

cian la investigación para que fomenten y apoyen la transición a operaciones de nuevas y prometedoras técnicas desarrolladas en los laboratorios de investigación, y esto debería incluir la formación profesional posterior (incluidos métodos basados en la Web).

Se reconoció que había que validar todos los datos de teledetección por satélite con el reconocimiento de aeronaves y los datos de satélite. Incluso las estimaciones de intensidad de ciclones tropicales de tipo Dvorak tienen que validarse mediante campañas de

observación de campo in situ en todas las cuencas que carecen de programas rutinarios de reconocimiento.

Agradecimientos

El Programa de Investigación de Meteorología Tropical de la OMM y el Programa de Ciclones Tropicales patrocinaron el IWTC-V. Damos las gracias a los representantes de los 31 centros de aviso de ciclones tropicales que completaron el estudio. La participación de R. L. Elsberry fue financiada por la Oficina del Programa de Investigación Naval de Meteorología Marítima y la de C. Velden a través de fondos de la NOAA y del NRL.

El agujero de ozono antártico: 1996-2002

Por Andreas FISCHER¹ y Johannes STAEHELIN²

Introducción

El agujero de ozono antártico, que fue descubierto en 1985 (Farman y otros, 1985) y cuyo desarrollo se vigiló posteriormente por medidas de satélite (Stolarski y otros, 1986), está muy influenciado por las condiciones meteorológicas de la estratosfera. Las bajas temperaturas durante el invierno sobre el Antártico originan la formación del vórtice polar, una región con vientos estratosféricos de gran velocidad que generalmente abarca el continente antártico. Este vórtice limita el intercambio de aire entre su interior y el exterior y da como resultado temperaturas extremadamente bajas, que forman nubes estratosféricas polares (NEP). Éstas activan procesos químicos que, en presencia de luz solar, originan una disminución rápida del ozono y producen todos los años el agujero de ozono en la baja estratosfera. Temperaturas inferiores a -78°C pueden producir NEP que consten de agua y ácido nítrico, mientras que temperaturas inferiores a -85°C originan NEP de cristales de agua casi puros. Ambos tipos de NEP ofrecen las superficies donde se producen las reacciones que convierten las moléculas menos reactivas en formas mucho más reactivas que destruyen el ozono con facilidad. Dichas moléculas son resultado de productos químicos hechos por el hombre emitidos a la atmósfera, incluyendo muchos compuestos que contienen cloro (p. ej., clorofluorocarbonos (CFC)) y bromo (p. ej., haluros).

En el Ártico también se produce un tipo similar de reducción polar del ozono (Rex y otros, 1998). Sin embargo, debido a los requisitos para la formación de un agujero de ozono, es poco probable que la destrucción de ozono origine un agujero de ozono en el Ártico similar en tamaño al del Antártico. Las temperaturas mínimas en el invierno ártico son generalmente mayores y más variables que las del invierno antártico, por lo tanto las temperaturas que favorecen la formación de NEP se dan con menor frecuencia. La razón de que las temperaturas árticas sean mayores es que hay importantes diferencias entre los hemisferios en las distribuciones de tierra, océano y montañas en latitudes medias y altas que afectan a los esquemas de la circulación atmosférica. En las 20 preguntas y respuestas sobre la capa de ozono de la OMM (OMM, 2003(a)) se ofrece una visión de conjunto de la teoría de la formación del agujero de ozono.

El agujero de ozono empieza a aparecer en agosto o a principios de septiembre a medida que el sol sale sobre el Antártico después de la oscuridad total y el frío extremo del invierno. La pérdida máxima de ozono se produce durante septiembre y octubre y el agujero se disipa cuando desaparece el vórtice.

A principios de agosto ya aparecen con frecuencia valores de ozono muy bajos. Debido a su pequeña extensión, se los conoce como miniagujeros y vienen de latitudes más bajas. Tienden a intensificarse con más fuerza sobre la Península Antártica y la hoja de hielo

281

¹ Estudiante de Ciencias Medioambientales en el Instituto Federal Suizo de Tecnología de Zurich (ETHZ); este estudio fue llevado a cabo principalmente en la OMM, como parte de un proyecto de prácticas

² Instituto de Ciencias Atmosféricas y Climatológicas del Instituto Federal Suizo de Tecnología de Zurich (ETH Zurich)

del este antártico y prácticamente no tienen nada en común con el agujero de ozono a gran escala. Por lo tanto es un fenómeno dinámico, más que químico (Newman y otros, 1988).

