

ACTIVIDADES HUMANAS QUE SE REVIERTEN CONTRA LA VIDA: EL DETERIORO ATMOSFÉRICO

Sonia María Amador Berrocal

INTRODUCCIÓN

El origen y la evolución de vida en el Planeta han estado íntimamente ligados al clima, de manera que sus variaciones influyen en forma notable, sobre todos los seres que lo habitan.

El clima terrestre, dependiente directo de ciertos factores atmosféricos, ha permanecido estable durante mucho tiempo, pero pruebas recopiladas, casi todas en los últimos años, revelan que algunas actividades humanas están alterando las condiciones climáticas necesarias para la existencia de los organismos vivos.

El conocimiento bastante reciente de variaciones en la composición química y las proporciones de los componentes atmosféricos, inducidas por la humanidad, constituye una de las grandes preocupaciones del mundo actual, pues coloca a todos los habitantes de la Tierra en situaciones peligrosas, muchas de ellas aún desconocidas.

La gran mayoría de los trastornos atmosféricos han sido causados por la contaminación ambiental y se detectaron al principio en Europa y América del Norte, probablemente porque en esas áreas se agrupan los países desarrollados y porque fue allí donde se recopilaron los primeros datos de estudios incipientes. En las regiones tropicales, según indica la información recopilada, los daños son menores, pero tal aseveración no es confiable, pues los trabajos científicos son aún insuficientes.

Desde 1988 se han venido llevando a cabo programas a nivel mundial, con la participación de todos los países, desarrollados y no desarrollados, en tres campos específicos:

- 1- revisión y evaluación de los datos científicos disponibles acerca del cambio climático
- 2- evaluación de los posibles impactos del cambio climático sobre el medio ambiente, las actividades sociales y económicas
- 3- elaboración de estrategias para responder a los cambios ocurridos.

Sus resultados, aunque aún en ciernes, constituyen en la actualidad fuentes de consulta para la planificación de diversas actividades. A ellos acuden los responsables de elaborar políticas, científicos y otros expertos en el mundo entero, porque no es posible planificar sin tomar en cuenta las realidades y proyecciones acerca de la alteración atmosférica que aunque poco conocida, afecta inevitablemente todas las actividades humanas.

Con el objetivo de repasar en forma sencilla los conceptos científicos acerca de la atmósfera terrestre, así como los aspectos más relevantes de las alteraciones atmosféricas inducidas, sus posibles efectos, los factores antropogénicos que las producen y las medidas remediales adoptadas, es que se escribe el presente texto, sin dejar de lado los escasos conocimientos que al respecto, se han producido en Costa Rica.

LA ATMÓSFERA TERRESTRE

La capa atmosférica que envuelve a la Tierra, se originó a partir de los gases emanados del interior del mismo planeta, los cuales se fueron acomodando en capas superpuestas, según sus densidades, depositándose los más

pesados cerca de la superficie terrestre y los más livianos, hacia el exterior (Nason y De-Haan, 1990).

Aunque se reconocen una serie de estratos o capas en la atmósfera, interesan únicamente dos de ellas, la troposfera y la estratosfera (cuadro 1). Es necesario hacer la observación de que la altura, partiendo del nivel del mar, a la cual se extienden los estratos gaseosos, varía según la latitud y otros factores, no concernientes por el momento.

CUADRO 1

Capas de la atmósfera

	Altura	Función principal
Troposfera	de 0 a 12 Km	determinar el clima
Estratosfera	de 12 a 100 Km	albergar al ozono

Fuente: Bojkov, 1994

La composición química de la atmósfera ha variado a lo largo del tiempo. Al comienzo fue mucho más abundante el dióxido de carbono que el nitrógeno, al contrario de lo que ocurre en la actualidad. Uno de los componentes de vital importancia para los organismos, el oxígeno, no estuvo presente en la atmósfera primitiva y ya que los volcanes no lo desprenden y no se conocen mecanismos atmosféricos ni geoquímicos que lo produzcan, se presume que este gas proviene en su totalidad, de la fotosíntesis realizada por los vegetales, de manera que las diferencias entre la atmósfera actual y la primitiva, están íntimamente ligadas a la evolución de la vida en el planeta (Castro y Banichevich, 1998). A su vez, en forma recíproca, la composición química de la atmósfera ha permitido el desarrollo de las diferentes formas vivientes, manteniendo un clima apto, que podría ser drásticamente alterado al modificar sus componentes o las proporciones entre ellos. En el cuadro 2 puede observarse la composición química de la atmósfera actual y el aporte de cada uno de los componentes, al efecto invernadero natural, que se explica en el próximo apartado.

