

del ozono y complementará también la componente ozonómica de la VAM.

Conclusión

La sensibilidad demostrada del forzamiento radiativo del ozono a la respuesta térmica de la baja estratosfera es actualmente un tema importante de preocupación científica. Los experimentos con MCG pronto comenzarán a estudiar cómo las temperaturas estratosféricas y el calentamiento dinámico influyen en el forzamiento climático debido a cambios en la distribución vertical, estacional y por latitud, del ozono. Si queremos comprender tales cambios químicamente inducidos deberemos desarrollar modelos más complejos para evaluar el cambio climático y las distribuciones regionales del O_3 . En consecuencia, son urgentemente necesarios modelos en los que se acoplen procesos físicos, químicos y dinámicos. La comunidad científica está actualmente respondiendo a ese reto.

El seguimiento del ozono troposférico se encuentra, hoy en día, en un estado crítico. El ozono ejerce una influencia clara en la temperatura de superficie; pero si futuros incrementos de gases precursores y de radiación UV-B son virtualmente inevitables, entonces debemos obtener datos mundiales de mejor calidad para documentar los cambios de la composición química de la atmósfera y para mejorar el análisis de las tendencias. Para alcanzar ese objetivo debe ponerse en marcha un conjunto integrado de observaciones de superficie y desde satélites. El actual inventario de herramientas de observación es insuficiente para evaluar fiablemente, a nivel mundial, la incidencia del cambio en el ozono. Existe una fuerte probabilidad de que las mejoras en la adquisición de datos y el nivel de complejidad de los modelos conduzca a un hito importante en la comprensión de las distribuciones del ozono en la troposfera y de su considerable influencia en el cambio climático.

Referencias y bibliografía

CARROLL, M. A. y A. M. THOMPSON, 1994: NO_x in the non-urban troposphere. In: *Current Problems and Progress in Atmospheric Chemistry*, J. BARKER (Ed.), World Pub. Company (to be published).

CHAMEIDES, W. L., P. S. KASIBATLA, J. YIENER y H. LEVY II, 1994: Growth of continental-scale metro-agroplexes, regional ozone pollution, and world food production, *Science*, **264**, 74-77 (1 April).

HIDALGO, H. y P. J. CRUTZEN, 1977: The tropospheric and stratospheric composition perturbed by NO_x emissions of high-altitude aircraft. *Jour. Geophys. Res.* **82**, 5 833-5 866.

HOUGHTON, J. T., B. A. CALLANDER y S. K. VARNEY (Eds.), 1992: *Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. WMO/UNEP, Intergovernmental Panel on Climate Change.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, 1993: *The Atmospheric Effects of Stratospheric Aircraft: A Third Program Report*. Reference Publication 1313, November 1993, Washington, DC, USA.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1991: *Rethinking the ozone problem in urban and regional air pollution*. National Academy Press, Washington DC, USA.

THOMPSON, A. M., 1992: The oxidizing capacity of the earth's atmosphere: Probable past and future changes. *Science*, **256**, 1 157-1 165.

WANG, W. C., Y.-C. ZHUANG y R. D. BOJKOV, 1993: Climate implications of observed changes in ozone vertical distributions at middle and high latitudes of the northern hemisphere. *Geophysical Research Letters*, **20** (15), 1 567-1 570 (6 August).

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 1990: *International Ozone Assessment: 1989*, WMO Global Ozone Research and Monitoring Network Project, Report No. 20, WMO, Geneva.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 1991: *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1991*. WMO Global Ozone Research and Monitoring Project, Report No. 25, WMO, Geneva.

LA EVALUACION INTERNACIONAL DEL OZONO 1994

Por Rumen D. Bojkov*

Desde principios de los años setenta, cuando nació la preocupación inicial por la posible disminución del ozono originada por los gases de escape de las aeronaves supersónicas a niveles altos,

ha surgido un interés creciente por la evaluación del estado de la capa de ozono. El conocimiento de la degradación del ozono como consecuencia de las actividades humanas es el resultado de la

* Asesor especial del Secretario General de la OMM en Asuntos del Ozono y del Medio Ambiente Mundial

investigación y la vigilancia cuidadosamente coordinadas llevadas a cabo por varios miembros de la OMM. La Comisión Internacional del Ozono, al prepararse para el Año Geofísico Internacional (1957/1958), normalizó las observaciones sistemáticas del ozono tomadas durante más de 37 años, habiendo coordinado satisfactoriamente su continuidad, publicación e investigación asociada por medio del Sistema Mundial de Observación del Ozono (SMOO₃), de la OMM. La primera Declaración de la OMM sobre Modificación de la Capa de Ozono debida a Actividades Humanas se redactó en 1975, fue aprobada por el Comité Ejecutivo y actualizada en 1978. El resumen científico advertía que la amenaza se debía más a productos fabricados por el hombre (como los CFC) que a unos cuantos aviones supersónicos que ocasionalmente vuelan en la estratosfera. Desde entonces, bajo la dirección de la OMM, con la participación de cientos de científicos de diversos países Miembros y en colaboración activa con organismos nacionales interesados (por ejemplo, NASA, NOAA), se han preparado amplias evaluaciones científicas internacionales, comenzando en 1981 (Informe del Ozono Nº 11 de la OMM) y continuando en 1985, 1988, 1989 y 1991 (números 16, 18, 20 y 25, respectivamente). El último, en 1994 (Nº 37) fue preparado en colaboración con el PNUMA. Estas evaluaciones proporcionaron la base científica del Convenio de Viena para la Protección de la Capa de Ozono, su Protocolo de Montreal y sus enmiendas. También sirven como un almanaque científico de los avances del conocimiento del ozono atmosférico.

