

**Acerca del
«agujero» de
ozono en la
estratosfera
Antártica**

Manuel Puigcerver
Zanón
*Real Academia de
Ciencias y Artes de
Barcelona*

Territoris (1998), 1:
239-252

Acerca del «agujero» de ozono en la estratosfera Antártica

Manuel Puigcerver Zanón

Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona

Resumen

Se resumen brevemente los actuales conocimientos sobre el llamado «agujero» de ozono de la estratosfera antártica. Tras aludir a la peculiaridad de su descubrimiento, se exponen sus principales rasgos así como las especiales condiciones estratosféricas que determinan los mecanismos de su formación y destrucción, y se discute el riesgo de su extensión a otras latitudes.

Abstract

A review of current knowledge concerning the Antarctic «ozone hole» is briefly presented. After mentioning its serendipitous discovery, its main features as well as the peculiar stratospheric conditions responsible for its formation and destruction are briefly discussed as is the risk of its extension to other latitudes.

Recepción del manuscrito, diciembre de 1996

Introducción

El llamado «agujero» de ozono es uno de las más espectaculares e inesperados recordatorios de la precariedad de nuestros conocimientos sobre la atmósfera. A comienzos del decenio de 1970 se había especulado (Crutzen, 1970; Johnston, 1971) sobre el riesgo de que los aviones supersónicos de transporte, que producen, como todo motor de reacción, grandes cantidades de óxidos de nitrógeno, pudiesen deteriorar la capa de ozono de la estratosfera (al primero le valió el premio Nobel de 1995). También preocupaban los halocarburos,¹ gases de amplio uso industrial por su inactividad química y su carácter incombustible y no explosivo ni tóxico: Molina y Rowland (1974) llamaron la atención sobre el riesgo de que los iones flúor y cloro de estos compuestos reaccionasen con el ozono y lo destruyeran; de paso, compartieron el Nobel con Crutzen.

Lo que no se le había ocurrido a nadie es que ello pudiera suceder en el lugar más remoto del mundo, donde no hay actividad industrial alguna y donde prácticamente no vive nadie (unas 4000 personas en verano y quizá menos de 1000 en invierno para 13,6

¹ Frecuentemente llamados, en mala traducción del inglés, *clorofluorocarbonos* o *clorofluorocar-bonados*.

millones de km²): la Antártida. En lo que sigue se trata de explicar la lógica de este sorprendente comportamiento.

La capa de ozono

El ozono estratosférico es de importancia primordial en el balance ecológico del planeta Tierra porque, merced a sus procesos de formación y destrucción, actúa como pantalla impidiendo la llegada de la radiación ultravioleta de corta longitud de onda, extremadamente destructora para los tejidos vivos. Se acostumbra a distinguir tres regiones en esta parte del espectro: la ultravioleta A (o UV-A) entre 320 y 380 nanómetros (nm, 10⁻⁹ metros o millonésimas de milímetro), que es la más próxima al visible; la UV-B, entre 280 y 320 nm y la UV-C, de longitud de onda inferior a 280 nm. De ellas, el ozono prácticamente no absorbe la UV-A, su formación y disociación absorben totalmente la UV-C, impidiéndole llegar a tierra; en cuanto a la absorción de UV-B, depende marcadamente de la concentración de O₃.

Ésta se puede medir desde tierra gracias al espectrofotómetro G.M.B. Dobson, ideado y construido hacia 1924 por este ilustre científico para su doctorado. Los equipos actuales, básicamente análogos pero aprovechando la electrónica y la miniaturización, permiten incluso hacer observaciones de noche con luz de luna (Dobson, 1957). Una complicada técnica operatoria y matemática, llamada efecto Umkehr (o de inversión) permite deducir no sólo la concentración total del ozono sino su distribución vertical. Ésta, además, se pudo obtener directamente desde el decenio de 1960 mediante *ozonosondas*, complemento del radiosonda dotado de un sensor de concentración de ozono y la correspondiente telemetría. A partir de 1964 con el programa *Nimbus*, se inició la medida de concentración del O₃ mediante satélites: el *Nimbus 4* llevaba un instrumento llamado BUV (de *Backscattered Ultra Violet*, o fotómetro de ultravioleta retrodifundido), que operó de 1970 a 1977, y hasta 1988 lo hizo el *Nimbus 7* portador del TOMS (*Total Ozone Mapping Spectrometer* o espectrómetro de cartografiado del contenido total de ozono) y el SBUV (*Solar Backscattered Ultra-Violet*), versión mejorada del BUV. En la actualidad, en los satélites *NOAA-11* (hasta 1994) y *NOAA-9* está funcionando el SBUV/2, nuevo perfeccionamiento del SBUV, que permiten mantener una vigilancia continua.