CUADRO 2

Principales componentes de la atmósfera terrestre y su aporte al efecto invernadero natural

Componente	Concentración en %	Aporte al efecto invernadero natural, en %
Nitrógeno	78,08	-
Oxígeno	20,95	-
Agua	0,84	62,5
Dióxido de carbono	0,036	21,8
Ozono	1,0x10-3	7,3
Metano	1,5x10-4	2,4
Oxido nitroso	2,5x10-5	4,2
Trazas otros gases	-	1,4

Fuente: Castro y Banichevich, 1998:11

EL EFECTO INVERNADERO

Según se estableció previamente, el clima de la Tierra depende en gran medida de la composición química de la atmósfera que la envuelve. Las radiaciones de onda corta procedentes del Sol que llegan al sistema tierra-atmósfera, son en su mayor parte absorbidas por la superficie terrestre, que se calienta y el resto irradiadas hacia el espacio en forma de ondas largas -infrarrojas o IR-, reflectividad que recibe el nombre de *albedo* (Charlson y Wigley, 1994). Tanto las nubes como algunos gases presentes en la atmósfera, capturan estas radiaciones IR terrestres y luego las emiten también como IR. Pero no toda esta energía capturada sale al espacio exterior, pues parte se queda atrapada, lo cual produce un calentamiento de la atmósfera inferior, que es el fenómeno conocido como *efecto invernadero* (Novelli y otros, 1995). Sin este efecto la Tierra sería inhabitable, pues su temperatura andaría cerca de los -5 grados C (Bate y Morris, 1995).

Como puede observarse en el cuadro 2, aparte del vapor de agua, entre los gases que más contribuyen al efecto invernadero natural se encuentran el dióxido de carbono, el metano y los óxidos nitrosos, cuyas concentraciones están aumentando en forma alarmante debido a las actividades humanas. Por eso son llamados *gases invernadero*, ya que contribuyen a elevar rápidamente dicho

proceso natural. Dentro de los gases invernadero actualmente se distinguen dos grupos:

- *naturales*, como el dióxido de carbono y el metano. Son los responsables de que el clima de la Tierra se haya mantenido relativamente cálido y constante por largos períodos (ver cuadro 2)
- *antropogénicos*, como los clorofluorocarburos (CFC) y otros, introducidos recientemente por el hombre (Novelli y otros, 1995).

Las actividades humanas también han motivado cambios en las proporciones de los componentes químicos de la atmósfera, aumentando las concentraciones de gases naturales como el monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄), estos dos últimos considerados gases invernadero de gran importancia, por la energía que retienen. A pesar de que el CO no absorbe calor en forma significativa, cobra un papel importante en el cambio climático (Novelli y otros, 1995), como se explica más adelante.

Diversas comparaciones entre gases atrapados en burbujas dentro del hielo de los casquetes polares, que datan de mucho tiempo atrás, con muestras de gases provenientes de la atmósfera actual, revelan que las concentraciones de CO₂ han aumentado desde la Revolución Industrial en un 50% aproximadamente. Se calcula que al inicio de la Revolución Industrial los niveles de CO₂ eran de 290 ppm, mientras que en 1990 eran de 430 ppm (Bate y Morris, 1995). Las mediciones realizadas en la troposfera entre 1960 y 1990, también confirman un aumento sostenido en las concentraciones de este gas. El crecimiento continuo es provocado principalmente por la quema de combustibles fósiles, calculándose que cada millón de personas en una ciudad de un país desarrollado, con alto consumo de energía, genera unas 25 000 toneladas diarias de CO₂ (Boodhoo, 1997 a). En el cuadro 3 se da una idea de la distribución geográfica de la producción de CO₂ en el mundo, el cual está en relación directa con el consumo energético.

CUADRO 3

Distribución geográfica de la producción de CO₂ en el mundo

Región	Porcentaje de producción de CO ₂
Estados Unidos	23
Antigua Unión Soviética	19
Europa Occidental	16
Japón	6
América Latina	6
Resto del mundo	30

Fuente: Vegas, 1990

Otro amplificador del efecto invernadero es la deforestación. Al disminuir la cantidad de organismos fotosintéticos, disminuye también la demanda de CO₂, acumulándose su exceso en la atmósfera, a tal punto que solamente la degradación de los bosques tropicales húmedos, provoca que se aumente entre un 10% y un 30%, del CO₂ excesivo (Llerena, 1990). Esos porcentajes son fáciles de explicar cuando se recuerda que por ejemplo en la selva amazónica en 25 años, entre principios de la década de los años 70 y mediados de los 90, el área deforestada fue de unos 300 000 Km₂ (Baldicero, 1995).

