

# Calidad del aire, condiciones meteorológicas y climáticas en Ciudad de México

por Luisa T. Molina<sup>1</sup>, Benjamin de Foy<sup>2</sup>,  
Óscar Vázquez Martínez<sup>3</sup> y Víctor Hugo Páramo Figueroa<sup>3</sup>

El Área metropolitana de la Ciudad de México (AMCM) constituye una de las megalópolis más grandes del mundo, con una población estimada en 20 millones de habitantes, que viven en el lecho seco del lago Texcoco y sus inmediaciones. La cuenca interna se encuentra a una altitud de 2 240 metros sobre el nivel del mar, y está rodeada en tres de sus lados por montañas y volcanes, con una abertura hacia la meseta mexicana en el norte y una interrupción en la continuidad montañosa en el sureste. Con un diámetro de unos 50 km y un espacio limitado para su ampliación, el AMCM cuenta con una elevada densidad de población y un alto índice de actividades industriales y comerciales (Figura 1). Representa alrededor del 20 por ciento de la población de México y el 9 por ciento de sus emisiones de gases de efecto invernadero, con vertidos equivalentes a 60 millones de toneladas de dióxido de carbono al año.

## Estrategias y tendencias de cara a la gestión de la calidad del aire

Durante el siglo XX, Ciudad de México experimentó un gran incremento en población y de zonas urbanizadas, puesto que hasta ella llegaron inmigrantes procedentes de otros lugares del país, y la industrialización estimuló el crecimiento económico (Figura 2). El crecimiento demográfico,



L.T. Molina

Figura 1 — Vista aérea de Ciudad de México

una motorización y actividades industriales cada vez mayores, una cuenca limitada y un elevado índice de radiación solar se han aliado para ocasionar importantes problemas en la calidad del aire, relacionados con agentes contaminantes primarios y secundarios. La red automática de control de la calidad del aire, creada a finales de la década de 1980, reveló elevadas concentraciones de todas las clases de los principales agentes contaminantes: plomo, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre, ozono y materia

particulada (PM). El ozono superaba los niveles aceptables de calidad del aire en más del 90 por ciento de los días y marcaba máximos por encima de 300 partes por mil millones (casi el triple del nivel estándar) entre 40 y 50 días al año: una de las peores cifras del mundo (Molina y Molina, 2002).

Tanto el gobierno mexicano como los ciudadanos de Ciudad de México han admitido que la contaminación atmosférica representa una gran preocupación medioambiental y social desde mediados de los años ochenta. En la década de 1990 se desarrollaron y aplicaron exhaustivos programas de gestión de la calidad del aire. Entre las acciones concretas

1 Centro Molina de energía y medio ambiente, California, e Instituto tecnológico de Massachusetts, Massachusetts (Estados Unidos)

