

## EL DETERIORO DE LA CAPA DE OZONO

Juan M.<sup>a</sup> Cisneros Sánchez  
Meteorólogo

*«No pida yo nunca estar libre de peligros, sino de miedo para afrontarlos».* (Rabindranaz Tagore).

Buenas tardes.

Voy a contaros algunas cosas sobre el ozono atmosférico, y sobre su deterioro como consecuencia de la contaminación. Si logro producir inquietud en mi auditorio, sé que éste se concretará en acciones para ponerle remedio y, con esto, me sentiré muy bien recompensado.

### ¿Qué es el ozono?

El nombre se lo dio Schönstein, un alemán que nació el último año del siglo XVIII. Lo tomó de una raíz griega que significa oler. Realizó las primeras investigaciones sobre la química del ozono.

A Schönstein se le puede considerar el abuelo y fundador de la química del aire. Fue el primero que propuso la primera red de estaciones de medidas de ozono del aire, que se concretó para varias ciudades europeas (Viena, por ejemplo, realizó medidas entre 1853 y 1920). Las medidas se hicieron mediante los papeles de yoduro potásico almidonado (papeles ozonoscópicos)

Durante muchos años fue considerado un peróxido de hidrógeno. Fue Soret, en 1863, quien probó que sólo se componía de oxígeno. Más tarde demostró que la relación entre el oxígeno y el ozono era tal que tres volúmenes de oxígeno producen dos volúmenes de ozono. Ahora decimos que su molécula es O<sub>3</sub>.

El ozono y el oxígeno son dos formas del mismo elemento, pero sus moléculas respectivas poseen cantidades diferentes de energía química. Estas formas diferentes de un mismo elemento se llaman alotrópicas.

En 1880 Walter Hartley descubre una fuerte banda de absorción de la luz solar entre las longitudes de onda de 200 y 320 nm que evidentemente corresponden al U.V. Se atribuyó este efecto a la presencia de ozono en el aire y además, teniendo en cuenta las bajas concentraciones del ozono observadas en la superficie, propuso que el ozono atmosférico tenía que presentar una distribución en capa, esto es, encontrarse una zona de alta concentración en las capas altas de la atmósfera.

William Huggins descubrió en 1890, la absorción del U.V. en la banda de 320-360 nm. Usó como foco de luz la estrella Sirio. Hasta 1917 (Fowler y Strutt) no se supo que esta absorción se debía al ozono atmosférico.

Fue Charles Fabry, en 1913, junto con Buisson, quien probó la existencia de la capa de ozono en la alta atmósfera mediante medidas con el U.V. En 1920, también junto con Buisson, realizó las primeras medidas de ozono total en columna de la atmósfera: 3 mm. de ozono, pero en condiciones normales.

En 1924, el inglés Gordon Dolson desarrolla el primer espectrofotómetro para la medida del ozono total por medio de la absorción del U.V. En 1926 se establece la primera red de estos ins-

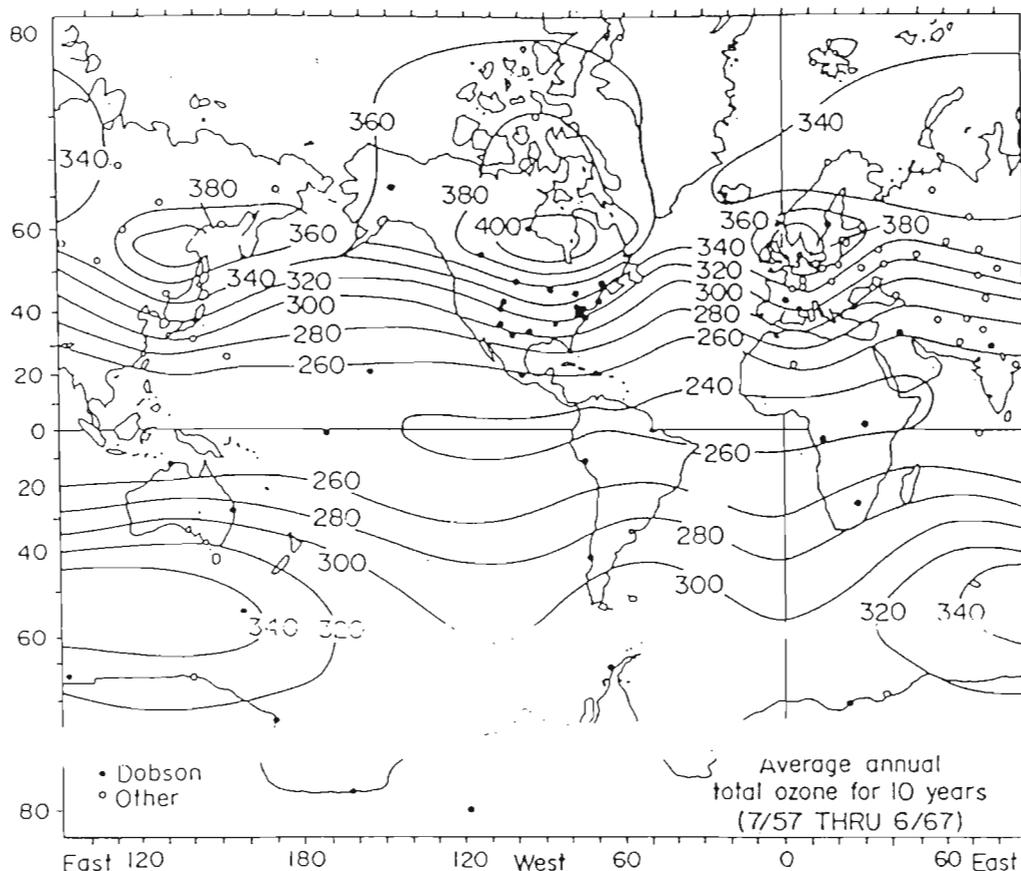


Figura 1.—Media de la distribución total del ozono a escala mundial en el periodo 1957-1967 expresado en m-atm-cm (unidades Dobson). Los puntos y pequeños círculos indican la posición de las estaciones de observación.

trumentos compuesta por 6 de ellos. Dolson fue el primer presidente de la Comisión Internacional del Ozono, que se constituyó en 1948.

