

EL OZONO ESTRATOSFÉRICO

El ozono es una especie molecular formada por tres átomos de oxígeno. Es relativamente inestable y se encuentra en dos niveles de la atmósfera: la *estratosfera* que se extiende entre 10 y 50 km de altura y la *troposfera* entre 0 y 10 km de altura. Aunque forma sólo una pequeña parte de la atmósfera, el ozono estratosférico es crucial para la vida en la Tierra.

El *ozono estratosférico* protege la superficie del planeta de la radiación electromagnética Ultravioleta-B (UV-B) emitida por el Sol. Sin ozono estratosférico seríamos más susceptibles al cáncer de piel, las cataratas y la depresión del sistema inmune. En cambio, el *ozono de la troposfera* es un peligroso contaminante del aire que respiramos, ya que daña al tejido pulmonar y también a las plantas. Las cantidades de ozono atmosférico estratosférico y troposférico dependen del balance entre los procesos que crean ozono y aquellos que lo destruyen.

La capa de ozono

En 1998 se publicó una investigación epidemiológica realizada en Puerto Rico sobre las tendencias del melanoma en la población humana (Matta *et al.* 1998). Uno de los propósitos de este trabajo era determinar la tasa de incidencia (corregida por edad) del melanoma en los residentes de Puerto Rico entre 1978 y 1991. Esta investigación respaldada por la NASA trataba de establecer si había un aumento del melanoma a partir de 1978 debido a la erosión del ozono estratosférico y la pérdida de parte de su capacidad de filtro de la radiación UV-B. Los cálculos incluyeron todos los valores registrados entre 1978 y 1991 y los resultados mostraron

un incremento del melanoma del 528% para los hombres y del 200% para las mujeres en los 13 años del estudio. Estas cifras son algo exageradas ya que el período de la investigación coincidió con las campañas de educación pública sobre la relación entre radiación solar y cáncer de piel y los datos de asistencia hospitalaria utilizados reflejan en parte el efecto de una mayor alerta pública sobre el problema. Por fin, la diferencia entre hombres (528%) y mujeres (200%) se relaciona probablemente con el tipo de trabajo más expuesto al sol que realizan los hombres. Esta investigación pionera subrayó los nuevos riesgos de salud de la vida cotidiana contemporánea. En otra investigación respaldada también por la NASA, se hizo cultivo de células y usando un simulador solar, Matta *et al.* (2005, 2006) reprodujeron en el laboratorio las condiciones ambientales de Puerto Rico (establecidas por seis años de medición continua de la irradiancia solar). En esas condiciones expusieron fibroblastos normales de piel humana al simulador solar durante 10, 11, 19, 23 y 45 minutos a un flujo correspondiente a la radiación ambiental de mediodía de UV-A (400 a 315 nm) y UV-B (280 a 315 nm). Esta exposición generó respuestas apoptóticas y necróticas con un umbral de 19 a 23 minutos para producir una o la otra. Este trabajo de ciencia básica mostró la clase y magnitud de las respuestas celulares de la piel humana a la acción de los fotones de alta energía de la radiación UV.

Se ha visto que el adelgazamiento de la capa de ozono durante las últimas décadas produjo un aumento en la incidencia de estos problemas. La reducción del rendimiento de los cultivos, la destrucción de pesquerías marinas, los daños a materiales no biológicos y el aumento del *smog* son atribui-



bles también a niveles más altos de radiación UV, mostrando que hay costos no despreciables asociados al problema del ozono estratosférico y la radiación UV.

El balance del ozono estratosférico

En la estratosfera, el ozono se crea y se destruye en primer término por la radiación UV. El aire de la estratosfera es bombardeado continuamente por la radiación UV del Sol. La capacidad de absorber varias longitudes de onda de la radiación UV, que hacen al ozono tan valioso para nosotros, es también la causa de su destrucción. Cuando una molécula de ozono (O_3) absorbe radiación UV, se divide en un átomo de oxígeno libre y una molécula de oxígeno ordinario. El átomo de oxígeno libre puede unirse con una molécula de oxígeno para formar otra molécula de ozono, o sustraer un átomo de oxígeno de una molécula de ozono para hacer dos moléculas de oxígeno. Estos procesos iniciados por la radiación UV se conocen como “Reacciones de Chapman” o “modelo de sólo oxígeno”.

Actualmente sabemos que otras fuerzas naturales se suman a las reacciones de Chapman afectando la concentración del ozono en la estratosfera. El ozono reacciona fácilmente cediendo su átomo “extra” de oxígeno al nitrógeno, al hidrógeno y al cloro de los compuestos naturales. Estos elementos existieron siempre en la estratosfera desprendidos de fuentes naturales como el suelo, el vapor de agua y los océanos. Se cree que los niveles de ozono cambian periódicamente como parte regular de ciclos naturales como los cambios estacionales, los ciclos solares y los vientos. Además, las erupciones volcánicas pueden, cada tanto, inyectar materiales que destruyen el ozono en la estratosfera.

