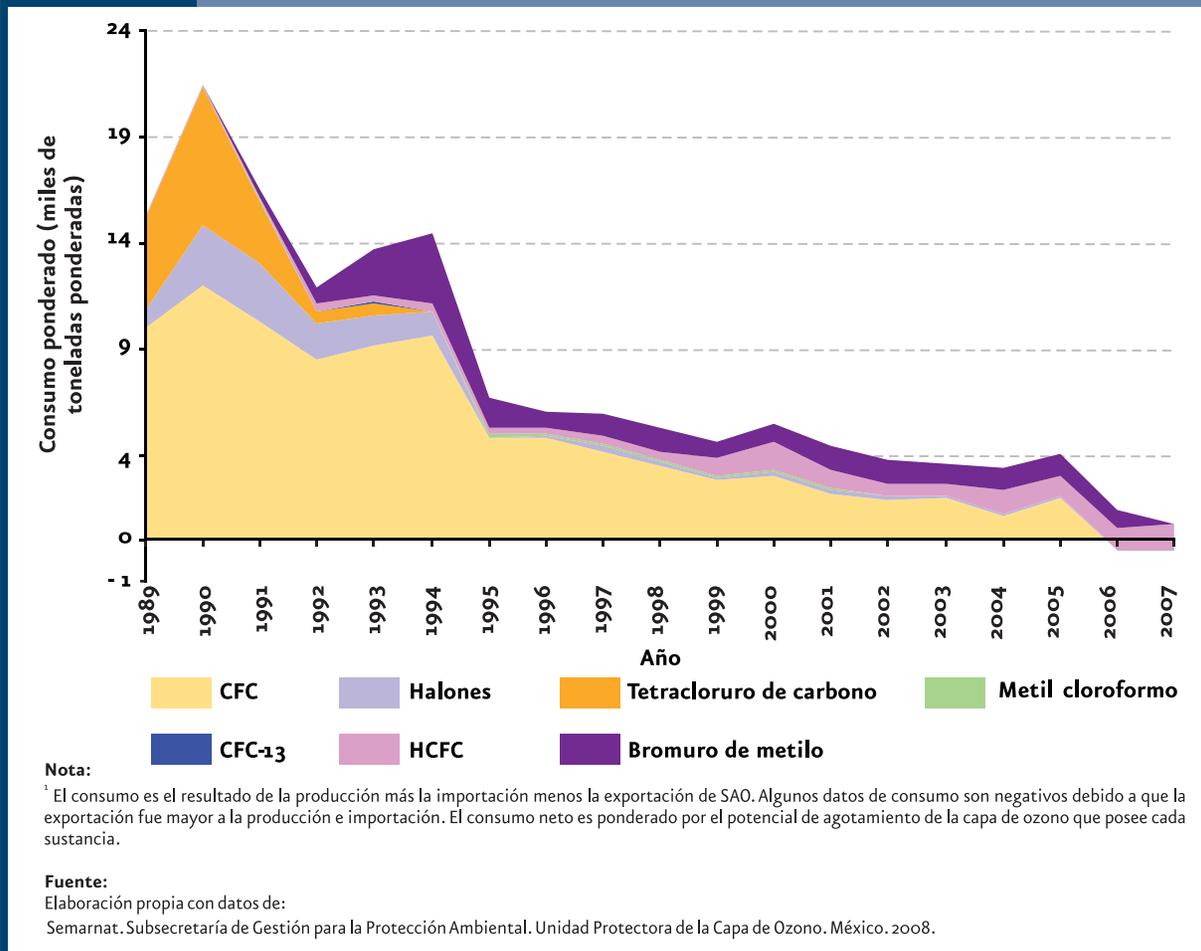
La preocupación de la comunidad científica y de los gobiernos de diversos países por la pérdida del ozono estratosférico llevó a la adopción de la Convención de Viena sobre la Protección de la Capa de Ozono (1985) y del Protocolo de Montreal sobre Sustancias que Degradan la Capa de Ozono (1987), en los cuales se establecieron compromisos para reducir el consumo y la producción de SAO (PNUMA, 2003). México firmó estos tratados, y adoptó las enmiendas de Londres, Copenhague y recientemente las de Montreal (2006) y Beijing (2007). Para 1995, la mayoría de las sustancias agotadoras de ozono incluidas en el Protocolo de Montreal habían dejado de producirse en los países industrializados. En el caso de los países en desarrollo, el protocolo especificó un periodo de gracia de diez años para su eliminación y,

además, se ofrecieron apoyos financieros que les permitirían a estos países enfrentar los costos de eliminar las SAO.