2 Universidad de San Luis, San Luis, Missouri (Estados Unidos)

3 Secretaría de medio ambiente, Gobierno del Distrito Federal (México)

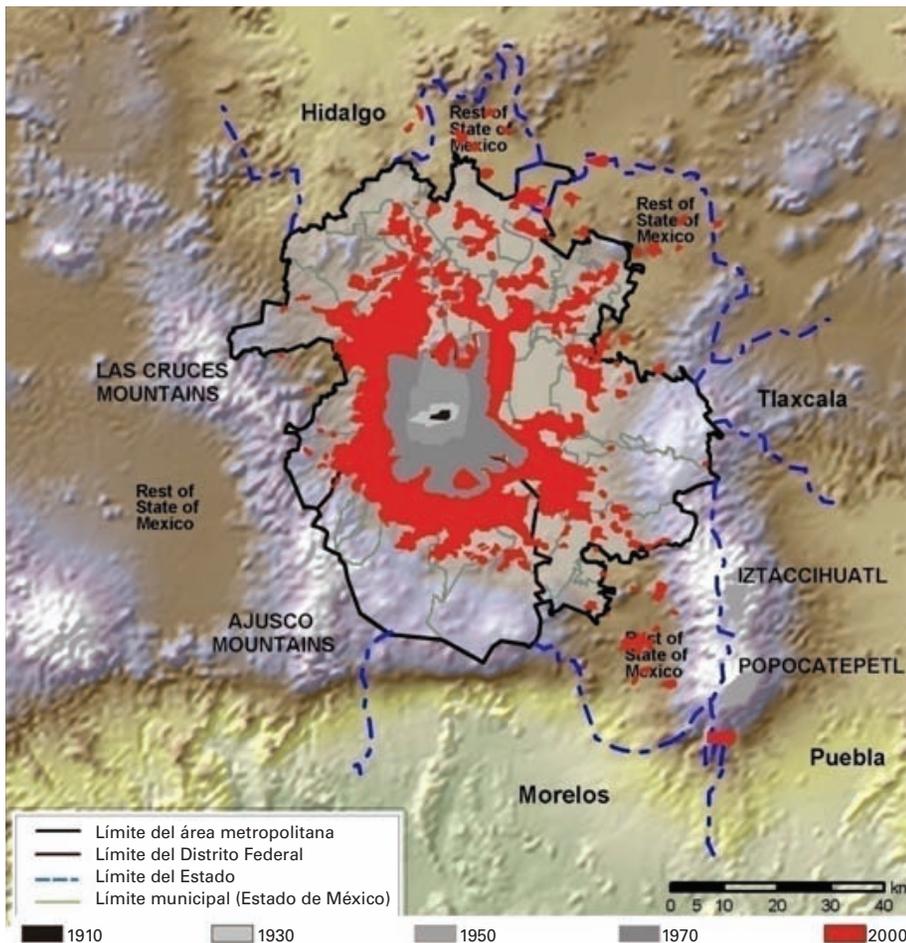


Figura 2 — Mapa topográfico de la expansión urbana correspondiente al área metropolitana de la Ciudad de México

llevadas a cabo figuraban la eliminación del plomo en las gasolinas y la implantación de convertidores catalíticos en los automóviles, la reducción del contenido de azufre en el combustible diésel de los transportes, la sustitución del gasóleo por gas natural en la industria y en las centrales eléctricas, y la reformulación del gas licuado de petróleo utilizado en calefacciones y cocinas. El gobierno también endureció las inspecciones a los vehículos y el programa de mantenimiento: los vehículos tenían que revisarse con arreglo a un sistema centralizado, y era necesario realizar inspecciones más frecuentes en el caso de los vehículos con unos índices de emisión mayores, como incentivo encaminado a promover la renovación del parque automovilístico y a ayudar a garantizar el mantenimiento adecuado de los vehículos. Además, la puesta en práctica del “Hoy no circula”, que hacía que los vehículos privados no circularan durante un día a la semana, ha resultado eficaz a la hora de modernizar el parque automovilístico, eximiendo a

los vehículos de bajas emisiones de atenerse a esa regla.

Como resultado de estas acciones reguladoras y en combinación con el cambio tecnológico, las concentraciones de los principales agentes contaminantes han ido reduciéndose durante la última década, a pesar del continuo crecimiento de la población y de la actividad económica (Figura 3). Sin embargo, los niveles de Ciudad de México en lo que respecta a materia particulada y ozono siguen superando los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud.

La Comisión ambiental metropolitana (CAM), un organismo que involucra a varias agencias y en el que tienen cabida las autoridades medioambientales del gobierno federal, del Estado de México y del Distrito Federal, se creó a mediados de los años noventa con la intención de coordinar las políticas y los programas que se desarrollan en el área metropolitana. El actual programa de ges-

ción de la calidad del aire, PROAIRE 2002-2010, incluye varias medidas nuevas para aumentar aún más esa calidad y recoge una mayor cantidad de datos de observación a fin de mejorar el inventario de emisiones del AMCM (Molina y Molina, 2002; CAM, 2002). En 2003 se llevó a cabo una gran campaña de medidas sobre el terreno, financiada por la CAM (Molina y otros, 2007) y, en 2006, Ciudad de México fue seleccionada como caso de estudio para el programa MILAGRO (Iniciativa de megaciudad: observaciones de investigación local y global), un proyecto científico internacional encaminado a investigar el caudal de emisiones procedentes de una megalópolis (Molina y otros, 2008). Estos estudios sobre el terreno han permitido disponer de conjuntos exhaustivos de datos dirigidos a actualizar y mejorar el inventario de emisiones, y también de los procesos químicos, de dispersión y de transporte de los agentes contaminantes emitidos a la atmósfera del AMCM, además de sus impactos a escala regional y mundial.

