

Aire y atmósfera

## Ozono troposférico

### Principales consideraciones

- El ozono troposférico, a diferencia del que se encuentra en la estratosfera, daña la salud humana, la vegetación y los materiales. El ozono y sus sustancias químicas precursoras viajan a través de las fronteras, tanto de América del Norte como las continentales.
- Los seres humanos contribuyen a la formación de ozono troposférico sobre todo mediante la quema de combustibles fósiles en el transporte, la industria y las centrales eléctricas. La evaporación de combustibles líquidos y solventes se incorporan a la formación de ozono.
- En ciertas zonas de América del Norte los niveles de ozono troposférico exceden las normas nacionales de protección de la salud humana.
- Desde 1990 las emisiones totales de sustancias precursoras del ozono han disminuido en América del Norte, pero la tendencia en la exposición humana en las tres naciones es mixta: refleja las diferencias en las condiciones de cada lugar y los métodos de registro.

El *ozono troposférico* es un gas incoloro y muy irritante creado por reacciones fotoquímicas entre los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles producidos en buena medida por la quema de combustible, vapores de gasolina y solventes químicos.

### ¿Cuál es la problemática ambiental?

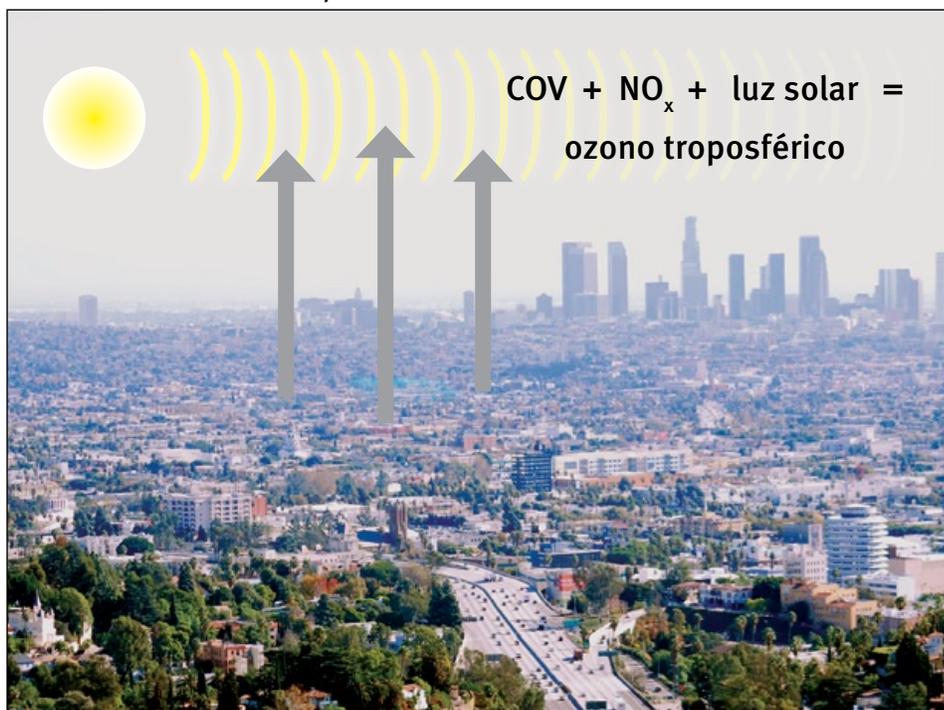
El ozono ( $O_3$ ) es un gas que se encuentra en diversas partes de la atmósfera. El de la atmósfera superior, o estratosfera, es un gas esencial que ayuda a proteger a la Tierra de los dañinos rayos ultravioletas del sol. En contraste, el ozono hallado cerca de la superficie, en la troposfera, perjudica tanto a la salud humana como al medio ambiente. Por esta razón el ozono se describe a menudo como “bueno arriba y malo de cerca”.

El ozono troposférico (también llamado “ozono ambiental” u “ozono de bajo nivel”) se produce cuando los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) y los compuestos orgánicos volátiles (COV) de fuentes como la quema de combustible reaccio-

nan mediante procesos fotoquímicos a la luz del sol (véase la ilustración). Las centrales eléctricas, el escape de los vehículos automotores, los vapores de la gasolina y los solventes químicos son las fuentes principales de estas emisiones.

