

LA ESTRATOSFERA POLAR, BASURERO ATMOSFERICO

La alarma del «agujero»

El descubrimiento de un alarmante debilitamiento de la capa de ozono sobre la Antártida durante la primavera austral ha puesto en marcha el esfuerzo de los científicos especialistas para descubrir cuáles son los procesos químicos y dinámicos que explican el fenómeno.

La primera alarma de que algo estaba sucediendo con el ozono en la Antártida fue dada por Sigeru Chubachi que, en la base antártica japonesa de Syowa, llevó a cabo una serie de sondeos a ritmo semanal entre febrero de 1982 y enero de 1983. Un resumen del trabajo realizado fue presentado por él mismo en el Symposium Cuatrienal del Ozono, que tuvo lugar en Malkidiki (Kasandrá) Grecia, en septiembre de 1984. Su trabajo pasó desapercibido, quizá porque fue presentado en una sesión de carteles o porque su autor se expresaba con mucha dificultad en inglés. Los más significativos gráficos de este trabajo pueden verse en la figura.

Chubachi no pretendió dar explicaciones al extraño fenómeno, limitándose a exponer lo que él había observado.

El 16 de mayo de 1985, la revista semanal «Nature», que se vende en los kioscos, pero que tiene un nivel científico indiscutible, publicó un breve artículo, firmado por Farman Gardiner y Shanklin del British Antarctic Survey, en el que dieron por primera vez el nombre de «hole» (agujero) a la disminución del ozono sobre la Antártida durante la primavera. La anomalía se venía observando desde 1979 y los resultados no fueron publicados antes de revisar el buen estado del instrumento Dobson que sirvió para detectarlo. Este espectrofotómetro, capaz de medir el espesor de la capa de ozono, había estado instalado en la base de Halley Bay, que mantiene el Reino Unido en el continente antártico desde 1960. Los autores dieron una interpretación científica al fenómeno, atribuyendo la principal responsabilidad de la masiva destrucción del ozono a los radicales de cloro procedentes de los halocarburos emitidos a la atmósfera.

La agencia gubernamental estadounidense NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) se apresuró entonces a revalidar los datos del viejo instrumento TOMS del satélite Nimbus 7 que, a causa del deterioro causado por el impacto de los micrometeoritos en sus ventanas de captación luminosa, estaba previsto darlo de baja en breve plazo y, cuyos datos para las zonas polares habían sido sistemáticamente desechados por erróneos desde poco después de su puesta en servicio, y publicó las célebres imágenes en falso color que han popularizado en el mundo entero el «agujero» del ozono.

Era inevitable que inmediatamente surgiese la polémica: Que si causas naturales, que si consecuencia de la contaminación atmosférica. En general, los defensores del origen natural propusieron razones de tipo dinámico, en combinación con ciclos anuales de especial actividad solar, mientras que los que le atribuían como origen la contaminación atmosférica se contaban principalmente alrededor de la tesis de Farman y colaboradores, considerando que la causa estaba en los halocarburos.

Poco a poco el misterio parece haberse ido desvelando y, actualmente, es mayoritariamente admitido que la rápida disminución del ozono estratosférico durante la pri-

mavera antártica tiene un origen antropogénico en combinación con las especiales condiciones dinámicas y de temperatura que se dan en el invierno sobre la Antártida en esta capa atmosférica.

El ozono ya había dado otros sustos

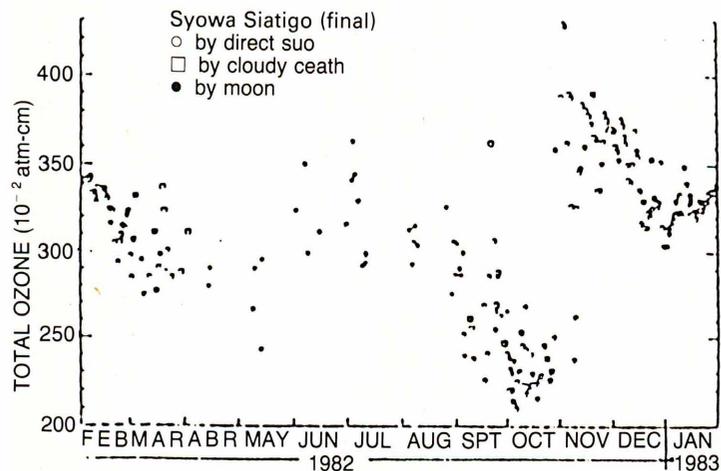
El tema del ozono atmosférico ya había producido alarmas anteriormente. Al comienzo de la década de los setenta, el anuncio de los vuelos supersónicos comerciales que, por razones principalmente económicas han de transcurrir a alturas estratosféricas, había preocupado a los científicos y provocado que se realizasen muchos estudios sobre el impacto que podrían tener estos vuelos sobre la capa de ozono.

