

Las Caras del Ozono

Por Mario Molina, Premio Nobel de Química, 1995

Primero que nada quiero agradecer las palabras del doctor Francisco Barnés. Es para mi un gran placer regresar aquí a la Universidad, mi *alma mater*, donde hice la carrera de ingeniero químico. Recuerdo con mucho cariño mis años de estudiante universitario y es particularmente grato que sea Paco Barnés mi gran amigo de hace muchos años quien ahora como Rector haya dicho esas palabras.

Esta mañana voy a hacer una exposición general de los problemas de contaminación, sobre todo la contaminación del aire, en conexión con el ozono. Voy a hacer ver una conexión entre un problema global y un problema local, como el que existe en la ciudad de México, el cual es un problema relativamente reciente.

En esta primera transparencia [1] vemos el planeta Tierra, lo que quiero mostrar es la magnitud de la atmósfera del planeta y con ella dar una idea de porque es posible que actividades de origen humano puedan tener repercusiones a nivel global. La situación es la siguiente: desde el punto de vista global, la contaminación en el Valle de México es un problema local si consideramos las dimensiones del Valle de México, unas cuantas decenas de kilómetros vemos que es una parte pequeña de toda la superficie terrestre. Por otro lado, sabemos que más del 95 por ciento de la masa de la atmósfera se encuentra en los primeros 20 kilómetros por encima de la superficie terrestre. Esto es, tenemos solo veinte kilómetros, donde esta la mayor parte de la atmósfera, sin embargo la distancia entre los dos polos es del orden de 20 mil kilómetros; esto quiere decir que desde el punto de vista global la capa atmosférica es realmente muy delgada y desde el punto de vista cósmico es muy frágil.

Si se fijan bien se puede ver el Valle de México, por ahí escondido entre las nubes, pero lo que destaca, claro, son las nubes mismas y lo delgada que es esta capa que nos protege a todos y que hace posible que exista la vida en nuestro planeta. Es con esta perspectiva con la que nos dimos cuenta hace apenas 10 o 20 años que efectivamente hay problemas a nivel global. Para poder explicar con un poco mas detalle el origen el origen de este problema voy a presentar una perspectiva histórica de como empezó el problema global específicamente conectado con la capa de ozono.

Vamos a regresarnos a principios de siglo. Lo que tenemos aquí [2] es un refrigerador de la época que empezaron a ser muy populares sobre todo en Estados Unidos y en Europa, este tipo de hieleras repercutieron en cambios de los hábitos familiares. El problema que tenían estas hieleras era el siguiente: la única manera para que funcionaran era transportando bloques de hielo, esto no funcionó por mucho tiempo. Por fortuna, en los años 30 se descubrió la posibilidad de usar tecnologías un poco mas refinadas. Así apareció un refrigerador con un motor de compresión el cual facilitó enormemente la refrigeración casera [3]. Sin embargo estos refrigeradores tenían un problema importante para su

funcionamiento: el fluido, un compuesto químico, que al pasar por el compresor se convierte en líquido y posteriormente al evaporarse produce el enfriamiento. Este compuesto normalmente debía estar dentro del sistema de refrigeración, pero en algunas circunstancias había fugas. Los compuestos originalmente eran bióxido de azufre o amoníaco, compuestos muy tóxicos. Hubo una serie de accidentes, por ejemplo, familias que tenían el refrigerador en un cuarto y dormían el mismo cuarto, si había una fuga, claro, había accidentes muy serios. Este problema inclusive le llamo la atención a Einstein, él junto con Leo Szilard (en los años 30) lo estudiaron porque era un problema serio para la sociedad. Diseñaron refrigeradores que no tuvieran fugas pero resultaron ser demasiado complejos como objetos prácticos.

Los refrigeradores que funcionaron en esa época son muy parecidos a los que tenemos hoy en día, pero la solución no consistió en inventar ciclos de refrigeración distintos sino simplemente en cambiar el fluido, esto es el refrigerante por uno que no fuera tóxico. Con el invento de nuevos compuestos químicos, la refrigeración se incremento muy rápidamente, sobre todo en Estados Unidos y Europa. La persona que descubrió estos nuevos compuestos químicos muy estables, que sustituyeron al amoníaco y al bióxido de azufre fue un ingeniero mecánico llamado Thomas Midgale [4], quien se convirtió en químico y, de una manera muy metódica, estudiando cuales elementos podían combinarse para producir compuestos muy estables inventó los llamados CFC's, o *clorofluorocarbonos*. Otro de sus inventos importantes son los llamados "antiknock", que son compuestos para mejorar el funcionamiento de los motores de gasolina. El tetraetilo de plomo, que sabemos que hoy en día es también un problema grave aquí en la Ciudad de México, pero no voy a tocar el problema del plomo, voy a hablar de los CFC's.

