

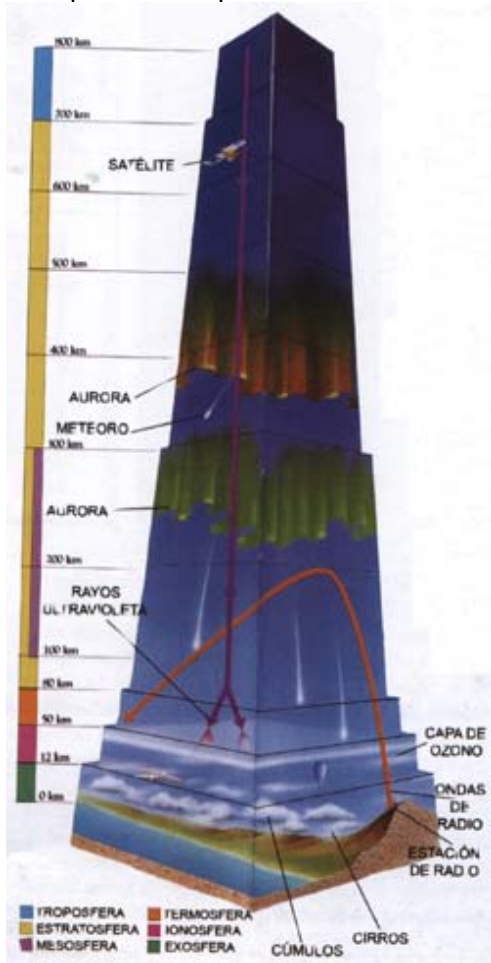
LA CAPA DE OZONO

Indicios de recuperación

LOS MODELOS NUMÉRICOS PREDICEN QUE, CON LAS LIMITACIONES DE EMISIÓN DE GASES, EL OZONO SE ENCONTRARÁ EN CONCENTRACIONES SIMILARES A LAS DE ANTES DEL AGUJERO (1980) HACIA MEDIADOS DE ESTE SIGLO

Por Manuel López Puertas (IAA-CSIC)

EL OZONO, QUE ETIMOLÓGICAMENTE SIGNIFICA "OLER", da nombre a una molécula compuesta por tres átomos de oxígeno -O₃- que, en condiciones normales de presión y temperatura, es un gas incoloro, de olor acre y que puede ser tóxico si se respira en grandes cantidades. Se encuentra en forma natural en nuestra atmósfera, principalmente en dos regiones: el 10% en la troposfera y el 90% en la estratosfera (ver esquema a continuación); por encima de esta altura sólo se encuentra en cantidades ínfimas. La capa con elevada concentración de ozono de la estratosfera se conoce comúnmente como la capa de ozono. Su concentración es muy baja comparada con los principales gases, el nitrógeno y el oxígeno moleculares (N₂ y O₂). Si comprimiéramos el ozono de toda la atmósfera en una sola capa en la superficie de la Tierra tendría el grosor de un lápiz (unos 3-4 mms).



Sin embargo, estas pequeñas cantidades son suficientes para proteger la vida en la Tierra de la dañina radiación ultravioleta (UV) solar.

El ozono se forma en la estratosfera de manera natural en dos pasos, a partir del O₂ y en presencia de radiación ultravioleta solar. Primero la radiación UV rompe la molécula de O₂ en dos átomos de oxígeno y estos se recombinan posteriormente con dos moléculas de oxígeno para formar dos moléculas de ozono. Asimismo, el ozono también se destruye en la atmósfera mediante reacciones químicas en las que intervienen compuestos naturales (por ejemplo, los óxidos del nitrógeno) y compuestos producidos por el hombre, como los compuestos de cloro y bromo.

En la troposfera, cerca de la superficie terrestre, además de la producción natural mencionada arriba, el ozono también se produce por reacciones con gases contaminantes, como hidrocarburos y óxidos de nitrógeno, que también requieren la presencia de luz. La combustión de carburantes fósiles es la principal fuente de polución

en la producción del ozono troposférico.