El esfuerzo desarrollado con estos estudios no había tenido precedentes en el afán de comprender los mecanismos que controlan el equilibrio del ozono en la atmósfera. Puede decirse que, en estas fechas, nace la química estratosférica. No es una casualidad que sea en 1974 cuando, dos profesores de la Universidad de Irvine (California), Mario Molina y Serwood Rowland, publiquen su trabajo sobre la descomposición de los halocarburos en la estratosfera por la acción de la radiación ultravioleta solar. A partir de este momento, y también porque la aviación comercial supersónica no se desarrolla según las previsiones, la preocupación por el posible deterioro de la capa de ozono se centró sobre la emisión de halocarburos a la atmósfera. Se elaboran modelos de tendencia y cunde de nuevo la alarma sobre la amenaza del previsto debilitamiento de la protectora capa de ozono. El Congreso de los Estados Unidos decide limitar la fabricación de halocarburos y presiona al resto de los países para que hagan lo mismo.

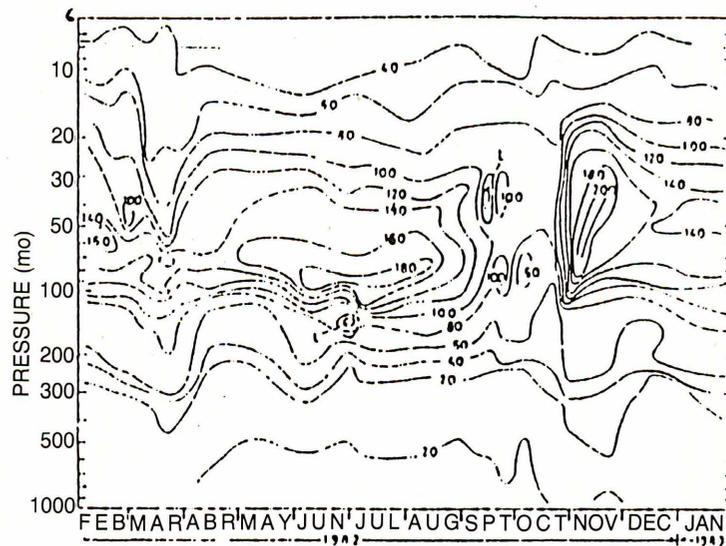
Al comienzo de la década de los ochenta, cuando ya han transcurrido unos años desde que Molina y Rowland descubrieron, en el laboratorio, su célebre proceso de disociación de las moléculas de los halocarburos por la acción de la luz ultravioleta, ya ha habido cierto tiempo para contrastar la validez de las alarmantes previsiones sobre la destrucción del ozono dadas por los modelos. Se observa que el espesor de la capa de ozono no parece estar tan afectado como anunciaban los modelos. Entonces se empieza a dudar de la efectividad en la atmósfera de las reacciones propuestas por Molina y Rowland en 1974. Las observaciones demuestran que el ozono no es tan vulnerable como se suponía y, por ahora, podemos estar tranquilos. El estudio del ozono atmosférico llega a perder algo de interés y muchos grupos de investigadores abandonan esta área de trabajo. Tuvo que aparecer el «agujero» del ozono en la Antártida para que el tema recobrase la atención de los científicos y ganase la del gran público. Porque es a partir de este momento cuando el interés sobre el ozono atmosférico gana la calle. Es entonces inevitable que los políticos de los países más convencionalmente democráticos se ocupen del tema. Con esta consideración no puede sorprender que Thatcher y Rocard se conviertan ahora en paladines del ecologismo, provocando un giro de 180 grados en la política de sus respectivos gobiernos.

