

*Carlos Gay**

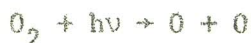
En 1930 (1) Chapman propuso lo que ahora conocemos como la teoría clásica del ozono estratosférico basada en la existencia del oxígeno en la atmósfera. Comprende cinco reacciones básicas.

El ozono se forma fundamentalmente a través de lo que conocemos como una colisión de tres cuerpos



donde O y O_2 son oxígeno atómico y molecular respectivamente, y M es un tercer cuerpo necesario para que esta reacción sea energéticamente posible.

El oxígeno molecular que se encuentra en la atmósfera da origen al oxígeno atómico al ser disociado por la absorción de la radiación proveniente del sol



donde $h\nu$ es un cuanto de radiación solar.

El ozono a su vez es destruido por dos mecanismos. El primero

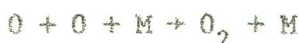


es por fotodisociación, y el segundo



reacción bimolecular.

Por último se puede considerar una reacción que destruye oxígeno atómico a través de una colisión de tres cuerpos



que restituye una molécula de oxígeno.

Esta reacción puede ser despreciada cuando la región considerada de la atmósfera está por debajo de 50 ó 60 km.

Este sistema de ecuaciones representa los procesos de producción y destrucción de los diferentes componentes de oxígeno (O , O_2 y O_3).

Cuando suponemos que la producción y la destrucción están en balance, estamos hablando de un estado de equilibrio fotoquímico, y las concentraciones para los diferentes componentes pueden ser determinadas.

El modelo de Chapman explicaba muy bien algunas características del ozono que se conocían desde los años 20 (2). Por ejemplo, que el ozono formaba una capa, y que el máximo de concentración se encontraba a unos 25 km de altura. Por otro lado, las concentraciones calculadas por el modelo para las regiones por encima del máximo resultaban exageradas. De cualquier manera, no era de esperarse que un modelo tan simple explicara todas las características del ozono. Sin embargo una cosa muy importante quedaba clara, que el ozono es el producto de mecanismos de creación y de destrucción y que su concentración podría alterarse al perturbarse cualquiera de ellos.

El modelo de Chapman también explicaba otras características de la atmósfera que se conocían desde los experimentos de Teisserenc de Bort en 1898 que demostraban la existencia de una región isoterma por encima de los 10 ó 12 km de altitud y que conocemos como la estratosfera. En efecto, posteriormente se encontró que la temperatura de la estratosfera aumenta con la altura.

La explicación a este aumento de temperatura es que para disociar tanto oxígeno molecular como ozono es necesario absorber fotones solares y esto tiene como consecuencia que la estratosfera se caliente. En particular la absorción por parte del ozono produce un máximo de temperatura a una altura aproximada de 50 km. Debemos mencionar que la rapidez

* Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

con que se llevan a cabo las reacciones fotoquímicas depende de la temperatura (3) de aquí que se presente un fuerte acoplamiento entre el ozono y la temperatura estratosférica y que una perturbación en uno de ellos conlleva a una perturbación en el otro.

También se explica en términos de la absorción por el ozono el abrupto corte alrededor de los 3000Å (.3um) en el espectro de la radiación solar medida en la superficie. Esto era conocido desde 1880, a partir de los estudios de Hartley sobre el espectro solar.

Las discrepancias entre las predicciones del modelo de Chapman y las observaciones condujeron, en los años 50, a que se investigara los efectos que gases como el monóxido de carbono (CO), el metano (CH₄), el óxido nítrico (N₂O) y el radical hidroxilo (OH) tendrían sobre el ozono.

Por esas fechas, Bates y Nicolet desarrollan la primera teoría fotoquímica del ozono, y Craig (3) publica una monografía en donde se compendian las observaciones y se discuten las diferencias con la teoría fotoquímica basada en el esquema de Chapman.

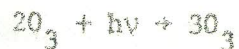
El hecho de que el modelo de Chapman sobreestimara las concentraciones de ozono por arriba de los 25 km indicaba que otros mecanismos de destrucción deberían estar presentes.