En el decenio de 1940 ya existía una modesta red de espectrofotómetros Dobson en el hemisferio Norte y se tenía cierta idea de la climatología del ozono y sus variaciones con la latitud. En el Año Geofísico Internacional (AGI, junio 1957-diciembre 1958) se instalaron dos equipos Dobson en bases antárticas: Halley Bay (76°S, 27°W) y Argentine Islands (65°S, 64°W, actualmente Faraday, en la Península Antártica), ambas británicas; en 1961 se montó otro en la base norteamericana Amundsen-Scott (Polo Sur) y en 1967, otro en la base japonesa de Syowa (69°S, 40°W). Se comenzaba a conocer la climatología del ozono en la Antártida, es decir, se sabía cuál era el valor medio en cada estación del año, se sabía que la concentración bajaba en primavera y se recuperaba en verano, etc.

Una sorpresa

Los investigadores británicos habían observado que desde mediados del decenio de 1970, algo extraño le ocurría al ozono antártico: cada primavera se producía un descenso anómalo en su concentración (Fig. 1). Comprobado que no se trataba de errores personales

ni instrumentales, sólo quedaba aceptar la realidad de esta disminución del contenido de ozono: así lo comunicaron en un artículo ahora famoso (Farman, Gardiner y Shanklin, 1985) donde se proponía también una explicación en parte química y en parte dinámica. Chubachi (1984) había notado lo mismo en Syowa y había sido el primero en dar la voz de alarma, que pasó desapercibida.

El trabajo británico, además de sensación, produjo inquietud entre los científicos americanos a cargo de los TOMS y SBUV del *Nimbus-7*: ¿por qué el satélite no lo había detectado? Una búsqueda metódica de las posibles causas reveló la casi grotesca razón: el programa del ordenador que procesaba los datos en tierra tenía una condición imponiendo que si el contenido de ozono caía por debajo de un cierto umbral (establecido según la climatología entonces conocida del O₃), la observación debía rechazarse: un artificio análogo al usado en los termómetros clínicos, donde la escala comienza a los 35 °C. Comprobado que el umbral era demasiado alto, se corrigió el programa, se recuperaron los datos almacenados que no se habían usado, y no solamente apareció el empobrecimiento vernal de la estratosfera antártica en ozono —incorrectamente llamado *agujero de ozono*² sino se halló que abarcaba gran parte de la Antártida y no se trataba, por tanto, de un fenómeno local de Syowa o Halley Bay.

Las características del «agujero»

He aquí las que parecen bien establecidas:

1. La concentración de O₃ disminuye bastante bruscamente hacia la primavera austral y se va recuperando durante el verano (parte izquierda de la Fig. 2, Amundsen-Scott, Polo Sur).
2. Desde su descubrimiento, la profundidad y extensión del agujero ha ido aumentando, si bien con fluctuaciones; el retorno a los valores normales se retrasa más cada año, es decir, la duración del agujero va aumentando.
3. Los valores de otoño e invierno son normales. En ocasiones, la disminución vernal es espectacular: la columna total de O₃ puede reducirse en más del 50% y localmente la destrucción del ozono puede ser casi total (Hales, 1996; Fig. 3, curvas del 12 de octubre de 1993 y del 5 de octubre de 1995).
4. Sólo se observa en la baja estratosfera de la Antártida. La parte derecha de la Fig. 2, que corresponde a Resolute, Canadá, no muestra agujero pese a su latitud comparable a la de Halley Bay.
5. Se empezó a observar hacia 1968 (Figs. 1 y 2)
6. Suele haber una región rica en ozono en el segundo cuadrante.
7. La intensidad agujero varía de unos años a otros. El más profundo conocido se dio en 1993, seguido de los de 1985, 1987 y 1995. La profundidad del agujero parece estar relacionada con la actividad de las ondas planetarias en el vórtice polar, del que se trata después. Algunos autores han sugerido prematuramente una hipotética periodicidad bienal, en que las profundidades mayores del agujero corresponderían a los años impares.

² En realidad, se trata de un empobrecimiento de la estratosfera en ozono, pero la expresión *agujero de ozono* es tan gráfica que resulta ocioso pretender cambiarla. Técnicamente, la expresión se reserva en la actualidad para concentraciones inferiores a 220 unidades Dobson.