Sydney Chapman presentó, en 1929, el primer modelo fotoquímico para explicar el comportamiento del ozono atmosférico. Este modelo, en gran parte aún aceptado, será objeto de nuestra atención un poco más adelante.

En 1934, Paul Götz publicó, junto con Meetham y Dobson, el famoso procedimiento de cálculo teórico de la distribución vertical del ozono. Se basaba en el efecto «Umkehr» descubierto por él mismo en 1929. Por estos cálculos se encontró que la concentración máxima de ozono se encuentra hacia los 22 km de altura.

Las primeras medidas experimentales de distribución vertical de ozono atmosférico fueron

realizadas por Erich Regener el 31 de julio de 1934. Usó un espectrómetro de U.V. con registro fotográfico a bordo de un globo.

Otros célebres investigadores del ozono atmosférico, entre lo ya fallecidos fueron Normand, Ramanathan, Ehmert, Hesstredt y Craig.

### Modelo de Chapman

El oxígeno constituye, aproximadamente, el 21 % de la atmósfera terrestre hasta los 85 km. Es hasta esta altura para lo que pueden considerarse constantes las proporciones de mezcla de los gases de onda media-larga que forman la atmósfera, no dependiendo, por tanto, de sus densidades, la distribución vertical es totalmente uniforme.

Como toda la atmósfera, el oxígeno se encuentra ligado a la historia geológica y biológica de la Tierra.

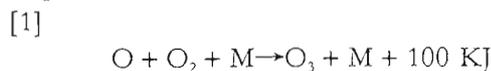
En un principio la conjunción de diversas sustancias, dio lugar a los primeros organismos vivos. Como producto gaseoso de tal actividad vital apareció el dióxido de carbono. Cuando este producto fue lo suficiente abundante aparecieron los primeros organismos capaces de aprovecharlo mediante la fotosíntesis. Los seres con clorofila se extendieron y produjeron abundancia de oxígeno en la atmósfera y de carbono en el suelo. El ozono hizo su aparición cuando la abundancia de oxígeno fue suficiente. La absorción de la radiación ultravioleta solar por el ozono permitió a los seres vivos abandonar las profundidades de las aguas donde vivían.

El oxígeno pasó a ser el principal alimento para muchas formas de vida. Las necesidades de oxígeno se incrementaron enormemente para las formas de vida llamadas inteligentes (?). De tal manera que pueden haber llegado a constituir una amenaza para toda la vida del planeta.

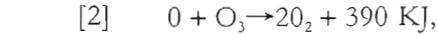
El oxígeno es un gas diatómico. Su forma más estable que presenta es la constituida por moléculas formadas por dos átomos.

El oxígeno molecular se descompone en atómico por la acción de la luz solar de longitud de onda inferior a los 242 nm. La absorción de energía radiante de esta longitud de onda es ya apreciable por debajo de los 1.000 km y su liberación por recombinación para volver a formar el oxígeno molecular es responsable de las altas temperaturas (próximas a los 1.000.° C) de la termosfera.

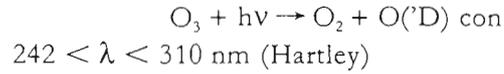
El ozono empieza a formarse hacia los 80 km de altura, donde se sitúa la mesopasa, cuando la abundancia de moléculas y de átomos de oxígeno, y de otras moléculas, es suficiente para que se produzca la reacción



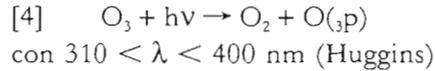
La formación del ozono, según este proceso, es simultánea con la destrucción del mismo, tanto química como fotoquímica según



[3]



y



De esta manera casi todas las radiaciones solares de longitud de onda menor que 400 nm son absorbidas por la atmósfera antes de llegar al suelo.

Las reacciones [1] y [2] son las causantes de que aparezca un máximo de temperatura hacia los 45 km de altura, que define la estratopausa (0°-10.° C).

El conjunto de las cuatro reacciones [1], [2], [3] y [4] gobiernan el contenido del ozono por debajo de los 80 km de altura y dan lugar a la aparición de un máximo de ozono que si se mide en presión parcial, aparece situado hacia los 22 km de altura en nuestras latitudes. El contenido de ozono, en un punto de la atmósfera terrestre, dependerá, por tanto, según este esquema, de la altura, de la latitud geográfica y de la época del año, ya que no hemos hecho intervenir en la explicación nada más que la presión del oxígeno y la radiación solar.

*La realidad no es tan simple*

Este bonito esquema fue expuesto, como dijimos antes, por Chapman en el año 1929. En muchos aspectos puede considerarse aún válido aunque existen discrepancias importantes como consecuencia de no haber tenido en cuenta los movimientos horizontales y verticales de la atmósfera y la presencia de otros gases, que han resultado ser químicamente muy activos.