Una de las medidas importantes del programa PROAIRE 2002-2010 se centra en el sector del transporte, la fuente más importante de contaminantes vertidos a la atmósfera del AMCM. Ciudad de México ha adoptado hace poco el sistema de autobús de tránsito rápido, diseñado inicialmente para la ciudad de Curitiba (Brasil), e implantado con éxito en Bogotá (Colombia), donde el espacio principal de las carreteras fue asignado a los autobuses de gran capacidad y bajas emisiones. Un estudio reciente llevado a cabo por investigadores de la SEMARNAT-INE puso de manifiesto que la exposición al monóxido de carbono, a los hidrocarburos y a la materia particulada por parte de las personas que diariamente se desplazaban a su lugar de trabajo se había reducido aproximadamente en un 50 por ciento cuando los populares minibuses de 22 plazas movidos por gasolina fueron sustituidos por modernos autobuses tipo diésel (Metrobús), que se desplazaban por un carril cerrado o destinado al tráfico de los mismos (Wöhrensimmel y otros, 2008). Este estudio corroboró las conclusiones de Bogotá en el sentido de que el sistema de autobuses de tránsito rápido puede reducir simultáneamen-

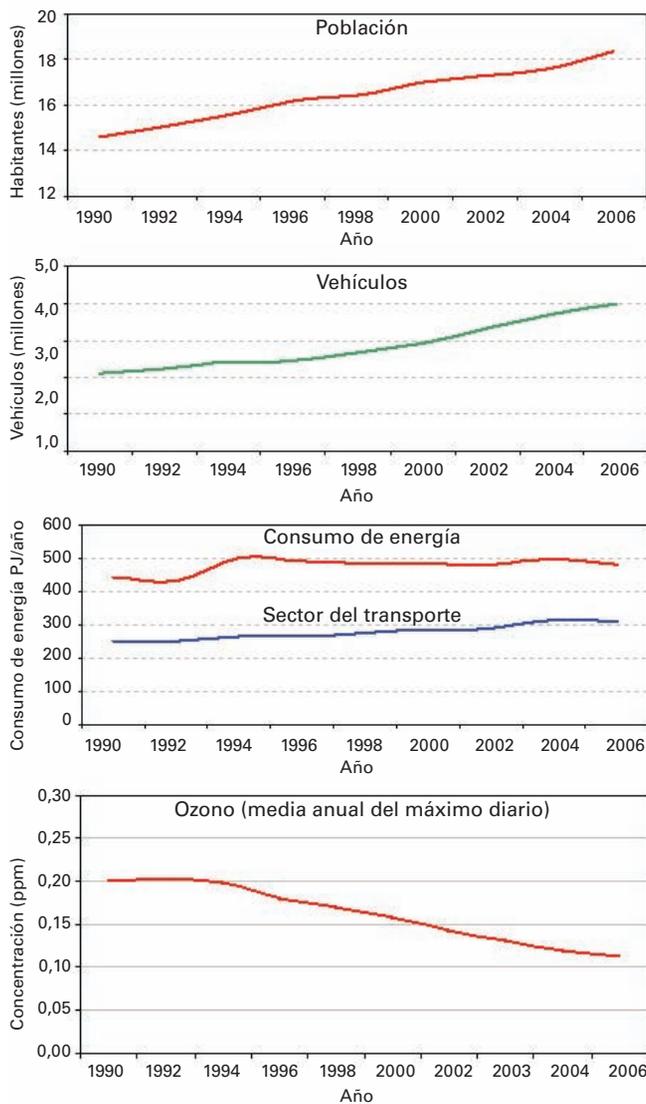


Figura 3—  
Tendencias de la población, el parque automovilístico, el consumo de energía y la concentración de ozono en el Área Metropolitana de la Ciudad de México (1990-2006)

te la concentración de agentes contaminantes regulados por la EPA, las emisiones de gases de efecto invernadero, los niveles de exposición de las personas que viajan diariamente a su lugar de trabajo y el tiempo de desplazamiento.

El gobierno también ha incrementado sus esfuerzos para animar a la participación pública y a la implicación de las partes interesadas. La información sobre los niveles de calidad del aire y las nuevas iniciativas puede consultarse en internet ([www.sma.df.gob.mx/simat/](http://www.sma.df.gob.mx/simat/)) y está publicada en los medios de comunicación.