En este artículo comparamos los agujeros de ozono y las condiciones meteorológicas respectivas de los años 1996-2002. El estudio se basa en los boletines de ozono antártico de la OMM. Las observaciones de ozono, al igual que las condiciones meteorológicas de 2002, fueron poco corrientes comparadas con los años 1996-2001 y, por lo tanto, las descripciones de este año se tratan aparte.

Observaciones de ozono, 1996-2001

Las variables más importantes para comparar el agujero de ozono antártico en distintos años incluyen el tamaño, la persistencia (duración), la profundidad y la forma del mismo (ver Tabla I). El tamaño del agujero de ozono se define generalmente como la superficie en donde la columna de ozono es menor que 22 unidades Dobson (UD), mientras que la profundidad se mide con distintos indicadores. Una medida es el déficit de la masa de ozono (DMO), que se calcula sumando la cantidad de ozono perdida dentro de la superficie de valores de ozono superiores al 10 por ciento por debajo de las medias previas al agujero de ozono, expresada en millones de toneladas de ozono. Las medias previas al agujero de ozono son los promedios diarios de la columna de ozono en un punto particular durante los años previos al agujero de ozono 1964-1976 y las desviaciones locales de estas medias es otra medida de la profundidad del mismo en puntos específicos. Otro indicador de la profundidad de dicho agujero es la superficie con valores de ozono superiores al 50 por cien-

to por debajo de las medias previas al agujero de ozono, mientras que la comparación de promedios mensuales zonales de la columna de ozono ofrece una perspectiva histórica.

La superficie del agujero de ozono ha aumentado constantemente de tamaño, considerando los promedios en seis años desde 1978 (ver Figura 1). Fue muy grande en 2000 y en 2001, con el valor más grande, de 27,5 millones de km², a mediados de septiembre de 2000, mucho antes de la fecha en la que aparece normalmente el máximo. La superficie promedio del agujero de ozono de septiembre de 2000 fue también la mayor de la que se tienen registros, pero los promedios mensuales disminuyeron considerablemente en octubre y noviembre. Por otra parte, la superficie media del agujero de ozono de 2001 en octubre y noviembre superó la de todos los años anteriores. También en 1998 dicho agujero fue grande, mientras que en 1997 se presentó el agujero de ozono más pequeño del período 1996-2001. Promediado a lo largo de este período, el agujero de ozono durante septiembre y octubre abarcó una superficie de unos 20 millones de km². Nunca se observó un valor tan alto antes de 1995.

La duración de cada uno de los agujeros de ozono de 1996, 1998, 1999 y 2001 fue de alrededor de 4 meses (desde mediados de agosto a mediados de diciembre), que es algo superior a la de los años anteriores a 1996. Desde 1985 hasta 1989, duraba generalmente entre 2,5 y 3 meses y desde 1990 hasta 1993, entre 3 y 3,5 meses, aproximadamente. Sin embargo, en 1997 y en 2000, el agujero de ozono duró sólo unos 3 meses. Desde 1996, se ha desarrollado antes.

La profundidad del agujero de ozono de 2001 fue la mayor de la que se tienen registros, con los prome-

Variables comparables del agujero de ozono, 1996-2002

	Superficie del agujero de ozono ¹ [millones de km ²]				Profundidad del agujero de ozono				Duración [meses]	
					Déficit de la masa de ozono [millones de toneladas de ozono]		Superficie 50 por ciento por debajo de las medias ² [millones de km ²]			
	Max.	Sept. ³	Oct. ³	Nov. ³	Max.	Sept. ³	Oct. ³	Nov. ³		
1996	25	20,5	17,5	11,5	46,5	37	39	36,5	9,5	4
1997	23	16	19	8	52,5	42,5	47,5	38,5	8,5	3
1998	26	20,5	20,5	12,5	51	44,5	45,5	38	13,5	4
1999	24	19,5	19,5	13	54	47,5	44	39,5	10	4
2000	27,5	24,5	16,5	2,5	57	46	33	26	14,5	3
2001	25	23,5	21,5	14,5	54	50	51	42,5	14,5	4
2002	19,5	12,5	6	0,5	34	26	20,5	20,5	2,5	3