En los años 50 y 60 se estudió intensamente la dinámica estratosférica, viéndose con sorpre-

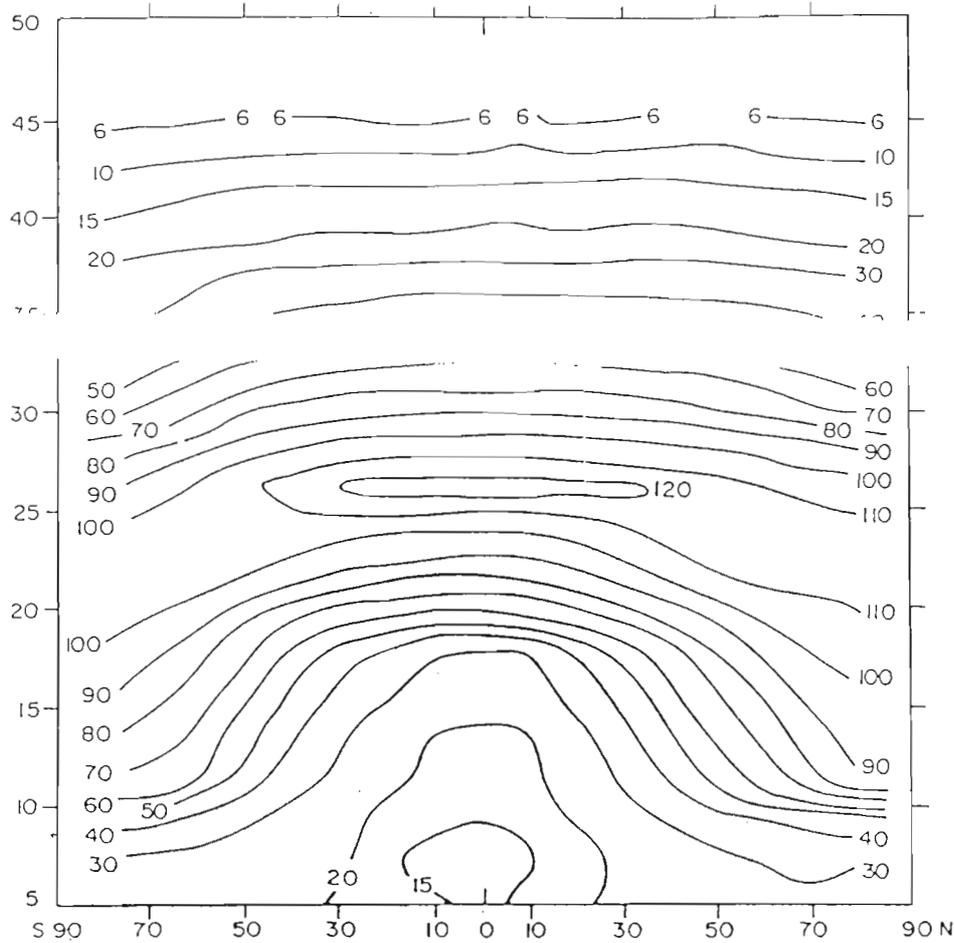


Figura 2.—Distribución vertical del ozono, en  $\mu\text{mb}$ . Variación media de la distribución vertical del ozono (presión parcial en  $\mu\text{mb}$ ) como función de la latitud. Las curvas están basadas en 8.500 perfiles y sondeos de ozono entre 1956 y 1966 (Bojkov).

sa, que no era tan estable como se suponía. Intensas corrientes zonales se detectan en ambos hemisferios en las latitudes altas y medias, del Oeste en invierno y del Este en verano, y fuertes inestabilidades se descubren en el hemisferio Norte. En especial el estudio del llamado «calentamiento súbito» de mitad del invierno, descubierto por Serhag en 1956, constituye un desafío, observándose significativas diferencias entre ambos hemisferios. Es a mediados de los años 70 cuando este curioso fenómeno estratosférico, en el que se producen subidas de hasta  $50^{\circ}\text{C}$  en las temperaturas del aire a los 40 ó 50 km de altura, en el corto tiempo de un par de días y cambio de sentido de los vientos de todo el hemisferio, pasando de intensidades de más de 100 kt del Oeste a 50 Kt del Este, también a estas al-

turas de 40 ó 50 Km, parece quedar perfectamente aclarado.

La causa se encuentra en las ondas inducidas en la estratosfera desde la superficie terrestre, que provocan la inestabilidad del flujo estratosférico en el torbellino polar del invierno en el Hemisferio Norte. No sucede lo mismo en el Sur, donde la configuración de tierras y mares no provoca estas inestabilidades.

El mito de la estabilidad dinámica de la estratosfera queda así definitivamente abandonado a mediados de los 70.

La estabilidad química de la estratosfera no era cuestionada antes de 1970. Al comienzo de

