

¿Puede la contaminación atmosférica generada en la zona metropolitana de la ciudad de México afectar lugares más allá de sus fronteras?



Los resultados de estudios hechos en relación con los contaminantes atmosféricos generados en la zona metropolitana de la ciudad de México, indican que éstos pueden ser transportados por el viento más allá de la cuenca.

**Telma Castro Romero, Graciela Binimelis de Raga
y Darrel Baumgardner Gibson**

El rápido crecimiento de la población mundial a partir de la segunda mitad del siglo XX ocasionó una gran demanda de alimentos, vivienda y energía. Esto ha tenido como consecuencia el abuso de los recursos naturales en diferentes regiones de la Tierra, que a su vez ha alterado algunos de sus ciclos naturales.

Un claro ejemplo lo constituye la zona metropolitana de la ciudad de México, donde la urbanización sin infraestructura adecuada ha modificado en forma considerable el uso del suelo y con ello la ecología. Actualmente cuenta con una población aproximada de 19 millones, y se estima que para el año 2010 esta cantidad puede llegar hasta 24 millones. (Schteingart, 2000). Junto con una problemática económica y social sumamente compleja, la ciudad enfrenta hoy en día el deterioro de la

calidad de aire, aun a pesar de los esfuerzos que han hecho los gobiernos para evitarlo. Tanto en el inventario de emisiones de 1989 como en el de 1994 se reportan alrededor de 4.3 millones de toneladas de contaminantes emitidos anualmente a la atmósfera de la zona metropolitana de la ciudad de México, de los cuales 77 por ciento son debidos al transporte, 8 por ciento a la industria y 15 por ciento a procesos naturales.

Los contaminantes generados en las ciudades pueden ser gases provenientes de emisiones primarias (dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos, etcétera), gases producto de transformaciones químicas (ozono, aldehídos, etcétera), o partículas que pueden agruparse en primarias o secundarias. La contaminación atmosférica en la zona metropolitana de la ciudad de México se ve modificada por el clima y las condiciones del terreno, que influyen en la dispersión de contaminantes.

¿SE EXPORTA LA CONTAMINACIÓN DE LAS CIUDADES?

Existen estudios que muestran que la contaminación generada

en zonas urbanas frecuentemente es transportada fuera de las mismas y afecta a zonas rurales lejanas. Tal es el caso de la región noreste de Estados Unidos, que se ve afectada por altas concentraciones de ozono generadas por emisiones de compuestos precursores a cientos de kilómetros (*National Academy of Sciences*, 1991). Asimismo, existen claras evidencias de que también las partículas de aerosol en la troposfera pueden ser transportadas a grandes distancias, inclusive de un continente a otro. Uno de los casos mejor documentados es el de partículas del desierto del Sahara que son observadas en América (Schutz *et al*, 1990). Otro caso notorio lo constituye el llamado “esmog ártico”, fenómeno que refleja el transporte de contaminantes desde latitudes medias hasta el océano Ártico, donde no hay emisiones locales. En lo que respecta a la exportación directa de ciudades y el transporte hacia regiones aledañas, Strawbridge y Hoff (1996) demuestran que en San Francisco se observa la presencia de aerosoles originados en Los Ángeles. Asimismo, la visibilidad en regiones relativamente distantes de Los Ángeles, como el Parque Nacional del Cañón del Colorado, también muestra el efecto de la exportación de contaminación urbana (EPA, 1996).

¿CÓMO PUEDEN LOS CONTAMINANTES AFECTAR EL CLIMA?

La atmósfera urbana contiene entre otras cosas grandes cantidades de polvo y “esmog” (*smog*, palabra usada en la literatura para señalar contaminación en la atmósfera por diferentes especies; es una contracción de las palabras inglesas *smoke* y *fog*, humo y neblina). El esmog es producto de procesos de combustión que incluyen procesos naturales, industriales y los vehículos que usan combustible fósil. Dependiendo del lugar, las concentraciones de los diferentes compuestos que componen el esmog son muy altas, en particular en las megalópolis. Adicionalmente están presentes los *aerosoles*, que son partículas en suspensión en un gas y pueden tener un diámetro de entre 0.1 y 10 micrómetros (un micrómetro es la milésima parte de un milímetro). El *polvo*, en cambio, está compuesto de partículas finas (con tamaños entre 1 y 10 micrómetros de diámetro) que generalmente son levantadas desde la superficie por el viento.