La destrucción del ozono estratosférico

El “agujero del ozono antártico” es una indicación dramática del cambio ambiental global causado por la humanidad. La destrucción del ozono estratosférico fue detectada por investigadores ingleses en la Antártida (Farman *et al.* 1985). Estos científicos medían aumentos primaverales en la radiación solar UV que penetraba la atmósfera en longitudes de onda normalmente absorbidas por el ozono. Los análisis mostraron un factor cercano a 2 en el aumento de la UV medida entre 1956 y 1985 y que el cambio se aceleraba desde 1976. Los estudios satelitales mostraron que este fenómeno ocurría en un área geográfica de 1.000 km de diámetro situada en un lugar no poblado y sin agricultura. Las reacciones de Chapman subestimaban la tasa de destrucción del ozono y Crutzen, Molina y Rowland postularon un modelo catalítico que podía explicar los hechos observados. Los catalizadores podían ser hidrógeno, hidroxilo, óxido nitroso,

cloro o bromo. El cloro producido por la disociación de el CFC-12 (CCL_2F_2) es el principal catalizador que actúa en el “agujero del ozono” de la primavera antártica. Estos autores recibieron el Premio Nobel de Química en 1995.

Como algunos investigadores sospechábamos, la magnitud extrema y las limitaciones geográficas de la destrucción del ozono antártico se deben a patrones meteorológicos peculiares de la región del Polo Sur. La gran destrucción local que contrasta con la disminución moderada del ozono en el resto de la estratosfera se conecta con la circulación del vórtice polar más una compleja interacción del cloro con los óxidos de nitrógeno, y su confinamiento físico en el frío extremo (temperaturas inferiores a 80 °C bajo cero) de las nubes estratosféricas y la remoción selectiva de algunas especies moleculares por precipitación (Carlson *et al.* 2000). En contraste con el confinamiento antártico del “agujero”, algunos habíamos observado (D’Antoni *et al.* 1994) que esa destrucción localizada debía reflejarse en la concentración global del ozono. Aunque los australianos y neozelandeses y, en menor medida los argentinos y chilenos tomaron medidas protectoras, en el hemisferio norte no hubo acción asociada a la creciente preocupación hasta que en 1987 se firmó el primer manuscrito del Protocolo de Montreal que ha sufrido desde entonces adiciones y modificaciones concomitantes con el aumento del conocimiento del problema. Esencialmente prohibió la producción y uso de moléculas como el CFC-12.

La destrucción del ozono estratosférico ejemplifica nuestra incapacidad para predecir las interacciones entre productos industriales y los ciclos químicos naturales. El déficit no está sólo en la ciencia sino en su pérdida de su poder de comunicación y persuasión, en algunas colosales faltas de ética y en ciertos casos de franca ignorancia de la amplitud y diversidad de los problemas. Beneficiarios de estas deficiencias son los buscadores de provecho a cualquier costo y con total irresponsabilidad sobre las consecuencias de sus acciones.

A lo largo de la vida de la Tierra, los procesos naturales han regulado el balance del ozono en la estratosfera. Una manera simple de entender el balance del ozono es pensar en un balde con agujeros. En tanto se le agrega agua a la misma tasa en que el balde la pierde, la cantidad de agua en él permanece constante. Del mismo modo, si el ozono se crea a la misma tasa en que se destruye, la cantidad total de ozono permanece constante (McElroy 2002).

La expresión “destrucción del ozono” significa no sólo la mera destrucción natural del ozono sino también que la pérdida excede su creación. Al agregar a la atmósfera compuestos que destruyen el ozono, como los clorofluorocarbonos (CFC), se acentúa la pérdida de ozono de modo que la tasa de pérdida supera a la tasa de creación. Consecuentemente, decrecen los niveles globales de ozono y con ello la protección que ofrece contra la radiación ultravioleta.

Entre 1973 y 1993 se han encontrado evidencias de que las actividades humanas alteran el balance del ozono. En 1974,



Mario Molina y Sherwood Rowland (que, junto con Paul Crutzen, recibieron el Premio Nobel de Química en 1995) predijeron que los CFC causarían una declinación del ozono global, pero la comunidad científica se mantuvo escéptica: ¿Por qué los sistemas de supervisión satelital no detectaban la declinación? Años más tarde, un examen cuidadoso reveló que los detectores satelitales habían registrado la caída y habían marcado sus valores más bajos, pero los científicos estaban atrasados en el análisis de esos datos y no habían visto las señales de alarma. En efecto, los archivos de computadora muestran que en 1984 el agujero del ozono que no se había detectado anteriormente, era más grande que los Estados Unidos y más profundo que el Monte Everest.