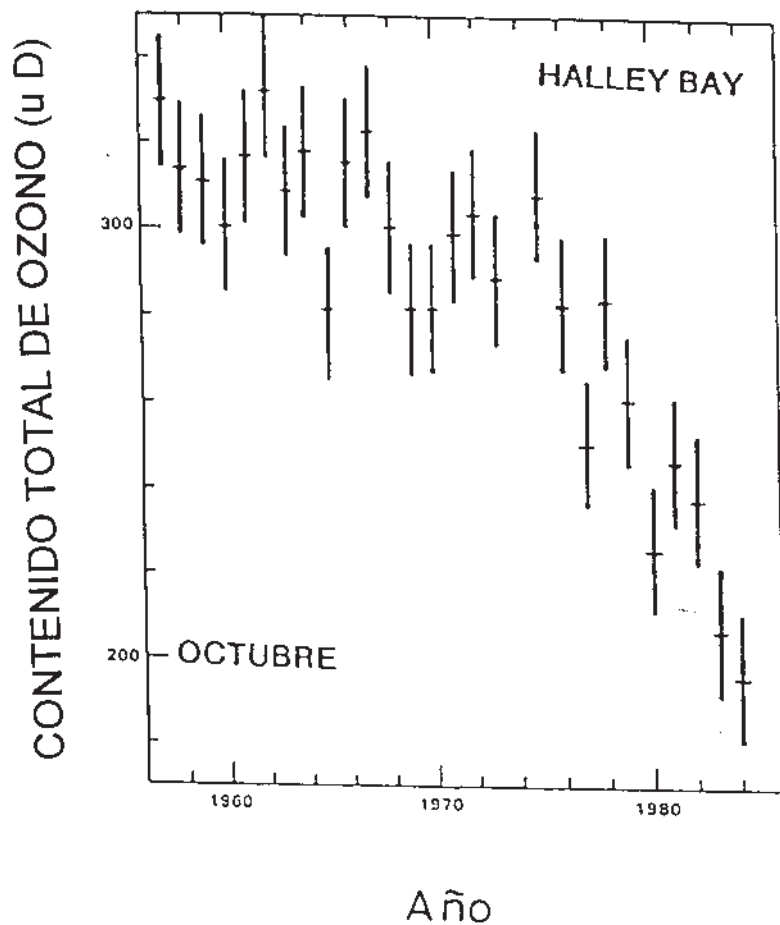


Figura 1. Curso del contenido total de ozono en la base antártica Halley Bay de 1967 a 1984. Se indica el valor medio y la desviación típica. La concentración de ozono se expresa en unidades Dobson (u D): Si todo el ozono de la atmósfera se llevase al nivel del mar en condiciones normales (1013,2 hPa de presión y 0 °C de temperatura) y se extendiese sobre un suelo llano, el espesor de esta «alfombra de O₃» sería de unos 3 mm. La unidad Dobson es un espesor de 0,01 mm en estas condiciones. Un contenido normal de O₃ sería, pues, de unas 300 u D. Obsérvese el decrecimiento del contenido de ozono desde finales del decenio de 1960. (Adaptada de Farman *et al.*, 1985).