Tanto los gases como las partículas pueden interactuar con la radiación que llega del Sol (luz visible y ultravioleta) o con la que emite la Tierra (radiación infrarroja). El clima de la Tierra se ve afectado en forma directa e indirecta por la presencia de contaminantes; la radiación solar que llega a la superficie de la



Tierra se ve afectada directamente, ya que las moléculas de gas y partículas en suspensión pueden dispersar o absorber radiación solar.

La dispersión y la absorción son formas de interacción de la luz con la materia. En la dispersión los fotones rebotan en todas direcciones desde una molécula o partícula después de chocar con ella; en la absorción la energía que tiene un fotón se transmite a un material, produciendo un efecto de calentamiento. La dispersión depende del tamaño de las partículas, mientras que la absorción depende de su composición. Dependiendo del tamaño de las partículas se presentan diferentes tipos de dispersión: cuando son pequeñas, comparadas con la longitud de onda de la luz que incide en ellas, se presenta la llamada dispersión de Rayleigh; cuando las partículas son del mismo tamaño que la longitud de onda, se presenta la dispersión de Mie. Las moléculas de aire dispersan preferentemente la luz en la longitud de onda del azul, y es por esto que el cielo se ve de este color.

Otro parámetro afectado por la presencia de partículas y gases contaminantes es el *albedo* del planeta, término usado para describir la fracción de radiación solar que es reflejada hacia el espacio. Su alteración, debida a cambios en las concentraciones de esmog y polvo, puede explicarse a través del siguiente análisis:

los aerosoles presentes en la atmósfera capaces de dispersar la luz incrementan el albedo, por lo que llega menos radiación a la superficie terrestre, y con ello disminuye su temperatura. Por el contrario, los aerosoles que absorben radiación, así como el hollín (presentes en la atmósfera baja), pueden disminuir el albedo y calentar la superficie, ya que la radiación que se refleja en la superficie es bloqueada. Sin embargo, si estos aerosoles son colocados en la atmósfera alta, entonces la temperatura de la superficie se reduce, debido a que los aerosoles absorben la radiación e impiden que llegue a la superficie terrestre. En particular, la presencia de capas de contaminantes a diferentes alturas y que además pueden abarcar grandes extensiones horizontalmente, afecta también la radiación incidente, por lo que contribuye a cambios en el clima regional (Charlson *et al.*, 1991; Herman *et al.*, 1997). Recientemente, Jáuregui y Luyando (1999) presentan pruebas climatológicas de que la radiación entrante en la ciudad de México es 21.6 por ciento menor que en las áreas rurales vecinas a la ciudad, lo cual se atribuye a la presencia de contaminantes urbanos.

Los efectos directo e indirecto también se manifiestan en el balance. Un ejemplo de efecto indirecto se presenta cuando las partículas con diámetros menores de 0.1 micrómetro actúan como núcleos de condensación de gotas de agua y dan lugar a la formación de nubes. Cuando la concentración de núcleos es alta (y en presencia de vapor de agua), la población de gotitas tiene un menor tamaño en promedio. En el caso contrario, cuando hay pocos núcleos de condensación e igual cantidad de vapor de agua, las gotas de nube crecen muy rápidamente. Para la misma cantidad de agua condensada en una nube, un mayor número de gotas pequeñas produce un mayor albedo en la nube, de este modo los aerosoles modulan la reflectividad de las nubes y con ello el balance de energía de la región. En áreas contaminadas la concentración de gotas

de nube puede ser alta, lo que trae como consecuencia un aumento en el albedo de la nube comparado con el de áreas no contaminadas. Como puede observarse, las nubes tienen un papel importante en el balance de luz visible en la Tierra. Asimismo, las nubes absorben y emiten radiación infrarroja, por lo que también contribuyen al calentamiento de la superficie de la Tierra de la misma forma que lo hacen los llamados gases de invernadero.