La Evaluación Científica de la Destrucción del Ozono 1994 contiene la última información y el conocimiento actual y formará parte de la base científica de futuras decisiones de los Firmantes del Protocolo de Montreal respecto a la protección de la capa de ozono. Es el resultado de las contribuciones de cerca de 300 científicos de 35 países. La Evaluación consta de cinco partes que comprenden los cambios observados en el ozono y en los gases fuente; los procesos atmosféricos responsables de los cambios observados en el ozono troposférico y estratosférico de las regiones polares, tropicales y de latitud media; modelos de simulación; forzamiento radiativo y UV en superficie como consecuencia de los cambios del ozono; e información científica para las futuras decisiones sobre el bromuro de metilo, las emisiones de aeronaves, los sustitutivos de los halocarbonos de larga vida y el contenido de cloro y bromo.

Las observaciones atmosféricas, las investigaciones de laboratorio y los estudios teóricos y por medio de modelos de los últimos años han posibilitado un conocimiento más profundo de los cambios químicos de la atmósfera, tanto natura-

les como antropogénicos, y su relación con la disminución del ozono de la tierra y los posibles efectos en el equilibrio radiativo del sistema climático. En este artículo se resaltan algunos de los principales descubrimientos relativos al cambio del ozono, ilustrados con información adicional de última hora, incluyendo la de la primavera austral de 1994 (para más detalle ver el Informe del Ozono número 37 (unas 400 páginas)).

Algunas de las aportaciones más importantes de la Evaluación del Ozono 1994 se resumen en el recuadro 1. La disminución continua del ozono total, que se inició en los años setenta es estadísticamente importante durante todo el año excepto sobre el cinturón tropical entre 20°N y 20°S. Los datos del SMOO₃, de calidad controlada, incluyendo datos de satélites, muestran que la disminución acumulada de ozono en latitudes polares y medias es casi del 9 por ciento (ver figura 1). Teniendo en cuenta la conocida variabilidad natural (por ejemplo, ciclos anuales y solares, la oscilación cuasibienal) la disminución en ambos hemisferios es especialmente fuerte durante el invierno y primavera (>6 a 7 por ciento por decenio) y es sólo la mitad durante las estaciones de verano y otoño. Estudios detallados ponen de manifiesto un aumento estadísticamente significativo en la proporción de las tendencias del ozono en aproximadamente entre 1,5 y 2,0 por ciento durante el período 1981-1991 comparado con 1970-1980. La tabla I presenta las expresiones numéricas de las tendencias del ozono en latitudes medias de la totalidad de los hemisferios norte y sur (se omiten signos menores). Se toma como error estimado $\pm 2\sigma$ pero se ve que las proporciones de disminución son significativas hasta más de 3 σ y esto es, por consiguiente, una confirmación adicional del carácter mundial de la disminución del ozono.

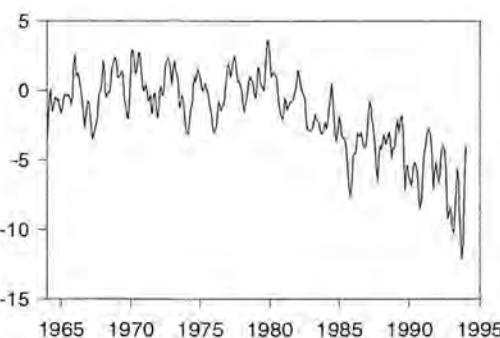


Figura 1 - Las desviaciones del nivel de ozono respecto a la media del período 1964-1980 en latitudes medias y polares (35°-90°S) muestran una disminución espectacular (cerca del 10 por ciento) durante los últimos veinte años (fuente: Bojkov y Fioletov, Journal of Geophysical Research)

TABLA I
Disminución del ozono (en tantos por ciento por década $\pm 2\sigma$) usando datos del SMOO₃, de enero de 1964 a marzo de 1994, con un ajuste lineal de la tendencia para el período 1980-1994
(fuente: Bojkov y Fioletov, Journal of Geophysical Research, 1995)

Región	Dic., Ene. Feb., Mar.	May., Jun. Jul., Ago.	Sep., Oct., Nov.	Año
35°-65°N	5,8 ± 1,7	2,6 ± 1,5	2,5 ± 1,0	3,8 ± 1,2
Hemisferio norte	4,0 ± 1,1	1,9 ± 1,1	1,6 ± 0,9	2,6 ± 0,9
Hemisferio sur	2,7 ± 1,0	3,4 ± 0,8	6,6 ± 1,5	3,9 ± 0,8
35°-65°S	3,6 ± 1,2	4,9 ± 1,3	7,3 ± 2,0	5,0 ± 1,0

Las mayores pérdidas de ozono tienen lugar en la estratosfera baja, donde, en latitudes medias, la disminución parcial de ozono ha excedido el 20 por ciento durante los últimos dos decenios. Esto se representa en la figura 2, donde aparece el promedio anual de la presión parcial del ozono en las capas de 17 a 19 km y de 20 a 22 km obtenida de los sondeos de ozono regulares del observatorio Hohenpeissenberg, de Alemania.