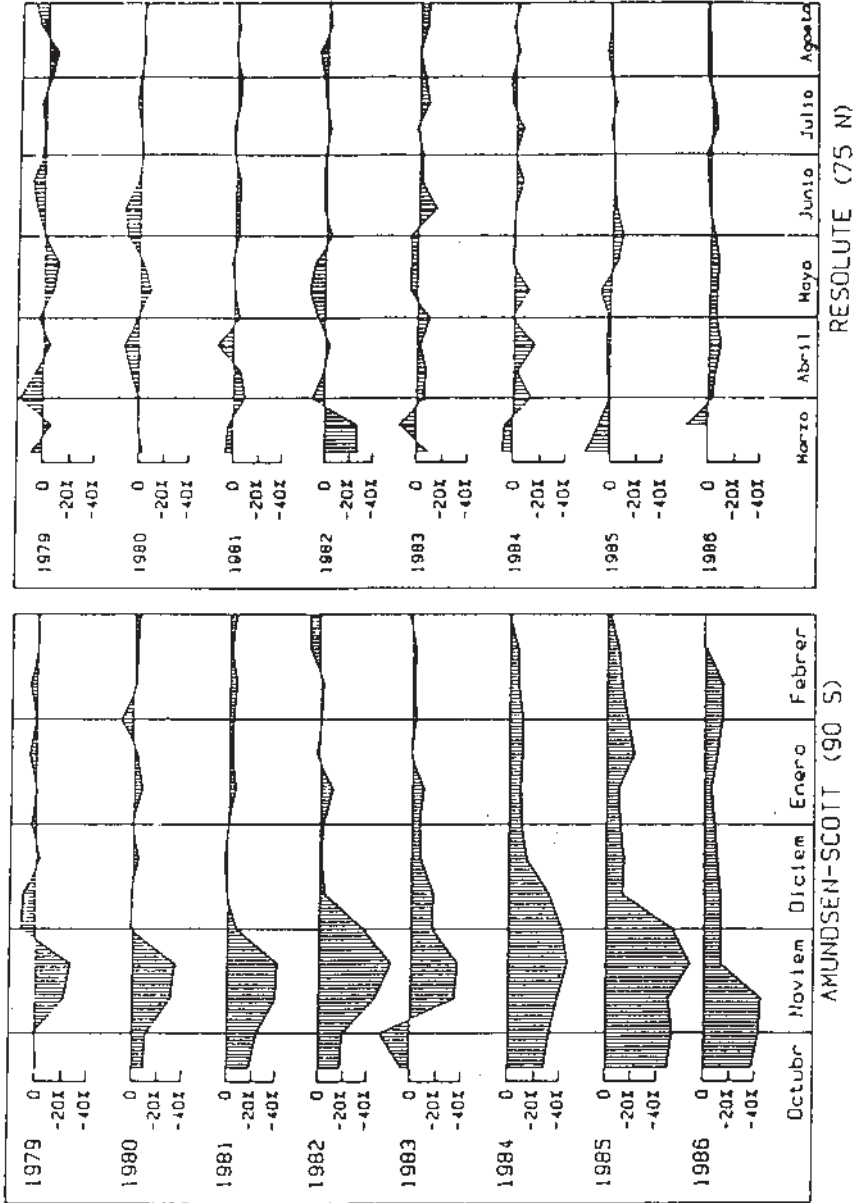


Figura 2. Evolución del contenido de ozono desde 1979 a 1986 sobre dos estaciones polares: Amundsen-Scott (Polo Sur) y Resolute (Canadá). En las gráficas se representan desviaciones en tanto por cien respecto al valor medio para la época del año considerada; en el caso antártico, el promedio se refiere a los años anteriores a la aparición del agujero. Obsérvese que éste no se aprecia en el hemisferio Norte. (Reproducida de Sainz de Aja, 1990).

Formación y destrucción del ozono: el «agujero»

Chapman (1930) había propuesto una teoría según la cual a cada nivel entre los 10 y los 40 km actuarían simultáneamente un mecanismo de formación y otro de destrucción del ozono hasta alcanzar un régimen estacionario, en el que producción y destrucción se compensarían. La producción se debería a absorción de radiación ultravioleta de longitud de onda $\lambda < 242$ nm, que rompe la molécula de oxígeno



y el átomo de oxígeno, en presencia de una molécula M que absorbe la energía liberada en la reacción, se combina con una molécula de oxígeno normal



La destrucción se produciría por descomposición (recuperación de la forma estable) o por fotodisociación (absorción de radiación, también ultravioleta, de longitud de onda $200 \text{ nm} < \lambda < 340 \text{ nm}$) según



Las reacciones de formación (1) y (2) predominarían en la parte baja de la capa de ozono y las de destrucción (3) y (4) lo harían en la parte alta, lo que justificaría la forma del perfil vertical de la concentración de ozono (Fig. 3, curva del 23 de agosto de 1993). El calentamiento producido por la absorción de radiación es responsable del aumento de temperatura en la estratosfera media y alta, en contraste con la cuasi-isotermia de la baja estratosfera.

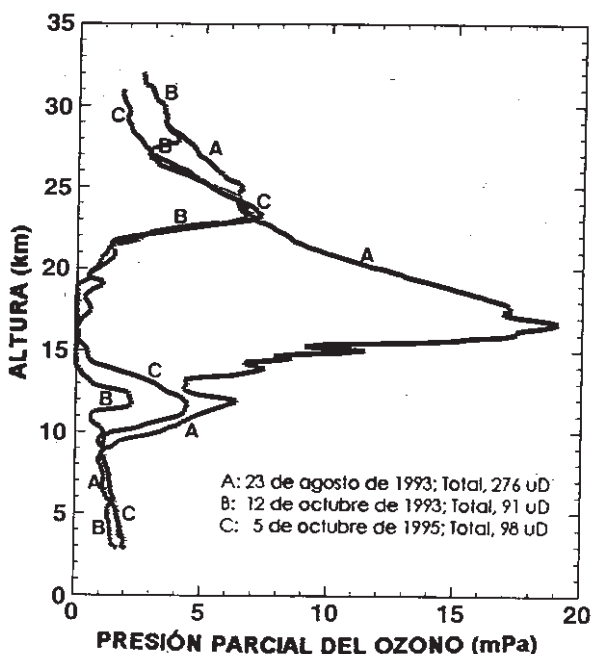


Figura 3. Perfiles verticales de la concentración de ozono tomados mediante ozonosonda en Amundsen-Scott. La curva A corresponde al 23 de agosto de 1993 y puede considerarse normal; la B es del 12 de octubre de 1993, en que el agujero alcanzó la máxima profundidad registrada hasta la fecha y la C es del 5 de octubre de 1995, que revela un agujero casi tan profundo como aquel.

(Adaptada de Halpert *et al.*, 1996).

Al mejorar el conocimiento de las constantes de las reacciones (3) y (4), se ha visto que éstas son insuficientes para explicar la destrucción del ozono: el ritmo de producción sería unas cuatro veces mayor que el de destrucción. El principal mecanismo de destrucción es en realidad una serie de ciclos catalíticos de la forma

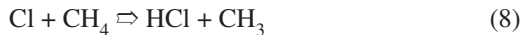


con el resultado neto



donde las especies químicas X son, por orden de importancia, los monóxidos de nitrógeno NO y de cloro ClO mientras que en la alta estratosfera y mesosfera el más importante es el radical hidroxilo OH. Estas reacciones, no obstante, sólo explican el proceso natural de formación y destrucción del ozono, pero no el «agujero» porque la concentración de oxígeno atómico O es tan baja que hace la reacción (6) insuficiente.