El dióxido de carbono y el vapor de agua también pueden absorber radiación infrarroja, reteniendo calor en la atmósfera a través del llamado *efecto invernadero*. Este fenómeno puede explicarse de la siguiente forma: la atmósfera de la Tierra es transparente a la energía de onda corta o solar (luz visible y ultravioleta); esta radiación es transformada por la superficie terrestre y las nubes en radiación de onda larga, o infrarroja, y emitida nuevamente a la atmósfera. Finalmente, dicha radiación es absorbida en la atmósfera, principalmente por gases como dióxido de carbono y vapor de agua, por lo que el aire se calienta, lo que eleva la temperatura de la atmósfera. En la atmósfera existen otros gases como metano, óxido nitroso, clorofluoroalcanos y ozono, que también atrapan radiación infrarroja.

El dióxido de carbono es procesado en forma natural por las plantas: durante el día es consumido a través de la fotosíntesis, y durante la noche es generado por la respiración. En zonas urbanas es emitido como contaminante por procesos de combustión así como por otros procesos químicos, como la reacción entre moléculas que contienen el radical hidroxilo y monóxido de carbono, y también por la reacción de éste con moléculas de agua. El monóxido de carbono es un contaminante primario, emitido principalmente en las ciudades por el transporte y la industria. En la ciudad de México se emiten aproximadamente 2.5 millones de toneladas al año de este contaminante, lo que corresponde a 50 por ciento del total de contaminantes emitidos a su atmósfera. Sin embargo, hasta la fecha no se tiene un estudio cuantitativo para la zona metropolitana de la ciudad de México sobre el papel del monóxido de carbono como precursor del dióxido de carbono que nos permita saber si se encuentra en cantidad suficiente para afectar el clima local a través del efecto invernadero.

El efecto sobre el clima regional de la presencia de partículas y gases también puede estudiarse a través del uso de modelos de transferencia de radiación (Liu *et al.*, 1991). Los estudios regionales de la interacción de la radiación incidente con aerosoles han mostrado, por ejemplo, que en el este de Estados Unidos la reducción del flujo incidente alcanza 7 por ciento (Ball y Robin-

son, 1982). Esta reducción depende de las características ópticas de las partículas (albedo de dispersión simple, coeficientes de absorción, dispersión y extinción); por ejemplo, la radiación absorbida por partículas puede tener un impacto importante en la distribución vertical de la temperatura (Raga *et al.*, 2001).

¿CÓMO AFECTAN LOS CONTAMINANTES LAS CONDICIONES EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO?

Para responder a la pregunta anterior se realizó un estudio teórico sobre la interacción de la radiación con las partículas presentes en la atmósfera utilizando un modelo de transferencia de radiación (Madronich, 1987). En el modelo se incluye una capa de aerosoles donde las partículas quedan representadas a partir de sus propiedades ópticas (coeficientes de absorción y dispersión) y una altura de la capa mezcla de 1200 metros (capa donde están las concentraciones mayores de contaminantes). Desde el modelo se obtiene el “flujo actínico”, o cantidad de radiación (directa y difusa, hacia arriba y hacia abajo) que incide a diferentes ángulos sobre la superficie horizontal (véase figura 1). El flujo actínico permite estimar las constantes de fotodisociación (descomposición química provocada por luz) del ozono, dióxido de nitrógeno y formaldehído, que se incorporan como datos de entrada en modelos fotoquímicos (tales como el de Hindmarsh, 1980), que predicen el comportamiento de la producción de ozono en superficie, como puede observarse en la figura 2.

¿SE EXPORTA LA CONTAMINACIÓN GENERADA EN LA ZONA METROPOLITANA A ZONAS RURALES?