El ozono también se forma en niveles bajos proveniente de emisiones naturales de COV,  $NO_x$  y CO (precursores de ozono), así como del ozono estratosférico que en ocasiones desciende a la superficie terrestre. Las fuentes naturales de los precursores de ozono incluyen las emisiones de plantas y suelos, los incendios forestales y los rayos durante las tormentas eléctricas. En muchos lugares remotos de latitud media se observan altas concentraciones de ozono a finales del invierno y la primavera, sobre todo en altu-

### Cómo se forma el ozono troposférico





densamente pobladas que emiten los precursores necesarios. En el hemisferio norte los niveles de ozono suelen ser más elevados por las tardes de los meses en que las temperaturas son altas y la influencia de la luz solar directa es más intensa.

### ¿Por qué es importante este asunto para América del Norte?

El ozono troposférico tiene efectos nocivos en la salud humana y animal, así como en el medio ambiente. A pesar de los esfuerzos por reducirlo en los tres países, sus concentraciones aún exceden las normas nacionales de calidad del aire en algunas zonas de América del Norte.

#### Efectos del ozono troposférico

El ozono troposférico, componente básico del smog, se considera un problema “sin umbral” porque incluso en muy pequeñas cantidades en el aire tiene efectos nocivos en la salud humana, en particular los sistemas cardiovascular y respiratorio. La exposición al ozono se ha vinculado con la mortalidad prematura y una gama de cuestiones de morbilidad, como admisiones en hospitales y síntomas de asma. Luego de analizar la contaminación atmosférica y los datos sobre mortalidad de ocho ciudades canadienses importantes, el Ministerio de Salud de Canadá calculó que en esos centros urbanos casi 6,000 muertes al año se podían atribuir a la contaminación atmosférica, cuyo componente mayoritario es el ozono troposférico. De acuerdo con la Asociación Médica de Ontario, los costos de la contaminación para los residentes de esa provincia ascienden a más de mil millones de dólares canadienses al año en admisiones hospitalarias, visitas a las salas de urgen-

cias y ausentismo. En Estados Unidos los estudios de 95 importantes zonas urbanas realizados por investigadores de Yale y Johns Hopkins revelan que el aumento de los niveles diarios de ozono se asoció con más de 3,700 muertes anuales por enfermedades cardiovasculares y respiratorias.

Las elevadas. Sin embargo, no es posible atribuir los niveles altos en exclusiva a fuentes naturales, sino que el transporte a grandes distancias y la acumulación invernal de precursores de  $O_3$  contribuyen también a estos niveles de primavera.

Los niveles de ozono troposférico son con frecuencia más altos durante los días calurosos del verano o en dirección del viento de zonas

Reducción de emisiones

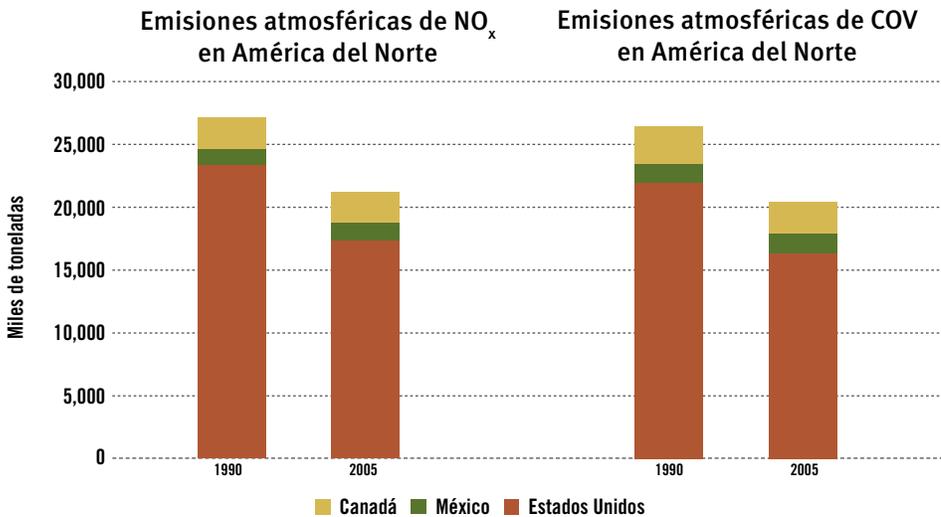
Los primeros intentos por mitigar las concentraciones de ozono troposférico en toda América del Norte, mediante reducciones orientadas a las emisiones de precursores, se registraron en el decenio de 1970. Como resultado, las emisiones tanto de  $NO_x$  como de COV en Estados Unidos disminuyeron de modo significativo, pese al importante crecimiento económico. En Canadá, las emisiones de COV han disminuido, pero la tendencia de las emisiones de  $NO_x$  ha permanecido casi igual desde 1990. México ha registrado bajas en las emisiones vehiculares de  $NO_x$  y COV, pero incrementos en las de fuentes fijas o estacionarias. En general, las emisiones atmosféricas de precursores del ozono troposférico en América del Norte han disminuido desde los noventa: las emisiones de óxidos de nitrógeno y de COV cayeron más de 20 por ciento (véanse las gráficas).