¹ Los datos utilizados provienen de conjuntos de datos de tierra y de satélite unidos, aportados por el Servicio Meteorológico de Canadá

² La superficie máxima con valores de ozono superiores al 50 por ciento por debajo de las medias previas al agujero de ozono

³ Valores medios mensuales

dios mensuales mayores del DMO de todo el período del agujero de ozono. Igualmente, los DMO de los años 1997-1999 y de septiembre de 2000 (con el valor récord del DMO de 57 millones de toneladas) fueron comparables y casi tan altos al de 2001. Sin embargo, al igual que la superficie del agujero de ozono, el DMO de 2000 disminuyó durante octubre y noviembre. El menos profundo del período 1996-2001 fue el de 1996. Promediado a lo largo de estos seis años, el DMO fue de 45 y de 43-44 millones de toneladas en septiembre y octubre, respectivamente.

Otro parámetro de la profundidad es la superficie con valores de ozono superiores al 50 por ciento por debajo de las medias previas al agujero de ozono. Empezando en 1994, esta superficie se ha vuelto importante, pero antes nunca fue superior a 4,5 millones de km^2 (ver Figura 2). Aumentó a más de 12 millones de km^2 a principios de octubre de 1994, y desde entonces (salvo en 2002) ha sido superior a 8 millones de km^2 todos los años. Esto es más de la mitad de la superficie del continente antártico.

Muchas estaciones terrestres del Antártico registraron sus valores de ozono más bajos en 2000. Sin embargo, el ozono total medido en una estación particular está influenciado no sólo por el tamaño y la profundidad del mismo, sino también por su forma y su rotación y, por lo tanto, debe utilizarse con las medidas de otras columnas para evaluar el tamaño, la profundidad y la persistencia del mismo. La forma del agujero de ozono es resultado de las condiciones meteorológicas dominantes cerca de la Antártida y sobre ella. Las condiciones meteorológicas influyen en el vórtice polar y en su forma, que tiene un fuerte efecto sobre la forma del agujero de ozono. En 1999 y en 2001, éste fue circular durante casi toda la estación. En general, cuanto más circular es el agujero de ozono, más tiempo dura.

Condiciones meteorológicas, 1996-2001

Para comparar el desarrollo del agujero de ozono, es importante tener en cuenta la meteorología de cada año. Los parámetros más utilizados son la superficie del vórtice polar, las temperaturas mínimas y el área con temperaturas suficientemente bajas como para producir NEP. Estos parámetros se ofrecen para distintos niveles (temperaturas potenciales) ya que muestran variaciones con la altitud a lo largo de la baja estratosfera.

Normalmente se observa la superficie máxima del vórtice polar en agosto o septiembre. El más grande se dio en 2000, con una superficie de más de 40 millones de km^2 , aunque en 1998 y en 2001 se observó un tamaño comparable. En 1999 y en 2001 el vórtice fue anormalmente grande en noviembre y duró hasta finales de diciembre, en contraste con el vórtice muy pe-

queño de octubre y de noviembre de 2000, que se disipó a principios de diciembre. En 1997, el vórtice polar fue muy pequeño a lo largo de todo el período del agujero de ozono y se disipó pronto. Estas disipaciones tempranas dieron como resultado la corta duración del agujero de ozono en estos años.

Las temperaturas mínimas más bajas sobre el Antártico se miden generalmente durante julio y agosto, con promedios mensuales que varían entre -93°C y -88°C ; en septiembre y en octubre hay un gran aumento de las temperaturas mínimas.

Las temperaturas mínimas más cálidas de los años 1996-2001 durante agosto y septiembre se observaron en 1997 y 2001. En 1996, 1999 y 2000 se midieron valores algo inferiores a los de los demás años del período 1996-2001.

La superficie con temperaturas suficientemente bajas favorables para producir NEP está asociada a las temperaturas mínimas dominantes sobre el Antártico. La extensión máxima de la superficie de NEP se produce en julio y agosto y su disminución está correlacionada con el aumento de las temperaturas mínimas durante septiembre y octubre.