Estimaciones recientes de las emisiones totales de partículas con diámetros menores a 10 micrómetros y partículas con diámetros menores a 2.5 micrómetros en la zona metropolitana de la ciudad de México (IMADA, 1998), indican tasas de emisión de 7 mil 32 y 4 mil 568 toneladas por año, respectivamente. Estas cantidades de partículas emitidas son considerables y es de esperar que una fracción de las mismas se transporte fuera de la zona metropolitana y contribuya a la contaminación en zonas vecinas. Fast y Zhong (1998) realizaron simulaciones tridimensionales de variables meteorológicas en el valle de México, con el objeto de entender la distribución de los contaminantes

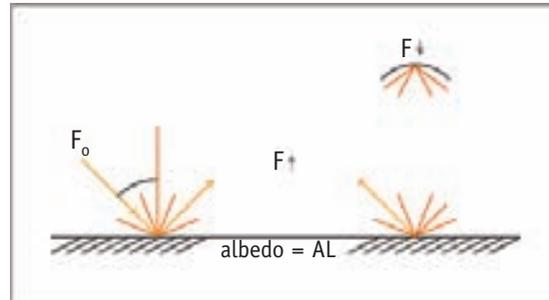


Figura 1. Geometría de luz solar reflejada por una superficie utilizada en el modelo para obtener el flujo actínico. F_0 flujo directo, F_{\downarrow} flujo difuso hacia abajo y F_{\uparrow} flujo difuso hacia arriba (el flujo actínico se obtiene de la suma de los tres flujos).

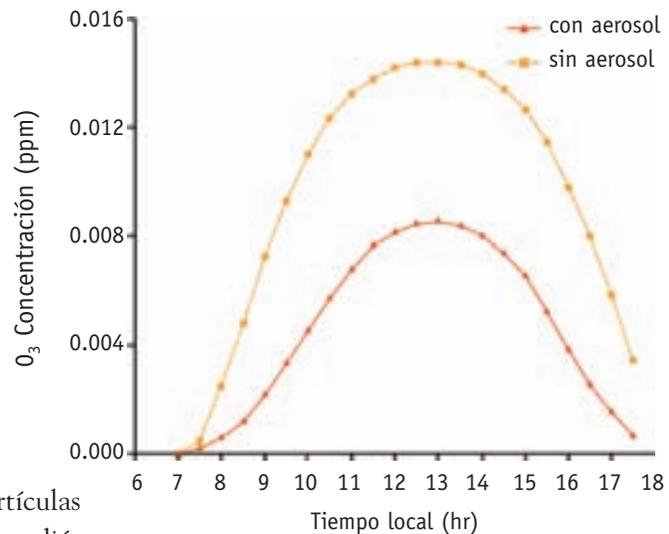


Figura 2. Ozono (O_3) en superficie, calculado con el modelo fotoquímico. La línea con triángulos muestra el perfil diario de ozono para la zona metropolitana de la ciudad de México cuando se considera la presencia de aerosoles, y la línea con cuadrados muestra el mismo perfil sin considerar aerosoles.

en la ciudad. Se identificaron varios procesos meteorológicos responsables del transporte de contaminantes en la zona. Tanto en las observaciones termodinámicas por medio de radiosondeos, como en las simulaciones numéricas correspondientes al mes de marzo, se observó que la capa de mezcla sobre la ciudad excede la altura de las montañas que la rodean, lo que implica que en esa época del año no es la topografía lo que impide la salida de contaminantes generados localmente hacia las regiones vecinas: las simulaciones indicaron un transporte horizontal de contaminantes a distancias del orden de 300 kilómetros fuera de la ciudad.

Por otro lado, si las partículas permanecen en la atmósfera baja por largos periodos, eventualmente pueden salir de la región donde son producidas, tienen más oportunidad de interactuar con la radiación solar y afectar con ello los procesos químicos mediados por luz (fotoquímicos) que se dan en la atmósfera. Este efecto se observa con claridad en la figura 2, donde la presencia de partículas de aerosol conduce a una reducción de 20 por ciento en la producción de ozono en superficie. Específicamente, de acuerdo con los cálculos presentados aquí, las concentraciones de ozono en la ciudad de México pueden aumentar por varias decenas de partes por billón si la presencia de partículas no atenúa la radiación ultravioleta. Es de esperarse que la reducción de la reactivi-