#### Reducción de emisiones

En los tres países, la quema de combustible de fuentes móviles es una de las fuentes más grandes de emisiones de  $NO_x$  y COV. En Estados Unidos y México las centrales eléctricas que funcionan con combustible fósil se suman significativamente a las emisiones de  $NO_x$ , en tanto que en Canadá las primeras etapas de producción de petróleo y gas constituyen la primera fuente industrial de emisiones de estas sustancias. Aparte de los combustibles del sector del transporte, los solventes son una fuente importante de COV en los tres países, pero la producción de petróleo y gas es también una actividad que contribuye de manera relevante en Canadá.

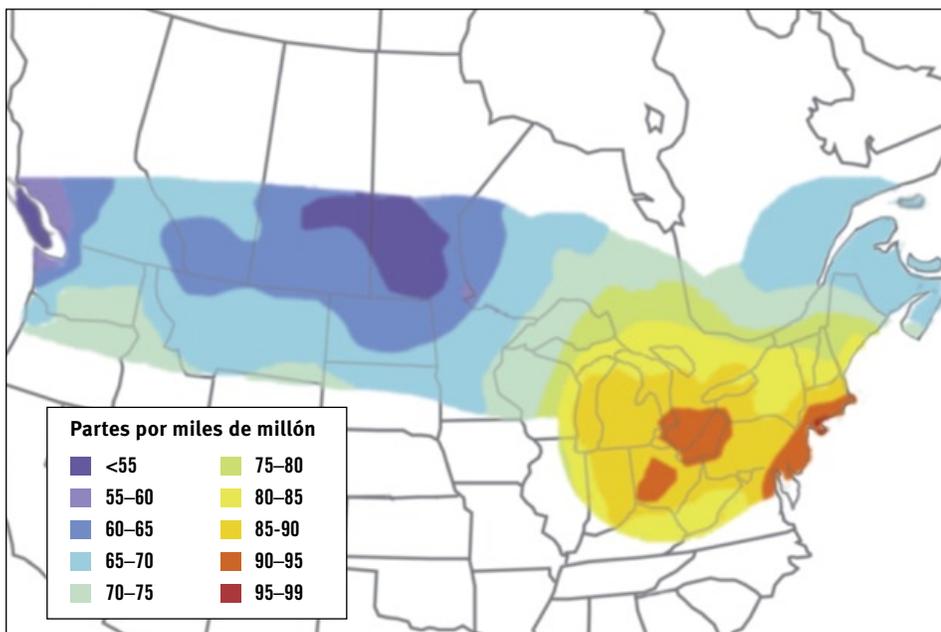
Tendencias de monitoreo del ozono

En la actualidad se cuenta con varias redes de datos sobre el ozono en América del Norte. Sin embargo, la caracterización de las tendencias y los patrones es limitada debido a la falta de congruencia de estos conjuntos de datos y de los métodos para preparar y registrar los resultados. También es difícil derivar tendencias significativas porque las condiciones varían de manera considerable en escala regional. Con todo, el



Fuentes: Ministerio de Medio Ambiente de Canadá (Environment Canada), Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US Environmental Protection Agency) e Instituto Nacional de Ecología de México (los datos más recientes de México corresponden a 2002, no a 2005).