La mayor superficie diaria de NEP en los años 1996-2001 se produjo en 2000, abarcando alrededor de 29 millones de km^2 , mientras que la superficie media en julio, agosto y septiembre de 2000 también excedió la de los demás años. También es interesante observar que la superficie de NEP de 2000 fue una de las menores durante octubre y noviembre, lo que contribuyó a las disminuciones observadas de la superficie del agujero de ozono en estos meses. En octubre, la superficie de NEP fue grande en 1998 y 2001, mientras que fue bastante pequeña en 1997, reflejando las altas temperaturas mínimas y el pequeño vórtice polar de ese año. La influencia de la meteorología sobre el agujero de ozono puede documentarse en los años en que la superficie del agujero de ozono fue bastante grande (en 1998 y 2001) o cuando fue la más pequeña del período 1996-2001 (en 1997).

Una comparación de los parámetros meteorológicos entre los dos períodos 1986-1993 y 1996-2001 revela algunos cambios sistemáticos que se han producido:

- La superficie promedio del vórtice para noviembre y diciembre fue en 1996-2001 unos 5 millones de km^2 mayor que desde 1986 hasta 1993. Este aumento de tamaño durante el último período de vórtice indica un vórtice más persistente en los años más recientes.
- En septiembre, octubre y noviembre de 1986-1993, las temperaturas mínimas fueron, generalmente, mayores que en el segundo período. Esto es una indicación de un enfriamiento de la estratosfera

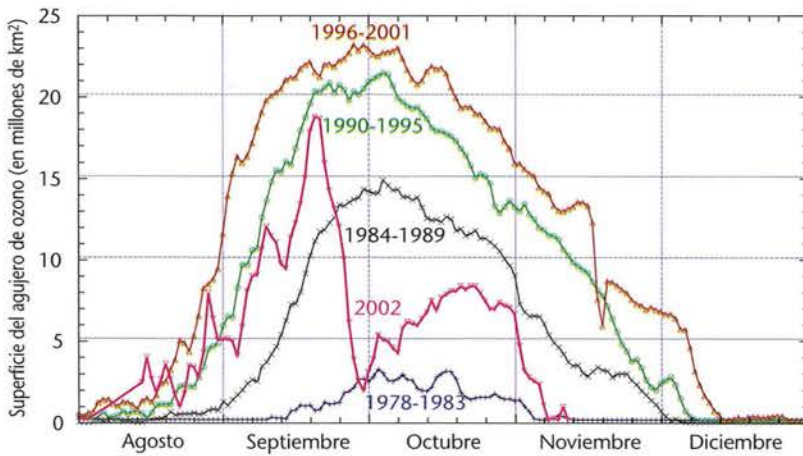


Figura 1 — Aumento de la superficie del agujero de ozono, 1978-2001

inferior. Dependiendo del mes y de la altitud, la diferencia era de entre 2°C y 3°C.

- La superficie de NEP de septiembre y octubre desde 1996 hasta 2001 fue, de promedio, unos 5 millones de km² superior a la del período 1986-1993. Por lo tanto, la actividad de las NEP también se disipó más tarde que en los años anteriores a 1994. En este último período la disipación de las NEP se produjo a mediados de noviembre, excepto en 2000, y en los años 1986-1993 se produjo generalmente a finales de octubre (excepto en 1987 y 1993).
- El vórtice polar más persistente, las temperaturas mínimas más bajas y una mayor actividad de las NEP a finales de cada período del agujero de ozono en los últimos años contribuyen a una mayor duración del mismo (ver la última sección).

Observaciones de 2002

El agujero de ozono de 2002 fue muy extraño, desdoblándose en dos agujeros más pequeños a finales de septiembre. Esto constituyó un episodio sin precedentes, y cada agujero contenía, inicialmente, un núcleo reducido de más del 50 por ciento de su ozono (ver Figura 3). Este fenómeno estaba relacionado con modelos anormales de la circulación atmosférica que rodeaba al vórtice polar, que fue el

menor observado en al menos dos décadas. A finales de septiembre, una gran masa de aire del vórtice se separó del vórtice principal, y a continuación se produjo un incremento rápido de las temperaturas dentro del vórtice. Esto produjo el fin de la formación de NEP antes de finales de septiembre. Según esto, la superficie media del agujero de ozono en septiembre y octubre fue la menor desde 1988. Después del desdoblamiento,

disminuyó hasta la superficie menor desde principios de la década de 1980 (ver Figura 1). El agujero de ozono se disipó completamente antes de principios de noviembre, un acontecimiento que no se veía desde 1988.