dad fotoquímica cerca de las fuentes emisoras (esto es, en la ciudad) haga que cantidades grandes de óxidos de nitrógeno e hidrocarburos que no han reaccionado puedan ser transportados a los alrededores y afectar así la química de la troposfera a escala regional o global. Las megalópolis (como la ciudad de México) pueden actuar como grandes fuentes de contaminación regional ya que, dependiendo de su permanencia, los contaminantes en el aire pueden ser transportados fuera de la ciudad por masas de aire. En particular, puede mencionarse que los nitratos de peroxiacetilo, en general, se acumulan en algunas ciudades de Estados Unidos, y en la zona metropolitana de la ciudad de México se observa un patrón diario de nitratos de peroxiacetilo (Gaffney *et al.*, 1999), lo cual implica que existe una exportación neta, pues de lo contrario también se acumularía. En general, la concentración de nitratos de peroxiacetilo en un lugar y tiempo dados depende de la temperatura y de los niveles locales de dióxido de nitrógeno y de óxido nítrico. Si durante la noche hay una atmósfera con una mezcla relativamente alta de óxido nítrico, tiene lugar una descomposición térmica del nitrato de peroxiacetilo, lo que inicia una reacción que convierte el óxido nítrico en dióxido de nitrógeno. El proceso anterior conduce a tener sustancias muy reactivas fotoquímicamente, y que al salir el Sol son destruidas por la luz para posteriormente generar ozono. Si el nitrato de peroxiacetilo formado en zonas urbanas es transportado a la troposfera alta (donde la temperatura es menor), su vida media puede ser de meses, de modo que al encontrarse con una atmósfera rica en óxidos de nitrógeno o radicales hidroxilo, se tendría una producción de ozono cuyo origen no sería propiamente del lugar.

CONCLUSIONES

Los resultados y suposiciones que hemos presentado a lo largo de este trabajo están basados en estudios previos y en el uso de un modelo computacional (en una dimensión), el cual, a su vez, fue alimentado con datos de propiedades ópticas de los aerosoles de la ciudad de México. Los estudios previos y los resultados indican que la contaminación generada en la zona metropolitana de la ciudad de México puede ser transportada por vientos fuera de la cuenca, propiciando con ello un cambio en la radiación, temperatura y fotoquímica del lugar. Esto puede conducir a un cambio en la calidad del aire, tanto local como regionalmente. Sin embargo, creemos necesario realizar un análisis de los patrones temporales y espaciales de aerosoles para finalmente utilizar un modelo de tres dimensiones y así evaluar

los cambios en la calidad del aire debidos a la presencia de aerosoles, a escalas que cubran no sólo el área urbana, sino también las regiones aledañas, a las cuales pueden transportarse parcelas de aire contaminado.