Los cambios de ozono en el plano vertical de los 20 años de sondeos de ozono del observatorio Tsukuba (Tateno, Japón) se presentan en la figura 3. Los valores estimados son negativos en la baja estratosfera y positivos en la troposfera. Ya que ésta contiene solamente el 10 por ciento del ozono total, su aumento no puede compensar la pérdida estratosférica. Sin embargo, el aumento de ozono troposférico, que está definido en el hemisferio norte, podría tener un importante efecto de aumento radiativo respecto al cambio climático (véase el recuadro 3).

Existen pruebas claras de que los niveles de ozono de la capa límite de las regiones pobladas del hemisferio norte han aumentado en más del 50 por ciento durante los últimos 30 años, debido a la producción fotoquímica de los precursores antropogénicos. Hay documentación del importante flujo de ozono desde América del Norte hacia la región del Atlántico norte, durante el verano. También se ha demostrado que la combustión de la biomasa es una fuente importante de ozono (y de monóxido de carbono) en los trópicos durante la estación seca. Un aumento de la radiación UV-B (por ejemplo, debido a la pérdida del ozono estratosférico) debe causar una disminución del

ozono troposférico en la atmósfera de fondo, pero en algunos casos aumentará la producción de ozono en las regiones más contaminadas. Muchos de los procesos que afectan al equilibrio del ozono troposférico no están debidamente representados o comprobados en los modelos y, por

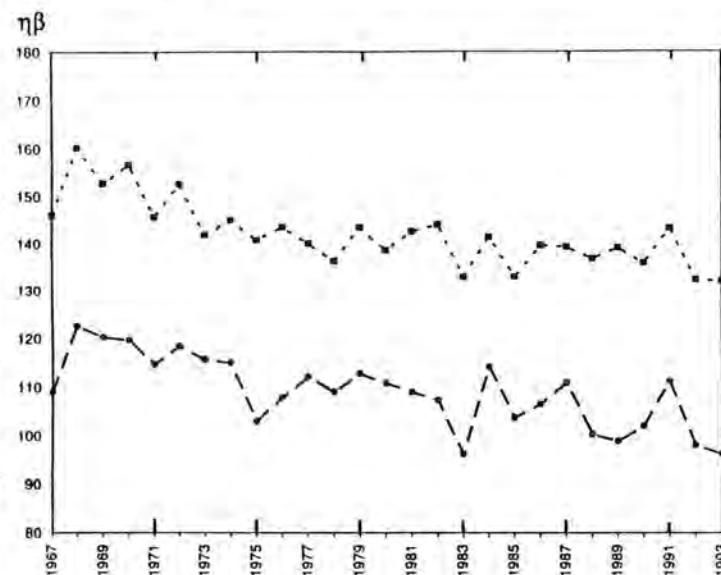


Figura 2 — Los valores anuales de la presión parcial del ozono de las capas a 17-19 km (línea superior) y 20-22 km (línea inferior) de los sondeos de ozono de Hohenpeissenberg (Alemania) muestran una disminución continua del ozono en la estratosfera baja (fuente: Bojkov, OTAN, 1994).

consiguiente, la exactitud de estas proyecciones es limitada.

Se han detectado pérdidas de ozono en la estratosfera del invierno ártico y se ha encontrado su relación con la química de los halógenos. Sin embargo, debido al frecuente intercambio meridional de masas de aire y a las temperaturas relativamente altas de la baja estratosfera, no se dan las condiciones para un agujero de ozono en el Ártico. Los estudios de la baja estratosfera del Ártico se han ampliado para incluir observaciones más extensas del ozono y de compuestos reactivos clave. En el período

Algunas de las más importantes aportaciones científicas de la Evaluación del Ozono 1994