Las nubes estratosféricas polares, cubos de basura atmosférica

Entre una de las primeras explicaciones dadas al fenómeno del ozono en la Antártida, está la Paul Crutzen y Frank Arnold, publicada también en «Nature» al año 1986. Consideran a los halocarburos como los principales responsables, y responsabilizaron a las nubes estratosféricas polares (NEPs) de ser el soporte donde se almacenan y concentran, durante el invierno antártico, las sustancias que en la primavera, con los primeros rayos solares, quedarán libres y provocarán la rápida destrucción del ozono.



Total ozone measured at Syowa Station from February 1982 to January 1983 (corrected). Open circles: direct sun measurement, Squares: cloudy zenith measurement: Filled circles: moon measurement.



Time-height cross section of partial pressure of ozone at Syowa Station from February 1982 to January 1983 constructed from 22 ozonesonde observations (corrected) (unit: 10^{-6} mb) (Chubachi, 1984).

No vamos a detallar los procesos químicos propuestos por Crutzen y Arnold en relación con las NEPs, pero sí que haremos algunas consideraciones sobre este tipo de nubes.

Antes de la era de los satélites las observaciones de nubes en la estratosfera fueron escasas.

Sólo unas 300 veces fueron citadas en la centuria que va desde 1870 a 1970 (Stanford y Davies, 1974). Casi todas estas nubes fueron observadas durante el invierno en altas latitudes, y correspondieron a las conocidas como nubes nacaradas o nubes «madreperla», que adquieren esta forma debido al enfriamiento adiabático del aire en los lugares alcanzados por las ondas orográficas. Las observaciones que realizó el experimento orbital SAM II (Stratospheric Aerosol Measurement II) a partir de finales de los años 70 muestran la existencia de estas nubes en la estratosfera invernal sobre ambas regiones polares. En los análisis de estos datos aparecen estas nubes fuertemente correlacionadas con las temperaturas muy bajas, próximas a 195 K, en regiones estratosféricas de escala sinóptica.

Las nubes estratosféricas polares del Artico han sido también observadas, durante algunos períodos de tiempo limitados, mediante sistemas lidar desde aviones. Se ha observado que la localización de las nubes coincide con zonas de temperatura ambiente por debajo de 193 K y presentan típicos picos de retrodispersión en proporción 10 a 30, con valores máximos de hasta 80 (Mc Cormick y otros, 1985).

En la Antártida se han llevado a cabo también observaciones con lidar desde el suelo (Iwasaka y otros, 1985, 86). Los resultados de estas observaciones muestran un incremento de los aerosoles estratosféricos durante el invierno (por encima de un factor de 10).

No está claro que las nubes nacaradas, observadas visualmente durante el siglo pasado, correspondan a las medidas del coeficiente de extinción que se ha descrito antes, o si los correspondientes aerosoles atmosféricos que las provocan puedan ser vistos por observadores desde el suelo. Para entedernos, llamemos NEPs (nubes estratosféricas polares) a las situaciones de coeficiente de extinción incrementado, sin pensar si serían capaces o no de ser vistas desde el suelo por un observador humano.

Actualmente hay tres teorías sobre los NEPs. La primera o histórica (Steele y otros 1981, Hamill y Mc Master, 1984) consiste en suponer que las partículas estratosféricas naturales aumentan desde un radio de alrededor de 0,1 hasta 0,5 micras, mientras la temperatura atmosférica se aproxima y alcanza la saturación con respecto al agua o al hielo.

Más recientemente, Toon y otros (1986) y Hamill y otros (1986) han propuesto un proceso según el cual los NEPs se forman a partir de la condensación del vapor de HNO₃ sobre cada una de las partículas del aerosol estratosférico de fondo, cuando las temperaturas están por debajo de unos 200 K y que la composición de las partículas finales, a las temperaturas más bajas (aprox. 190 K), viene a ser de un 50 % de ácido nítrico en agua, con un radio de 0,5 micras.

Una tercera teoría ha elaborado Heymsfield (1986) quien ha señalado que la temperatura y la altura de los NEPs son muy similares a las de ciertas nubes tropicales del tipo cirrus. Se ha observado que estas nubes están formadas por varios tipos de cristales de hielo con un diámetro medio de unas 5 micras (aunque existen algunos

de hasta aproximadamente 50 micras, una concentración másica de alrededor de 1 ppmv (comprable con la masa de agua disponible) y unas concentraciones de partículas de hielo varias órdenes de magnitud inferiores al número de partículas de aerosol presentes.