Este agujero de ozono fue también el menos profundo desde 1988 (ver las medias mensuales del DMO en septiembre y octubre en la Tabla I). La superficie con valores de ozono superiores al 50 por ciento por debajo de las medias previas al agujero de ozono fue la menor desde 1990 (ver la Figura 2) y la mayor parte de las estaciones terrestres del Antártico midieron sus valores de ozono más altos de la última década.

Ozono y UV sobre regiones pobladas

El ozono es un absorbente eficaz de la radiación UV y, por lo tanto, las disminuciones en el ozono total originan aumentos en la radiación UV-B solar en la tierra.

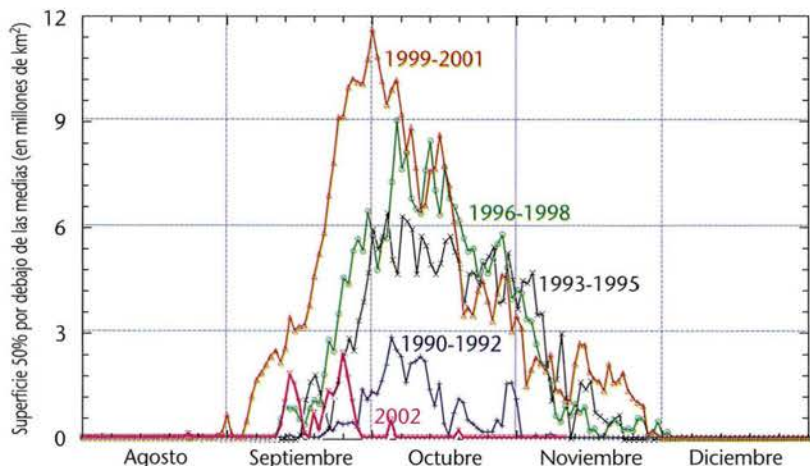


Figura 2 — Superficie del agujero de ozono antártico con valores de ozono superiores al 50 por ciento por debajo de las medias previas al agujero de ozono, 1990-2002

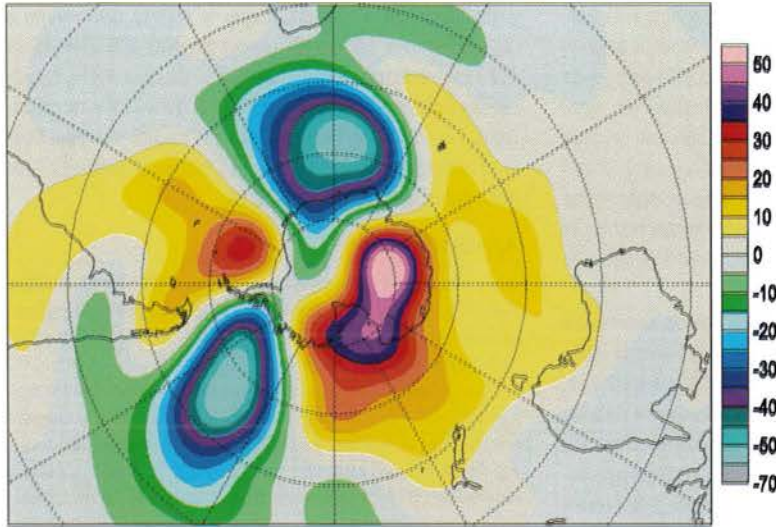


Figura 3 — El agujero de ozono de 2002 (mostrado como la desviación en porcentaje de las medias previas al agujero de ozono) fue muy extraño, desdoblándose en dos a finales de septiembre

La cantidad de UV sobre la superficie depende también de la nubosidad local y de la contaminación, aunque el UV máximo no se produce necesariamente con condiciones de cielo despejado. Las medidas del satélite de Espectrómetro de Cartografiado del Ozono Total (TOMS) han confirmado que los aumentos de UV debidos al agotamiento del ozono están a veces enmascarados por una mayor nubosidad. La cantidad de radiación UV-B depende también de la altitud sobre el nivel del mar y de la elevación del sol sobre el horizonte. Las mayores dosis de UV ponderado biológicamente bajo el agujero de ozono no se observan generalmente en septiembre y octubre, sino en noviembre y a primeros de diciembre, cuando las elevaciones solares son mayores y todavía persisten valores bajos de ozono.