Los CFC's son compuestos que tienen básicamente dos propiedades importantes: una de ellas es que no son tóxicos, y la otra es que son compuestos que fácilmente se convierten en líquidos y vapores, esto es, su punto de ebullición se encuentra cercano a la temperatura ambiente [5]. El hecho de tener estas dos propiedades trajo como consecuencia una gran producción industrial [6], sobre todo entre los años sesenta y mediados de los setenta, porque además de su uso en refrigeración, fueron utilizados, por ejemplo, en la fabricación del hule espuma; donde se necesita un líquido que se mezcle con el plástico cuando se esta formando, y al evaporarse hace la espuma. Otra aplicación fue en las latas de aerosol, el propelente (CFC) se pone en cantidades grandes dentro de una lata relativamente delgada [7]. Al apretar el botón de la lata de aerosol, el líquido se evapora y arrastra consigo al desodorante o a las lacas para el pelo.

Ahora veamos lo que eventualmente pasa en los refrigeradores. Los CFC's son estables y a largo plazo terminan en el medio ambiente. Con las latas de aerosol es evidente que se emiten a la atmósfera casi de inmediato, no así con los refrigeradores, sin embargo también acaban en el ambiente. En los años 70, junto con mi colega Sherwood Rowland, decidimos investigar que les pasaba a estos compuestos en la atmósfera. Para explicar lo anterior voy a describir brevemente ciertas propiedades de la atmósfera.

La propiedad más importante en la atmósfera es el perfil de temperatura [8]. Sabemos que la temperatura varia con las estaciones del año y con la altitud, pero en promedio tiene una propiedad interesante sobre todo el globo terrestre, esto es, la temperatura disminuye con la

altura y eventualmente vuelve a subir, esto da lugar a una capa de inversión. La disminución de la temperatura con la altura debido al calentamiento de la atmósfera ocurre, sobre todo, en la superficie terrestre, y esto le da a la atmósfera baja las características que conocemos como el clima, la lluvia, etc.

Cuando hay una inversión de temperatura, es decir cuando la temperatura aumenta al aumentar la altura, la atmósfera se estabiliza. Este es el mismo fenómeno que sucede aquí en el Valle de México, si de alguna manera el aire frío circula por las montañas, debajo de aire caliente, se produce la inversión de temperatura, y los contaminantes quedan atrapados porque la atmósfera se estabiliza, esto es lo que muchas veces da lugar al fenómeno de contaminación de la Ciudad de México. Todo el globo terrestre tiene una capa de inversión, pero al contrario de lo que sucede en la ciudad, la capa de inversión está por encima de una capa inestable llamada troposfera. La capa donde la temperatura está invertida se llama estratosfera.

Otra propiedad importante, que también tiene analogías con lo que pasa en el Valle de México, es que en la capa inferior de la troposfera hay un mecanismo muy eficiente para limpiar contaminantes que se emiten a la atmósfera. Este mecanismo es sobre todo la lluvia y las nubes. Muchos de los gases que se emiten se limpian periódicamente. La estratosfera es muy seca no hay lluvia, toda el agua que existe en estas alturas se condensa de tal manera que no penetra en la estratosfera. Así que si de alguna manera introducimos contaminantes en la estratosfera, por combinación de esta capa de inversión y la falta de mecanismos de limpieza, esa contaminación puede tener consecuencias muy grandes, de la misma forma que de manera local. Aquí en el Valle de México cuando no llueve y está presente la capa de inversión, los contaminantes se acumulan.

La atmósfera normalmente se calienta en la superficie: en la estratosfera hay otro mecanismo de calentamiento y es la existencia de un gas que absorbe energía solar a esas alturas. Casi todos los componentes importantes de la atmósfera son transparentes en las regiones del espectro solar, a la luz que emite el Sol con mayor intensidad. La luz ultravioleta se absorbe muy eficientemente por un compuesto muy importante que existe en la estratosfera, *el ozono*. Este compuesto existe en toda la estratosfera y es el responsable del aumento de la temperatura en esta capa atmosférica.