La destrucción de la capa de ozono estratosférico es un tema importante para el estudio del cambio global. Ocurre hace décadas y la actividad humana es la causa. Los responsables principales de la destrucción del ozono forman una familia de gases sintéticos llamados clorofluorocarbonos (CFC). Éstos fueron creados en 1929 para usarlos en refrigeración y aire acondicionado y luego como propelente en aerosoles, solventes, agentes para formar espumas artificiales. Su creación puso fin a la muerte de obreros de la industria de la carne al reemplazar al cloruro de metilo (altamente tóxico) como gas para la refrigeración. Otra familia de gases dañinos para el ozono es la de los halometanos cuya molécula es la de un metano (CH_4) con uno de los hidrógenos reemplazado por un halógeno (F, Cl, Br ó I) usados en los extinguidores de incendios y otras aplicaciones industriales. Algunos de estos compuestos se producen naturalmente pero sobre todo artificialmente. En la década de 1970 los científicos comenzaron a descubrir un aspecto negativo muy serio de estos compuestos “maravillosos”. Los halógenos de los CFC y de los halometanos destruyen el ozono estratosférico. La producción humana de estos compuestos ha introducido una nueva fuerza en el sistema de destrucción del ozono, que desequilibra el balance natural de creación/destrucción. Los CFC son compuestos muy estables y no reaccionan fácilmente con otros compuestos en la atmósfera baja. Una de las pocas fuerzas que pueden romper las moléculas de los CFC es la radiación UV. En la atmósfera baja, sin embargo, los CFC están protegidos de la radiación UV por la capa de ozono de la estratosfera. Aunque las moléculas de los CFC son más pesadas que el aire, los procesos de mezcla de la atmósfera las llevan a la estratosfera. Una vez en la estratosfera los CFC dejan de estar protegidos de la radiación UV de la capa de ozono. Bombardeadas por la energía UV del Sol, las moléculas de CFC se rompen y liberan sus átomos de cloro. Los átomos libres de cloro pueden entonces reaccionar con las moléculas de ozono, tomando un átomo de oxígeno para formar monóxido de cloro y una molécula de oxígeno.

Si cada átomo de cloro que se libera de una molécula de CFC rompiera una sola molécula de ozono, los CFC serían una amenaza muy pequeña para la capa de ozono, pero cuando una molécula de monóxido de cloro encuentra un

átomo de oxígeno libre, el átomo de oxígeno rompe el monóxido de cloro sustrayéndole el átomo de oxígeno y liberando nuevamente al átomo de cloro en la estratosfera para destruir más ozono. Esta reacción tiene lugar repetidamente, permitiendo que un mismo átomo de cloro destruya muchas moléculas de ozono.

Afortunadamente, los átomos de cloro no permanecen para siempre en la estratosfera. Cuando un átomo de cloro libre reacciona con gases como el metano (CH_4) se liga a una molécula de cloruro de hidrógeno (HCl) que puede ser transportada desde la estratosfera a la troposfera y lavado por la lluvia. Por consiguiente, si los humanos dejan de poner CFC y otros agentes destructores del ozono en la estratosfera, la capa de ozono finalmente se reparará por sí misma.

El “agujero” del ozono

Las nubes estratosféricas de la Antártida contienen partículas de hielo que no existen en latitudes más cálidas. Las reacciones que ocurren en la superficie de las partículas de hielo aceleran la destrucción del ozono por el cloro. Esta es la causa de la disminución de la concentración de ozono sobre la Antártida que se ha documentado mediante los espectrómetros de Dobson montados por la Misión Británica en el Polo Sur, el detector espacial TOMS de la NASA y también *in-situ* por la Misión de la NASA dirigida por Estelle Condon (1987). Los niveles de ozono disminuyen tanto en la primavera del hemisferio sur que se ha observado un “agujero” en la capa de ozono. Además se ha observado una caída en la concentración de ozono sobre todo el globo. La segunda mitad de 1992, por ejemplo, marcó un récord de mínima concentración de ozono en el mundo.

Hacia 1987, la concentración media de ozono sobre el Polo Sur era un 50% menor y en puntos aislados había desaparecido por completo. En 1988 más de 100 expertos internacionales informaron que la capa global de ozono se estaba erosionando mucho más rápido de lo que cualquiera de los modelos había predicho. Entre 1969 y 1986, el promedio global de la concentración de ozono en la estratosfera había caído aproximadamente un 2%. Pero las regiones más pobladas del mundo sufren pérdidas de ozono mucho mayores que ese promedio y la concentración varía estacionalmente. En invierno, cuando las pérdidas son más pronunciadas se han medido disminuciones de ozono de más del 6% en las regiones más pobladas. La declinación de las concentraciones de ozono ha sido más severa en el Polo Sur; el agujero del ozono cubre más del 10% del Hemisferio Sur. A pesar de la creciente evidencia científica, había escepticismo en cuanto a la veracidad de estos hallazgos. La NASA decidió producir información incontrovertible. Los aviones espía U2 fueron diseñados para volar en la estratosfera. La NASA tuvo la necesidad de modificar el diseño de estos aviones para adaptarlos a la nueva misión (Fig. 41) (Fig.42).



Figura 41: Un U2 original (al fondo) y la versión modificada, el ER-2 (primer plano), sobrevolando el Golden Gate de San Francisco, California. Nótese el aumento considerable de las alas y la nariz estirada y achatada (Foto NASA Ames).



Figura 42: El ER-2 convertido en un complejo laboratorio de fisicoquímica, está listo para estudiar el Agujero del Ozono Austral. Los detectores se hallan en los tubos bajo las alas, en los extremos de las mismas y varios sitios de la parte inferior del cuerpo del avión.

La misión de 1987 se desarrolló con éxito y produjo mucha información original, que eliminó dudas sobre la veracidad del agujero del ozono (Fig. 43).