- Continúan observándose tendencias decrecientes de la columna total de ozono en la mayor parte de la Tierra. La disminución es de unos 4 a 5 por ciento por década (desde 1979) en las latitudes medias de los hemisferios norte y sur. Las pérdidas son mayores durante la primavera e invierno que durante el verano y otoño y fueron mayores durante los últimos diez años que durante la década anterior. En el cinturón entre 20°N y 20°S no se ha observado tendencias decrecientes o han sido pequeñas.
- En 1992 y 1993 se midieron los niveles más bajos mundiales de ozono, cuando los descensos en las latitudes medias del hemisferio norte fueron mayores que las del sur. Sin embargo, el agujero del ozono de la primavera antártica fue el mayor (con una superficie superior a los 23 millones de km²) y el más profundo (mínimos inferiores a 100 m atm cm (déficit del 70 por ciento)); estos valores sólo se superaron algunos días durante la temporada de 1994.
- La mayor contribución a la disminución del ozono proviene de su destrucción en la estratosfera baja a una razón de un 7 a 8 por ciento por década en latitudes medias. En la Antártida, durante el período desde finales de septiembre y octubre de 1992, 1993 y 1994 el ozono se aniquiló, en general, completamente entre los 14 y 19 km. Los modelos sugieren que la pérdida de ozono estratosférico es la principal causa de la disminución de temperatura de aproximadamente 0,3° a 0,4°C por década que ha tenido lugar allí durante las últimas dos o tres décadas.
- El ozono troposférico, que se origina principalmente por medio de reacciones químicas en la que intervienen los contaminantes, ha aumentado en muchos lugares del hemisferio norte durante los últimos 30 años. Las simulaciones con modelos y algunas observaciones sugieren que el ozono troposférico ha aumentado en más del doble en el hemisferio norte desde los tiempos preindustriales. Estos cambios incrementarían el forzamiento radiativo respecto al debido a otros gases invernadero durante el mismo período en aproximadamente un 20 por ciento.
- Se ha confirmado la conclusión de que la causa de la destrucción del ozono polar son los compuestos de cloro y bromo asociada a la química superficial de las partículas naturales de la estratosfera polar. Las reacciones con los aerosoles sulfatados procedentes del Pinatubo originaron aceleraciones temporales de la pérdida fotoquímica del ozono de aproximadamente entre 1 y 2 por ciento por debajo de los niveles que se esperaban para el año siguiente a la erupción.
- Se ha reducido la proporción del aumento atmosférico de varias de las más importantes substancias destructoras de ozono, como los CFC, los halones, etc., lo que demuestra la influencia prevista del Protocolo de Montreal y sus Enmiendas y Modificaciones. Sin embargo, se espera que el máximo de contenido estratosférico de cloro se alcance a finales de este siglo; por tanto, pérdidas importantes de ozono pueden tener lugar durante los próximos diez años.
- El bromuro de metilo, que no sólo procede de fuentes naturales oceánicas sino también de la fumigación del campo, de la incineración de la biomasa y de los gases de escape de los automóviles que utilizan gasolina con plomo, se continúa considerando como una sustancia importante en la destrucción del ozono.
- Se ha evidenciado más la relación entre la disminución de ozono estratosférico y el aumento superficial de la radiación ultravioleta (UV). Sin embargo, la falta de datos exactos decenales (o de mayor duración) de radiación UV superficial y de su variación producida por las nubes y otros factores, han impedido la determinación inequívoca de una tendencia a largo plazo de la radiación UV en superficie.

de finales de invierno y de principio de la primavera se han detectado, mediante estas observaciones, pérdidas químicas adicionales de ozono de hasta del 15 al 20 por ciento a algunas altitudes, en particular durante los inviernos de 1991/1992 y 1992/1993. Los cálculos de los modelos, limitados por las observaciones, también son consecuentes con estas pérdidas, lo que aumenta la confianza en el papel del cloro y del bromo en la destrucción del ozono. La varia-

bilidad interanual en las condiciones fotoquímicas y dinámicas del vórtice polar ártico continúa limitando la capacidad para predecir los cambios de ozono en los años futuros.

La disminución de ozono más espectacular se produce en la Antártida durante la primavera austral, cuando desde los 70°S hasta el polo la deficiencia de ozono supera el 45 por ciento comparada con los promedios anteriores al agujero de ozono de 1957-1978 (véase el Bolet-

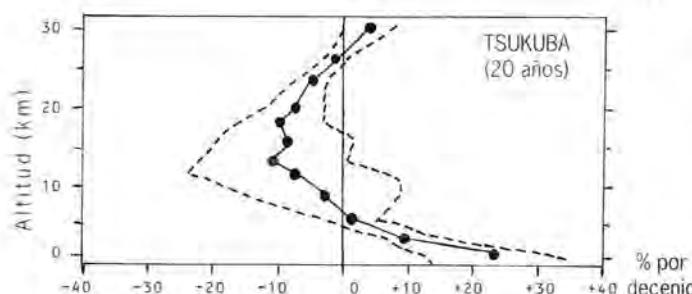


Figura 3 – Cambios en el ozono (en tantos por ciento por decenio) a diferentes altitudes deducidos de los sondeos de ozono del observatorio de Tsukuba (Tateno, Japón) mostrando su disminución en la baja estratosfera y su aumento en la troposfera. Las líneas de trazo indican los límites de fiabilidad del 95 por ciento (fuente: Servicio Meteorológico de Japón)

tín de la OMM 43 (2)). Profundos estudios confirman que no existe ninguna prueba de una disminución importante del ozono de la Antártida en la primavera austral antes de 1980. Durante septiembre de 1994 la superficie afectada por el agujero del ozono alcanzó los 24 millones de km^2 , superando ligeramente las estaciones que previamente habían batido marcas en 1992 y 1993. A finales de septiembre se han registrado ya durante un par de días valores mínimos absolutos de menos de 100 m atm cm (aproximadamente una deficiencia del 70 por ciento). Valores semejantes solamente se habían detectado previamente durante unos pocos días en la temporada de 1993. El promedio de ozono de septiembre de 1994 de varias estaciones terrestres de la OMM ha sido el más bajo desde que se iniciaron las observaciones (por ejemplo, Faraday 202, Syowa 174). Esto también puede verse en la tabla II, donde figuran los valores medios provisionales de los cinturones latitudinales de septiembre de 1993 (previo récord mínimo) y 1994 expresados como tantos por cientos (todos negativos) de los "valores normales" de 1964-1980.