Diversas campañas de medidas llevadas a cabo en 1986 y 1987 en la Antártida y en 1989 y 1991-92 en el Ártico establecieron una relación entre el empobrecimiento en ozono y los halocarburos, como Molina y Rowland habían sospechado. Ellos postulaban las reacciones (5) y (6) con $X \equiv Cl$, pero la presencia de dióxido de nitrógeno NO_2 y metano CH_4 , ambos relativamente abundantes, detiene el ciclo catalítico al transformar el Cl en cloruro de hidrógeno HCl

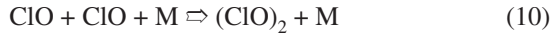


y el monóxido de cloro ClO de (6) en nitrato de cloro $ClONO_2$



compuestos que hacen el cloro inactivo respecto al ozono y actúan por tanto como *depósitos* de cloro.

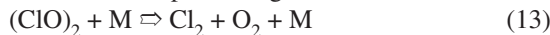
En cambio, como Luisa y Mario Molina (1978, a y b) han mostrado, para la destrucción del ozono resulta ser crucial la formación de un dímero del monóxido de cloro, procedente de la reacción (5) (con $X = Cl$) seguida de



y la fotólisis directa



o bien la disociación del dímero en primer lugar



y del cloro después

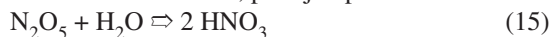


y el Cl liberado en (12) y (14) vuelve a reaccionar según (5), (que no requiere presencia de oxígeno monoatómico) destruyendo el ozono.

Durante la mayor parte del año, no obstante, este ciclo de reacciones no actúa porque los átomos de cloro permanecen «secuestrados» en los *compuestos depósito*. La destrucción en gran escala del ozono requiere un mecanismo que libere el cloro de sus depósitos y una eficaz desnitrificación que garantice muy baja concentración tanto de NO_2 como de CH_4 a fin de hacer las (8) y (9) inoperantes.

Las medidas mostraron que esta segunda condición se cumple en la estratosfera antártica primaveral gracias a la formación durante el invierno de unas nubes especiales, las *nubes estratosféricas polares (NEP)* (Hamill y Toon, 1991), que requieren muy bajas temperaturas y parecen pertenecer a dos tipos: el I sería de ácidos nítrico y sulfúrico y agua; el II sería de cristales de hielo. Estas nubes son sede de reacciones en fases heterogéneas (gas-sólido) de extraordinario rendimiento, que liberan el cloro Cl_2 de los

compuestos depósito al mismo tiempo que secuestran los óxidos de nitrógeno NO_x almacenándolos en forma de ácido nítrico, por ejemplo



El proceso, que opera durante la larga noche polar, se conoce como *desnitrificación* (eliminación de NO_x) de la estratosfera. Las partículas de ácido nítrico de las NEP, por su parte, sedimentan con el tiempo, desnitrificando efectivamente la estratosfera polar.

Al retorno del Sol a la estratosfera antártica, fotoliza el Cl_2 en dos átomos de Cl y las reacciones (5) a (14) prosiguen en gran escala sin el obstáculo de las (8) y (8) pues las NEP ya han denoxificado y desnitrificado la estratosfera. Esto explica la destrucción brusca y masiva del ozono en primavera: el *agujero de ozono*.

Más adelante, cuando la radiación alcanza valores suficientemente altos, desaparecen las condiciones necesarias para dicha destrucción: la intensa circulación ciclónica asociada al vórtice polar queda sustituida por una débil circulación anticiclónica, y se produce una fuerte subida de temperatura que disipa los NEP; los óxidos de nitrógeno, ya no retenidos en ellas, vuelven a frenar el ciclo catalítico de destrucción de ozono hasta detenerlo a mediados o finales de primavera y éste recupera poco a poco su concentración normal. Algunas veces, los cambios de circulación y temperatura son tan insólitos que se habla de *derrumbamiento* del vórtice y *calentamiento explosivo* de la estratosfera (Palmer y Taylor, 1960).

El vórtice polar antártico: diferencias con el ártico

Lo dicho no explica por qué el agujero de ozono es un fenómeno exclusivamente antártico; hay para ello razones geográficas y meteorológicas.