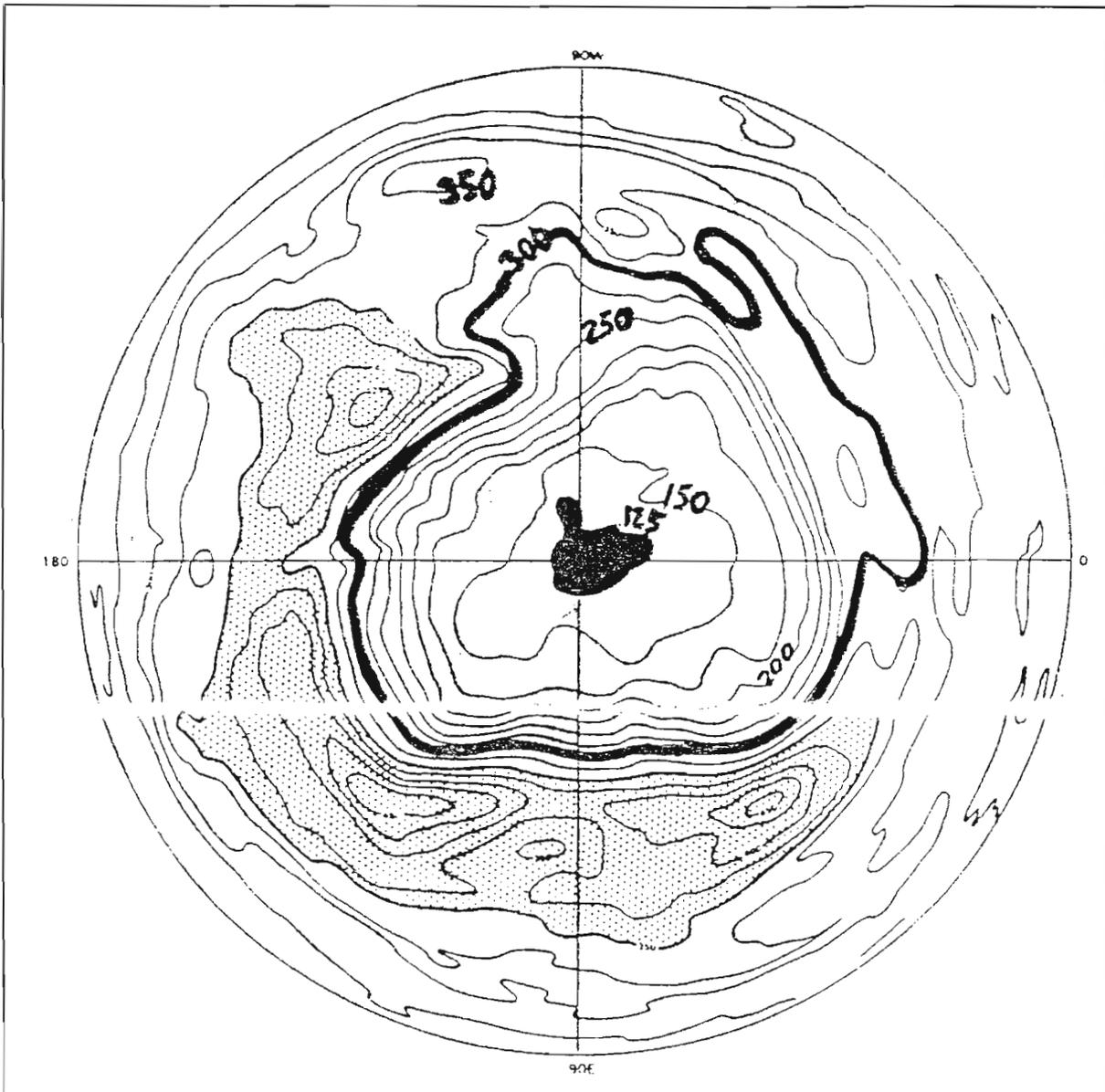
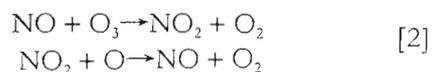
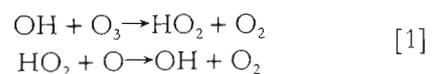
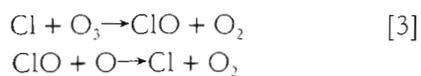


Figura 3.—Observación del «agujero de ozono» sobre la Antártida, procedente del Espectrometro de ozono (TOMS) a bordo del satélite Nimbus 7 en fecha 5 octubre 1987. Las curvas están expresadas en unidades DU.

esta década surge la amenaza del posible deterioro de la capa de ozono por emisiones de los aviones estratosféricos. La posibilidad de un desarrollo amplio de la aviación comercial supersónica, con alturas de crucero por encima de los 16 km, desencadenó la alarma mundial. Posiblemente no estuvo el asunto libre de la intención de la industria aeronáutica norteamericana de frenar el desarrollo de la europea que parecía adelantarse en la fabricación de un avión comercial supersónico: el Concorde.

Tres componentes atmosféricos son los principales responsables de la destrucción del ozono estratosférico. Son el OH, el NO y el Cl. Las reacciones que explican estos tres procesos de destrucción son las siguientes:





Los tres procesos son catalíticos, esto es, la sustancia destructora del  $\text{O}_3$  se regenera. Ahora bien, esta regeneración se realiza con consumo del oxígeno atómico. Esto exige que la destruc-

ción del ozono se realice a alturas suficientemente altas, donde exista abundancia de oxígeno atómico.

¿De dónde proceden el OH, el NO y el Cl? Tienen origen natural y artificial.