Sólo una porción del espectro UV causa cáncer de piel y daños oculares. Para ayudar al público general a evaluar la exposición a la radiación UV perjudicial, se ha definido un índice, que describe los efectos perjudiciales del UV solar sobre la piel humana.

La región poblada más afectada en torno al Antártico es el extremo meridional de América del Sur, aunque el sur de Aus-

tralia y Nueva Zelanda también sufren ocasionalmente cantidades muy bajas de ozono total. El agujero de ozono afecta de forma directa a estas regiones cuando su superficie es lo suficientemente grande o alargado y extendido.

El extremo meridional de América del Sur sufrió por primera vez valores de agujero de ozono un día de 1984; en 1986 hubo una exposición total de 15 días. En 1996, la ciudad argentina de Ushuaia, en el extremo meridional de América del Sur, midió cinco días de agujero de ozono y en 1997 y 1998, se registraron, respectivamente,

siete y ocho días. En estos dos años, Ushuaia informó también de valores de ozono un 45 por ciento por debajo de las medias previas al agujero de ozono. Aunque éste en 2002 fue uno de los más pequeños y de los menos profundos, el extremo meridional de América del Sur sufrió ese año valores de agujero de ozono durante un total de ocho días. Probablemente, la mayor exposición a valores bajos de ozono fue en 2000, con 14 días de agujero de ozono y un valor récord de ozono de más del 50 por ciento por debajo de las medias previas al mismo en la estación de Ushuaia el 12 de octubre (ver Figura 4). El índice de UV para este día fue superior a 11, un valor comparable a la exposición al UV en

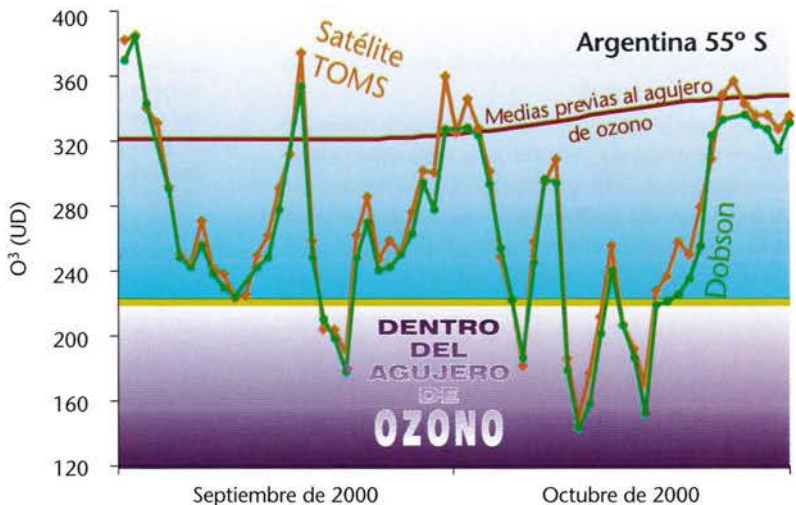


Figura 4 — El 12 de octubre de 2000 se registró en la estación de Ushuaia, en Argentina, un valor récord de ozono superior al 50 por ciento por debajo de las medias previas al agujero de ozono ("Dobson" quiere decir medidas desde la superficie)

los trópicos. Debido al agujero de ozono bastante circular de 1999 y, de nuevo, en 2001, el extremo meridional de América del Sur no sufrió valores de agujero de ozono en 1999 y sólo dos días en 2001. Aunque un agujero de ozono circular generalmente significa menor exposición a valores de ozono muy bajos, también implica generalmente que el vórtice es más estable y que durará más y, por lo tanto, originará un aumento en la radiación UV avanzada la estación, cuando el sol esté más elevado.