Debido a ser la Antártida un continente casi circular, al hecho de que en el hemisferio Sur los restantes continentes no se extienden hasta latitudes altas y al predominio de los mares sobre las tierras, la circulación atmosférica es allí mucho más zonal —es decir, según los paralelos— que en el hemisferio Norte. Ello crea un déficit de transporte meridiano de calor y consiguientemente una fuerte diferencia de temperatura entre las bajas y las altas latitudes australes, o gradiente meridiano de temperatura, que a su vez refuerza la circulación. El fenómeno alcanza caracteres extremos durante el invierno. Al comienzo de la noche polar cesa el calentamiento de la estratosfera por absorción de radiación ultravioleta, mientras que la emisión de radiación infrarroja prosigue imperturbada. Este aire extraordinariamente frío se contrae y desciende, creando un fuerte gradiente meridiano de presión que impulsa al aire de latitudes medias hacia el Polo Sur; pero la fuerza de Coriolis desvía su trayectoria convirtiendo la corriente inicialmente meridiana en una corriente zonal o chorro entre las latitudes 50 y 70°S en el que el viento alcanza velocidades de casi 400 km/h: el vórtice polar (Palmer, 1959; Fig. 4).

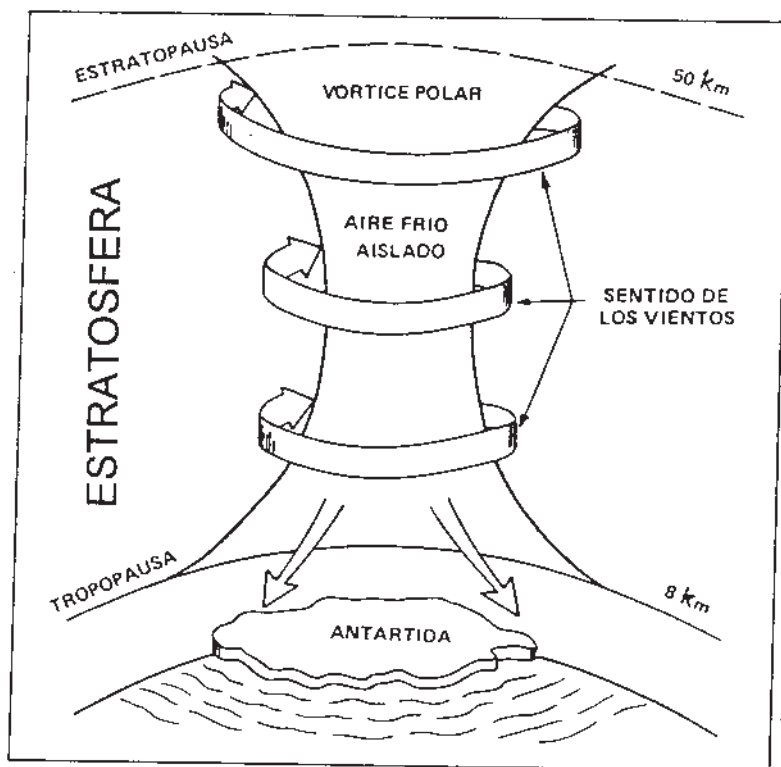


Figura 4. Representación esquemática del vórtice polar. (Reproducida de Sainz de Aja, 1990).

El aire en el interior del vórtice queda todo el invierno prácticamente aislado del resto del hemisferio mientras prosigue el enfriamiento radiativo. La consecuencia es un enfriamiento extremo de la estratosfera antártica, que alcanza temperaturas inferiores a -85°C sin paralelo en el Ártico, donde son por término medio 10 a 15°C más altas. Entre los sondeos de la Fig. 5, realizados por el autor (1967) y colaboradores en una estación antártica durante el año 1961, el n.º. 4, correspondiente al 17 de julio, muestra una estratosfera tan extraordinariamente fría, que desaparece la inversión tropopáusica. Se usaba un radiosonda cuyo límite inferior de temperatura era del orden de -88°C y se nos salió de escala tres veces durante el invierno.