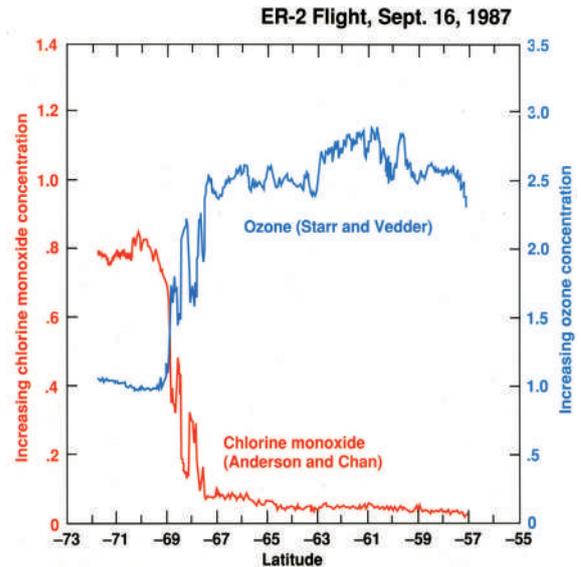


Figura 43: Cromatografía in-situ del agujero del ozono antártico (16 de septiembre de 1987). La concentración de monóxido de cloro es baja entre los 57 y 67 grados de latitud sur y la del ozono es alta en el mismo trayecto. A los 69 grados la relación se invierte macando el comienzo del “agujero”.

Los científicos saben que el ozono se está destruyendo sobre todo el planeta, principalmente debido a las acciones humanas pero aún falta determinar con más exactitud cuánta destrucción se debe a la humanidad y cuánta proviene de las fluctuaciones de los ciclos naturales (Fig. 44).

Supervisión del ozono desde el espacio

En la década de 1920 comenzó a medirse el ozono estratosférico desde la superficie de la Tierra. En varios lugares del mundo se colocaron instrumentos para medir la cantidad de radiación UV que pasaba a través de la atmósfera. A partir de esos datos se calcularon las concentraciones de ozono que se encontraban encima de esos lugares. Estos datos mostraron nuevos aspectos del ozono estratosférico pero no ofrecieron un cuadro global de sus concentraciones. A fines de la década de 1970 existían detectores satelitales que resolvían este problema. En la década de 1980 la declinación del ozono fue del 5%. Nuevos datos muestran que la destrucción del ozono en el Hemisferio Norte se extiende más hacia el sur de lo que se había pensado y que dura más, comenzando a fines del otoño y extendiéndose hasta mayo. Las noticias son peores para el Hemisferio Sur, con pérdidas que, en promedio, son un 2% mayores que en el Hemisferio Norte y con un período de destrucción que dura más tiempo. Los análisis de abril de 1991 muestran que en la zona templada del Hemisferio Norte la pérdida de ozono está sucediendo más de dos veces más rápido de lo esperado.

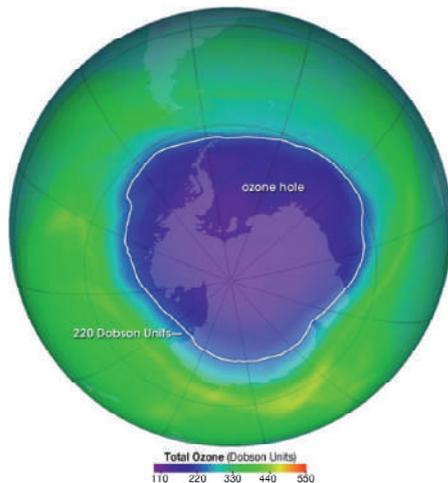


Figura 44: El agujero del ozono antártico detectado por el instrumento OMI el 3 de octubre de 2006.

En contraste con la imagen que sugiere la expresión “capa de ozono”, la cantidad y distribución de las moléculas de ozono en la estratosfera es muy variable. Las moléculas de ozono derivan por la estratosfera en concentraciones cambiantes. Por consiguiente, los científicos que observaban el ozono en un punto determinado no podían establecer si los cambios que detectaban tenían extensión global o si se trataba de fluctuaciones del ozono en ese punto solamente. Los satélites resolvieron este problema al ofrecer una imagen simultánea del ozono en todo el planeta.

Los últimos análisis están basados en datos de un instrumento llamado Total Ozone Mapping Spectrometer (= espectrómetro de mapeo del ozono total, TOMS), que ha volado a bordo de las naves espaciales Earth Probe, Meteor 3, Nimbus 7, y OMI (Ozone Monitoring Instrument). Las mediciones satelitales se hacen sobre la llamada “columna de ozono”, que es la cantidad de ozono que se encuentra sobre cualquier punto dado de la Tierra. Las mediciones se han realizado desde 1978 hasta el presente con una breve interrupción en 1994. Estas mediciones permitieron reconocer y eliminar del análisis los cambios en la radiación UV producidos por el ciclo solar.