## Meteorología

Si exceptuamos la contaminación atmosférica, el área metropolitana de la Ciudad de México tiene un clima ideal: una estación fresca y seca entre noviembre y febrero, seguida por

un período cálido y seco hasta abril, y una estación lluviosa desde mayo hasta octubre. Las temperaturas son moderadas y la humedad es baja. Gracias al efecto pantalla ejercido por las cadenas montañosas en casi todos los lados, los vientos suelen ser débiles dentro de la cuenca. Por lo que respecta a los contaminantes atmosféricos, la estación fresca presenta fuertes inversiones en superficie y picos más elevados de contaminantes primarios por la mañana, mientras que la estación cálida posee un mayor índice de radiación ultravioleta y, en consecuencia, mayor presencia de esmog. Unas condiciones más secas originan un aumento de la concentración de aerosoles como consecuencia del polvo y de la quema de biomasa. La estación de lluvias cuenta con un menor índice de partículas de  $PM_{10}$  y de monóxido de carbono, pero sigue presentando elevados niveles de ozono como consecuencia de una intensa actividad fotoquímica antes de los chaparro-

nes vespertinos. Por tanto, la preocupación por la calidad del aire es una constante durante todo el año.

Parte del problema reside en las condiciones meteorológicas. Los suaves vientos y las fuertes inversiones térmicas durante la noche conducen a la aparición de altas concentraciones de agentes contaminantes primarios en la hora punta y a lo largo de la mañana. Por tratarse de una latitud baja ( $20^{\circ}N$ ), el forzamiento sinóptico es débil y las condiciones meteorológicas se ven fuertemente influidas por los vientos de montaña y valle existentes en la cuenca. La circulación habitual en una estación cálida comienza con la aparición de vientos catabáticos suaves en la cuenca, que vienen seguidos por un crecimiento muy rápido de la capa límite hasta alturas máximas de 2 a 4 km a primeras horas de la tarde. Un viento canalizado accede a la cuenca desde el sureste y crea una línea de convergencia a través del AMCM (véase la Figura 4). El momento en el que se presenta este flujo canalizado determina la localización y la magnitud de las concentraciones máximas de ozono (de Foy y otros, 2008).

Con la presencia de estos vientos débiles y de un intenso esmog, resulta tentador comparar el caso del AMCM con el de Los Ángeles. En Los Ángeles, los sistemas estables de altas presiones con subsidencia del aire dan lugar a una acumulación de contaminantes y de episodios de niveles máximos de esmog durante múltiples días. En el AMCM, las simulaciones de las trayectorias de las partículas muestran que el rápido crecimiento de la capa límite origina una mezcla vertical eficaz. Cuando la línea de convergencia se mueve hacia el noreste, la masa de aire es desplazada de la cuenca a través de los vientos de altura. Por consiguiente, la recirculación de los contaminantes en el interior de la cuenca se halla limitada, así como su persistencia de un día para otro. De hecho, el AMCM se asemeja más a Houston, donde la masa de aire contaminado se desplaza hacia el mar por la mañana y es transportada de nuevo sobre la ciudad por la brisa marina de la tarde (Banta y otros, 2005).

Desde el punto de vista climático, la serie de temperatura de 100 años del observatorio meteorológico muestra

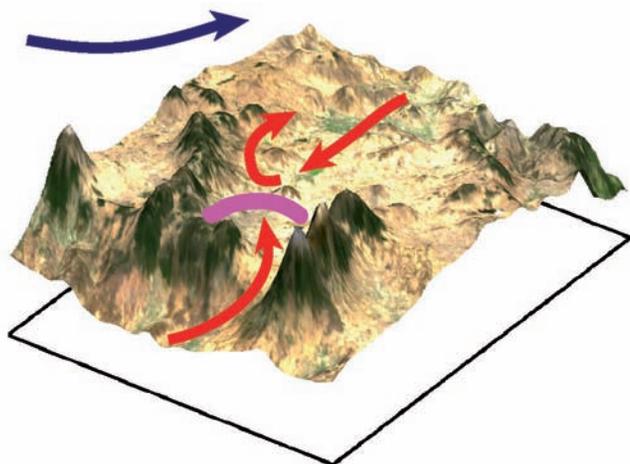


Figura 4 — Modelo conceptual de circulación en un día de la estación cálida. Los vientos en superficie procedentes del norte se encuentran con el viento canalizado del sur (rojo) y forman una línea de convergencia (rosa). La mezcla vertical origina una ventilación de la cuenca como consecuencia de los vientos de altura del oeste (azul). Imagen del MODIS con colores reales proyectada sobre un modelo con elevación del terreno (escala vertical exagerada).