## Concentraciones de ozono a lo largo de la frontera Canadá-Estados Unidos, 2002-2004



Fuente: Comité Canadá-Estados Unidos sobre Calidad del Aire (Canada-United States Air Quality Committee).

actual monitoreo revela que los niveles de ozono ambiental exceden las normas nacionales en ciertas zonas de los tres países.

En Canadá, las tendencias del ozono ambiental basadas en la Norma Pancanadiense (*Canada-wide Standard, CWS*) permanecieron en buena medida sin cambios durante los pasados 15 años, hasta 2005. Sin embargo, el indicador canadiense de la exposición humana al ozono se elevó un promedio de 0.8 por ciento anual: un aumento total de 12 por ciento de 1990 a 2005. A la cabeza de este indicador nacional, que se pondera por la población, se encuentran las concentraciones de ozono y las poblaciones de Ontario y el sur de Quebec. En 2005 las comunidades de estas zonas registraron las concentraciones más elevadas de ozono troposférico, tanto en relación con la CWS como por sus promedios estacionales. Muchas estaciones de monitoreo en Alberta también registraron altas concentraciones estacionales promedio. En 2005 cuando menos 40 por ciento de la población canadiense vivía en comunidades con concentraciones de ozono por arriba de la meta ambiental de la CWS.

En Estados Unidos, las concentraciones nacionales promedio de ozono durante una hora y ocho horas cayeron doce y ocho por ciento, respectivamente, entre 1990 y 2005. Pese a las disminuciones, en 2005 más de diez por ciento de la población estadounidense vivía en condados con concentraciones de ozono por arriba de la norma nacional de una hora para la calidad del aire am-

biente en relación con el ozono, y cuando menos 33 por ciento vivía en condados con concentraciones por encima de la norma de ocho horas.

En México, la frecuencia de días en que las concentraciones de ozono troposférico excedieron la norma ha permanecido constante en el tiempo en la mayoría de las ciudades con monitoreo. Sin embargo, en la Ciudad de México y Guadalajara persisten los problemas graves de calidad del aire. En 2005 al menos 27.7 por ciento de los mexicanos vivía en municipios en los que las concentraciones de ozono estuvieron por encima de la norma nacional cuando menos un día al año.

### Flujos transfronterizos

Tanto estudios de campo como modelos por computadora confirman que en varias zonas de América del Norte el problema del ozono es resultado de complejas interacciones de procesos meteorológicos en diversas escalas y las emisiones de precursores y su química. A veces los niveles de ozono son producto sobre todo de emisiones locales, con apenas contribuciones menores de fuentes ubicadas viento arriba, pero en otras ocasiones, los niveles de ozono dominados por el transporte de ozono y sus precursores provenientes de fuentes a barlovento.

Los análisis de los niveles de ozono en una franja de 500 kilómetros de ancho a todo lo largo de la frontera entre Canadá y Estados Unidos descubrieron niveles más elevados en la región baja de los Grandes Lagos y el valle de Ohio, así

como en la costa oriental estadounidense (véase el mapa). Los valores más bajos de ozono se encuentran por lo general en el oeste y en el Canadá del Atlántico. Los niveles suelen ser más altos viento abajo en las zonas urbanas, por ejemplo en las porciones occidentales de la parte inferior de Michigan. Los niveles locales más altos en las complejas tierras de la cuenca de Georgia y la sonda Puget de Columbia Británica y el estado de Washington no tienen suficiente resolución en el mapa, aunque son menores que en el este. De 1995 a 2004 se registró una disminución de los niveles anuales de ozono en esta región fronteriza, con líneas de tendencia monitoreadas similares en ambos lados de la frontera.