El ozono es un compuesto muy poco estable, existe en la estratosfera en concentraciones de partes por millón, esto es, alrededor de 10 ppm [9]. El ozono existe hasta la superficie terrestre e inclusive, se forma, por ejemplo aquí en el Valle de México -después voy a explicar con un poco más de detalle esta formación de ozono cerca de la superficie-. Su concentración en la estratosfera es la que da lugar al calentamiento. Una consecuencia muy importante de la existencia de esta capa de ozono que cubre todo el planeta, es que la luz o radiación ultravioleta que calienta a la atmósfera, no llega a la superficie terrestre evitando así consecuencias dañinas en los sistemas biológicos. Por ejemplo, en la gente es la responsable de las quemaduras de la piel y eventualmente también puede causar cáncer en la piel. Lo que sucede es que a pesar de que existe la capa de ozono, no nos protege de una manera perfecta de esta radiación. Hay cierta cantidad de radiación ultravioleta que se llama ultravioleta B que penetra a pesar de la existencia de esta capa y es la que tiene consecuencias muy importantes para todo tipo de sistemas ecológicos: plantas, animales

que son sensibles a esta redacción. Así la preocupación principal es que si cambiamos la cantidad de ozono que existe de manera natural, podemos afectar a varios sistemas biológicos.

Ahora quiero explicar en forma breve como funciona el ciclo de los gases industriales, los CFC's, usados como refrigerantes, y como es que afectan al ozono [10]. Estos gases se emiten desde la superficie terrestre pero siendo tan estables, tan poco tóxicos, químicamente poco reactivos, los mecanismos de limpieza que existen a bajas alturas, no afectan a los CFC's, de tal manera que pueden difundirse hacia la estratosfera, y cuando llegan por encima de la capa de ozono es cuando la luz solar (que el ozono mismo filtra) destruye a las moléculas de estos CFC's. Los productos de descomposición de los CFC's incluyen átomos de cloro, estos son compuestos que se llaman radicales libres, que tienen un número impar de electrones y que son consecuentemente químicamente muy reactivos. Este tipo de compuestos, si se emitieran en la baja atmósfera, durarían muy poco tiempo. Por ejemplo, la lluvia los eliminaría con rapidez, pero en la estratosfera se mantienen por varios años antes de difundirse de nuevo hacia la superficie terrestre. Hay otro proceso interesante que es un proceso de amplificación: el ozono existe en partes por millón en la estratosfera, donde es más abundante y los CFC's de origen industrial, existen en cantidades menores, es decir, en partes por billón, mil veces menos abundantes, pero a pesar de esto, tienen efectos muy importantes sobre el ozono a través de un sistema de reacciones catalíticas; un proceso de amplificación, de reciclaje de estos compuestos, de tal forma que un átomo de cloro puede tener efectos importantes destruyendo decenas de miles de moléculas de ozono. [11]

Es de esta manera que nos podemos explicar como una actividad industrial puede tener efectos a nivel global, en parte por esa fragilidad de la estratosfera y en parte por el tiempo que los CFC's permanecen en la atmósfera y sus compuestos en la estratosfera. Debo aclarar que debido a la estabilidad de estos compuestos industriales, su vida media en la atmósfera es del orden de 50 a 100 años, alrededor de un siglo, ya que tardan mucho tiempo en llegar a la estratosfera. Así que lo que se emita hoy en día va a permanecer por muchos años en la atmósfera.

Esta teoría, que originalmente postulamos en 1974, se comprobó en partes. Al principio hubo muchas mediciones que confirmaron la presencia de los átomos de cloro en la estratosfera, de los CFC's en la baja atmósfera y en la estratosfera y muchos otros detalles de la química que no estoy discutiendo. Sin embargo el efecto en el ozono fue difícil de medir. Tardamos muchos años más para medirlo, debido a que el ozono tiene muchas fluctuaciones: se produce sobre todo en los trópicos y emigra hacia los polos, además la cantidad de ozono natural que existe en la estratosfera varía.

Lo que sucedió en 1985 es que se descubrió un fenómeno muy espectacular sobre el Polo Sur. En esta transparencia [12] vemos gráficas donde se muestran mediciones de satélite de la cantidad de total ozono que existe en la atmósfera en distintas partes del planeta. Se ve con toda claridad que la cantidad de ozono en el Polo Sur, disminuyó espectacularmente, esto es lo que se conoce con el nombre de *agujero en la capa de ozono*, que se pudo medir por el hecho de que la señal fue muy grande.

Lo que tenemos en esta otra gráfica [13] es una descripción de como desaparece el ozono en función de la altura, esto es, un perfil de concentración de ozono. Primero vemos un perfil normal de ozono donde se ven concentraciones de partes por millón. Su mayor concentración esta en la baja estratosfera. En la primavera en el Polo Sur (meses de agosto y septiembre) cuando empieza a salir la luz se ve que muy rápidamente, en cuestión de varias semanas, el ozono empieza a desaparecer con gran rapidez, de tal manera que a principios de octubre ya no es posible detectarlo con el aparato que fue colocado en los globos atmosféricos. Entre alturas de alrededor de 15 a 20 kilómetros mas del 99 por ciento del ozono desaparece. A menores alturas, en la troposfera, no se ve afectado, ni tampoco a mayores alturas.