La validación en superficie es deficiente. La National Science Foundation (Polar Program) ha establecido una red de espectro-radiómetros de alta resolución desde el Polo Sur hasta Barrow (Alaska), al norte del círculo polar. Recientemente agregó otra estación en Groenlandia. El establecimiento de esta red implicó un gran esfuerzo presupuestario y requiere la cooperación local para la supervisión y control de los delicados instrumentos. En cambio, no existe una red como la propuesta por D’Antoni *et al.* (1994), que hubiese detectado en detalle el comportamiento del agujero del ozono con respecto al continente sudamericano, verificando en tierra la significación de la información satelital. Como prueba del valor de esa idea

puede verse el “agujero” de 2004 cuando se hallaba cerca de América del Sur (Fig. 45) y extendiéndose por el área de la red de detectores que se proponía en 1994.

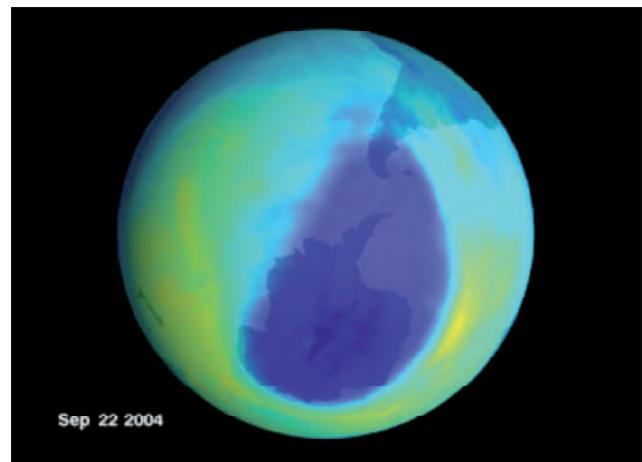


Figura 45: El “agujero” del ozono austral que lleva zonas de baja concentración de ozono a la latitud de Bahía Blanca (38° 47’ S y 62° 16’ W) y Bariloche (41° 71’ S y 71° 10’ W).

En la actualidad, es alta la concentración estratosférica de fracciones moleculares que aumentan la destrucción del ozono (Fig. 43). Valores similares se registran con fragmentos moleculares de otros CFC y halometanos (Fig. 46).

Predicción de los niveles de ozono

Cuanto mejor se separen las causas naturales y humanas de la destrucción del ozono mejores serán los modelos para predecir los niveles de ozono. Las predicciones de los primeros modelos ya han sido usadas por los políticos para determinar qué se puede hacer para reducir la destrucción del ozono causada por los humanos. Por ejemplo, ante la firme posibilidad de que los CFC causen graves daños a la capa de ozono, representantes diplomáticos de casi todo el mundo firmaron un tratado llamado Protocolo de Montreal. Este tratado establece límites estrictos en la producción y uso de los CFC. En 1990 la creciente evidencia científica contra los CFC hizo que los diplomáticos fortalecieran los requerimientos del Protocolo de Montreal. La revisión del tratado demandaba una completa eliminación de los CFC en el año 2000, que se ha cumplido sólo en parte.

En el área científica se ha avanzado mucho en el conocimiento de las interacciones que afectan al ozono. Esto ha permitido crear y ajustar modelos que tratan simultáneamente todos los factores que afectan la creación y destrucción del ozono. Además hay que supervisar continuamente estos factores desde el espacio sobre todo el planeta. El Sistema de la NASA para la Observación de la Tierra (EOS)

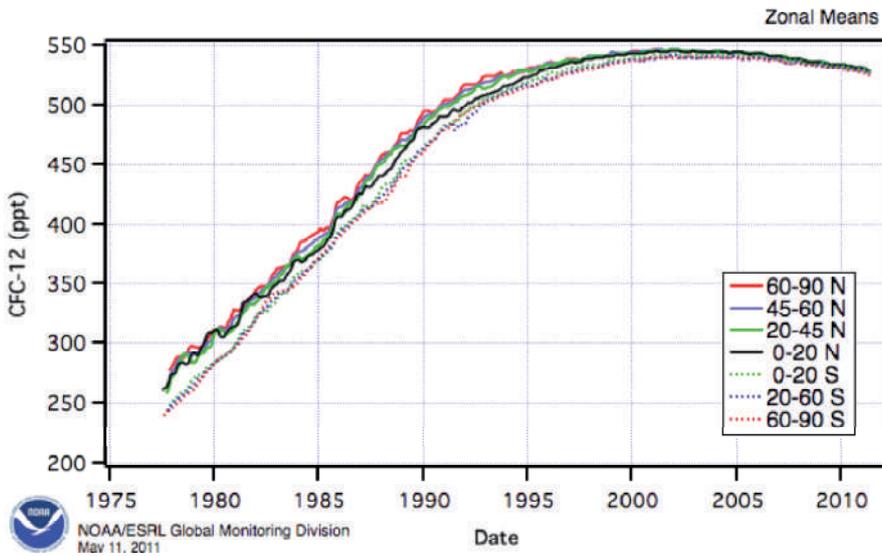


Figura 46: La concentración atmosférica de CFC-12 entre 1978 y el presente muestra un crecimiento alarmante hasta el año 2000, luego una aparente estabilidad hasta 2005 y desde allí al presente un muy leve descenso (Gráfico de la NOAA).

realiza esa tarea. La serie de satélites EOS lleva un grupo de instrumentos sofisticados que miden las interacciones de la atmósfera que afectan al ozono. Con datos recogidos por la NASA durante más de 20 años, las nuevas mediciones aumentan nuestros conocimientos de la química y dinámica de la alta atmósfera y de las actividades humanas que afectan la capa de ozono que protege a la Tierra.