Las concentraciones de ozono en la región fronteriza de Estados Unidos y México persisten como una preocupación en algunas zonas. Aunque en el valle del río Bravo ningún día de 2005 excedió la norma binacional del ozono de ocho horas, otros lugares monitoreados en ciudades hermanas demostraron niveles por encima de la norma, incluidos los dos Nogales (un día), Ciudad Juárez-El Paso (seis días), Tijuana-San Diego (11 días) y Mexicali-Imperial Valley (24 días). Si bien en general el cumplimiento de la norma sobre el ozono está mejorando, Mexicali/Imperial Valley y Tijuana-San Diego permanecieron constantemente por arriba de la norma aplicable de 2001 a 2005.

El transporte de ozono y sus precursores trasciende las fronteras de América del Norte. Es ésta una fuente de ozono troposférico para Europa, igual que Asia lo es para América del Norte. En términos más generales, los niveles de ozono troposférico crecen en todo el planeta y han creado concentraciones "de fondo" de ozono, incluso en zonas remotas que no están directamente afectadas por la influencia humana. El análisis retrospectivo de datos de Europa que se remontan al siglo XVIII sugiere que las concentraciones de ozono en el hemisferio norte tal vez se hayan duplicado durante el siglo pasado como consecuencia de la masiva industrialización que ha tenido lugar. Las actuales concentraciones "de fondo" en América del Norte son de 30-40 partes por mil millones.

### ¿Cuáles son sus vínculos con otras cuestiones ambientales de América del Norte?

El ozono y sus contaminantes precursores están vinculados con las partículas suspendidas (PM), otro componente del smog, y la acidificación, la eutrofización y el cambio climático.

### Partículas suspendidas

Cuando el nitrato —producto de la oxidación del dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ )— se combina con otros componentes de la atmósfera, como el amoníaco, se torna en un importante contribuyente de la formación secundaria de partículas finas ( $\text{PM}_{2.5}$ ). Los COV son también precursores de contaminantes para la formación secundaria de  $\text{PM}_{2.5}$ . El ozono y las partículas suspendidas comparten algunos gases precursores comunes y las reducciones en cualquiera de estos precursores pueden tener resultados complejos y en ocasiones negativos en las concentraciones tanto de ozono como de partículas suspendidas. Los esfuerzos para reducir las concentraciones de estas últimas suelen integrarse en los programas de gestión de la calidad del aire para evitar resultados negativos en la atmósfera.

### Acidificación

Los óxidos de nitrógeno se forman básicamente del nitrógeno liberado durante los procesos de combustión. El óxido de nitrógeno emitido durante la combustión se oxida con rapidez para formar dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) en la atmósfera. Éste después se disuelve en el vapor de agua en el aire para formar ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), e interactúa con otros gases y partículas en el aire para formar otras partículas conocidas como nitritos y nitratos, así como otros productos que pueden resultar dañinos para las personas y el medio ambiente. Tanto el  $\text{NO}_2$  sin transformar como el ácido nítrico y los productos de su transformación pueden tener efectos adversos en la salud o el medio ambiente, toda vez que perjudican la vegetación, los edificios y los materiales, y contribuyen a la acidificación de los ecosistemas acuáticos y terrestres.