Aunque no habíamos predicho originalmente este fenómeno en el Polo Sur, hicimos investigaciones posteriores. Ahora les quiero comentar brevemente, lo que no habíamos incluido en nuestras consideraciones originales. Como decía yo antes, no llueve en la estratosfera, es muy seca, hay poca agua, y en los polos, la temperatura es muy baja, alcanza alrededor de menos 80 grados centígrados. Y a pesar de que sea tan seca se forman nubes de hielo que aceleran los procesos químicos de destrucción de ozono. El ozono no solo ha desaparecido en el Polo Sur que es donde hace mas frío (hace mas frío que en el Polo Norte) sino que realmente ha empezado a desaparecer en muchas otras latitudes. Aquí tenemos una gráfica [14] de la tendencia de la cantidad de ozono, promediada en todo el globo terrestre, para las latitudes de sesenta grados Norte y Sur, se ve claramente que entre los años de 1980 a 1995 hay una tendencia muy clara a una disminución de la cantidad de ozono.

Tenemos aquí una gráfica [15] con la cantidad de cloro de origen orgánico que esta en la estratosfera (para diferentes años). Hay mediciones muy precisas, podemos medir cuanto cloro existe y se ve con toda claridad que la cantidad de cloro ha aumentado mucho. Existe cierta cantidad de cloro de origen natural que no ha cambiado en las ultimas décadas. El cloruro de metilo es un compuesto de origen biológico, es la fuente del cloro natural de la estratosfera. El cloro de origen industrial ha aumentado.

Veamos ahora que ha hecho la sociedad con respecto a este problema.

- Un acuerdo muy importante el llamado Protocolo de Montreal. Este Protocolo originalmente estipulaba simplemente limitar a la mitad, la producción de los CFC's a la atmósfera en los años 70, pero en vista de los efectos tan graves que se vieron, sobre todo en el Polo Sur, se decidió tomar medidas mas fuertes. Primero en Londres y después en Copenhague se hicieron enmiendas al protocolo, las cuales consistieron en parar completamente la producción de los CFC's en los países industrializados para finales de 1995. Los países en vías de desarrollo, como México pueden continuar produciendo CFC's sin aumentar el volumen de producción, por una temporada y después adaptarse a las nuevas tecnologías.

Quiero ahora empezar a hacer una conexión con el ozono que tenemos cerca de la superficie terrestre. El ozono es una molécula que tiene tres átomos de oxígeno [16]. El oxígeno que respiramos tiene dos átomos y lo que pasa es que hay procesos atmosféricos eficientes que de alguna manera rompen a la molécula de oxígeno que respiramos. Cuando se rompe se liberan átomos de oxígeno libres, y estos átomos (lo que ocurre con mayor frecuencia) se encuentran con una molécula normal de oxígeno y forman una molécula con tres átomos. Es por eso que existe ozono en todas partes de la atmósfera. El mecanismo para la producción de ozono es mucho más eficiente en la estratosfera alta en la zona de los trópicos

Las reacciones químicas normalmente las estudiamos los químicos y escribimos la fórmula química correspondiente. Aquí tenemos un mecanismo químico que fue postulado por Sindy Chapman en los años 30 [17]. El ozono molecular se rompe por acción de la luz solar: fotones de alta energía rompen la molécula de oxígeno y producen átomos de oxígeno que rápidamente generan ozono, el cual después absorbe con mucha eficiencia luz ultravioleta proveniente del Sol. Como el ozono es un compuesto estable los átomos de cloro se reciclan y se regeneran en un proceso catalítico de destrucción de ozono debido a los CFC's.

Hay un proceso catalítico natural que realmente controla los niveles de ozono en la estratosfera, esto es, la presencia de óxidos de nitrógeno que existen de manera natural a estas alturas. Los óxidos de nitrógeno que solo están presentes en concentraciones de partes por billón destruyen al ozono [18]. Sin embargo estos óxidos también lo generan. Lo que sucede es que hay otro tipo de compuestos que también están presentes en la atmósfera como los hidrocarburos: el metano es el hidrocarburo más sencillo, gas natural y puede oxidarse en la atmósfera produciendo radicales libres, los cuales a su vez reaccionan rápidamente con el oxígeno molecular. Este mecanismo involucra luz solar de alta energía. -Estoy explicando un mecanismo distinto al que ocurre en la alta estratosfera para formar ozono-. Este otro que estoy mostrando ahora [18a] no involucra luz solar directamente sino dos pasos de naturaleza química. La destrucción de hidrocarburos que reaccionan con la molécula de oxígeno y después con los óxidos de nitrógeno (también de manera catalítica) reaccionan con el compuesto del hidrocarburo combinado con la molécula de oxígeno formando un dióxido de nitrógeno. El dióxido de nitrógeno es un gas café, absorbe luz solar eficientemente y al romperse produce átomos de oxígeno que a su vez generan ozono.