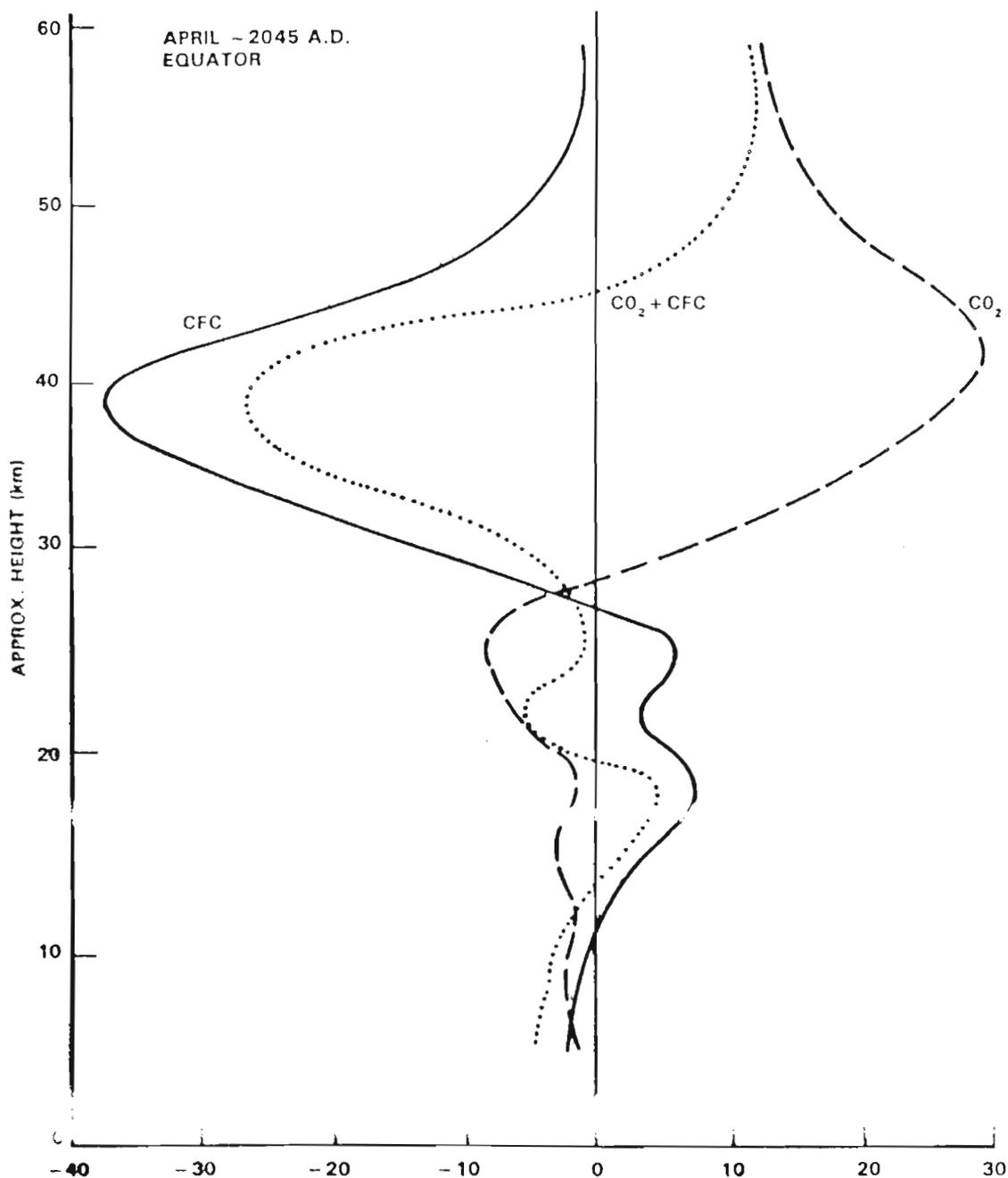
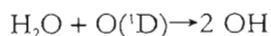


Figura 4.—Porcentaje del cambio en la concentración de ozono calculado mediante modelo de aproximación para el año 2045. Con varias hipótesis: a) por causa del  $\text{CO}_2$ ; b) por incremento de fluorocarbonados; c) perturbación acoplada a ambos casos. De Haigh y Pyle 1982.

*Veamos el origen natural del OH*

El proceso químico es:



donde O(<sup>1</sup>D) es una forma excitada del oxígeno atómico que tienen una vida muy corta, inferior al microsegundo, pues pasa a su forma normal por colisión con un tercer cuerpo (O<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>). Además, el H<sub>2</sub>O es muy escaso a las alturas en que existe el O (<sup>1</sup>D).

*Veamos el origen natural del NO*

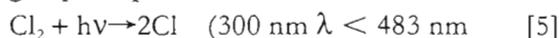
La reacción química correspondiente es



Como puede verse, es semejante a la anterior. Sin embargo, puede decirse que el N<sub>2</sub>O es relativamente abundante en las alturas en que existe presencia del O (<sup>1</sup>D). Por esto, se considera este proceso [2] como el más activo de los que destruyen el ozono naturalmente en la estratosfera. El 70 % del ozono destruido naturalmente por un proceso químico en la estratosfera se realiza según [2].

*Veamos el origen del Cl natural*

En la troposfera la producción de Cl tiene por origen principal la reacción



y en la atmósfera



pero los gases Cl<sub>2</sub> y HCl son muy activos químicamente y suelen destruirse a poca distancia de donde se producen. Por lo tanto, naturalmente es muy difícil que el Cl alcance las alturas donde hay abundancia de ozono.

*Consideremos el origen artificial del OH*

Procede del vapor de agua emitido por los aviones a reacción. Se ha calculado que los avio-

nes emiten al año, entre los 9 y los 12 km de altura que es la altura más frecuente de vuelo, 1.700 millones de toneladas. Esta cantidad es, aproximadamente equivalente al contenido total de vapor de agua que existe en la estratosfera en un momento dado. A pesar de la gran cantidad de vapor de agua emitida por los aviones y que está elevando la cantidad de éste en la estratosfera, debido a que la producción de OH depende de la abundancia de (<sup>1</sup>D) que es escaso, podemos decir que el vapor de agua artificial tampoco contribuye mucho a la destrucción directa del ozono. Veremos más adelante que a la destrucción indirecta, en la zonas pobres, sí que parece contribuir de forma decisiva.