La investigación continuó despertando interés, aunque no hizo furor sino hasta los años 70 cuando la destrucción catalítica del ozono se vuelve una posibilidad real. Las reacciones catalíticas se pueden resumir como:



donde la X puede ser óxido nítrico (NO), cloro (Cl), hidroxilo (OH) o bien hidrógeno (H).

El resultado neto es:



la destrucción del ozono y la permanencia del XO.

Las posibles fuentes del NO y OH son el dióxido de nitrógeno y el agua al reaccionar con átomos de oxígenos excitados respectivamente. Las fuentes del cloro más importantes son de origen humano y son los clorofluorocarbonos (CFC). Debería mencionarse aquí, que actualmente la fotoquímica del ozono comprende más de 150 ecuaciones.

La posibilidad de destrucción del ozono a través de reacciones catalíticas representa un grave peligro para la vida. El ozono absorbe el 99 por ciento de la radiación ultravioleta que proviene del sol, y nos protege de sus efectos nocivos.

La agencia de protección del ambiente de los Estados Unidos (E.P.A.) por ejemplo, ha estimado que una disminución de 2.5% en el ozono podría significar para los EEUU, 15,000 casos más de cáncer de piel. Por otro lado, incrementos importantes en la radiación ultravioleta que llegaran a la superficie podrían alterar todos los ciclos biológicos al perturbar los elementos que lo componen y causar una catástrofe planetaria. Son estos factores sobre los que por cierto no quiero insistir, los que a fin de cuentas hacen muy importante el estudio de la capa de ozono y que son el origen de las crisis a las que nos vamos a referir.

LA PRIMERA CRISIS

No fue sino hasta los años 70, como ya mencionamos, cuando el interés sobre el ozono vuelve a reavivarse con la introducción en la aviación comercial de aviones del tipo Concorde, que viajan a una altura de aproximadamente 17 km y a mayor velocidad que el sonido.

La preocupación de los investigadores se dirigía a los efectos que los gases de combustión producidos por los aviones supersónicos tendrían sobre la capa de ozono.

Se investigaron los posibles efectos que el vapor de agua tendrían sobre el ozono y se

llegó a la conclusión que serían despreciables, teniendo en cuenta el tamaño de la flota de aviones que estaría en servicio, y por tanto los excesos producidos de vapor de agua.

Sin embargo, la acción de los óxidos de nitrógeno (producidos por los motores de los aviones) sobre el ozono sería muy importante. A partir de un esquema algo simplista (ver la primera sección), los óxidos de nitrógeno, a través de las reacciones catalíticas descritas anteriormente podrían destruir la capa de ozono.

Los estudios realizados en los Estados Unidos condujeron en parte a la suspensión de la construcción del avión estratosférico americano.

Mientras tanto, la sociedad europea que se encargó de la construcción del Concorde, sospechando que los estudios realizados sobre el impacto que los transportes estratosféricos tendrían en la capa de ozono, podrían constituir una conspiración contra su construcción, decidieron encargar más estudios a científicos europeos.

Tres descubrimientos, en opinión de los europeos, vinieron a calmar la situación: primero, se encontró en los fertilizantes una fuente natural para los óxidos de nitrógeno (hemioxido de nitrógeno N_2O), y segundo, los modelos fotoquímicos que incluían al dióxido de nitrógeno (NO_2) detectado en la atmósfera en 1969 a través del análisis de la luz solar en la región del infrarrojo, indicaban que existía un equilibrio entre los óxidos de nitrógeno y el ozono. Un poco más tarde, el descubrimiento de ácido nítrico en la atmósfera demostraba la existencia de un sumidero natural, es decir un mecanismo de destrucción para los óxidos de nitrógeno, que haría que éstos no fueran una amenaza para el ozono. En conclusión, los resultados de los estudios indicaban que si acaso el Concorde contribuyera a la destrucción del ozono, estos efectos serían de cualquier manera muy pequeños. Cabe indicar que estos resultados no fueron universalmente aceptados.