Significado para la vida humana

Se estima que por cada 1% de declinación en el ozono se produce un aumento del 2% en la radiación UV que llega a la superficie terrestre. Para ilustrar su efecto sobre los seres humanos se ha estimado que cada 1% de caída del ozono se refleja en un aumento del 4-6% en los casos de los dos tipos más comunes de cáncer de piel. De acuerdo a los cálculos de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos, basados en las mediciones más recientes del ozono, en los próximos 50 años alrededor de 12 millones de norteamericanos desarrollarán cáncer de piel y más de 200.000 morirán a causa de esa enfermedad (además de los 8.000 que mueren actualmente de cáncer de piel). El riesgo es mayor para la gente de piel clara, que vive cerca del ecuador y a mayores alturas. Asimismo, los argentinos, australianos, chilenos y neozelandeses que viven en áreas a las que llega el agujero de ozono de primavera son particularmente susceptibles.

Efectos sobre la vida marina

También hay efectos sobre otras especies. Los ecosistemas acuáticos pueden ser los más amenazados. El fitoplancton, los

organismos microscópicos unicelulares que viven y hacen fotosíntesis mientras navegan en la superficie del océano son la base de toda la cadena alimenticia de la vida marina. Los estudios muestran que un 25% de reducción del ozono deprimirá la productividad del fitoplancton en un 35%. Una gran destrucción de fitoplancton podría amenazar a toda la cadena de alimentos y a la resultante descomposición que podría aumentar los niveles de dióxido de carbono incrementando así el calentamiento de la atmósfera. La complejidad de las interrelaciones del sistema tierra son evidentes. Un error de movimiento de los seres humanos puede poner en marcha una catástrofe de eventos en cadena que vaya mucho más allá de nuestro control.

Un problema complejo

Uno de los aspectos más alarmantes de este problema es que la destrucción del ozono observada hasta ahora es sólo la respuesta a gases que fueron liberados a principios y hasta mediados de los años ochenta. El cloro y el bromo que se emiten actualmente y que están ascendiendo hacia las capas inferiores de la atmósfera van a tardar entre seis y ocho años en llegar a la estratosfera para hacer su daño. Se estima que hay 2 millones de toneladas de CFC y halometanos almacenados en forma de espumas aislantes y equipos contra incendio en las construcciones existentes. Las concentraciones del cloro en la alta atmósfera han crecido de 0.6 a 2.7 partes por billón en los últimos 25 años. Aun con las predicciones más optimistas en términos de regulación hay que esperar que esto se triplique en el año 2075. Se ha estimado que la concentración de bromo crecerá considerablemente más rápido, con un incremento de 10 veces con respecto a su nivel actual y a despecho del congelamiento previsto.



El protocolo de Montreal

Varios años de negociación produjeron un tratado internacional entre los países que representan alrededor de dos tercios del consumo mundial de CFC. El tratado pide una reducción del 50% en la producción de CFC, lo que constituye un logro internacional sin precedentes. Pero desgraciadamente el Protocolo de Montreal no va a detener la destrucción del ozono, sólo la va a disminuir. De acuerdo a los análisis de la EPA aun con un 100% de participación global en el Protocolo, las concentraciones de cloro en la atmósfera se triplicarán para el año 2075. Las proyecciones de la EPA para el año 2075 indican que el 45% del crecimiento de cloro en la estratósfera provendrá de compuestos que contienen cloro y que no están incluidos en el tratado y el 15% remanente provendrá de las emisiones de naciones que no han firmado el Protocolo. A la luz de estos hechos es claro que queda mucho por hacer para reforzar el tratado y otras medidas regulatorias.

Perspectivas de la investigación

Objetivos científicos

Observar, documentar, modelar y estimar los efectos de los cambios de concentración del ozono en la estratósfera y en la alta troposfera y los cambios en el flujo de la radiación UV en la superficie de la Tierra.

Fundamentos

Las observaciones terrestres y satelitales han confirmado que las pérdidas de ozono ocurren estacionalmente, especialmente en el remolino polar primaveral ("polar vortex") de la atmósfera antártica, que produce el conocido "agujero" del ozono. También existe una destrucción más moderada del ozono en las latitudes medias, donde reside una gran parte de la población humana de la Tierra. Mientras no haya cambios en la nubosidad o la contaminación, la disminución del ozono de la atmósfera aumentará los niveles de la radiación UV en la Tierra.

Algunos resultados recientes

En la Antártida el Satélite de Investigación de la Alta Atmósfera (UARS) produjo un conjunto de datos que caracterizan los procesos de las nubes polares estratosféricas. Estos procesos aumentan la concentración de las formas de cloro atmosférico que destruyen más ozono. Como el Ártico es

menos frío, la formación de nubes polares estratosféricas es más efímera y localizada y las pérdidas de ozono son menos intensas. Sin embargo, el futuro enfriamiento de la estratósfera debido a la creciente concentración de gases de invernadero podría producir un aumento en la formación de nubes estratosféricas polares y con ello una mayor destrucción de ozono en el Ártico.