Además de disminuir el consumo de SAO, México se ha adelantado a los controles internacionales, ya que para varias de las sustancias alcanzó las metas comprometidas antes de la fecha de vencimiento. La estrategia que ha seguido el país se basa en las medidas siguientes: 1) control del consumo y producción de SAO, 2) fomento y asesoría sobre el uso de sustancias alternativas que minimicen los impactos en la capa de ozono, 3) introducción de tecnologías limpias que empleen sustancias alternativas a las SAO y 4) capacitación a los usuarios sobre las medidas de conservación de la capa de ozono. Dicha estrategia se enmarca en el calendario de reducción comprometido por los países ante el Protocolo de Montreal.

Figura 5.31

Consumo nacional ponderado de sustancias agotadoras del ozono, 1989 - 2007¹



De las metas comprometidas por México destaca que para los CFC, tetracloruro de carbono (TET) y metil cloroformo (MCF), México cumplió con las metas que se había planteado anticipadamente. Por ejemplo, para los CFC en el año 2007 se reportó un consumo negativo, ya que se eliminó la producción de estas sustancias y la exportación fue mayor que la importación (Figura 5.32). Para información más detallada sobre producción, importación, exportación y consumo de SAO en México se recomienda consultar los Cuadros: [D3_AIRE03_01](#), [D3_AIRE03_02](#), [D3_AIRE03_03](#) y [D3_AIRE03_04](#).

México ha cumplido con las metas de reducción de consumo de varias SAO, como los CFC, TET y MCF.

Como parte del fomento al uso de sustancias alternativas, se han empleado algunas menos dañinas a la capa de ozono. Por ejemplo, los HCFC han sustituido a los CFC, ya que poseen menor potencial de agotamiento de ozono. En México, los HCFC consumidos poseen potenciales de agotamiento de entre 0.04 y 0.07, mientras que los CFC van de 0.6 a 1.0. La Figura 5.33 muestra el resultado de la sustitución de CFC, es decir, mientras el consumo de CFC usados principalmente en la refrigeración y aire acondicionado ha disminuido, el consumo de HCFC ha ido incrementándose (IB 1.3-5).



Figura 5.32

Consumo nacional de CFC y metas comprometidas para alcanzar ante el Protocolo de Montreal, 1989 - 2007



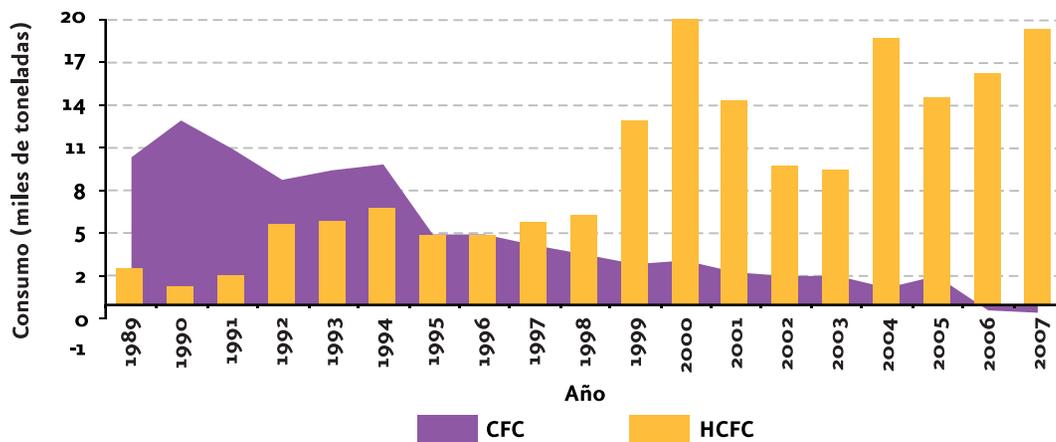
Línea base: consumo promedio 1995-1997 (4 643.5 toneladas métricas). A partir de este consumo promedio, las metas son la reducción del 50% en 2005, 85% en 2007 y 100% en 2010.