un leve descenso durante la primera mitad del siglo, seguido por un fuerte incremento hasta el momento actual de entre 2 y 4 °C. También se ha producido un aumento en el número y en la duración de las olas de calor en el AMCM. Las simulaciones numéricas del cambio en el uso de la tierra sugieren que hasta un 75% del mismo podría atribuirse al efecto de isla de calor urbana y el resto, al cambio climático. Los estudios relativos a esta isla de calor ponen de manifiesto que podría interactuar con los vientos de montaña y valle e influir en los flujos catabáticos nocturnos y en la ventilación vespertina.

Las precipitaciones han experimentado una tendencia aún más pronunciada que la temperatura durante el último siglo (véase la Figura 5). La precipitación anual en el observatorio ha aumentado en un 50 por ciento. Mientras que a principios de siglo se registraba una media de entre 0 y 3 días al año con episodios extremos (más de 30 mm/día), en las últimas décadas esta frecuencia ha pasado a ser de entre 5 y 10 días al año. Aún no se conoce bien en qué medida puede atribuirse este cambio a la isla de calor urbana y en qué proporción, al cambio climático.

## Plan de acción frente al cambio climático

El Plan de acción frente al cambio climático del AMCM (Acción Climática), diseñado para el período 2008-2012, consta de 26 medidas de reducción de las emisiones, 12 medidas de adaptación y seis medidas

de información y sensibilización, con un presupuesto total de casi seis mil millones de \$ EEUU. Este proyecto se inició con el apoyo del Banco Mundial, se desarrolló a través de un análisis de costes, beneficios, obstáculos e impactos y concluyó con la consulta pública y el establecimiento de un consenso entre 32 organizaciones gubernamentales. El objetivo es reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en el equivalente a 7 millones de toneladas de dióxido de carbono durante el período que va de 2008 a 2012, así como contar con un plan de adaptación listo para 2012.

Las principales medidas destinadas a la reducción de emisiones están relacionadas con los proyectos de captura de biogás y los de gestión de residuos. A continuación nos en-

contramos, en el sector del transporte, con los casos del transporte público para escolares, una nueva línea de metro, hasta 10 nuevas líneas de Metrobús y rutas especiales para el transporte. Estas medidas se complementan con proyectos para renovar la flota de taxis y autobuses de capacidad media, con medidas de inspección y mantenimiento de vehículos, y con la modernización y renovación de las estaciones. En el sector residencial, resulta especialmente rentable iluminar de forma eficaz los domicilios privados. Se adoptarán medidas adicionales para racionalizar el uso de la energía residencial y de los recursos hídricos, así como el desarrollo sostenible de las viviendas. Se fomentará la eficacia energética a través de proyectos destinados a tal fin en agencias gubernamentales y en los sectores de servicios públicos. Entre estas medidas adicionales se incluyen algunos proyectos de generación de energías renovables y centros de reciclado.

La adaptación a un incremento en las precipitaciones y a los episodios extremos consistirá en una mejor gestión de las crecidas a través del desarrollo de compuertas de inundación y sistemas de alerta. Los proyectos de desarrollo rural promoverán la conservación del terreno y de los recursos hídricos, así como la reforestación y la protección de los cultivos. Además, se incluirá el control de las cosechas modificadas genéticamente, el fomento de la agricultura orgánica, la plantación de especies de árboles resistentes al cambio climá-