LA SEGUNDA CRISIS

No bien habíase acabado el furor acerca del impacto de los transportes estratosféricos sobre la capa de ozono, cuando una nueva amenaza se presentó. Esta la constituía la presencia de los clorofluorocarbonos (también conocidos como "Freones") en la atmósfera. Estas sustancias se emplean en refrigeración artificial, en la producción de espumas plásticas, y como impulsores en lantatomizadoras y por lo tanto, representan un gran interés comercial.

El problema con los freones es que aunque a nivel troposféricos son sustancias bastante estables y por lo tanto con tiempos de residencia largos, una vez que llegan a la estratosfera por el transporte vertical, son destruidos. La radiación solar los disocia liberando átomos de cloro, que al igual que los óxidos de nitrógeno atacan al ozono a través de reacciones catalíticas; sólo que en este caso con mucho mayor eficiencia, un átomo de cloro puede destruir 10,000 moléculas de ozono. A partir de los estudios de Rowland y Molina realizados en 1974 que demostraban estos hechos, y de trabajos posteriores, algunos países como EEUU, Canadá y Suecia, preocupados por las posibles influencias negativas de los freones sobre la capa de ozono, tomaron acciones para el control de estas sustancias.

Otra vez y debido a las implicaciones de tipo económico que el control representaría, se inició, al igual que con el avión supersónico estratosférico, una polémica. Por un lado, los Estados Unidos proponían acciones inmediatas de control, como la eliminación del uso de freones no fundamentales como pulverizadores (que en efecto adoptó), y por otro, la comunidad económica europea proponía esperar a que hubiera evidencia clara de que la capa de ozono estuviera siendo afectada. De cualquier manera, se plantearon dos enfoques diferentes bajo una misma limitación, que sería la de establecer un control una vez que se llegara a un tope que correspondería a una vez y media la producción de 1980 (4).

Los dos enfoques representan una diferencia de alrededor de 13 años en llegar a dicho límite siendo la proposición americana la que busca este lapso extra.

LA CRISIS MAS RECIENTE

A pesar de que los estudios más conservadores que son los producidos por los europeos y que de acuerdo a diferentes condiciones y según ellos, de acuerdo a los escenarios más adversos indican que los efectos al ozono se empezarían a dejar notar hacia el primer tercio del Siglo XXI, recientemente han sido publicados estudios que resultan alarmantes. En un trabajo publicado por Hutton et. al., en 1985 (5), en la revista Nature, se demuestra que la concentración de ozono estratosférico sobre el polo sur sufre una dramática disminución durante los octubres del periodo 1980-1984, significando para 1984 una disminución del 40% cuando se compara con los promedios obtenidos para el periodo entre 1957 y 1973. Con el propósito de encontrar alguna explicación a esta disminución, estos autores muestran que para el mismo periodo (1980-1984), la concentración de CFC (clorofluorocarbones) fue en aumento. En ese trabajo se busca una explicación basada exclusivamente en términos fotoquímicos, pues causas debidas a cambios en la circulación pueden desecharse por la evidente ausencia de éstos.

Así pues, la explicación se encuentra en términos de la destrucción del ozono producida por los átomos de cloro liberados de los CFC.

Una explicación como la presentada por Hutton y colaboradores apunta de hecho al origen básicamente humano de la perturbación provocada en la capa de ozono.

Es interesante notar que aunque la ocurrencia del ahora llamado agujero, se venía observando desde 1977. Los resultados se publicaron en 1985; esto se debió a la cautela y cuidado con que se realizan los análisis y que, en el caso del ozono, condujo a los investigadores a pensar que las lecturas muy bajas eran el resultado de mediciones erróneas. Sin embargo; después de revisar los datos se ha confirmado la existencia del mencionado agujero.