El bueno, el malo y el ozono

El ozono estratosférico absorbe parte de la radiación ultravioleta solar (UV-B, 280-315 nm), perjudicial para la vida en la superficie terrestre. Por esta razón, el ozono de la estratosfera se considera como ozono "bueno". Por el contrario, un exceso de ozono en la superficie, formado a partir de los gases contaminantes, se considera ozono "malo", porque es perjudicial para el hombre, las plantas y los animales – reduce el crecimiento de cosechas y bosques y produce problemas en las vías respiratorias. Además, el ozono en esta región contribuye al calentamiento global de la superficie terrestre. No obstante, el ozono producido de forma natural en la troposfera también se considera "bueno" por su papel de agente limpiador de gases contaminantes como monóxido de carbono y metano. En la década de los 80, cuando se descubrió su drástica reducción sobre la Antártica (el denominado agujero de ozono), su estudio pasó a ser fundamental porque una disminución progresiva podría incidir en un mayor riesgo de aparición de cáncer de piel. Y, más recientemente, también cobró protagonismo por su importante papel en la contaminación y en la calidad del aire de las grandes urbes.

El agujero de ozono

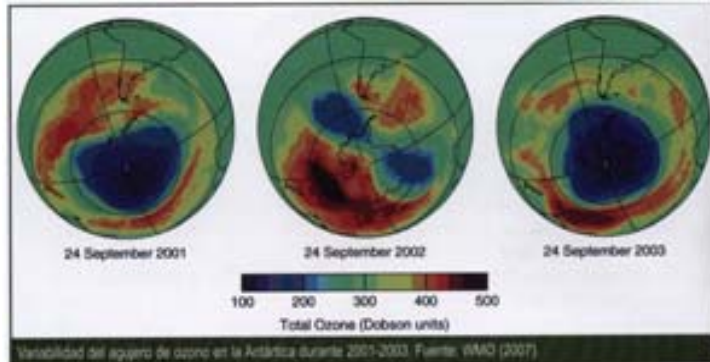
El ozono no se encuentra distribuido uniformemente sobre todo el globo. Aún produciéndose principalmente en el ecuador y en los trópicos (recordemos que necesita de la presencia de luz para formarse), la mayor cantidad total de ozono (o columna de ozono), correspondiente a todo el ozono que hay en la atmósfera por encima de un determinado sitio, se encuentra en latitudes medias y cercanas a los polos (salvo en las condiciones del agujero de ozono, primavera austral), debido al régimen de vientos ecuador-polo reinante en la estratosfera. Esto produce un fuerte cambio con la latitud.

A principios de la década de los 80, investigadores del *British Antarctic Survey* y de la agencia meteorológica de Japón observaron en varias estaciones de la Antártica que la columna de ozono a finales del invierno y principios de primavera (septiembre-octubre) disminuía de forma espectacular. Estas informaciones fueron confirmadas posteriormente con las medidas de satélites que mostraban que esta reducción se extendía sobre una vasta región (20-25 millones de km²) centrada en el polo sur (imagen siguiente). De ahí el nombre de "agujero de ozono". Hoy sabemos (en 1995 se concedió el Premio Nóbel de Química a los investigadores Mario Molina, Sherwood Roland y Paul Crutzen por sus trabajos sobre la destrucción del ozono atmosférico) que el agujero de ozono se produce por la emisión a la atmósfera terrestre de compuestos de cloro y bromo (los cloro-fluorocarbonos, CFCs) empleados en las industrias de refrigeración y aire acondicionado. Estos gases, químicamente inertes e insolubles en la lluvia y nieve en la baja atmósfera, se acumulan en la misma y se transportan a la estratosfera donde, en presencia de luz UV, se convierten en gases reactivos que, mediante reacciones catalíticas, destruyen el ozono. La eventual eliminación de los CFCs de la atmósfera tiene lugar a través de la disolución en lluvia y nieve de los productos reactivos de cloro y bromo aunque a un ritmo lentísimo –la vida media de una molécula de CFC en la atmósfera es de casi un siglo-.