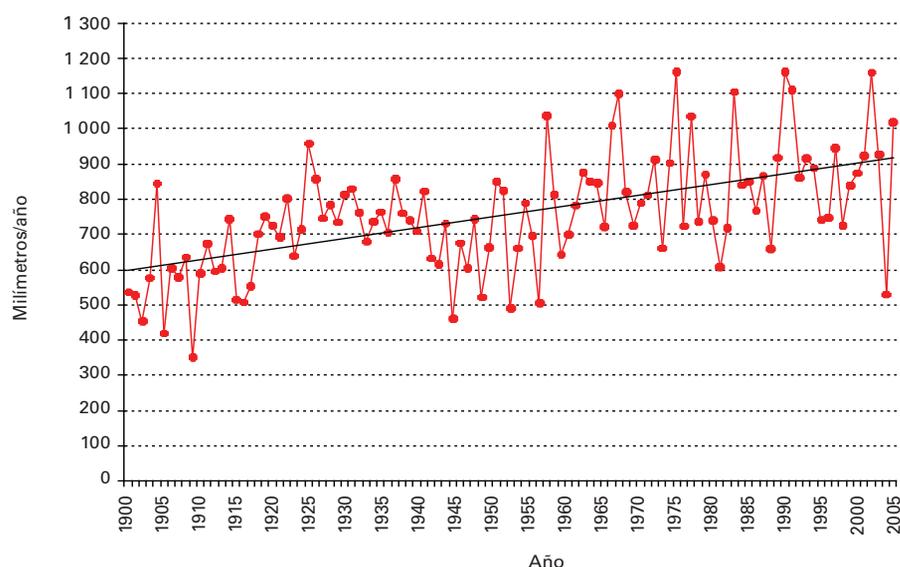


Figura 5 — Tendencias históricas de la precipitación en un observatorio meteorológico del AMCM

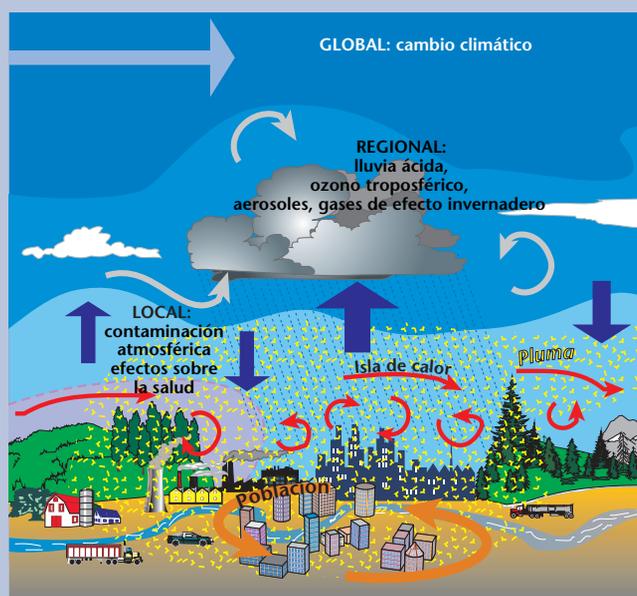
## Investigación en materia de meteorología urbana

Los Miembros de la OMM reaccionaron ante las necesidades de desarrollar capacidades meteorológicas y medioambientales en zonas urbanas a través de la creación del Proyecto de la Vigilancia de la atmósfera global (VAG) sobre la meteorología y el medio ambiente urbano (GURME) en 1999. El interés surgió a partir de las dificultades a las que estaban teniendo que enfrentarse los países como consecuencia de la creciente urbanización y de los problemas de contaminación atmosférica relacionados.

Han sido muchos los proyectos que se han emprendido bajo los auspicios del GURME, encaminados a ayudar y a facilitar las actividades de investigación conexas y, en consecuencia, a crear aplicaciones urbanas de las mismas. Estos proyectos incluyen algunas actividades como:

- Estudios encaminados a comprender cómo se forma la contaminación atmosférica local.
- Estudios sobre el fenómeno de la isla de calor.
- Diseño, establecimiento y mejora de las redes de observación meteorológica y de la contaminación atmosférica.
- Creación de sistemas y servicios de modelización y de predicción de la calidad del aire.
- Formación y creación de capacidad en materia de modelización y predicción de la calidad del aire.
- Estudios sobre el impacto que el área urbana ejerce sobre la calidad del aire a nivel regional.
- Creación de sistemas de comunicación vía internet para informar a las autoridades y al público general acerca de condiciones meteorológicas especiales (como por ejemplo hielo, nieve, humo y calima), así como de la contaminación atmosférica.