Bibliografía

- Ball, R. J. y G. D. Robinson, 1982, "The origin of haze in the Central United States and its effect on solar irradiation", *J. Appl. Meteorol.*, 21, 171-188.
- Charlson, R. J., J. Langner, H. Rodhe, C. B. Leovy y S. G. Warren, 1991, "Perturbation of the northern hemisphere radiative balance by backscattering from anthropogenic sulfate aerosols", *Tellus*, 43AB, 152-153.
- EPA, 1996, *National air quality and emissions trends report*, 1995, EPA454/R-96-005.
- Fast, J. y S. Zhong, 1998, "Meteorological factors associated with inhomogeneous ozone concentrations within the Mexico City basin", *J. Geophys. Res.*, 103, 18927-18946.
- Gaffney, J. S., N. A. Marley, M. M. Cunningham y P. V. Doskey, 1999, "Measurements of peroxyacyl nitrates (PANS) in Mexico City: implications for megacity air quality impacts on regional scales", *Atmospheric Environment* 33, 5003-3012.
- Herman, J. R., P. K. Bhartia, O. Torres, C. Hsu, C. Seftor y E. Celarier, 1997, "Global distribution of UV-absorbing aerosols from Nimbus 7/TOMS data", *J. Geophysical Research*, 102, D14, 16911-16922.
- Hindmarsh, A. y C. Lsode, 1980, *Livermore Solver for Ordinary Differential Equations. Provided with CHEMKIN: a general-purpose problem-independent, transportable FORTRAN chemical kinetics code package*, DE-ACO4-76DPOO789. Sandia National Lab. Albuquerque, NM.
- IMADA, 1998, *Investigación sobre materia particulada y deterioro atmosférico: informe final*, Proyecto DOB-7238, Instituto Mexicano del Petróleo, México.
- Jáuregui, E. y E. Luyando, 1999, "Global radiation attenuation by air pollution and its effects on the thermal climate in Mexico City", *Int. J. Climatol.*, 19, 683-694.
- Liu, S. C., S. A. McKeen y S. Madronich, 1991, "Effect of anthropogenic aerosols on biologically active ultraviolet radiation", *Geophys. Res. Lett.*, 18 (12), 2265-2268.
- Madronich, S., 1987, "Photodissociation in the atmosphere. 1. Actinic flux and the effects of ground reflections and clouds", *J. Geophys. Res.*, 92, 9740-9752.
- National Academy of Sciences, 1991, *Rethinking the ozone problem in urban and regional air pollution*, National Academy Press, Washington, DC.
- Raga, G. B., T. Castro y D. Baumgardner, 2001, "The impact of megacity pollution on local climate and implications for the regional environment: Mexico City", *Atmospheric Environ.*, vol. 35, 1805-1811.
- Schteingart, M., 2000, "Urbanization and Land Use: The case of Mexico City Metropolitan Area", 2nd US Mexico Joint Workshop, MIT. Jan 24-25, 2000. Cambridge, Mass.
- Schutz, M., R. Schmitt, K. Thomas y A. Volz-Thomas, 1990, "Photochemical box modeling of long-range transport from North America to Tenerife during the North Atlantic Regional Experiment", *J. Geophysical Research*, vol. 103 D11, 13477-13488.
- Strawbridge, K. B. y R. M. Hoff, 1996, "LITE validation experiment along California's coast: Preliminary results", *Geophys. Res. Lett.*, 23, 1, 73-76.

T. Castro es doctora en Ciencias Químicas por la UNAM y realizó una estancia posdoctoral por un año en el Laboratory of Atmospheric Chemistry, del MIT. En 1998 se incorpora al grupo de Física de Aerosoles del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, donde actualmente es investigadora titular. Participa en la creación del laboratorio para el estudio de las propiedades físicas de los aerosoles urbanos. Sus líneas principales de investigación son: la interacción de aerosoles con radiación solar, la fotoquímica de la atmósfera y la exportación de contaminantes atmosféricos. Imparte cursos regulares en el posgrado de Ciencias Químicas de la UNAM.

D. Baumgardner es doctor en Ciencias Atmosféricas por la University of Wyoming, USA. Trabajó en el National Center for Atmospheric Research de 1981 a 1998 como investigador en el Research Aviation Facility, donde desarrolló tecnología para la medición de propiedades físicas de aerosoles y nubes desde aviones. En 1998 se incorporó al Centro de Ciencias de la Atmósfera, en el Grupo de Aerosoles. Las líneas actuales de investigación incluyen la evolución de aerosoles e interacción con radiación, la influencia de contaminación antropogénica en nubes y el desarrollo de instrumentos para la medición de aerosoles.

G. B. Raga es doctora en Ciencias Atmosféricas por la University of Washington, USA, graduada en febrero de 1989. Realizó una estancia posdoctoral de dos años en la División de Física de Nubes de la Agencia del Ambiente en Toronto, Canadá. Trabajó cuatro años como investigadora en el Departamento de Física Pura y Aplicada de la University of Manchester Institute of Science and Technology. En 1995 se incorporó al Centro de Ciencias de la Atmósfera, estableciendo nuevas líneas de investigación que llevaron a la creación del Grupo de Física de Aerosoles. Las líneas actuales de investigación incluyen la evolución de aerosoles e interacción con radiación, la influencia de contaminación antropogénica en nubes y la modelación matemática de la dinámica, microfísica y química de nubes.