En las últimas cuatro estaciones, el agujero del ozono se ha extendido a zonas habitadas del cono sur de América del Sur. Esto ocurrió durante dos o tres días en 1991 y 1992, durante cuatro días en 1993 y durante una semana (14 al 20 de octubre) en 1994, cuando la estación argentina de la VAM en Ushuaia registró valores de ozono tan bajos como 151 m atm cm (una deficiencia de

casi 65 por ciento) el 17 de octubre. Un mapa de ese día (figura 4) de líneas de nivel de ozono obtenidas con datos del instrumento TOMS a bordo del METEOR-3 muestra el agujero alargado del ozono cubriendo un área de más de 20 millones de km^2 , rodeado de zonas de contenido de ozono casi normal o alto, dominando las latitudes medias de Australia, Nueva Zelanda y África. El vórtice polar estratosférico, anormalmente potente, de forma elíptica y el agujero de ozono asociado, a niveles inferiores, giró en el sentido de las agujas del reloj y afectó también a latitudes de unos 55°S en el sector del Atlántico sur (correspondiente a las latitudes de Copenhague y Glasgow) durante algunos de los días siguientes. Aunque no se produjo una disminución adicional del ozono durante octubre de 1994, los sondeos de ozono de Marambio, Neumayer y Syowa continuaron registrando que, entre los 15 a 17 km, y antes entre los 14 a 19 km, se había destruido prácticamente todo el ozono. Como en los dos años anteriores, esta situación continuó durante cuatro a seis semanas.

Debe resaltarse que en la temporada de 1994 no quedaban prácticamente aerosoles volcánicos de la erupción del Pinatubo de 1991 y los orígenes de la fuerte destrucción deben buscarse en el aumento del contenido de cloro en la estratosfera y en las temperaturas inferiores a las normales de la baja estratosfera, de menos de -80°C (extremadamente favorables para la destrucción del ozono), que persistieron desde agosto hasta mediados de octubre de 1994.

La figura 5 proporciona una visión general del cambio mundial del ozono durante los últimos 15 años (aparecerá en un próximo ejemplar del *Journal of Geophysical Research*). Se ve claramente la zona ecuatorial y tropical con un cambio insignificante de menos de 1 por ciento por década, así como la importante disminución de ozono del invierno y primavera, especialmente en la Antártida durante la primavera, donde a 80°S, en octubre, es de ~35 por ciento.

TABLA II
Desviaciones del ozono en % respecto a los valores "normales" de 1964-1980 en los cinturones latitudinales entre 90° y 60°S
(Todas son negativas; se omite el signo)

Septiembre	90	85	80	75	70	65	60°S
1993	46	44	42	40	35	26	16
1994	49	47	44	39	33	23	14

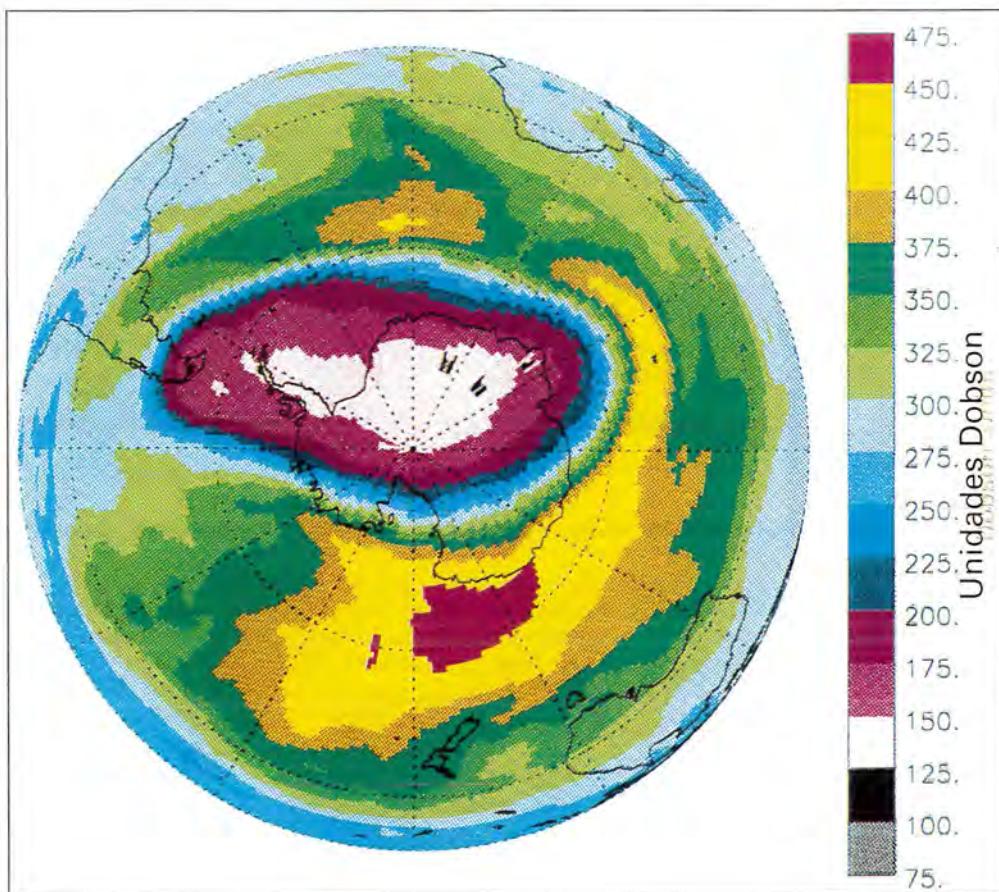


Figura 4 – El mapa de isolíneas de ozono basadas en TOMS de datos del METEOR 3 muestra el agujero de ozono alargado del 17 de octubre de 1994 que alcanza el cono meridional de América del Sur (NASA-Goddard TOMS Processing Team).