El proyecto GURME ha centrado sus esfuerzos en la modelización y predicción de la calidad del aire (actividades necesarias para apoyar una gestión medioambiental eficaz a escala urbana). Se están llevando a cabo reuniones de expertos, encaminadas a recopilar la información existente hasta la fecha relacionada con los nuevos métodos de predicción meteorológica



desde una perspectiva química y a contribuir a identificar las futuras necesidades de investigación con el fin de mejorar las predicciones. Se han organizado actividades de formación en América Latina y en el sur de Asia que han contado con la participación conjunta de representantes de los sectores investigador y operativo.

El proyecto GURME implica la cooperación entre organizaciones y agencias que se desenvuelven en diferentes sectores. Trabajar conjuntamente con diferentes autoridades es importante para que los estudios, el desarrollo de actividades y el fomento de estrategias de prevención mejoradas puedan llevarse a cabo de forma satisfactoria.

El proyecto GURME también establece colaboraciones que se extienden a nivel regional y mundial. Cada vez existe una mayor conciencia de que una predicción meteorológica precisa en términos químicos requiere tener en cuenta la influencia de las fuentes de contaminantes a partir de fenómenos a gran escala (como por ejemplo tormentas de polvo e incendios forestales). La naturaleza multiescalar de las cuestiones de las que se ocupa el proyecto GURME exige, y facilita, la colaboración a diferentes niveles.

tico y la creación de tejados verdes. La adaptación ante un incremento en las temperaturas se centrará en la teledetección y en el control de los incendios forestales y en un sistema de control epidemiológico para las poblaciones vulnerables.

Los proyectos de información y sensibilización incluyen un programa de formación permanente sobre el cambio climático, información acerca de la utilización eficaz de los recursos energéticos en el hogar, la conservación del agua, campañas de sensibilización pública y campañas sobre la gestión integrada de

residuos. El principal foco de atención es el de aumentar la concienciación, comprender los riesgos y promover medidas de adaptación y mitigación.

Los resultados reflejados hasta la fecha incluyen una "norma solar" que está siendo promovida para los paneles solares de cara al suministro de agua caliente. Esta norma ya ha sido adoptada por el 30 por ciento de las piscinas (6 957 m<sup>2</sup> instalados), con un período de recuperación de la inversión de 1,5 años. La instalación continuará con 6 500 nuevos proyectos inmobiliarios hasta 2012,

y también será adoptada por hoteles y otros socios comerciales.

El sistema de Metrobús está suponiendo un rotundo éxito gracias a que cuenta con una de las líneas más utilizadas del mundo, que transporta diariamente a 265 000 pasajeros. Este es el primer proyecto del mundo que vende las reducciones en sus emisiones como parte de su financiación. En el período comprendido entre 2005 y 2007 hubo una reducción del equivalente aproximado a 67 400 toneladas de dióxido de carbono, que se vendió por 281 600 euros. Están desarrollándose nuevas

líneas y se instalarán 10 nuevas rutas de transporte para 2012, consiguiendo así una reducción del equivalente a 369 500 toneladas de dióxido de carbono junto con una mejora del entorno urbano.

## Conclusiones

Ciudad de México lleva trabajando varios años con la intención de mejorar la calidad del aire. Se ha progresado mucho a la hora de abordar los problemas relacionados con la contaminación atmosférica a través de programas de gestión de la calidad del aire basados en consideraciones científicas, técnicas, sociales y políticas. Sin embargo, la presión continua ejercida por la creciente población urbana y el deseo de las personas de disponer de una mejor calidad de vida conllevan una constante necesidad de mejorar la calidad del aire.

El gobierno también ha emprendido acciones encaminadas a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. El objetivo del plan es desarrollar políticas "sin excusas" que resulten beneficiosas incluso en caso de ausencia del cambio climático. El plan también trata de centrarse en las estrategias de "todos ganan", que promueven el desarrollo social a la par que los beneficios medioambientales.