Los óxidos de nitrógeno juegan dos papeles en la estratosfera: por un lado, destruyen al ozono y por el otro, en la baja atmósfera, en presencia de productos de descomposición de hidrocarburos, producen ozono. Ahora podemos entender una diferencia; en la estratosfera reacciona con átomos de oxígeno y en la baja atmósfera al absorber luz se rompe y produce ozono. La situación que nos preocupa es destrucción de ozono en la estratosfera ya que el nos protege de la luz ultravioleta y también nos preocupa la generación de ozono cerca de la superficie terrestre ya que al respirarlo (un producto tan reactivo) puede dañar a los pulmones, esto es, tiene efectos dañinos en la salud del hombre mismo, así como, en muchos sistemas biológicos.

Vemos que estos dos compuestos el ozono y los óxidos de nitrógeno tienen un doble papel. En el caso del ozono: de protección en la estratosfera y de daños a la salud en la baja

atmósfera. Y los óxidos de nitrógeno que dependiendo de la altura, de la concentración de hidrocarburos, o destruye o genera ozono.

La contaminación urbana realmente se descubrió en los Angeles, en los años cincuenta y fue un científico de CalTec, Erick Hagensmith, él que se dio cuenta por primera vez de la naturaleza de smog. El smog proviene de productos de combustión. Los elementos importantes para producir el smog son los hidrocarburos, por ejemplo, la gasolina que se usa en los automóviles, que al romperse generan radicales que pueden atacar al oxígeno.

Otro elemento importante que se produce en la combustión son los óxidos de nitrógeno. En el aire, el nitrógeno (muy estable) y el oxígeno molecular (muy estable) a temperaturas suficientemente altas, se combinan para producir óxidos de nitrógeno y es la combustión de estos compuestos la que genera el smog. También existen partículas en el aire que dan origen al smog, son compuestos orgánicos que se acumulan cada vez más y eventualmente se condensan reduciendo la visibilidad.

Por cierto, quiero comentar, la manera como midió Erick Hagensmith originalmente el ozono en Los Angeles, una manera muy ingeniosa. No había mediciones precisas en aquel entonces, pero se dio cuenta de que el ozono ataca, por ejemplo al hule. El método consistió en usar ligas: estiraba las ligas y contaba el número de grietas que se producían en ellas como función del tiempo. Resulta que es un método efectivo, cuando hay mucho ozono, como el que había en Los Angeles, - me imagino que también aquí en la Ciudad de México- que nos puede indicar las cantidades de ozono presentes.

Esta otra gráfica [19] muestra con un poco más de detalle el mecanismo de formación de ozono troposférico, el ozono del smog. El metano (al que me referí con anterioridad) no contribuye a la formación de smog, porque es demasiado estable. Se oxida y afecta a nivel global. Su vida media en la estratosfera es del orden de 10 años. Para producir smog lo que se necesita son hidrocarburos, o compuestos orgánicos mucho menos estables, por ejemplo, las olefinas que tardan solo unas cuantas horas en descomponerse. Así, durante un día se emiten y se descomponen en la atmósfera y en presencia de óxidos de nitrógeno producen ozono. La secuencia de eventos es que primero se emiten estos compuestos, los hidrocarburos, los óxidos de nitrógeno reaccionan en presencia de luz solar, y la luz descompone al dióxido de nitrógeno para producir ozono.

La química básica de esto, está muy bien entendida, pero existen muchas complicaciones porque las mezclas de hidrocarburos pueden ser muy complejas, por ejemplo, en los hidrocarburos más grandes como los que se usan en la gasolina, existen un gran número de compuestos que se forman eventualmente en la atmósfera, esto es, compuestos como el formaldehído, acetaldehído y el nitrato de peroxiacetaldehído, que es un lacrimógeno y es el que nos hace llorar cuando hay mucho smog.