La Evaluación del Ozono 1994 confirmó que todas las pruebas indican que los causantes de la destrucción del ozono son los compuestos de cloro y bromo. Los últimos resultados de los estudios basados en las observaciones y en los modelos reafirman el papel de los halocarbonos antropogénicos en la debilitación del ozono en la Antártida. Las observaciones desde satélites demuestran que existe una fuerte correlación espacial y cronológica entre la abundancia de ClO y la disminución del ozono en el vórtice de la Antártida. En el invierno ártico se ha observado una pérdida de ozono mucho menor. Ambas pérdidas son consecuentes con los cálculos del modelo fotoquímico limitados por las observaciones directas o procedentes de instrumentos a bordo de satélites. El recuadro 2 da un resumen de los complejos procesos que se supone han originado la destrucción del ozono observada.

Las observaciones han demostrado que la heterogénea química de los halógenos desempeña un papel más importante en la destrucción química

del ozono en la baja estratosfera a latitudes medias que el que podría esperarse de los procesos químicos en la fase gaseosa. Las medidas locales directas de compuestos radicales en la estratosfera baja junto con cálculos del modelo, han demostrado cuantitativamente que la pérdida fotoquímica local de ozono debida a compuestos de nitrógeno reactivo (NO_x) (principalmente naturales) es menor que lo previsto según la química de la fase gaseosa, mientras que la debida a los compuestos de HO_x (principalmente naturales) y a los compuestos de cloro y bromo (principalmente antropogénicos) es mayor que lo previsto según el mismo proceso. Esto confirma el papel primordial de las reacciones químicas en los aerosoles de sulfato en el control del balance químico de la baja estratosfera.

Las observaciones indican que la erupción del Pinatubo no aumentó apreciablemente el contenido de HCl de la estratosfera sino que los gases de azufre inyectados durante la erupción provocaron un aumento de las áreas superficiales de los aerosoles con sulfato que han disminuido más tarde. Además, las observaciones y los estudios de labo-

ratorio han demostrado la importancia de la hidrolisis heterogénea del N_2O_5 sobre los aerosoles sulfatados en la atmósfera. Las pruebas sugieren que la hidrolisis del $ClONO_2$ con los aerosoles sulfatados también tiene lugar a temperaturas bajas. Ambos fenómenos alteran los procesos químicos en el sentido de aumentar la pérdida de ozono mediante la interacción con el contenido de cloro y bromo antropogénico de la estratosfera. Por ello se cree que el 1 al 2 por ciento de la deficiencia de ozono de 1992 y posiblemente en 1993 fue el resultado de la presencia de un exceso de aerosoles de sulfato. La solidez de las pruebas científicas sugiere que la disminución de ozono observada en

latitudes medias y altas se debe principalmente a los compuestos antropogénicos de cloro y bromo.

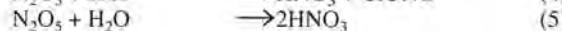
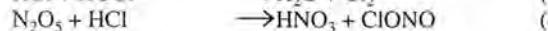
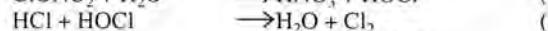
Una consecuencia importante de los cambios en el ozono se refiere al balance radiativo de la atmósfera. Simulaciones con modelos y deducciones de las observaciones del aumento del ozono troposférico en el hemisferio norte desde los tiempos preindustriales sugieren un forzamiento mundial positivo medio de aproximadamente $0,5 \text{ Wm}^{-2}$ que puede compararse con el forzamiento radiativo directo debido a los cambios en la mezcla de gases invernadero (CO_2 , CH_4 , N_2O y los CFC) de $2,4 \text{ Wm}^{-2}$ durante el mismo período de tiempo.

Recuadro 2

Procesos químicos conducentes a la destrucción del ozono polar

La destrucción del ozono en latitudes polares se atribuye a una secuencia de reacciones químicas en las que intervienen el cloro y el bromo.

Los principales portadores inorgánicos de larga vida (depósitos) de cloro en la atmósfera, que se originan a partir de los CFC, son el HCl y el $ClONO_2$. El N_2O_5 es un depósito de óxidos de nitrógeno. Las nubes estratosféricas polares, que se forman a temperaturas inferiores a -78°C acelerean las reacciones heterogéneas que tienen lugar en su superficie. Las reacciones más importantes son:



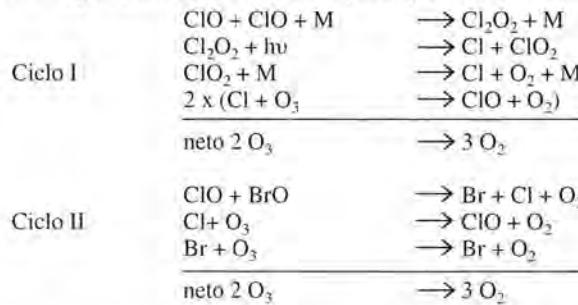
Los compuestos de cloro formados en estas reacciones se descomponen rápidamente por efecto de la luz, incluso en condiciones de poca luminosidad, liberando átomos de cloro (Cl) que producen la destrucción del ozono. El ácido nítrico (HNO_3) formado permanece en las partículas de manera que se reducen las concentraciones gaseosas de los óxidos de nitrógeno. Esta reducción, o "denoxificación", disminuye la velocidad de eliminación de ClO en la reacción:



manteniéndose así altos niveles de cloro activo.