Las importantes implicaciones para los humanos de la existencia de una disminución notable en la capa de ozono, hacen que ésta se convierta en sujeto de encabezados, así que recientemente apareció en los diarios la noticia de que una expedición de científicos

norteamericanos estaba realizando experimentos en el Polo Sur midiendo las concentraciones de ozono. Sus resultados son otra vez alarmantes, pues indican que se ha vuelto a producir una disminución del 50 por ciento.

En esta ocasión, la explicación adelantada por los investigadores está basada nuevamente en la fotoquímica del ozono pero siendo el agua el mayor causante de la disminución. El vapor de agua es producido, según ellos, por la evaporación de las nubes polares durante la primavera. Este razonamiento parece indicar que las causas son naturales. Sin embargo, no nos parece que sean las únicas, pues de ser así, las disminuciones deberían haberse presentado también en el periodo previo al de las disminuciones drásticas, ya que la evaporación de las nubes polares debe ser un acontecimiento normal y no sujeto al periodo de los ochenta.

LOS PELIGROS

Una pregunta que se ocurre, y que de hecho está implícita en el trato que los medios de difusión aplican a estos estudios científicos es: ¿estas disminuciones representan algún peligro inmediato para los humanos?. O poniéndolo de otra manera, ¿nos vamos a freír? La respuesta es: lo más probable es que no representa un peligro inmediato.

Ahora bien, por inmediato entendemos ahora o mañana, o el mes que viene, incluso el año que viene. Sin embargo, los resultados de las observaciones recientes deberían tomarse como las advertencias que la naturaleza nos está haciendo. Ya hemos mencionado que estudios recientes pronostican que disminuciones importantes pueden producirse (bajo condiciones actuales en cuanto a producción de CFC), para los años treinta del siglo que viene, lo que no representaría ahora algo alarmante. Pero si tomamos en cuenta que existen parámetros que en la teoría no son bien conocidos y que no se conocen bien las condiciones bajo las cuales procesos destructivos podrían dispararse en procesos no lineales, deberíamos ser mucho más cautelosos en cuanto a la producción de CFC de lo que somos ahora, teniendo en cuenta que los CFC producidos durante los últimos 10 años, aún no llegan a la estratosfera. Las drásticas disminuciones observadas recientemente pueden significar que lo que

se consideraba como escenarios muy pesimistas resultan aún optimistas, y que un mayor control debería imponerse de inmediato.

El argumento de que las observaciones (aparte de las correspondientes a los eventos polares), no indicaban cambios importantes, y que las teorías que pronosticaban estos cambios no eran entonces definitivas, y que por lo tanto se podrían dejar las cosas como están, no es válido por dos razones. En primer lugar, aunque los modelos contengan algunas incertidumbres, no hay duda de que todos apuntan hacia la posible destrucción de la capa de ozono, y como las implicaciones son tan graves, se debería actuar de manera preventiva sin esperar a que se produjera la prueba que de por sí sería catastrófica.

En segundo lugar, es posible que la evidencia experimental que se estaba buscando se haya presentado ya con las observaciones realizadas en el Polo Sur.

El último comentario es que la naturaleza ha sido tan sabia que los avisos recientes nos los ha dado sobre regiones despobladas del planeta, pues otra cosa hubiera sido si estos agujeros se hubieran producido encima de Nueva York o de la ciudad de México.

BIBLIOGRAFIA

1. Kuo-Nan Liou. An introduction to Atmospheric Radiation. Academic press. New York, pp. 392, 1980.
2. Christian Muller. El ozono de la atmósfera. Mundo Científico. Vol. 2, No. 13, 372-382, 1981.
3. Craig, R.A. The observation of photochemistry of atmospheric ozone and their meteorological significance. Meteorological Monographs Vol. 1, No. 2, 1-50, 1950.
4. Anna Lubinska, Europe Takes a cheerful view. Nature Vol. 313, 727-728, 1985.
5. Farman, J.C. Gardiner, B.G. and Shanklin, J.D. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction. Nature Vol. 315. 207-209. 1985.

* * * * *