La participación de las NEPs en el proceso de destrucción del ozono en las zonas polares parece ya fuera de toda duda después de las campañas de medidas, realizadas con todo lujo de medios, en la estratosfera invernal polar. En el año 1987, se llevó a cabo la campaña sobre el Antártico y este año, 1989, sobre el Artico.

El papel de las NEPs como depósitos de contaminantes nocivos para el ozono se ha puesto claramente de manifiesto.

En el hemisferio Norte, de momento, nos estamos librando de la aparición de los temidos agujeros de ozono porque nuestra estratosfera invernal polar es mucho más inquieta, desde el punto de vista dinámico, y deshace los «odres de basuras» (las NEPs) antes de que aparezca la luz solar que desencadene el proceso de destrucción. Además la inestabilidad circulatoria rompe, en ocasiones, el torbellino polar permitiendo que aire de más bajas latitudes, más rico en ozono, renueve el desgastado ozono estratosférico polar.

Lo que podemos esperar

Lo que va a ocurrir en el futuro, más o menos lejano, es la principal cuestión que tiene planteada la ciencia meteorológica y, también, su aplicación más popular.

A todos nos interesa lo que va a pasar con el equilibrio del ozono atmosférico, porque nos han dicho que un desplazamiento hacia menos ozono en la estratosfera, nos puede crear problemas en nuestra ya complicada vida.

Lo que voy a decir a continuación tiene una fuerte componente de especulación no científica, por tanto no demostrable, aunque, eso sí, dicho con la confianza que da la experiencia propia de haber, hasta ahora, acertado en casi todos los casos en los que he dejado actuar lo más libre de mi imaginación. Es este un método que me resulta útil cuando quiero ir un poco por delante de los acontecimientos en el tema del ozono atmosférico, que es mi tema desde hace diecisiete años. La verdad es que pocas veces lo he practicado públicamente. Creo que es mi creciente afición por el riesgo lo que me lleva a hacerlo.

La cantidad de nubes estratosféricas está aumentando en todas las latitudes. Espero que esta afirmación sea pronto refrendada por las medidas. Probablemente ya pueda ser confirmado mediante el procedimiento tradicional de la observación visual, pero creo que la instrumentación de la nueva generación de satélites pronto lo confirmará sin ningún género de dudas.

Estas nubes estratosféricas son, generalmente, del tipo cirrus, formadas por partículas sólidas de agua congelada, polvo, H₂SO₂, HN₃, HCL, etc.

La abundancia de las NEPs no es nada más que una consecuencia de la abundancia de las nubes estratosféricas en general.

Sabemos que, es en las latitudes bajas y medias donde más fácilmente puede pro-

ducirse la entrada de aire, procedente de las capas bajas troposféricas húmedas y contaminadas. Esto se debe a las fuertes corrientes convectivas que, en ocasiones, se originan en las capas bajas de la atmósfera en estas latitudes. Además, sobre todo en las latitudes medias del hemisferio norte, existen grandes masas de vapor de agua y de contaminación introducidas directamente en la estratosfera por los aviones a reacción (Cisneros, 1987). Se calcula que, las masas totales de vapor de agua y de óxidos de nitrógeno emitidos por los aviones que vuelan por encima de los 10.000 m. de altura en el período de un año, son aproximadamente equivalentes a las que hay, de estos gases, en un momento dado en toda la estratosfera del planeta. No resulta, por esto, demasiado arriesgado decir que el contenido total de agua está aumentando en la estratosfera.

No hay nada más que levantar la vista hacia el cielo para observar cómo éste llega en ocasiones, a cubrirse con las estelas de condensación producidas por los aviones. Ahora bien, las estelas sólo se forman en determinadas condiciones del medio donde se producen las emisiones, pero sabemos que las emisiones se producen siempre que pasa un avión, se observe o no estela de condensación.

El regreso del vapor de agua estratosférico a la troposfera se realiza, sobre todo por las latitudes (Brewer, 1949). Según esto, en las latitudes altas de ambos hemisferios se sumará, a la normal de deposición troposférica (lluvia, nieve y contaminantes), la deposición procedente de la estratosfera (en particular de las nubes estratosféricas más o menos polares). Todo esto, podría explicar por qué castigan con más intensidad las lluvias ácidas las regiones situadas en las latitudes altas.