También pueden producirse reacciones heterogéneas sobre, o en el interior de las partículas de aerosoles de sulfato (gotitas de ácido sulfúrico en solución) cuando existen en la baja estratosfera. Ayudan a las reacciones (2) y (5) y posiblemente a la (3), conducentes ambas a la liberación de cloro activo y a denoxificación. Por ello, a temperaturas inferiores a -78°C existe la posibilidad de una destrucción generalizada del ozono.

La producción de cloro activo requiere luz solar que puede desencadenar los Ciclos catalíticos I y II. Se cree que el Ciclo I es el responsable de la mayor parte (70 por ciento) de la destrucción del ozono de la Antártida (Cl_2O_2 es térmicamente inestable y el Ciclo I es más eficiente a bajas temperaturas). En el Ártico, menos frío, gran parte de la destrucción puede producirse mediante el Ciclo II.



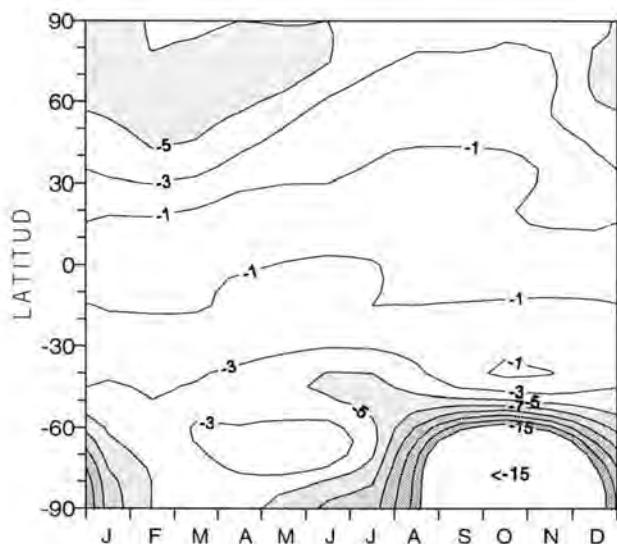


Figura 5 – Diferencias (en tantos por ciento) entre los valores del ozono total de dos períodos (1964-1980 y 1984-1993). Al sur de 60°S, desde septiembre hasta noviembre la diferencia es superior al 15 por ciento con un máximo de 35 por ciento hacia el polo de 80°C en octubre (fuente: Bajkoy y Fioletov, *Journal of Geophysical Research* (en prensa))

Estudios unidimensionales confirman las conclusiones de la anterior Evaluación del Ozono (1991) que, entre 1980 y 1990, la disminución observada en el ozono estratosférico originó un forzamiento radiativo mundial de valor medio negativo de unos $-0,1 \text{ Wm}^{-2}$ (es decir, actúa enfriando las capas inferiores de la atmósfera), que puede compararse con el forzamiento radiativo directo y positivo de $0,45 \text{ Wm}^{-2}$ debido a los cambios de los gases "bien mezclados" durante el mismo periodo (véase el recuadro 3).

Según estas estimaciones, el forzamiento radiativo neto medio mundial debido a los cambios del ozono es probable que haya sido positivo desde los tiempos preindustriales. Así, el aumento del ozono troposférico ha potenciado el forzamiento radiativo de todos los otros gases invernadero en aproximadamente un 20 por ciento durante el mismo periodo.

Los datos de radiosondas de los últimos tres decenios y las observaciones de satélites desde finales de los años setenta confirman la existencia de un enfriamiento medio mundial de la baja estratosfera de $0,3^{\circ}$ a $0,4^{\circ}\text{C}$ por década; existe alguna indicación de una aceleración de este enfriamiento pero la presencia de grandes perturbaciones de temperatura causadas por aerosoles volcánicos hace el análisis difícil. Los cálculos del modelo indican que es probable que la destrucción del ozono haya sido el factor dominante en la tendencia de la temperatura de la estratosfera baja desde 1980 y es mucho más importante que los gases de invernadero "bien mezclados". Una evaluación exacta

del efecto climático real de los cambios de ozono atmosférico está limitada por la falta de información detallada del cambio de la distribución vertical del ozono, principalmente en la proximidad de la tropopausa.

Se han observado importantes aumentos de radiación ultravioleta (UV) asociados al agujero del ozono en latitudes altas meridionales. Los aumentos medios de UV concuerdan bien con los cálculos del modelo. También se midieron aumentos locales de UV-B durante 1992/1993 en latitudes altas y medias del hemisferio norte. Los registros espectrales de los incrementos implican claramente a la cantidad de ozono anormalmente baja observada durante esos años más que a la variabilidad de la capa nubosa o la contaminación troposférica. Estas correlaciones aumentan la confianza en la capacidad para relacionar los cambios de ozono con los cambios de UV-B en períodos de tiempo relativamente largos.

Varias declaraciones de la Evaluación se refieren a la influencia de las aeronaves y del bromuro de metilo.

Las actuales operaciones de aviones subsonicos pueden estar aumentando los elementos en trazas (principalmente NO_x , dióxido de azufre y hollín) a los niveles de la troposfera alta en las aerovías del Atlántico norte y produciendo aumentos de ozono en la alta troposfera de hasta varias unidades por ciento. Ya que los resultados de estos modelos más bien complejos dependen criticamente de la química del NO_x y las medidas son inciertas, en la actualidad se debe depositar poca confianza en estos resultados cuantitativos del modelo.