Si se imaginan que esta gráfica [20] fuera como una montaña en la que entre más lejos estemos de la pantalla, mayor cantidad de ozono hay -las líneas que se representan son niveles constantes de ozono- entonces lo que se ve aquí en esta gráfica es el nivel máximo que se forma con ciertas cantidades iniciales de compuestos orgánicos y de óxidos de nitrógeno. En esta gráfica se han hecho muchas simplificaciones, sin embargo se puede ver

el máximo de ozono. Aunque lo que nos preocupa del ozono en la ciudad, es saber como, cuando y donde se forma de todas maneras es un punto de partida para empezar a discutir que se puede hacer con respecto a este problema. Analizando la gráfica vemos que si uno esta del lado de la montaña donde hay mas óxidos de nitrógeno, la paradoja es que al bajarse de la montaña uno esperaría que disminuyera la cantidad de ozono formado, sin embargo, la paradoja ahí es que la manera de hacerlo es incrementando la cantidad de óxidos de nitrógeno. Otra manera de verlo es que si disminuimos y empezamos a controlar la cantidad de óxidos de nitrógeno subimos a mayores alturas con la consecuencia de que se produce mas ozono. Esto se debe a la propiedad de que cuando hay altas concentraciones de los óxidos de nitrógeno se destruye ozono.

Esto nos empieza a indicar ciertas limitaciones de estas gráficas, porque este tipo de contaminación se genera en otras partes del sistema, pero en fin, lo que es evidente es que disminuyendo los hidrocarburos (si uno esta en el otro lado de la montaña) es una manera eficiente de disminuir la concentración de ozono, pero por otro lado, dependiendo de los detalles, de las cantidades de estos dos tipos de compuestos, se puede uno dar cuenta que hay circunstancias por las cuales, el controlar solo los hidrocarburos no funciona bien. En sitios como al Ciudad de México, donde hay bastante mas hidrocarburos que óxidos de nitrógeno, por lo menos de manera aparente, resulta mas eficiente controlar a los hidrocarburos que a los óxidos de nitrógeno, además de que los sistemas de control para óxidos de nitrógeno son mucho mas caros.

El resultado de este tipo de análisis fue que en 1991 hubo un estudio muy importante de la Academia de Ciencias de los Estados Unidos donde se analizó el tipo de controles que se habían hecho hasta la fecha. En este país se había puesto demasiado énfasis solo en los hidrocarburos, sin hacerle tanto caso a los óxidos de nitrógeno y como resultado de esto, las medidas no resultaron tan efectivas como las que podrían haber sido.

¿Por que hay problemas con los hidrocarburos?. Por un lado hay hidrocarburos de origen natural, las plantas emiten hidrocarburos. Por otro lado no se había estimado bien la alta cantidad de hidrocarburos que emiten los automóviles. El resultado de este tipo de consideraciones es que hay que investigar, para sitios como México, si efectivamente hay que controlar no solo a los a los hidrocarburos sino también, a los óxidos de nitrógeno, a pesar de que el costo sea aparentemente elevado.

Pero quiero volver a hablar de costos dentro de un momento. Antes de esto quiero referirme brevemente a otra situación muy interesante y también muy alarmante. Lo que tenemos aquí en esta gráfica [21] son mediciones de ozono a principios de siglo, comparadas con mediciones de ozono en el presente. En este caso, las mediciones de principios de siglo se hicieron cerca de París, con un método químico muy bien documentado que se pudo reproducir en los años recientes. La cantidad de ozono que existe ahora en Europa cerca de la superficie terrestre es mucho mayor de la que había en le pasado, debido a una contaminación parecida a la que existe aqui en el Valle de México. En estas gráficas no tenemos el ozono producido por contaminación directamente sobre ciudades, sino ozono que existe en toda la troposfera. Ha aumentado casi al doble, lo que está muy claro es que hay mas ozono no solamente sobre las ciudades sino en toda la atmósfera.

Por fortuna ese aumento, no es tanto como el que existe aquí en la Ciudad de México, de tal manera que no es un problema directamente de salud, pero si es un problema importante en sistemas ecológicos por efectos de la química de la atmósfera a nivel global. Lo que está resultando muy claro en años recientes, es que estamos cambiando el funcionamiento de toda la atmósfera, por una contaminación de un tipo parecido a la que existe en centros urbanos. Podemos explicar esto por aumentos de hidrocarburos como el metano (en toda la atmósfera), ha estado aumentando su concentración muy claramente en estas últimas décadas, sin embargo, no es esta, la única explicación al problema. También han aumentado los óxidos de nitrógeno y el ozono a nivel global, pero, no tenemos una gráfica que represente este aumento, porque estos compuestos, tienen una vida media muy corta. Hay grandes variaciones de las concentraciones de ozono y óxidos de nitrógeno fuera de las ciudades, así que es muy difícil tener un promedio que represente lo que pasa en todo el globo terrestre, lo que si es evidente, es que a pesar de esta complejidad las cantidades de óxidos de nitrógeno y ozono están aumentando y esto a su vez afecta a la química de la atmósfera de una manera importante.