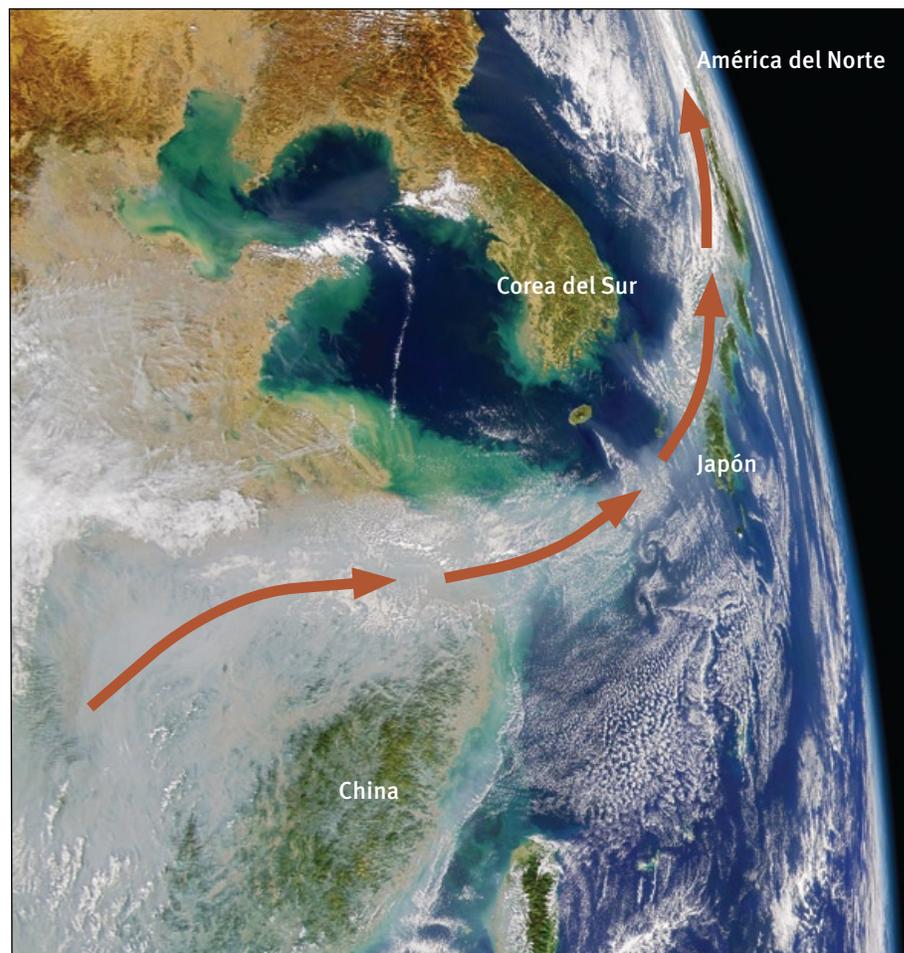
### Eutrofización

Las emisiones de nitrógeno no sólo contribuyen a la formación de deposiciones ácidas, sino que también pueden fungir como nutriente en los ecosistemas, lo que se traduce en la eutrofización o enriquecimiento excesivo de tierras y cuerpos de agua.

### Cambio climático

Cuando está presente en la troposfera superior, el ozono es un gas de efecto invernadero muy eficaz. Las estrategias para reducir las concentraciones de ozono en los ámbitos urbanos y regionales tal vez ayuden a limitar la contribución del ozono troposférico al efecto invernadero y el calentamiento global. 🦋

## Estudio de caso – Transporte de la contaminación asiática a América del Norte



Fuente: Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio de Estados Unidos (National Aeronautics and Space Administration, NASA).

Un estudio reciente plantea que el transporte transpacífico de la contaminación de Asia influye en la calidad del aire de América del Norte durante la primavera y el verano. Cantidades incluso muy pequeñas de las emisiones de Asia que llegan a América del Norte durante el verano pueden tener repercusiones significativas para el manejo de la calidad del aire.

En el verano las emisiones de Asia y Europa contribuyen con 4-7 partes por mil millones de volumen (ppmv) a las concentraciones de ozono vespertino en el aire superficial de Estados Unidos, lo que da lugar a violaciones de la norma de calidad del aire. Si las emisiones de origen antropogénico de Asia se triplican —como se prevé— de 1984 a 2010, el ozono superficial en Estados Unidos podría crecer 1-5 ppmv en el verano.

El transporte a grandes distancias de la contaminación de Asia a través del Pacífico alcanza su máximo nivel en la primavera, por la intensa actividad ciclónica y los fuertes vientos de occidente. El flujo asiático más fuerte ocurre en la parte media de la troposfera. La contaminación asiática se puede transportar por el Pacífico en 5-10 días; esta exportación por convección compite durante el verano con la exportación de ciclones de latitud media. El transporte transpacífico ocurre sobre todo en las partes media y superior de la troposfera, con un tiempo de transporte promedio de 6-10 días.

De acuerdo con el análisis, las masas de aire asiático contenían elevados niveles de monóxido de carbono, ozono, partículas suspendidas y otras sustancias químicas resultantes de la influencia dominante de las emisiones por combustión en el este asiático. Los niveles elevados de metanol y acetona indican que las emisiones naturales se combinaron con el flujo contaminado.