Fuente:

Semarnat. Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental. Unidad Protectora de la Capa de Ozono. México. 2008.

Figura 5.33

Consumo nacional de HCFC como sustancias alternativas a los CFC, 1989 - 2007¹



Nota:

¹ El consumo es el resultado de la producción más la importación menos la exportación de SAO. Algunos datos de consumo son negativos debido a que la exportación fue mayor a la producción e importación.

Fuente:

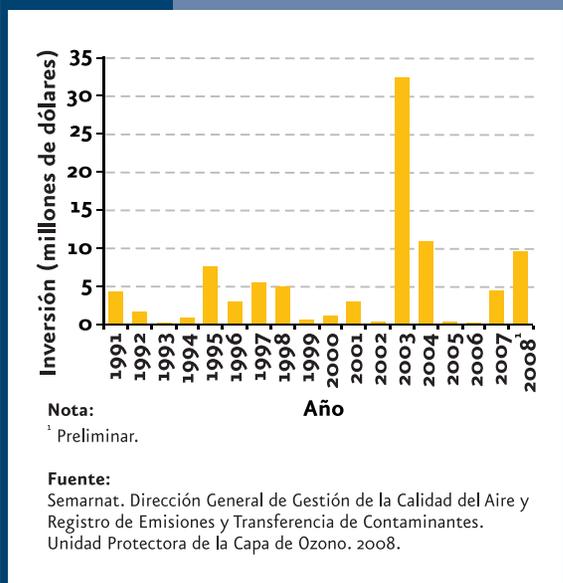
Semarnat. Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental. Unidad Protectora de la Capa de Ozono. México. 2008.

Cabe señalar que incluso para los HCFC existen metas de reducción de consumo. Esta sustitución, así como la disminución generalizada del consumo de SAO, ha sido el resultado del apoyo a proyectos de inversión en tecnologías limpias en sectores que emplean estas sustancias, tales como el de la refrigeración, aire acondicionado, solventes, espumas de poliuretano y fumigación, entre otros.

Para auxiliar a los países en desarrollo a cumplir con las medidas de control adoptadas ante el Protocolo de Montreal, existe a nivel internacional el Fondo Multilateral para la Implementación del Protocolo de Montreal (PNUMA, 2003; UNEP, 2001, 2003). Los recursos de este Fondo se dirigen a impulsar la introducción de tecnologías limpias y la capacitación de los usuarios de SAO. En el periodo 1991-2008, este Fondo destinó alrededor de 2 mil 400 millones de dólares a nivel mundial para apoyar a los países en desarrollo en la ejecución de proyectos y dentro de ellos otorgó poco más de 91.5 millones de dólares a México (Figura 5.34).

Figura 5.34

Fondos otorgados a México por el Fondo Multilateral para la Implementación del Protocolo de Montreal, 1991 - 2008



A nivel nacional y con el fin de implementar las medidas necesarias para el cumplimiento de los compromisos de México ante el Protocolo de Montreal, hace más de diez años se creó la Unidad de Protección a la Capa de Ozono, dependiente de la Semarnat (Semarnat, 2007). Entre los logros que se han obtenido destaca la eliminación del consumo de CFC, debido a la ejecución de más de 100 proyectos para la sustitución del uso de estas sustancias en los refrigeradores domésticos, comerciales, aires acondicionados, aerosoles, solventes y espumas de poliuretano. Como parte de la estrategia de eliminación de CFC, en el año 2005 se cerró la planta de producción de estas sustancias, con lo cual nuestro país se adelantó cuatro años a lo establecido por el Protocolo de Montreal. Con ello, además de anular la producción en México, se generó una reducción de 12% de la producción mundial y de 60% en América Latina.

Por otro lado, se desarrolló el Sistema de Información y Monitoreo de Importaciones, Exportaciones y Producción de Sustancias Agotadoras de la Capa de Ozono (SISSAO) para vigilar la importación y exportación de estas sustancias y contar con un registro estadístico. También están en marcha proyectos para brindar asistencia técnica y capacitación a usuarios de bromuro de metilo -sustancia que se utiliza como plaguicida para la fumigación de suelos y sistemas de almacenamiento de granos y harinas- para reducir su consumo.