Uno de los factores que también se deben de tener en cuenta, además de la quema de combustibles fósiles (usados en los automóviles y en la industria) es la quema de bosques en los trópicos para uso agropecuario. Hay grandes quemas, tanto en las Amazonas como en el África. Esta es una forma sencilla de preparar la tierra para plantar, pero el efecto inmediato de esta acción es una contaminación en toda la atmósfera a nivel global. De nuevo, de una manera muy parecida a la química que existe en la Ciudad de México, se producen óxidos de nitrógeno. Es claro que es una combustión no controlada y se producen compuestos orgánicos que son ingredientes del smog. También producen mucho humo y partículas -que por cierto, también es un problema en la Ciudad de México-. Vemos aquí, analogías muy importantes entre sí, es decir, procesos muy locales con procesos que están ocurriendo a nivel global.

Ahora voy a referirme brevemente a otro problema global, *el efecto invernadero*. Simplemente voy a hacer referencia de él, porque el efecto no está conectado directamente con el problema del ozono pero está conectado indirectamente a través del problema de contaminación. La acumulación de gases como el bióxido de carbono (producto de la combustión) está cambiando el balance de radiación en la atmósfera, de tal manera que es posible que se esté afectando el clima de toda la Tierra. Lo que quiero resaltar es que tenemos varios problemas a nivel global que están relacionados entre sí: el problema de efecto invernadero, por la presencia de bióxido de carbono, otros gases y el problema del aumento de ozono en la baja atmósfera que además es el origen a nivel local de muchos otros problemas.

El aumento de la población mundial y con ella, las actividades industriales, es un problema que ahora preocupa al mundo científico. El problema de base, es el aumento de la población mundial. La población se ha duplicado en relativamente pocos años. Por fortuna, aparentemente ya se empezó a nivelar este aumento.

Veamos ahora que pasa con el consumo per capita de energía y su relación con la contaminación. En países como Estados Unidos y Canadá es mucho mayor que en México y que en los países en vías de desarrollo. El problema que tenemos que resolver es como

aumentar el nivel de vida de todos estos países en vías de desarrollo (que normalmente involucra un aumento de consumo de energía) considerando el aumento de población mundial. Lo que es evidente, es que hay que hacerlo, de una manera distinta. No vamos a poder consumir energía de la misma forma que lo hecho por los países industrializados. Hay que inventar métodos nuevos mas eficientes. Para lo cual tenemos ciertos precedentes: en países europeos, por ejemplo, el consumo per capita es menor y gozan de un nivel de vida elevado.

Regreso, para terminar, al problema de la contaminación en la Ciudad de México. ¿Que podemos decir sobre soluciones a este problema?. No soy experto en este campo, no es un problema que yo haya estudiado con gran detalle, tiene muchas dimensiones además de la científica pero quizás pueda hacer algunas conexiones de nuevo con el problema global. Por un lado, sabemos que hay soluciones equivocadas, por ejemplo, en Bangkok (que también hay una contaminación enorme), una buena parte de la contaminación se debe al uso de las motocicletas. Aparentemente podríamos pensar que estos vehículos son eficientes desde el punto de vista del transporte, pero no tienen un sistema de control, son altamente contaminates. En Estados Unidos, en Los Angeles ya están muy controladas, e inclusive las cortadoras de paso o todo tipo de motores sencillos.

El mensaje aquí es que no solo hay que controlar a los automóviles sino a toda la gama de actividades humanas que conducen a contaminar la atmósfera. Quiero terminar, haciendo una serie de comentarios.