Los océanos, al igual que los bosques, se consideran sumideros que absorben el CO₂, pues en la gran superficie poblada de fitoplancton fotosintético, también se consumen grandes cantidades de este gas. Pero al igual que con la vegetación terrestre, los microorganismos planctónicos están mermándose rápidamente por el efecto dañino de las radiaciones ultravioleta procedentes del sol, que llegan hasta la superficie terrestre en forma más directa, debido al agotamiento de la capa de ozono (CMI, 1994) según se explica al mencionar los problemas relativos al mismo. Finalmente la oxidación de CO para conformar CO₂, también contribuye a elevar las concentraciones de este último gas (Novelli y otros, 1995), con fuerte influencia en el efecto invernadero.

El metano (CH₄) atmosférico actúa en forma semejante al CO₂, atrapando energía y se ha procedido a comparar su concentración, primitiva y actual, de igual manera que con el dióxido de car-

bono, aunque se desconoce cuál es la magnitud de las emisiones totales de metano (Victoria y otros, 1990). Las fuentes primordiales de CH_4 son tierras húmedas, cultivos de arroz, pozos petrolíferos, animales rumiantes y termitas, que actúan como inductores de la degradación de materia vegetal. Además proviene en menor cantidad de la quema de biomasa, de los océanos y de los escapes de gas natural. Casi todo el CH_4 se elimina de la atmósfera por reacción con el radical OH. Su concentración también ha venido en aumento, aunque en el decenio de los años 80 la tasa de crecimiento disminuyó, probablemente debido a la reducción de las fuentes, a una mayor eficiencia en la captación de gas natural en la antigua Unión Soviética y a una reducción de las emisiones provenientes de la quema de materia vegetal (Novelli y otros, 1995).

El CO tiene un efecto indirecto. Este gas reacciona con el radical hidroxilo (OH) para formar CO_2 , de ahí que cuando las concentraciones de CO aumentan en la atmósfera, las de OH disminuyen. Se presentan entonces dos consecuencias importantes:

- se contribuye a incrementar la concentración de CO_2 .
- otros gases atmosféricos como el CH_4 principalmente, que se oxidan y eliminan reaccionando con OH, se ven afectados. Al ser el OH "atrapado" por CO, queda impedido para reaccionar con el metano, aumentando consecuentemente la concentración de este último.

En ambos casos el resultado es un aumento en la absorción de radiaciones IR y por lo tanto de la temperatura terrestre (Novelli y otros, 1995).

Cada uno de estos gases contribuye a atrapar un porcentaje distinto de la radiación total que cautiva la atmósfera: se calcula que actualmente el CO_2 colabora con 48%, el CH_4 con 20%, los CFC con 14% y otros gases, entre los que destacan los óxidos de nitrógeno, con un 18%. A pesar de que los gases invernadero antropogénicos, los CFC, tienen un potencial superior que el CO_2 para atrapar calor, su contribución es inferior porque se encuentran en menores cantidades (Bate y Morris, 1995).

PREOCUPACIÓN POR EL CAMBIO CLIMÁTICO

La idea de que las actividades humanas podrían modificar la composición de la atmósfera y con ello producir cambios climáticos, proviene desde el siglo pasado, cuando en 1827 Fourier expuso sus inquietudes al respecto (Novelli y otros, 1995). Más tarde Arrhenius, en 1896, estimó que la duplicación del dióxido de carbono procedente de la quema de combustibles fósiles, provocaría un calentamiento global de 4 a 6 grados C (White, 1990), lo cual fue retomado por Callendar en 1938 (Novelli y otros, 1995). Durante 1957 se puso en marcha el Año Geofísico Internacional, proyecto destinado a registrar por primera vez, la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera a nivel mundial, del cual se sospechaba que podría contribuir al calentamiento de la Tierra. Desde esa época los datos recopilados confirmaron un incremento sistemático de la cantidad de dióxido de carbono (White, 1990). En 1975 se calculó que al duplicarse la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera se produciría un calentamiento climático global de unos 3 grados C sobre toda la superficie de la Tierra, cálculo que ha sido repetido posteriormente en diversas oportunidades, obteniéndose resultados muy variados (White, 1990). Después de la Conferencia Mundial sobre el Clima, celebrada en 1979, se decidió continuar realizando estudios sobre el clima y el cambio climático (OMM-PNUMA, 1992).

El paso decisivo para lograr acuerdos posteriores a nivel mundial, se dió en 1988, cuando la Organización Mundial de las Naciones Unidas (ONU), solicitó a la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y al Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), que convocaran a un foro internacional de expertos, para estudiar el calentamiento global del planeta (Ramírez, 1998), el cual dió como resultado la conformación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre los Cambios Climáticos, IPCC (OMM-PNUMA, 1992). La OMM en conjunto con otras entidades, estableció en 1992 el Sistema Mundial de Observación del Clima (SMOC), el cual se propone entre otros objetivos, detectar

cambios climáticos, dar seguimiento a sus impactos y realizar investigaciones especializadas en este campo. Con dicho programa se espera obtener una visión integrada de todos los componentes del cambio climático, necesaria para interpretar adecuadamente la variabilidad del clima (Kibby, 1996), pues en la actualidad hay mucha incertidumbre (Bate y Morris 1995).