REFERENCIAS

CBD. *Interlinkages between Biological Diversity and Climate Change. Advice on the Integration of Biodiversity Considerations into the Implementation of the United Nations Framework Convention on Climate Change and its Kyoto Protocol*. CBD Technical Series No. 10. Montreal. 2003.

- Cifuentes, L., V. H. Borja-Aburto, N. Gouveia, G. Thurston y D. Lee. Hidden Health Benefits of Greenhouse Gas Mitigation. *Science* 293: 1257-1259. 2001.
- Conabio. "El Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad". *Biodiversitas* 44: 1-15. 2002.
- Conagua. *Estadísticas del Agua en México*. México. 2007.
- Delgado, G. H. Volcano-Ice Interactions in Mexico: Extinction of Glaciers at Popocatepetl and the Fate of the Glaciers of Iztaccíhuatl and Citlaltépetl Volcanoes. *American Geophysical Union*. Vol. 33. 2007.
- DOF. Modificación a la NOM-020-SSA1-1993. México. 2002 (30 de octubre).
- DOF. Modificación a la NOM-025-SSA1-1993. México. 2005 (26 de septiembre).
- DOF. NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005. México. 2006 (30 de enero).
- EEA. *Impacts of Europe's changing climate*. 2004. Disponible en: http://reports.eea.europa.eu/climate_report_2_2004/en Fecha de consulta: 10-11-2008.
- GDF. *Gaceta Oficial del Distrito Federal*. México. 2006a.
- GDF. *Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2004*. México. 2006b.
- IEA, OECD. *Map Energy Indicators - Latin America - CO2 / Population 2005*. 2008. Disponible en: www.iea.org/Textbase/country/maps/LAMERICA/co2_pop.htm Fecha de consulta: 06-12-2008.
- IEA. *Key World Energy Statistics*. 2007.
- INE. Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana y Regional. México 2007.
- INEGI. Dirección General de Contabilidad Nacional y Estadísticas Económicas. México. 2007.
- IPCC. *Climate Change 2001: the Scientific Basis*. Cambridge University Press. United Kingdom. 2001.
- IPCC. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2007a.
- IPCC. *The AR4 Synthesis Report*. France. 2007b.
- Keeling, C.D. y T.P. Whorf. Atmospheric CO₂ Records from Sites in the SIO Air Sampling Network, 2005. En: *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center. USA. Disponible en: <http://cdiac.ornl.gov/trends/co2/sio-keel.html> Fecha de consulta: 27-09-2008.
- Magaña, V. O. y C. Gay. Vulnerabilidad y adaptación regional ante el cambio climático y sus impactos ambientales, sociales y económicos. *Gaceta Ecológica* 65: 7-23. 2002.
- NAS. *Climate Change Science. An Analysis of Some Key Questions*. National Academy Press. Estados Unidos. 2001.
- NASA. *The ozone hole*. 2008. Disponible en: www.theozonehole.com/nasaoct2008.htm Fecha de consulta: 19-12-2008.
- OCDE. *Evaluación del desempeño ambiental en México*. Francia. 2003.
- OECD. *OECD in Figures. Statistics on the Member Countries*. France. 2002.
- OECD. *OECD in Figures 2004 Edition. Statistics on the Member Countries*. France. 2004.
- OECD. *OECD in Figures 2007 Edition*. France. 2007.
- Parmesan, C. y Yohe, G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across

natural systems. *Nature* 421:37-42. En: The Royal Society. Biodiversity-climate interactions: adaptation, mitigation and human livelihoods. 2007.

PNUMA. *Acción por el ozono*. Kenya. 2000.

PNUMA. *Perspectivas del medio ambiente mundial GEO-3*. Grupo Mundi-Prensa. España. 2002.

PNUMA. *GEO América Latina y el Caribe. Perspectivas del Medio Ambiente 2003*. Costa Rica. 2003.

Ralston, H., B., Horstmann, y C., Hol. Climate change changes Tuvalu. *Germanwatch*. 2004.

Rehfish, M. M., C. J., Feare, N. V., Jones, y C. Spray. Climate change and coastal birds. *Ibis* 146 Supplement 1. 2004.

SE, GEM, SMAGDF, Semarnat y SS. *Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2002-2010*. México. 2003.

Semarnat, INE. *Estrategia Nacional de Acción Climática*. México. 1999.