Existen importantes ventajas compartidas relacionadas con la calidad del aire de cara a mitigar el cambio climático. Ciudad de México ha desarrollado algunos estudios integrados que evalúan los beneficios compartidos asociados a los esfuerzos coordinados en relación con la contaminación atmosférica y la atenuación del cambio climático. Un análisis de cuatro megalópolis (Ciudad de México, ciudad de Nueva York, San-

tiago de Chile y Sao Paulo) realizado por Cifuentes y otros (2001) arrojó el resultado de que la reducción de los gases de efecto invernadero desembocaría en grandes disminuciones en las concentraciones de ozono y materia particulada, con importantes mejoras en la salud pública. McKinley y otros (2005) concluyeron que cinco medidas de control propuestas en la Ciudad de México con las que se pretendía reducir la exposición anual a partículas en un uno por ciento y al máximo diario de ozono en un tres por ciento también reducirían las emisiones de gases de efecto invernadero en un dos por ciento durante los períodos 2003-2010 y 2003-2020. Otro estudio puso de relieve que si el programa actual para la gestión de la calidad del aire (PROAIRE 2002-2010) en la Ciudad de México se desarrollaba conforme a lo establecido, originaría una reducción del 3,1 por ciento en las emisiones previstas de dióxido de carbono en 2010, además de una disminución sustancial de los agentes contaminantes a nivel local (West y otros, 2004). Por consiguiente, es importante integrar los objetivos de la calidad del aire y de la estabilización climática en el diseño de la política medioambiental, a fin de obtener así unos posibles beneficios sinérgicos.

## Referencias

BANTA, R.M., C.J. SENIFF, J. NIELSEN-GAMMON, L.S. DARBY, T.B. RYERSON, R.J. ÁLVAREZ, S.R. SANDBERG, E.J. WILLIAMS and M. TRAINER, 2005: A bad air day in Houston, *Bul. Amer. Meteorolo. Soc.*, 86: 657-669.

CIFUENTES, L., V.H. BORJA-ABURTO, N. GOUVEIA, G. THURSTON and D.L. DAVIS, 2001: Climate change: hidden health benefits of greenhouse gas mitigation, *Science*, 293, 1257-1259.

DE FOY, B., J.D. FAST, S.J. PAECH, D. PHILLIPS, J.T. WALTERS, R.L. COULTER, T.J. MARTIN,

M.S. PEKOUR, W.J. SHAW, P.P. KASTENDEUCH, N.A. MARLEY, A. RETAMA and L.T. MOLINA, 2008: Basin-scale wind transport during the MILAGRO field campaign and comparison to climatology using cluster analysis. *Atmos. Chem. Phys.*, 8:1209-1224.

CAM, 2002: Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México 2002-2010, Comisión Ambiental Metropolitana, México.

McKINLEY, G., M. ZUK, M. HOJER, M. ÁVALOS, I. GONZÁLEZ, R. INIESTRA, I. LAGUNA, M.A. MARTÍNEZ, P. OSNAYA, L.M. REYNALES, R. VALDÉS and J. MARTÍNEZ, 2005: Quantification of local and global benefits from air pollution control in Mexico City. *Environ. Sci. Technol.*, 39, 1954-1961.

MOLINA, L.T. and M.J. MOLINA (Eds.), 2002: *Air Quality in the Mexico Megacity: An Integrated Assessment*, Kluwer Academic Publishers.

MOLINA, L.T., C.E. KOLB, B. DE FOY, B.K. LAMB, W.H. BRUNE, J.L. JIMÉNEZ, R. RAMOS-VILLEGAS, J. SARMIENTO, V.H. PÁRAMO-FIGUEROA, B. CÁRDENAS, V. GUTIÉRREZ-AVEDOY and M.J. MOLINA, 2007: Air quality in North America's most populous city—overview of the MCMA-2003 campaign, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 2447-2473.

MOLINA, L.T., S. MADRONICH, J.S. GAFFNEY and H.B. SINGH, 2008: Overview of MILAGRO/INTEX-B Campaign, *IGAC Newsletter*, 38, 2-15.

WEST, J., P. OSNAYA, I. LAGUNA, J. MARTÍNEZ and A. FERNÁNDEZ-BREMAUNTZ, 2004: Co-control of urban air pollutants and greenhouse gases in Mexico City. *Environmental Science and Technology*, 38:3474-3481.

WÖHRNSCHIMMEL, H., M. ZUK, G. MARTÍNEZ-VILLA, J. CERÓN, B. CÁRDENAS, L. ROJAS-BRACHO and A. FERNÁNDEZ-BREMAUNTZ, 2008: The impact of a rapid bus transit system on commuters' exposure to benzene, CO, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Mexico City. *Atmospheric Environment* (en imprenta).