En promedio, la capa de ozono global se ha reducido desde 1980 y actualmente es de un 4% menor que entonces

Merced a los procesos químicos, los CFCs se distribuyen casi uniformemente por todo el globo. ¿Por qué se produce entonces el agujero en la Antártica? La respuesta está en las bajas temperaturas de la estratosfera en el invierno polar antártico, producidas por el denominado vórtice polar, un potente anticiclón que se forma en la baja estratosfera (30 km). Estas bajas temperaturas favorecen la

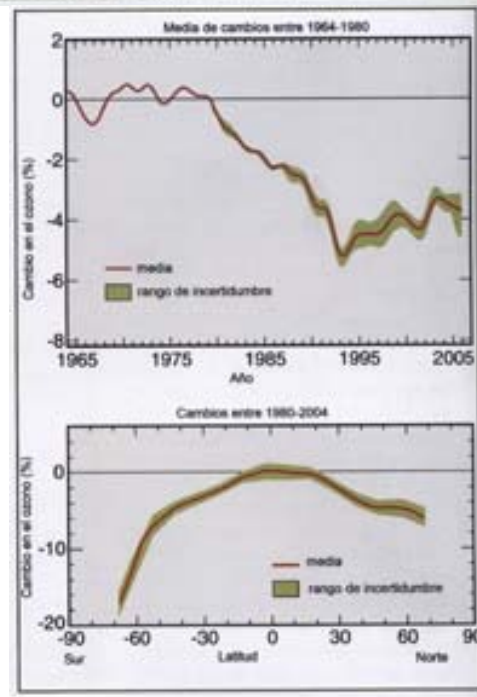
formación de nieves de hielo (nubes estratosféricas polares). En la superficie de los cristales de hielo tienen lugar, durante el invierno polar, reacciones químicas que transforman los productos del cloro en otros que, tras la llegada de la luz en la primavera, producen los productos clorados reactivos que destruyen al ozono. En el ártico también se produce una disminución del ozono al final del invierno y principios de primavera (febrero-abril), aunque mucho menor que



en el Antártico, debido a las temperaturas menos frías, y es mucho más variable. La distinta orografía y distribución de continentes y océanos en el hemisferio norte tiene un papel muy importante, ya que aumenta la actividad de propagación de ondas en la estratosfera y evita así que las temperaturas del vórtice polar Ártico sean tan bajas. La pérdida de ozono no sólo ocurre en las regiones polares. Aunque en menor intensidad, también sucede en latitudes medias, y en mayor medida en el hemisferio sur que en el Norte (ver imagen, panel inferior). Considerando el promedio de todas las

Variabilidad del agujero de ozono en la antártica durante 2001-2003

La imagen muestra la pérdida de ozono en el hemisferio sur desde 1965 a 2005. En el 2002 ocurrió, por primera vez en la historia, una ruptura del vórtice polar antártico (algo muy frecuente en el Ártico), que impidió que se alcanzaran temperaturas muy bajas y propició que la reducción de O₃ fuera pequeña (imagen superior, panel central). En 2004 la pérdida de ozono también fue mucho menor. No está claro porqué han ocurrido estas reducciones tan débiles en estos años aunque parece que están asociadas al cambio climático. Sin embargo en el 2006 casi se alcanza un nuevo récord absoluto de pérdida de ozono. De cualquier manera la tendencia en promedio de los últimos años es a una recuperación de la capa de ozono. Fuente WMO (2007).



Latitudes, la capa de ozono global se ha reducido paulatinamente desde 1980 y actualmente es un 4% menor que entonces (ver imagen, panel superior), valor significativamente mayor que su variabilidad natural.