Las mediciones globales de la atmósfera continúan mostrando una caída en la tasa de crecimiento de la concentración de CFC-11, CFC-12 y varios halometanos que destruyen el ozono. Las tasas de aumento del cloro y bromo orgánicos en la troposfera también han caído. Se espera que la carga total de cloro y bromo estratosféricos hayan llegado al máximo al final del Siglo XX y que ya haya comenzado una lenta recuperación de la capa de ozono que se extenderá a lo largo de varias décadas del Siglo XXI.

Como se dijo más arriba, en los seres humanos y en los animales los efectos de la exposición a la radiación UV son la depresión o supresión del sistema inmunitario, la pérdida de la visión por cataratas, el aumento de las quemaduras solares graves y varias lesiones epidérmicas, reducción de la síntesis de vitamina D y cáncer. El aumento de la radiación UV puede causar el desarrollo de cáncer de dos maneras: (a) la radiación UV puede mutar los genes supresores del cáncer en la piel y (b) puede hacer que las células ya dañadas de la piel produzcan más células mutantes. Así, la exposición a la radiación UV solar puede actuar tanto como iniciador cuanto como magnificador del cáncer. Estos descubrimientos subrayan el valor de la capa de ozono estratosférico para la preservación de la salud.

El estudio de la producción del fitoplancton marino de la Antártida y numerosos estudios de campo y laboratorio indican que el aumento de la radiación UV solar en la superficie puede tener importantes efectos sobre muchos ecosistemas marinos. El aumento de la exposición a la radiación UV en las plantas puede inhibir la fotosíntesis e influir en la productividad agrícola. Asimismo, produce deterioro en plásticos y otros materiales sintéticos.

La primavera septentrional de 2011 ha tenido los valores más bajos de ozono estratosférico registrados hasta el presente, posiblemente derivados de un invierno inusualmente frío (Fig. 47).

Investigaciones relevantes

La supervisión de la recuperación de la capa de ozono en el Siglo XXI permitirá establecer sobre bases firmes el proceso de recuperación de la capa de ozono. Esta supervisión se suma a la supervisión de las concentraciones de CFC, halometanos y otros gases que destruyen el ozono en la estratósfera. También se deben llevar a cabo estudios sostenidos de los procesos de destrucción extrema del ozo-



Deviations (%) / Ecartes (%), 2011/03/10

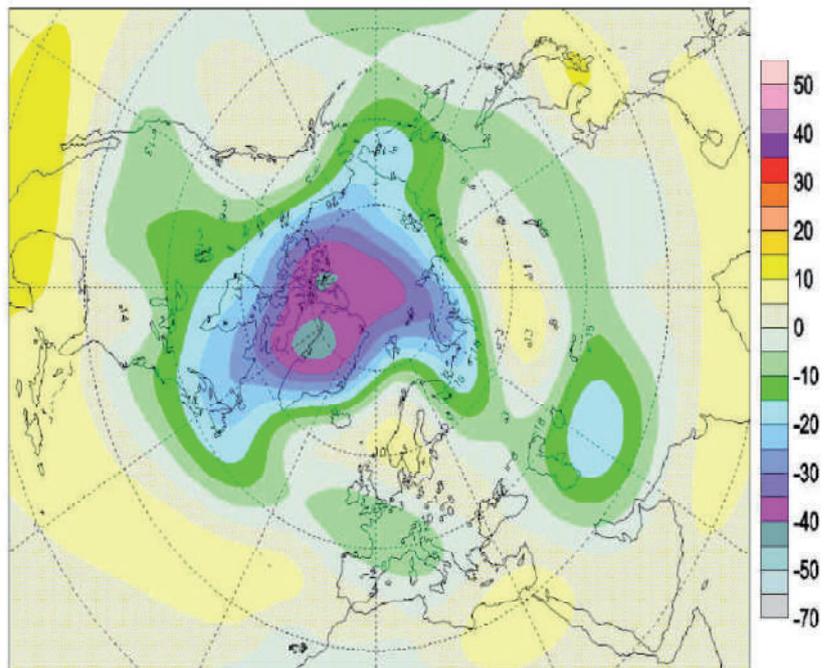


Figura 47: Desvíos negativos en la concentración de ozono estratosférico en el Hemisferio Norte en Marzo de 2011.

no. Estos datos científicos permitirán establecer con exactitud el rol de los gases utilizados para sustituir a los CFC. Deberá cuantificarse el papel del bromuro de metilo en la destrucción del ozono y búsqueda de posibles sustitutos. Se debe aumentar el conocimiento de los procesos que afectan a la química asociada con las emisiones de óxidos nitrosos por los aviones.

Asimismo será necesario establecer las tendencias de la radiación UV en todas las longitudes de onda que llegan a la superficie e investigar la conexión entre el ozono estratosférico y el clima en superficie.