Debido a un miniagujero a primeros de agosto, las regiones pobladas de Nueva Zelanda y del sur de Australia sufrieron su mayor exposición al UV en 1997, con valores de ozono superiores al 30 por ciento por debajo de las medias previas al agujero de ozono durante unos pocos días. También en 2000, se produjeron durante cuatro días valores superiores al 25 por ciento por debajo de las medias, mientras que en 1996, 2001 y 2002, se observaron valores casi normales. En 1998 y 1999, aparecieron valores de ozono del 20 por ciento de desviación durante unos tres días.

286 Expectativas para el futuro

El Protocolo de Montreal y sus Enmiendas están funcionando bien. Las observaciones de la troposfera muestran que la cantidad total combinada efectiva de los componentes que destruyen el ozono sigue disminuyendo lentamente desde el máximo que se produjo en 1992-1994 (OMM, 2003(b)). En la estratosfera, la cantidad total de cloro está en el máximo o cerca de él, mientras que las cantidades de bromo probablemente, seguirán creciendo. Sin el Protocolo de Montreal, se preveía que la producción y el uso continuados de los CFC y de otros gases que destruyen el ozono aumentarían el cloro estratosférico efectivo en diez veces a mediados de la década de 2050, comparado con el valor de 1980. Probablemente, esos valores tan altos habrían incrementado la destrucción del ozono mucho más de la observada actualmente.

Durante la última década, la superficie media del agujero de ozono en primavera ha aumentado en tamaño excepto en 2002, pero no tan rápidamente como durante la década de 1980 (ver Figura 1). Como la superficie del agujero de ozono varía de un año a otro según las condiciones meteorológicas dominantes, todavía no es posible decir si la superficie del mismo ha lle-

gado al máximo. Sin embargo, se espera una vuelta a las cantidades totales de ozono previas a la década de 1980 en el Antártico a mediados de este siglo, suponiendo el total cumplimiento del Protocolo de Montreal. No obstante, la recuperación podría retrasarse si la estratosfera se enfría por el cambio climático o por grandes erupciones volcánicas.

Agradecimientos

A los autores les gustaría dar las gracias a Michael H. Proffitt, Funcionario Científico Superior del Departamento de Investigación Atmosférica y Medio Ambiente de la OMM por sus muchos y valiosos comentarios.

Los primeros boletines de ozono antártico de la OMM fueron realizados por Rumen D. Bojkov (hasta 1999), y después por Michael H. Proffitt. Los boletines se basan en los datos que aporta la red terrestre de estaciones de la Vigilancia de la Atmósfera Global y por varios instrumentos de satélites. También se usan mucho los productos de datos del Instituto Noruego de Investigación del Aire (NILU) y del Servicio Meteorológico de Canadá (MSC).

Para obtener más fuentes, consúltese: <http://www.wmo.ch/web/arep/ozone.html>

Referencias

- FARMAN, J.C., B.G. GARDINER, J.D. SHANKLIN, 1985: Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction, *Nature*, 315, 207-210.
- NEWMAN, P.A., L. LAIT y M. SCHOEBERL, 1988: The morphology and meteorology of southern hemisphere spring total ozone mini-holes, *Geophysical Research Letters*, 15, 923-926.
- STOLARSKI, R.S., A.J. KRUEGER, M.R. SCHOEBERL, R.D. MCPETERS, P.A. NEWMAN y J.C. ALPERT, 1986: Nimbus-7 satellite measurements of the springtime Antarctic ozone decrease, *Nature*, 332, 808-811.
- REX, M., P. VON DER GATHEN, N.R.P. HARRIS, D. LUCIC, B.M. KNUDSEN, G.O. BRAATHEN, S.J. REID, H. DE BACKER, H. CLAUDE, R. FABIAN, H. FAST, M. GIL, E. KYRO, I.S. MIKKELSEN, M. RUMMUKAINEN, H.G. SMIT, H. STÄHELIN, C. VAROTSOS e I. ZAITCEV, 1998: In situ measurements of stratospheric ozone depletion rates in the Arctic winter 1991/1992: A Lagrangian approach, *J. Geophys. Res.*, 103, 5843-5853.
- WMO, 2003(a): *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002. Twenty Questions and Answers about the Ozone Layer*, Global Ozone Research and Monitoring Project-Report N.º 47, Geneva.
- WMO, 2003(b): *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002. Global Ozone Research and Monitoring Project-Report N.º 47*, Geneva.