Soluciones al problema

Debido al alto poder destructor del O₃ de las CFCs y a su larga vida en la atmósfera, rápidamente se establecieron protocolos para disminuir su producción. Así, el 16 de septiembre de 1987 se firmó el protocolo de Montreal (la ONU celebra el día mundial del ozono este día, y este año se celebra el veinte aniversario), donde se establecieron límites de producción de CFCs que posteriormente tuvieron que ser revisados a la baja en sucesivas enmiendas en Londres (1990), Copenhague (1992) y Pekín (1999). Como resultado de dicho protocolo y las sucesivas enmiendas, la

Los modelos numéricos predicen que el ozono se encontrará en concentraciones similares a las de antes del agujero hacia mediados de este siglo

cantidad de gases destructores del ozono ha empezado a disminuir recientemente y, desde finales del siglo pasado, se ha observado una estabilización de la pérdida de

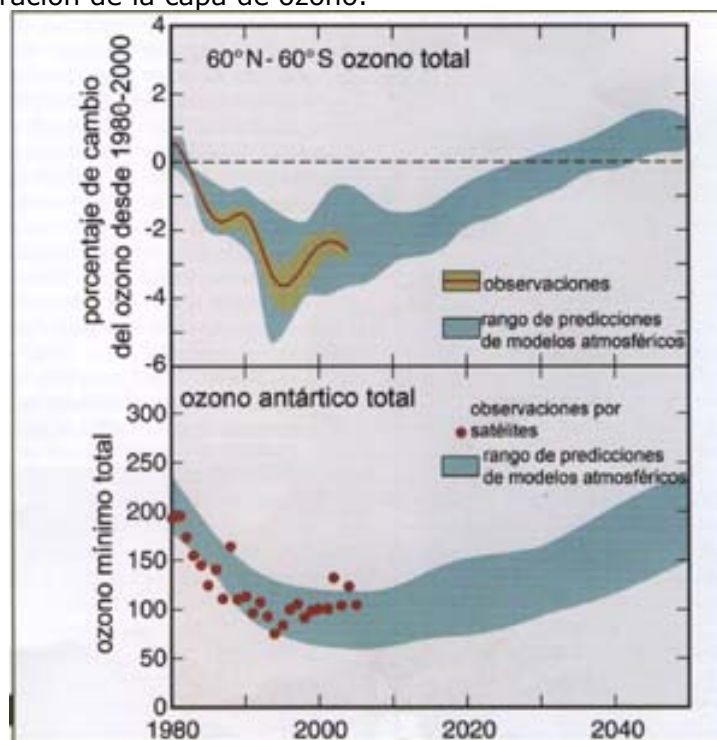
ozono. Sin embargo, el agujero de ozono presenta una alta variabilidad que impide afirmar con rotundidad cuando exactamente y en qué medida se recuperará.

Los modelos numéricos predicen que, con las limitaciones actuales de emisión de gases, el ozono se encontrará en concentraciones similares a las de antes del agujero (las de 1980) hacia mediados de este siglo (imagen siguiente). La capa de ozono se recuperará a medida que los compuestos clorados y bromados vayan desapareciendo de la atmósfera, aunque existen varios factores, tanto de índole natural como de origen humano, que pueden cambiar el ritmo de su recuperación. Factores naturales como la variabilidad de la actividad solar y las erupciones volcánicas, así como el cambio climático, puede alterar su evolución.

Factores de variabilidad

Como ya hemos mencionado, el condiciones de mayor radiación solar se produce más ozono. Así, la columna total de ozono tiene una variabilidad de un 5% asociada al ciclo solar de 11 años. Por otra parte, una mayor actividad solar genera perturbaciones (tormentas) magnéticas, lo que produce una mayor concentración de óxidos de nitrógeno en las regiones polares y, por tanto, una disminución del ozono (ver recuadro en pagina siguiente).

La erupción de grandes volcanes, como el Chichón en 1982 o el Monte Pinatubo en 1991, inyectó en la estratosfera gran cantidad de aerosoles sulfatados, que proporcionan la base para las reacciones que dan lugar a los gases destructores del ozono. Durante esos años se detectaron los niveles más bajos de ozono en la Antártica. Así pues, si entraran en erupción volcanes similares en los próximos años, cuando los niveles de CFCs en la atmósfera aún serán altos, se retrasaría en varios años la recuperación de la capa de ozono.