Un hallazgo inesperado

En 2005, dos grupos de investigadores del NASA Astrobiology Institute realizaban sus respectivos trabajos de campo en América del Sur. Lynn Rothschild y Dana Rogoff tomaban muestras de los lagos del Altiplano Boliviano por encima de los 4000 metros sobre el nivel del mar para su estudio microbiológico de ambientes extremos; Héctor D'Antoni verificaba en superficie los datos satelitales de la Patagonia austral y Tierra del Fuego para su proyecto de Retrodicción de Ecosistemas. Los protocolos de campo de ambos grupos incluían el registro de la radiación solar. Sorprendentemente, ambos grupos registraron señales entre 250 y 280 nm, (parte de la banda de radiación ultravioleta llamada UV-C). La UV-C solar no debería alcanzar la su-

perficie terrestre por lo que los instrumentos se mandaron a recalibrar en fábrica. Ambos instrumentos funcionaban bien de acuerdo a los respectivos fabricantes. Sin embargo, el calibrado volvió a controlarse con una fuente de alta precisión calibrada por el National Institute of Standards and Technology (NIST) que emite en el UV-C y ambos registraron la señal. Rothschild usaba un radiómetro con una sonda centrada en 265 ± 5 nm y D'Antoni usaba un espectro-radiómetro de alta resolución para el rango 250-850 nm. Las mediciones se repitieron en 2006 y 2007 y finalmente se publicó un artículo sobre los hallazgos de Tierra del Fuego (D'Antoni *et al.* 2007). Rothschild y D'Antoni pensaban que si su hallazgo era genuino, alguien podría haberlo hecho antes. Después de una prolongada y ardua búsqueda bibliográfica encontraron una única referencia: Córdoba *et al.*, 1997.

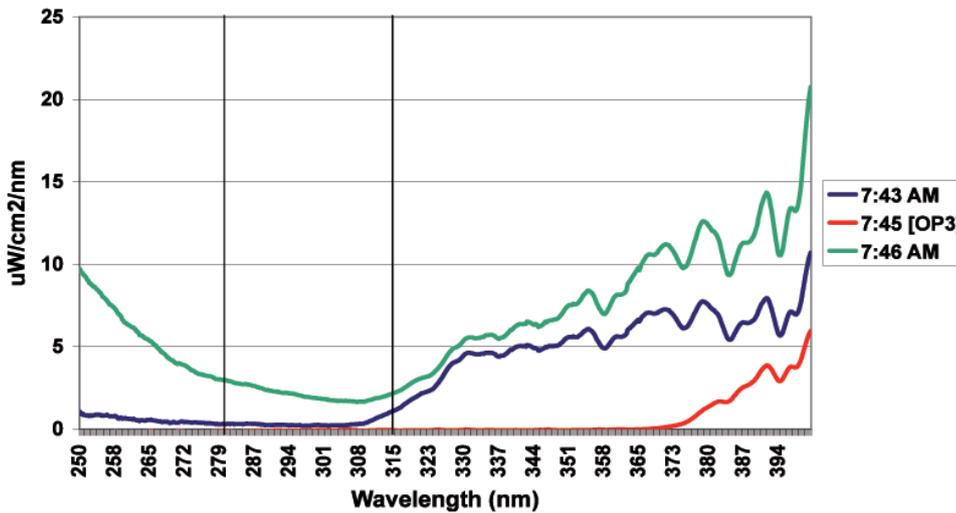
D'Antoni se puso en contacto con el investigador que impulsó ese estudio, Íñigo Aguirre de Cárcer, con quien mantuvo una nutrida correspondencia. En mayo de 2008 D'Antoni (respaldado por el NASA Astrobiology Institute) viajó a Madrid para acordar los detalles de una investigación conjunta. Las mediciones de prueba con fotoluminiscencia y termo luminiscencia dieron resultados alentadores y sugirieron la necesidad de un esfuerzo mayor. En Junio de 2008 D'Antoni regresó a Madrid respaldado por la NASA y junto con Aguirre de Cárcer realizaron mediciones simultáneas con el espectro-radiómetro y el dosímetro. El dosímetro fue leído por termo luminiscencia y sus medidas



coincidieron con las del espectro-radiómetro. El resultado de esta colaboración se plasmó en un artículo (Aguirre de Cárcer *et al.* 2008). Aguirre de Cárcer y D'Antoni continúan investigando este problema y hacen validación cruzada de sus datos. Así, una variable en gran medida ignorada

(la UV-C en el rango de 250 a 280 nm) se incorpora a la problemática del flujo de radiación solar UV que llega a la Tierra y abre un conjunto de nuevos interrogantes que es necesario responder (Fig. 48).

**Hotel Ushuaia, Nov 17,2007
USB4000**



λ	$\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$
250	15.85
300	63
350	100
400	100

Emisión de UV solar medida en el espacio

Figura 48: Registro de UV-C en la mañana del 17 de noviembre de 2007 en el Hotel Ushuaia (Tierra del Fuego). La línea roja (un filtro de metacrilato) elimina toda señal por debajo de 365 nm. Todos los registros en un lapso de tres minutos. El valor registrado a las 7:46 AM es muy cercano a la cantidad que emite el Sol en esas longitudes de onda. Media hora después, la señal de UV-C había desaparecido.