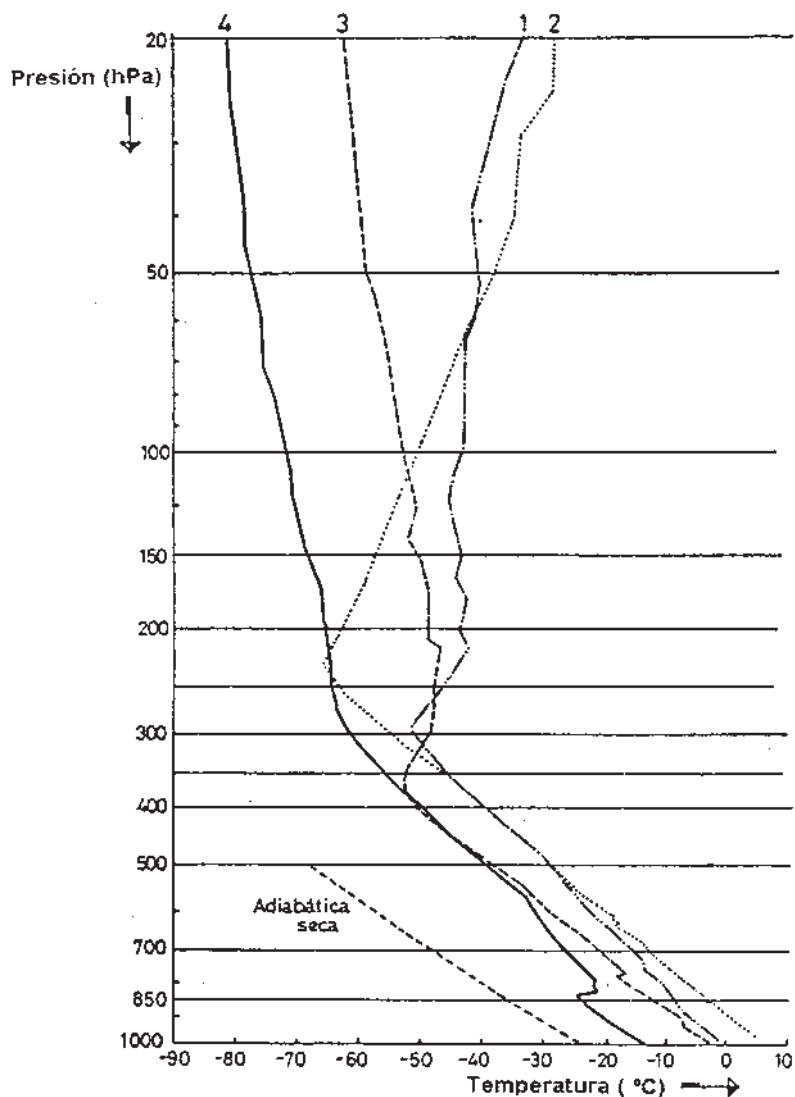


Figura 5. Radiosondeos tomados en la estación antártica chilena «Presidente Gabriel González Videla» durante el año 1961. El sondeo n° 4, realizado el 17 de julio, muestra las características ausencia de inversión tropopáusica y estratosfera extremadamente fría, ambas típicas del aire en el interior del vórtice. (Adaptada de Puigcerver, 1967).

Como las NEP —esenciales, como se ha visto, para la destrucción del ozono— sólo se forman a temperaturas vecinas a -80°C , son mucho más abundantes y persistentes en la Antártida que en el Ártico, donde su escasez y limitada duración les impide realizar una desnitrificación efectiva de la estratosfera.

Inquietudes

Tras lo expuesto, surge espontáneamente cierto número de preguntas. Sin pretender agotar la cuestión, he aquí algunas:

1. ¿Por qué apareció el agujero hacia en decenio de 1970?
2. ¿Puede algo semejante ocurrir en el hemisferio Norte?
3. ¿Podría el agujero extenderse a latitudes medias?
4. Si fuese así ¿comportaría algún riesgo para los seres vivos?
5. En caso afirmativo ¿hasta qué punto sería peligroso?

La respuesta a la primera parece sencilla. El uso industrial de los halocarburos data aproximadamente de 1950; hizo falta alrededor de veinte años para que esos gases, descuidadamente lanzados a la atmósfera, llegasen hasta la estratosfera.

Si la explicación del agujero que se ha expuesto es correcta, la respuesta a las dos preguntas siguientes ha de ser negativa, pues en ningún otro lugar de la Tierra se dan las condiciones antárticas: un vórtice extraordinariamente intenso y aislado que impide el intercambio no sólo de calor, sino de materia con del resto del hemisferio; las temperaturas excepcionalmente bajas, consecuencia de ello y de la noche polar, y la formación y persistencia de nubes estratosféricas polares que desnitrifican la estratosfera. Nada de ello sucede en el Ártico, donde el vórtice, mucho más débil y menos zonal, se destruye al menos una vez durante el invierno como consecuencia de la advección de aire más cálido. Ya se ha indicado el dominio de temperaturas árticas; las NEP son pues escasas y esporádicas. En consecuencia, aunque en algunos puntos se destruye el ozono —*miniagujeros*— son transitorios, de extensión limitada y comparativamente poco profundos.

Pese a ello, parece inquietantemente claro que en las latitudes medias del hemisferio Norte el contenido total de ozono ha estado disminuyendo a razón de entre 1 a 6% por decenio, dependiendo de la estación del año y la latitud, y la mayor parte de la disminución tiene lugar en la baja estratosfera. Esto contradice la explicación anterior, según la cual la máxima destrucción debería tener lugar donde es máxima la irradiancia ultravioleta, es decir, a grandes alturas. Parece, pues, que la explicación no es del todo correcta y se deberá revisar o completar. Se ha sugerido que el mecanismo del dímero $(\text{ClO})_2$ puede no ser el único medio de destrucción del ozono y se ha especulado también sobre la posibilidad de que el aerosol estratosférico de sulfatos, muy abundante en el hemisferio Norte, desempeñe un papel similar al de las NEP. Aunque no sea de esperar una destrucción masiva del ozono como en el agujero antártico, hay poca duda de que en nuestro hemisferio se está produciendo un empobrecimiento, por ahora lento y leve.