Por otra parte, los efectos del cambio climático (cuya causa principal no es la reducción de ozono sino el elevado aumento de las concentraciones de los gases invernadero como el dióxido de carbono o el metano) pueden incidir en un sentido u otro en la recuperación de la capa de ozono. Aunque esto es, hoy día, un campo de intensa investigación, sabemos que la emisión de gases invernadero aumenta la temperatura en la superficie pero baja la de la estratosfera, que contiene la mayor parte del ozono. La destrucción natural del ozono es más lenta a menores temperaturas en la alta estratosfera y, por tanto, produciría una recuperación más rápida del mismo. Por el contrario, temperaturas más bajas en la estratosfera

inferior propician un aumento en la aparición de nubes estratosféricas polares, que contribuyen a una mayor pérdida del ozono. En este mismo sentido, el aumento de la cantidad de vapor de agua en la estratosfera constatado recientemente también conduciría a una mayor presencia de estas nubes y de menos ozono.

Los efectos del cambio climático también se dejan sentir a través de los cambios en la dinámica atmosférica como consecuencia del cambio en la estructura térmica. ¿De qué forma afectará al ozono global?. Aún no lo sabemos con certeza. Por una parte, parecen existir indicios de una aceleración del transporte meridional ecuador-polos, que puede afectar al transporte de ozono, producido principalmente en los trópicos. Por otra parte, el cambio climático puede afectar a los procesos dinámicos fortaleciendo el vórtice polar, esto es, temperaturas bajas, mayor presencia de nubes estratosféricas polares y mayor pérdida de ozono; o puede que aumente la actividad de ondas planetarias, causando vórtices más débiles y menos fríos, menos nubes y mayores niveles de ozono. Así, pues, la predicción de la recuperación de la capa de ozono a los niveles anteriores a 1980 es, hoy por hoy, bastante incierta.

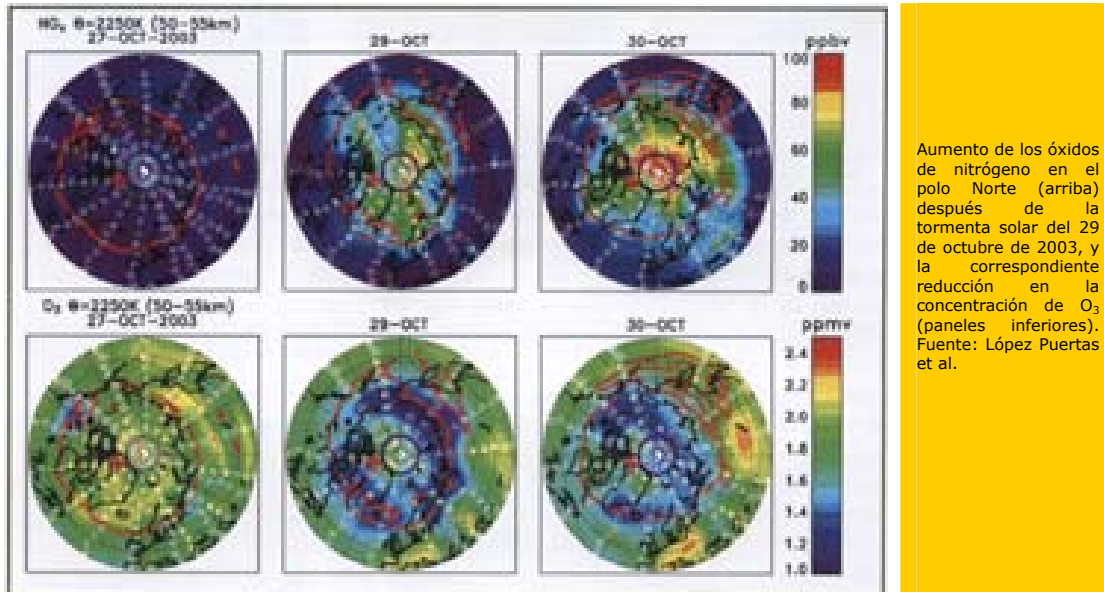
BIBLIOGRAFÍA

- García, R., Causes of ozone depletion, Physics World. April, p. 49-55. 1995
- Solomon, S., Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history. Rev. Geophys., 37, 235-316, 1999
- WMO (World Meteorological Organization), Scientific assessment of ozone depletion: 2006. Global ozone research and monitoring project-Report nº. 50. Geneva. Switzerland, 2007
- Weatherhead E. C., and S. B. Andersen. The search for signs of recovery of the ozone layer, nature, 44, 4, 39-45. 2006