Los efectos atmosféricos de las aeronaves supersónicas dependen de su número, altitud de operación, emisión de gases de escape y del contenido de fondo de cloro y de aerosoles. Las flotas de transportes supersónicos en proyecto darán lugar a importantes cambios en las concentraciones de los elementos en trazas, especialmente en las aerovías del Atlántico norte, produciendo disminuciones de la media anual del ozono total de entre 0,3 a 1,8 por ciento para el hemisferio norte. Sin embargo, existen importantes ambigüedades en los resultados de estos modelos y las cifras no pueden aceptarse con confianza.

Se continúa considerando al bromuro de metilo como un compuesto importante en la destrucción de ozono. Mientras que se comprende bien la magnitud de la eliminación fotoquímica at-

Recuadro 3**Efectos radiativos del cambio en el ozono**

- El ozono troposférico ha aumentado en el hemisferio norte desde los tiempos preindustriales. Los modelos y las deducciones basadas en las observaciones sugieren un forzamiento radiativo positivo de unos 0.5 Wm^{-2} ;
- el ozono estratosférico ha disminuido desde los años setenta. Estudios unidimensionales confirman que la disminución entre 1980 y 1990 ha originado un forzamiento radiativo negativo de unos 0.1 Wm^{-2} frente al forzamiento positivo de 0.45 Wm^{-2} debido al aumento de otros gases invernadero en el mismo período;
- es probable que la media mundial del forzamiento radiativo neto originado por los cambios en el ozono haya sido positiva desde épocas preindustriales;
- se cree que la destrucción del ozono ha sido el factor dominante del enfriamiento medio mundial de entre 0.6°C y 0.8°C de la troposfera baja durante los últimos 20 años.

mosférica, existen importantes ambigüedades para cuantificar el sumidero oceánico del bromuro de metilo atmosférico. La estimación más probable de la duración total de la vida del bromuro de metilo atmosférico es de 1,3 años, dentro de un intervalo de entre 0,8 a 1,7 años. La destrucción potencial de ozono (DPO) por el bromuro de metilo se calcula en aproximadamente 0,6 (respecto a una DPO de 1 para el CFC-11).

La Evaluación del Ozono 1994 resalta varios puntos importantes para su consideración durante el proceso de formulación de objetivos.

Suponiendo que todas las naciones cumplan el Protocolo de Montreal modificado (Copenhague, 1992), el abundante cloro estratosférico continuará aumentando desde sus niveles actuales (3,6 ppmm) hasta un máximo de 3,8 ppmm hacia finales de siglo. El contenido futuro total de bromo dependerá de las decisiones que se adopten en cuanto a la producción y las emisiones humanas futuras de bromuro de metilo. En algún momento después del comienzo del nuevo siglo los niveles de cloro y bromo estratosférico iniciarán un descenso que continuará durante el siglo XXI y comienzos del XXII. La recuperación de la capa de ozono habría sido imposible sin las Enmiendas y Modificaciones al Protocolo original (Montreal, 1987).

La capa de ozono estará muy afectada por las perturbaciones antropogénicas y será susceptible a las variaciones naturales a finales de siglo, cuando se espera que tengan un máximo los contenidos de bromo y cloro en la estratosfera. Tornando como base de los cálculos las observaciones actuales, se espera que la destrucción máxima de ozono respecto a los niveles de la década de los sesenta tenga lugar durante, aproximadamente, los próximos 10 años. Sólo después de esto comenzará un período de disminución de la proporción de destrucción de ozono. Sin embargo, si las naciones no cumplen los acuerdos internacionales existentes, se retrasará la recuperación de la capa de ozono hasta después de la segunda mitad del próximo siglo.

Para asegurar la provisión de los datos de observación indispensables del estado de la capa de ozono y de avisos tempranos de una degradación adicional inesperada son necesarios trabajos continuos de los Miembros para reforzar el SMOO₃.

LA VIGILANCIA DE LA ATMOSFERA MUNDIAL (VAM) DE LA OMM

Por P. G. PRICE¹ y John M. MILLER²

Estado de realización

La VAM de la OMM ha hecho grandes avances desde que en 1989 la cuadragésima quinta reunión del Consejo Ejecutivo aprobase un plan con los objetivos, los componentes y una lista parcial de las variables a medir. Ahora, más que nunca, la OMM tiene que desempeñar un papel destacado, no sólo en la vigilancia a los niveles regional y mundial de la composición química de fondo de la atmósfera y de sus características físicas aso-

ciadas, sino que también tiene que contribuir a valorar su estado y su evolución y participar en las actividades de investigación.

Los temas que trata la VAM son complejos: el cambio mundial y la influencia del hombre en la calidad del medio ambiente natural. En el calendario científico internacional de hoy en día ocupa un lugar prominente el valorar estos temas, sus efectos y las respuestas a éstos, a fin de hacer posible el predecir los estados futuros

¹Superintendente de la Sección de Vigilancia de la Atmósfera en el Servicio Meteorológico de Australia
²Jefe de la División de Medio Ambiente en el Departamento del Programa de Investigación Atmosférica y Medio Ambiente de la OMM