El efecto de este empobrecimiento de ozono sobre los seres vivos estriba en el aumento de la dosis de radiación UV-B que recibirían. No es fácil cuantificar el aumento de UV-B en función de la disminución de O_3 porque tanto el vapor de agua como las nubes actúan en sentido contrario y de manera complicada. Tampoco es sencillo el problema de la dosis porque la irradiancia UV-B recibida depende de la concentración de O_3 pero también de la inclinación del haz solar, a su vez función de la latitud y la época del año. Por estas razones, gran parte de la información que sigue debe considerarse con suma reserva. Se suele mencionar el incremento de lesiones oculares y cutáneas e incluso alteraciones de los ADN portadores del código genético como consecuencia del aumento de la dosis de UV-B ; algunos investigadores médicos (Scott, 1984) han estimado que un aumento de $n\%$ de la irradiancia UV-B recibida llevaría consigo un aumento de $2n\%$ de los casos de cáncer de piel. Se ha hablado también de extrañas enfermedades oculares en el

ganado en el Sur de Chile, reducción de cosechas, reducción del fitoplancton con las consiguientes alteraciones ecológicas, etc. Todo ello está pendiente de un estudio riguroso y profundo.

Referencias

- Cacho, J. y Sainz de Aja, M. J. 1989. *Antártida - El agujero de ozono*. Tabapress, Madrid, 250 pp.
- Cacho, J., 1990: "El ozono estratosférico en las próximas décadas: Variaciones naturales y efectos de la contaminación". En: «Ozono estratosférico y agujero de ozono». *Mem. Real Acad. Ciencias y Artes Barcelona*, **884**, L, 2, 79-102.
- Crutzen, P. J., 1970: «The influence of nitrogen oxides on the atmospheric ozone content». *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **96**, 320-325.
- Chapman, S., 1930: «On ozone and atomic oxygen in the upper atmosphere». *Phil. Mag.*, **10**, 369.
- Chubachi, S., 1984: «A special ozone observation at Syowa station, Antarctica, from February 1982 to January 1983». En *Atmospheric Ozone*. C. Zerefos y A. Ghazi, Eds. Dordrecht, Reidel, 285-289.
- Dobson, G. M. B., 1957: «Observers' Handbook for the ozone spectrophotometer». *Annals Int. Geophys. Year*, V, Pt. I., 48-49. Pergamon Press.
- Farman, J. C., B. C. Gardiner y J. D. Shanklin, 1985: «Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal Cl_x/NO_x ». *Nature*, **315**, 207-210.
- Gil, M., 1990: "Introducción al ozono estratosférico: origen, evolución y dinámica estratosférica". En: «Ozono estratosférico y agujero de ozono». *Mem. Real Acad. Ciencias y Artes Barcelona*, **884**, L, 2, 5-21.
- Hales, J., 1996: «Scientific background for AMS policy statement on atmospheric ozone». *Bull. Am. Met. Soc.*, **77**, 6, 1249-1253.
- Halpert, M. S., G. D. Bell, V. E. Kousky y C. F. Ropelewski, 1996: «Climate assessment for 1995». *Bull. Am. Met. Soc.*, **77**, 5, S1-S44.
- Hamill, P. y O. B. Toon, 1991: «Polar stratospheric clouds and the ozone hole». *Phys. Today*, Dec. 1991, 34-43.
- Johnston, H. S., 1971: «Reduction of stratospheric ozone by nitrogen oxide catalyst from supersonic transport exhaust». *Science*, 173, 517-522.
- Molina, L. T. y M. J. Molina, 1987: «Production of Cl_2O_2 by the self reaction of the ClO radical». *J. Phys. Chem.*, **91**, 433-436.
- Molina, M. J. y F. S. Rowland, 1974: «Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: Chlorine atom catalyzed destruction of ozone». *Nature*, 249, 810.
- Palmer, C. E., 1959: «The stratospheric polar vortex in winter». *J. Geophys. Res.*, **64**, 7, 749-764.
- Palmer, C. E., y R. C. Taylor, 1960: «The vernal breakdown of the stratospheric cyclone over the South Pole». *J. Geophys. Res.*, **65**, 10, 3319-3329.
- Puigcerver, M., 1967: "Upper air observations at González Videla Station, Antarctica, during 1961". En «Polar Meteorology», *Tech. Note No. 87, W.M.O. - No. 211. T.P. 111*, 307-323.
- Sainz de Aja, M. J., 1990: "El agujero de ozono". En: «Ozono estratosférico y agujero de ozono». *Mem. Real Acad. Ciencias y Artes Barcelona*, **884**, L, 2, 23-49.
- Scott, E. L., 1984: «Epidemiology of skin cancer under increasing UV radiation». *INDO-US Workshop on Global Ozone Problem*, 235.