OZONO Y RAYOS UV

La variación de la columna de ozono a lo largo de un día es prácticamente nula, por lo que la mayor variación de la radiación solar en la superficie viene dada por la inclinación de los rayos solares, al margen de efectos menores como la nubosidad y la concentración de aerosoles. El cambio en la radiación solar recibida en la superficie a la latitud de España (40°) en el solsticio de verano (21 de junio) desde las 9 a las 12 de la mañana (de 11 am a 2 pm hora civil) es de un 35% (y un 65% de 8 a 12h) equivalente al mismo sector en la columna de ozono. Este factor es mucho más elevado que la reducción de la columna de ozono desde 1980 en todas las latitudes salvo en torno al polo Sur (latitudes > 60°S). Así pues, salvo en la Antártica durante la primavera austral, el efecto de la pérdida de ozono sobre el aumento de la radiación UV en la superficie es casi despreciable frente a la variación diaria. Si estamos sensibilizados por nuestra exposición a la radiación UV, no debemos pues preocuparnos en exceso del agujero de ozono sino de no tomar el Sol en las horas centrales del día. Los índices de radiación UV actualmente publicados en varias páginas web, normalmente junto a columnas de ozono, reflejan más bien la latitud, estación y hora del lugar más que la pérdida de ozono.

EFECTO DE LA VARIABILIDAD DE LA ACTIVIDAD SOLAR SOBRE EL OZONO POLAR



Con objeto de predecir la evolución futura de la capa de ozono es necesario conocer todos aquellos procesos, tanto naturales como causados por el hombre, que lo controlan. Entre las causas naturales se encuentran la variabilidad de la actividad solar, que tiene una doble vertiente. Por un lado, la variación de la radiación solar UV que nos llega a la atmósfera, principalmente asociada al ciclo solar de once años y, por otro, la producción de grandes cantidades de partículas (principalmente protones y electrones) eyectadas por el Sol que, dirigidas a lo largo de las líneas de campo magnético terrestre, inciden en las regiones polares. En el Instituto de Astrofísica de Andalucía realizamos una intensa actividad en el segundo aspecto. Las medidas excepcionales suministradas por el instrumento MIPAS, a bordo del satélite Envisat de ESA, nos está permitiendo estudiar en profundidad los efectos de las denominadas "tormentas magnéticas" solares sobre la concentración de ozono en las regiones polares. Estos eventos inyectan gran cantidad de protones y electrones altamente energéticos en las regiones polares, capaces de penetrar hasta los 30 km. En su penetración, ionizan el nitrógeno molecular que rápidamente reacciona con el oxígeno para formar óxidos de nitrógeno (NO y NO₂). Estos gases participan de forma natural en ciclos catalíticos destructores del O₃. Así pues, uno de los efectos de estas tormentas es la destrucción del ozono polar. Si inciden sobre la atmósfera cuando no está iluminada (invierno polar) los efectos pueden ser muy elevados (hasta una reducción del 10% en la columna de O₃) y sus efectos se pueden dejar sentir durante varios meses.

Otro aspecto más persistente aunque menos intenso es el producido por la precipitación de electrones muy energéticos. La actividad magnética solar induce cambios en la magnetosfera terrestre (varios miles de km) que produce la precipitación de electrones muy energéticos sobre la alta atmósfera (100 km) en las regiones polares. Estos producen igualmente óxidos del nitrógeno en la alta atmósfera que, tras su descenso durante la noche polar, destruyen el ozono en la estratosfera. MIPAS es un instrumento ideal para cuantificar la destrucción del O₃ debido a estos fenómenos, pues mide tanto el O₃ como estos compuestos del nitrógeno de forma global y continua, no solo en regiones iluminada sino particularmente en condiciones nocturnas.



Fuente: *Información y Actualidad Astronómica*, IAA-CSIC, octubre, 2007, nº 23