Semarnat-INE. *Gestión de la calidad del aire en México. Logros y retos para el desarrollo sustentable 1995-2000*. México. 2000.

Semarnat, GEP y SMRN. *Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de Puebla 2006-2011*. México. 2006.

Semarnat, INE. *Cambio climático: una visión desde México*. México. 2004.

Semarnat, INE. *Inventario de emisiones de los estados de la frontera norte de México, 1999*. México. 2005.

Semarnat, INE. *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2002*. México. 2006a.

Semarnat, INE. *Inventario nacional de emisiones de México, 1999*. México. 2006b.

Semarnat, INE. *México Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. México. 2006c.

Semarnat. *¿Y el medio ambiente? Problemas en México y el mundo*. México. 2007.

Semarnat. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes. México. 2005.

Semarnat. *Implementación del Protocolo de Montreal en México*. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes. 2007. Disponible en: www.semarnat.gob.mx/gestionambiental/calidaddelaire/Pages/proteccionalacapadeozono.aspx Fecha de consulta: 19-12-2008.

Semarnat. *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales, 2002*. México. 2003.

Semarnat-INE, GEG, GMS. *Programa para mejorar la calidad del aire en Salamanca*. México. 2004.

Sener. *Programa Energía y Medio Ambiente hacia el Desarrollo Sustentable Sener-Semarnat 2002*. México. 2003.

Smith, J. B., J. L., Jeerey y B. Hurd. The Difficulties of Estimating Global Non-Market Damages from Climate Change. En: Griffin, J. M. *Global Climate Change. The Science, Economics and Politics*. United Kingdom. 114-139. 2003.

Stern, N. *Stern Review. The Economics of Climate Change*. United Kingdom. 2007.

Stewart, B. A. y C. A. Robinson. Land Use Impact on Carbon Dynamics in Soils of the Arid and Semiarid Tropics. En: Lal, R., J. M. Kimble y B. A., Stewart. *Global Climate Change and Tropical Ecosystems*. CRC Press. United States. 251-257. 2000.

Taub, D. R., Miller, B. y Allen, H. Effects of elevated CO₂ on the protein concentration of food crops: a meta analysis. *Global Change Biology* 14: 565-575. 2008.

The Royal Society. *Biodiversity-climate interactions: adaptation, mitigation and human livelihoods*. United Kingdom. 2007.

Townsend, P. A., M. A. Ortega-Huerta, J. Bartley, V. Sánchez-Cordero, J. Soberón, R. H. Buddemeier y D. R. Stockwell. Future Projections for Mexican Faunas under Global Climate Change Scenarios. *Nature* 416: 626-629. 2002.

UNEP. *Global Environment Outlook 2000*. Earthscan Publications. United Kingdom. 1999.

UNEP. *Multilateral Fund for the Implementation of the Montreal Protocol*. 2003. Disponible en: www.multilateralfund.org/ Fecha de consulta: 19-12-2008

UNEP. *Protecting the Ozone Layer*. Volume 1 Refrigerants. Malta. 2001.

UNEP. *UNFCCC Convention on Climate Change*. Climate Change Secretariat. Francia. 2002.

UNFCCC. *Kyoto Protocol. Status of Ratification*. 2008. Disponible en: http://unfccc.int/kyoto_protocol/status_of_ratification/items/2613.php Fecha de consulta: 07-12-2008.

UNFPA. *Estado de la población mundial 2005. La promesa de igualdad. Equidad de género, salud reproductiva y Objetivos de Desarrollo del Milenio*. UNFPA. 2005.

Weatherhead, E. C. y S. B., Andersen. The search for signs of recovery of the ozone layer. *Nature* 441: 39-45. 2006.

Webster, P.J., G.J. Holland, J.A. Curry y H. R. Chang. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science* 309: 1844-1846. 2005.

Welbergen, J. A., Klose, S. M., Markus, N. y Eby, P. Climate change and the effects of temperature extremes on Australian Flying-foxes. *Proceedings of The Royal Society*. 2007.

WMO, UNEP. *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002. Global Ozone Research and Monitoring Project*. Report No. 47. Ginebra. 2003.

WRI. *A Guide to the Global Environment 1998-1999*. Oxford. United States of America. 1998.

WRI. *World Resources 1998-99. A Guide to the Global Environment*. Oxford University Press. United States of America. 1998.