*Origen artificial del NO*

La emisión de óxidos de nitrógeno por los aviones de reacción que vuelan a alturas comprendidas entre 9 y 12 km es de un millón de toneladas al año, cantidad que es equivalente a todos los óxidos de nitrógeno que existe en la estratosfera en un momento dado. Estos óxidos de nitrógeno si no alcanzan la estratosfera es porque son eliminados por la acción de la lluvia en forma de ácido nítrico. Habría que ponderar en qué medida contribuyen a una producción de lluvias ácidas.

Parece que puede ser correcta la estimación de que una tercera parte del contenido de N<sub>2</sub>O en la atmósfera tendrá un origen antropogénico en el año 2030 (Ramanathan y otros, 1985). Como el tiempo de vida de ácido nitroso en la atmósfera es muy largo, 150 años, queda garantizado que alcanzará la estratosfera y que producirá NO por el proceso [2]. El óxido nitroso antropogénico se debe fundamentalmente al uso de fertilizantes nitrogenados y a las combustiones de sustancias nitrogenadas, según la rápida combustión producida en las llamas (Perry, 1984)



El resultado fue que se realizaron informes y contrainformes que contribuyeron a iniciar el estudio sistemático de la química estratosférica con

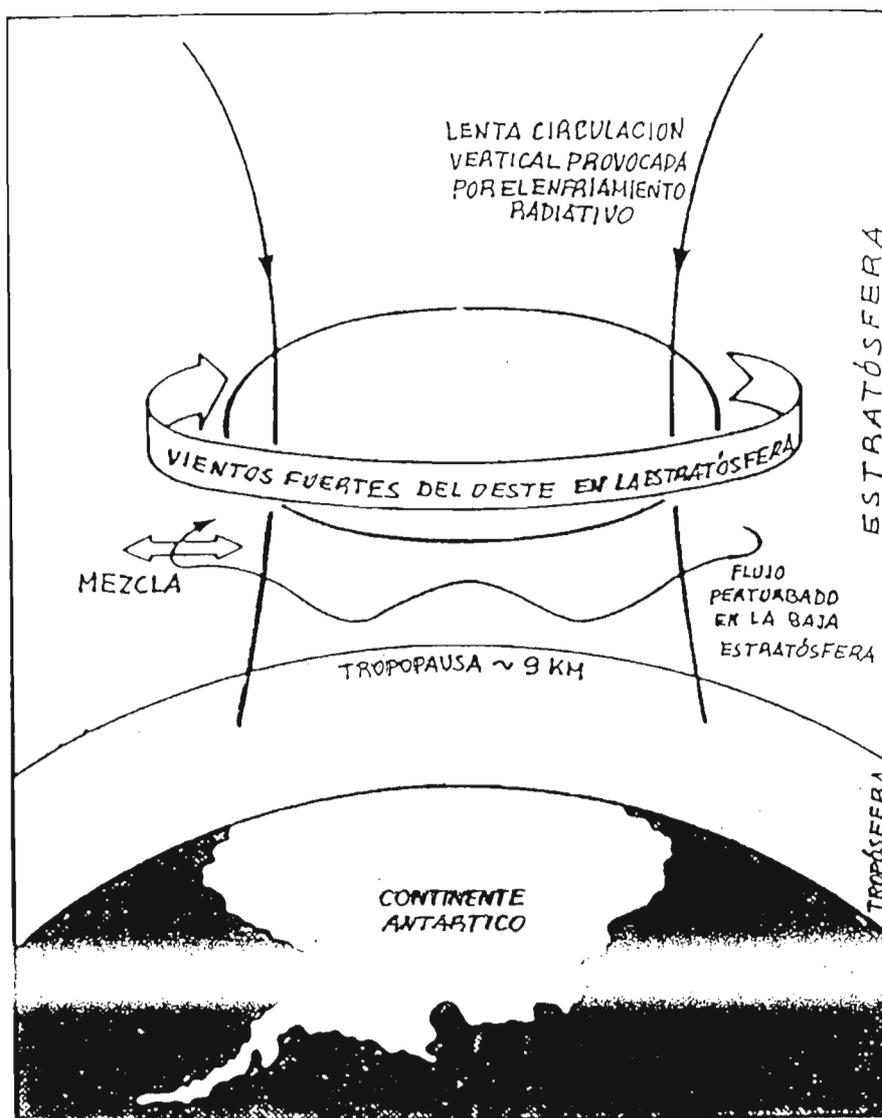


Figura 5.—Hipótesis de formación del agujero de ozono sobre Antártida teniendo presente la subsidencia y el cambio de los alisios polares en estratosfera.

el fin de adaptar el modelo de Chapman a los conocimientos del siguiente.

Es en 1974, cuando Molina y Rowland, dos profesores de la Universidad de Irvine (California), proponen su célebre proceso de destrucción del ozono estratosférico a través de la descomposición de las moléculas de los halocarburos, por la radiación ultravioleta solar cuando alcanzan la estratosfera, es el momento en que queda abandonada la antigua idea de la estabilidad química de la estratosfera.

Es también, a partir de entonces, cuando se empieza a comprender la atmósfera como un todo integrado con el resto de los procesos del planeta. Con estos nuevos criterios se elaboran modelos de evolución. Al cabo de unos años, ya en la década de los 80, se detecta que los modelos han sido exagerados y que las alarmas que habían despertado las acciones del Cl y el Br, procedentes de la descomposición de los hidrocarburos por la acción de la luz solar UV en la alta estratosfera, sobre la capa del ozono no es tan grave como se suponía. El estudio del ozono es-

tratosférico empieza a perder interés. Tiene que llegarse a mayo de 1985 para que el ozono vuelva a estar en el candelerero.