- Lo que es evidente es que necesitamos cambiar en la dirección de ser mucho mas eficientes en el uso de energía; en la medida en que esta eficiencia aumente, podemos contribuir al mejoramiento tanto del problema local como del global.
- Por otro lado, desafortunadamente no hay soluciones muy sencillas, no hay gasolinas mágicas que no contaminen. En el caso de los CFC's se pudieron substituir por compuestos que no dañan a la estratosfera en la misma medida. Esto es una solución tecnológica. En el caso de la gasolina - hay algunas que son peores que otras- sabemos que si tiene olefinas, reaccionan mas rápidamente, también sabemos que si tienen mayor presión de vapor se evaporan más y producen mas contaminación. Hay algunas medidas que desde luego se pueden tomar. Ya existen automóviles que contaminan mucho menos que otros.
- Lo que esta muy claro es que, parte de contaminación proviene de los automóviles, por ejemplo, en Los Angeles históricamente se vio con claridad que la mayor parte de las contaminación provenía de los autos viejos y según tengo entendido, también en México. Con el programa *Hoy no Circula*, originalmente el incentivo fue comprar mas automóviles viejos, pero la situación actual es que si existe un automóvil que no contamine ya no es necesario aplicarle el programa. Ese es un incentivo en una dirección apropiada para disminuir la cantidad de automóviles que contaminan. Sin entrar en detalle, lo que quiero aclarar es que el problema de fondo desde el punto de vista social es un problema de costo, un problema económico. ¿Quien paga y cuando?
- Quiero hacer una analogía con el problema de los CFC's. Cuando se empezaron a hacer negociaciones sobre lo que debía hacerse en el mundo para controlar a los CFC's. Los países en vías de desarrollo estaban apuntando con claridad que eran los países industrializados los que habían contaminado el resto del mundo y ¿Por que iban a ser

ellos los que tenían que empezar a usar tecnologías mas caras?. La solución tuvo que hacerse con creatividad: la solución fue que los países industrializados formaran un fondo, el llamado Fondo Multilateral, que realmente desde el punto de vista de la economía global es una cantidad pequeñísima de recursos. Este Fondo esta destinado a ayudar a los países en vías de desarrollo para hacer la transformación tecnológica. Esto les sale muy caro al los países en vías de desarrollo pero solamente desde un punto de vista directo. Si uno toma en cuenta el costo al medio ambiente, el costo total es menor. En el caso de los CFC's, el costo no se iba a ver de inmediato sino con efectos en todo el sistema global en años posteriores.

Volviendo al problema de la contaminación en las Ciudad de México, creo que es importante ver esto con claridad; es un problema social en la medida que se exija que haya automóviles nuevos, que no contaminen. Por ejemplo, los autos con catalizadores de tres vias, contaminan diez o veinte veces menos que los automóviles antiguos, así que realmente no tiene ningún sentido hacer una inversión que no considere esta gran diferencia de tecnología. Aquí la dificultad es que la gente con menos recursos se discrimina en cuanto a su accesibilidad para comprar autos nuevos -claro que la solución evidente es mejorar el transporte colectivo-.

El mensaje que quiero transmitir es ver esto con claridad. Si se toma en cuenta el costo para la sociedad, no resulta mas barato usar 'carcachas' o coches viejos, a la larga resulta mas barato que los coches sean menos contaminates. Dejar que la gente con pocos recursos compre coches sin controles de emisión, en ultima instancia, todo el mundo la tiene que pagar. Una manera quizá mas eficiente sería considerar subsidios para ayudar a las personas con menos recursos a adquirir automóviles que no contaminen, como pueden ver, esto no es un problema científico sino social desde el punto de vista de costo a la salud y al medio ambiente.

Tengo entendido, por ejemplo en Grecia, en Atenas, hay un programa del gobierno para comprar "carcachas" y facilitar la compra de coches no contaminates. Un error, según yo, seria dar prestamos con intereses bajos para que la gente con pocos recursos económicos compre coches baratos. Es una inversión a corto plazo que en ultima instancia va a salir mas caro. Y de nuevo, es importante ver también a nivel de gobierno, que es lo que se solucionó en el problema de los CFC's.

Quiero terminar haciendo dos reflexiones importantes del problema de los CFC's y del ozono estratosférico. Por un lado se demostró con toda claridad que la humanidad puede afectar a todo el globo. Es el primer precedente, no tenemos duda, en vista de la claridad de todas las mediciones atmosféricas, de que la atmósfera ha sido afectada de manera global por actividades industriales. Por otro lado, hemos visto una solución, no perfecta y que todavía no ha funcionado a la perfección, tenemos que tener paciencia y esperar varias décadas para que desaparezca *el agujero de la capa de ozono*. Vimos como es posible que distintos sectores de la sociedad, el sector industrial, el científico, los gobiernos, las organizaciones de protección al medio ambiente etc., trabajaron juntos en un sistema de colaboración de tal manera que se pudieron formular reglamentaciones que actualmente se están llevando a cabo.

Quizá exista una manera de hacer algo análogo con respecto al problema de la contaminación en la Ciudad de México, aclarando que no se pueden tomar decisiones bruscas, la economía puede verse afectada de una manera muy seria, si estas medidas se toman con demasiada rapidez, pero por lo menos hay que empezar por un buen camino y apuntar en la dirección apropiada.

Muchas gracias por su atención.