Desde mediados de la década de los 70 se conoce muy bien las cifras de las emisiones de los aviones. La realidad ha superado con creces las previsiones que se hicieron por aquellos años, para los vuelos subsónicos en el año 1990. Sabido es que la altura de la tropopausa en las zonas polares es de unos 8 Km y que, hacia los 45 grados de latitud puede situarse hacia los 10,5 Km en promedio. Sin duda, se puede asegurar que casi el 40 % de los vuelos comerciales que se realizan en el mundo son estratosféricos. Lo malo de estos vuelos es que introducen en la estratosfera grandes masas de sustancias que, de forma natural, nunca hubiesen alcanzado esta capa atmosférica. La química de la estratosfera, particularmente activa, está siendo profundamente alterada. Por otro lado, la depuración de la atmósfera, por el procedimiento natural y habitual de la lluvia, no puede tener lugar en la estratosfera. Sólo quedan las zonas de las altas latitudes como lugares para eliminar las basuras estratosféricas. ¿Cuáles pueden ser las consecuencias de todo esto? Creo que ya las estamos viviendo. Lo que ocurre ahora es una débil muestra de lo que nos depara el futuro.

Juan M.^a Cisneros
Meteorólogo

Madrid, Noviembre 1989

BIBLIOGRAFIA

- BREWER, A. W. «Evidence for a world circulation provided by measurement of helium and water vapor in the stratosphere». *Quart. J. Roy Meteor. Soc.*, 75, 351-363, 1949.
- CISNEROS, J. M. «Relaciones entre la contaminación de los aviones y la destrucción del ozono atmosférico». *Actas del II Symposium Español de Estudios Antárticos, Madrid 13-17 julio, págs. 149-160, 1987.*

- CISNEROS, J. M. *La disminución del ozono en la Antártida. Transporte atmosférico de contaminantes a larga distancia*. Univ. de Valladolid, págs. 71-80, 1989.
- CHUBACHI, S. «Preliminary result of ozone observations at Syowa station from February 1982 to January 1983». *Memoirs of Nac. Ins. of Polar Research, Special Issue No. 34*. Tokyo, December 1984.
- CRUTZEN, P. J., and F. ARNOLD. «Nitric acid cloud formation in the cold Antarctic stratosphere: a major cause for the springtime «ozone hole». *Nature*, 324, 651-655, 1986.
- DANIELSEN, E. F. «A dehydration mechanism for the stratosphere». *Geophys. Res. Lett.*, 9, 605-608, 1982.
- FARMAN, J. C. GARDINER and J. D. SHANKLIN. «Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClOx/NOx interaction». *Nature*, 315, 207-210, 1985.
- HAMILL, P.; O. B. TOON and R. P. TURCO. «Characteristics of polar stratospheric clouds during the formation of the Antarctic ozone hole». *Geophys., Res. Lett.*, 13, 1288-1291, 1986.
- HAMILL, P., and L. R. McMASTER (Eds.). *Polar stratospheric clouds*, NASA Conf. Publ., NASA CP 2318, 1984.
- HEYMSFIELD, A. J. «Ice particles observed in a cirriform cloud at -83 C and implications for polar stratospheric clouds». *J. Atmos. Sci.*, 43, 851-855, 1986.
- IWASAKA, I. «Large de polarization ratio of the winter Antarctic Stratosphere aerosol layer: lidar measurements at Syowa station (69°00' S; 39°35' E)». *Antarctica, J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 64, 303-309, 1986.
- IWASAKA; Y. T. MIRASAWA and M. FUKUNISHI. «Lidar measurement on the Antarctic stratospheric aerosol layer, I. Winter enhancement, J. Geomagn.» *Geoelectr.*, 37, 1098-1098, 1985.
- MCCORMICK, M. P.; P. HAMILL and U. O. FARRUKH. «Characteristics of polar stratospheric clouds as observed by SAM, sage and lidar». *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 63, 267-276, 1985.
- STANFORD, J. L., and DARIES. «A century of stratospheric cloud reports: 1870-1972, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 55, 213-219, 1974.
- STEELE, H. M.; P. HAMILL, P. MCCORMICK and T. J. SWISSLER. «The formation of polar stratospheric clouds», *J. Atmos. Sci.*, 12, 517-529, 1981.
- TOON, O. B.; P. HAMILL, R. P. TURCO and J. PINTO. «Condensation of HNO₃ and HCl in the winter polar stratospheres». *Geophys. Res. Lett.*, 13, 1284-1287, 1986.