### Alarma general

La presentación del trabajo de Sigern Chubachi, en septiembre de 1984 había pasado casi desapercibida. Su mal inglés, junto con el hecho de presentar su trabajo en una sesión de carteles del Symposium Internacional del Ozono, contribuyó a que pocos se dieran cuenta de la importancia de su descubrimiento. Desde enero de 1982 a febrero de 1983, Chubachi había realizado sondeos de distribución vertical de ozono, mediante globos, en la base antártica de Syowa (69°S).

En ellos había observado la rápida disminución del contenido de ozono que se producía, durante el comienzo de la primavera en las capas donde debería estar situado el máximo: Chubachi no dio ninguna interpretación del fenómeno, limitándose a exponer lo observado.

Fueron Farman, Gardnier y Shaulku del British Antarctic Survey quienes a través de los datos de la columna total de ozono, obtenidos en Halley Bay (estación antártica situada a los 16°S de latitud) con el clásico espectrofotómetro Dolsen, los que dieron una primera explicación al fenómeno, atribuyendo a los halocarburos, la principal responsabilidad y llamándolo por primera vez «agujero» o «bache» (hole, en inglés). Su artículo fue publicado en la revista «Nature» que, a pesar de su indudable categoría científica, se vende en los kioscos. El trabajo de Farman y colaboradores apareció en mayo de 1985 y a partir de este momento se desencadenó la alarma mundial y el interés general (incluso de los políticos, por el tema del ozono).

El satélite Nimbus de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de EEUU era el único que llevaba instrumentación para medir ozono por estas fechas. No hay que olvidar que el estudio del ozono ya no tenía el interés de antes, cuando todavía no se había de-

mostrado el alarmismo de las suposiciones de Molinar y Rowland... El «asunto del agujero de ozono», cogió desprevenidos a los estadounidenses, sin la adecuada instrumentación satelitaria. Incluso el instrumento espectrofotométrico de medida total de ozono (TOMS) del citado satélite Nimbus 7 se encuentra bastante averiado por los impactos de los micrometeoritos.

Los datos sobre la Antártida durante la primavera (cuando los rayos solares iluminan tangencialmente las heladas superficies, y que sirven para el cálculo del ozono total), que venían siendo desechados a la vista de las medidas de Syowa, de Halley Bay y de Argentine Islands, son realidades y aparecen las imágenes en falso error del llamado «agujero de ozono»

También nosotros, en el INTA, donde veníamos estudiando el ozono, desde 1973, el antiguo grupo científico de Meteorología de la extinta Comisión Nacional de Investigación del Espacio (CONIE), tuvimos nuestra época de crisis en el interés por el estudio del ozono. Algunos de los componentes del grupo manifestaron el deseo de dedicarse a otro tema. Eso hizo que el director del grupo continuase en solitario con el tema 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 centraban principalmente alrededor de la tesis de Ferman 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 primavera antártica tiene un origen antropogénico en combinación con las especiales condiciones dinámicas y térmicas que se dan en el invierno sobre la Antártida en la baja estratosfera.

## Las nubes estratosféricas polares, cubos de la basura atmosférica

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 esa 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 periodos 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 entendernos, llamemos NEPs (nubes estratosféricas polares) a las situaciones de coe-

ficiente 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 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 HNO<sub>3</sub> 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 ppm (comparable con la masa de agua disponible) y unas concentraciones de partículas de hielo varios 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 un fuerte componente de especulación no científica, por lo 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 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,  $H_2SO_4$ ,  $HNO_3$ ,  $HCl$ , 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 producirse 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 periodo 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 la estela de condensación o no.

El regreso del vapor de agua estratosférico a la troposfera se realiza, sobre todo por las latitudes altas (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

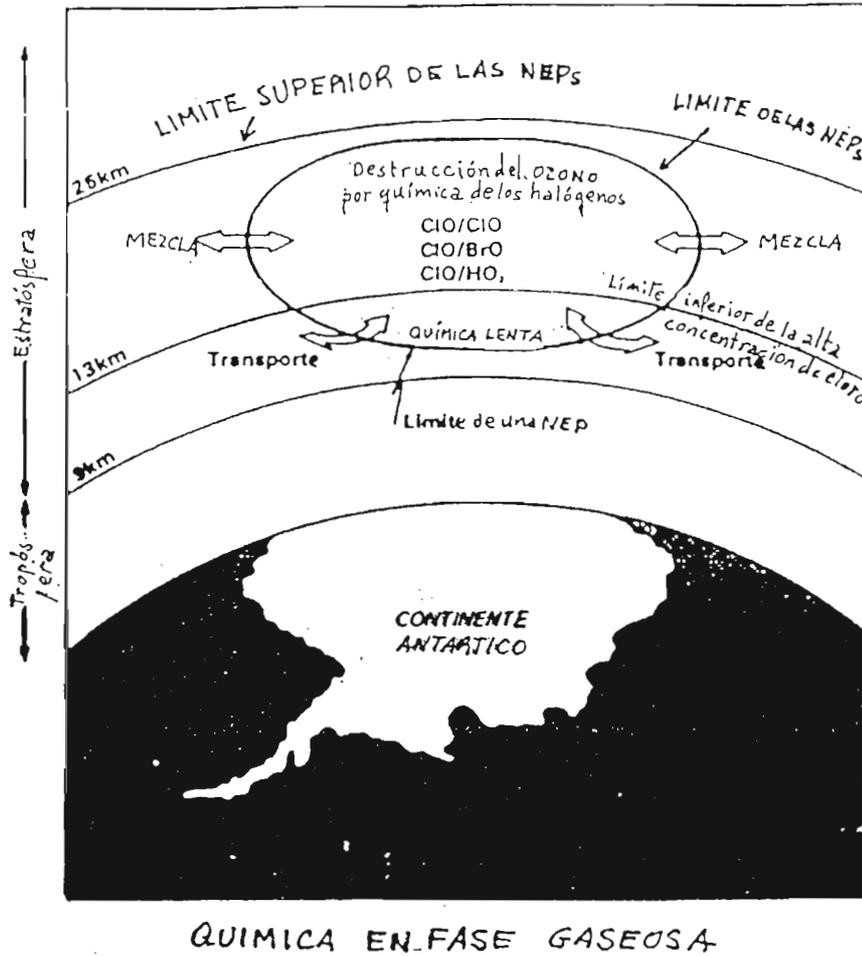


Figura 6.—Hipótesis de formación del agujero del ozono sobre Antártida teniendo presente la destrucción del ozono por la halógenis y la aparición de nubes nacaradas.

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 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.

Lo que está ocurriendo con el ozono en la estratosfera no es nada más y nada menos que un síntoma de la mala salud que padece toda la atmósfera como consecuencia de los malos tratos a que la estamos sometiendo.

Llevamos mucho tiempo tratándola como basurero y su capacidad de regeneración se está resintiendo.

La atmósfera está envenenada y hay que someterla con urgencia a un tratamiento de depuración.

No hay que caer en el simplismo de creer que eliminando el síntoma nuestra atmósfera va a recuperar la salud. Y ya he dicho que lo del ozono es un síntoma, un síntoma aparatoso, como un gran grano que indica el grado de envenenamiento general, pero hay que tener en cuenta que tratando este grano con «pomaditas» no vamos a curar la intoxicación generalizada que padece.

Creo que es grave lo que está pasando, muchos lo creemos así. ¡Es muy grande la responsabilidad de nuestra generación!

Abandonando protagonismos, todos los que trabajamos por conservar, y mejorar el medioambiente deberíamos unir nuestros esfuerzos para ser más eficaces. Las futuras generaciones se beneficiarán. Sentimos así el supremo placer de haber hecho algo útil para los demás y de que el fruto de nuestro trabajo perdure.

### Reflexión final

Quiero terminar con una reflexión sobre el tipo de medidas que han de aplicarse para preservar el medioambiente atmosférico y, en particular la capa de ozono.

¡Todas han de tener un carácter radicalmente revolucionario! No es posible conectar las caducas conductas económicas, sociales y políticas con la conservación de los frágiles equilibrios atmosféricos. Es necesario aplicar criterios de autolimitación tanto a nivel individual, en pequeños grupos o para toda la Humanidad. Ha sido necesario el concurso de la Ciencia para que se entienda, que estos criterios son necesarios también para el conjunto del planeta Tierra. Hemos tenido que sentir la responsabilidad de saber que podemos acabar con la vida en el mundo para comprender lo que era evidente como individuo.

Por esto digo que se trata de la gran Resolución. Como dijo Teilhard de Chardin, «la edad de las naciones ha pasado. Se trata ahora de nosotros, si no queremos perecer, de sacudir los antiguos prejuicios y de construir la Tierra».

Gracias por su atención.

### Bibliografía

- BREWER, A. W. Evidence for a world circulation provided by measurement of helium and water vapor in the stratosphere. *Quart. J. Roy Meteor. Soc.* 1949, 75, 351-363.
- CISNEROS, J. M. Relaciones entre la contaminación de los aviones y la destrucción del ozono atmosférico. *Actas del II Symposium Español de Estudios Antárticos*. 1987, Madrid 13-17 julio. Págs. 149-160.
- CISNEROS, J. M. La disminución del ozono en la Antártida. Transporte atmosférico de contaminantes a larga distancia. Univ. de Valladolid, 1989, págs. 71-80.
- 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*. Todyo, December 1984.
- CRUTZEN, P. J. and F. ARNOLD, F. Nitric acid cloud formation in the cold Antarctic stratosphere: a major cause for the spring time «ozone hole». *Nature*, 324, 651-655. 1986.
- DANIELSEN, E. F. A dehydration mechanism for the stratosphere. *Geophys. Res. Lett.* 1982, 9, 605-608.
- FARMAN, J. C. GARDINER and SHANKLIN, J. D. (1985). Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal C10x/NOx interaction. *Nature*, 315, 207-210.
- HAMILL, P., TOON, O. B., and TURCO, R. P. Characteristics of polar stratospheric clouds during the formation of the Antarctic ozone hole, *Geophys. Res. Lett.*, 13, 1288-1291, 1986.
- HAMILL, P. and McASTER, L. R. (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 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. MIRASAWWA, and M. FUKUNISHI. Lidar measurement on the Antarctic stratospheric aerosol layer, I. Winter enhancement, *J. Geomagn. Geoelectr.*, 37, 1098-1098, 1985.

MCCORMICK M. P., HAMILL, P. and FARRUKH, U. O. 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., HAMILL, P., MCCORMICK, P. and SWISSLER, T. J. The formation of polar stratospheric clouds, *J. Atmos. Sci.*, 12, 517-529, 1981.

TOON O. B., HAMILL, P., TURCO, R. P. and PINTO, J. Condensation of  $\text{HNO}_3$  and  $\text{HCl}$  in the winter polar stratospheres, *Geophys. Res. Lett.* 13, 1284-1287, 1986.