En diciembre de 1997, durante la Conferencia de las Partes celebrada en Kioto, Japón, conocida como "Protocolo de Kioto", se acordó un reducción de 5,2% con respecto a 1990, de las emisiones de seis gases invernadero, por parte de los países desarrollados (OMM, 1998) según se indica en el cuadro 4 a continuación:

CUADRO 4

Compromiso de reducción de las emisiones de gases invernadero de los países desarrollados, de 2008 a 2012

Países	Porcentaje de reducción con respecto a 1990
Unión Europea	8
Estados Unidos	7
Japón y otros	6
Rusia y Ucrania	No disminuirán ni aumentarán

Fuente: Ramírez, 1998

Algunos países como Noruega, Australia e Islandia aún pueden incrementar las emisiones hasta un 8% aproximadamente. No se establecieron obligaciones para países en desarrollo, los cuales es posible que incrementen notablemente la producción de gases invernadero, como China, India y México, llegando a convertirse en los mayores emisores de los próximos años (Ramírez, 1998).

Al comparar los datos incluidos en los cuadros 3 y 4, puede apreciarse que las tasas de reducción de emisiones de CO₂ son pequeñas, en contraste con la producción de las mismas. Esta diferencia, sumada a la actual y eventual producción de los países no incluidos en el convenio, como se indicó en el párrafo anterior, conduce a pensar que en realidad no se vislumbra remedio para la elevada producción de CO₂ en el mundo, a corto y mediano plazo.

¿SE ESTÁ CALENTANDO LA TIERRA?

En la década de 1980 los científicos dieron la voz de alarma ante la posibilidad de que la atmósfera terrestre estuviese aumentando su temperatura promedio, a consecuencia de las emanaciones de gases invernadero antropogénicos. A partir de entonces se utilizan los términos *variabilidad climática*, para referirse a los cambios naturales que sufre el clima y *cambio climático global*, para designar aquellos cambios ocurridos como consecuencia de los gases antropogénicos (Bonatti, 1998).

Los científicos aún no llegan a un acuerdo acerca de las modificaciones del clima y se ha especulado mucho con respecto al calentamiento. Entre los efectos esperados que tendría el cambio climático global, se citan (Bonatti, 1998, García, 1995):

- a- Aumento del nivel del mar, hasta unos 20 cm, al año 2030. Debido tanto a dilatación de las aguas oceánicas por el aumento en la temperatura, como a la fusión de los hielos polares. Esto causaría efectos nocivos importantes tales como:
 - inundación de las zonas costeras bajas e islas de tamaño pequeño
 - salinización de los depósitos de aguas subterráneas
 - alteración de los estuarios y otros ecosistemas costeros.
- b- La disponibilidad de agua variaría. Al alterarse la precipitación y evaporación por el cambio climático se provocarían fuertes sequías en las latitudes medias y aumento de precipitaciones en latitudes polares, con lo cual se afectarían las actividades agrícolas.
- c- Aumento de las tormentas tropicales y huracanes, producidas por cambios en la dirección y velocidad de las corrientes de viento, que variarían debido a la modificación de la temperatura. Esto podría ocasionar pérdidas considerables en vidas humanas, viviendas y cultivos, entre otras.
- d- El aumento de CO₂ podría incrementar el rendimiento de las cosechas, sin embargo los cambios de temperatura desplazarían las regiones agrícolas desde la zona tropical hacia

los polos. Esta combinación podría tener efectos nocivos en la producción agrícola.

- e- La salud humana se vería afectada. Al disminuir la disponibilidad de agua, es posible que se reduzca el nivel sanitario, que unido a una alimentación deficiente, podría desatar epidemias peligrosas.

Actualmente se continúa buscando evidencias de la alteración del cambio climático global, por ejemplo en los datos recopilados en registros hidrológicos. Aunque no se ha hallado ninguna, algunos científicos creen probable que se aumente la intensidad de la lluvia y por lo tanto el número de inundaciones, conforme crece la concentración de gases invernadero (Kundzewicz, 1998). También se debate en torno a que se esté calentando cada vez más el planeta y cause un aumento de la temperatura, o sea, produzca un cambio climático global. Según cálculos realizados con base en los datos de temperaturas mundiales recolectadas por satélites durante 10 años, las variaciones de temperatura no muestran una tendencia al calentamiento, sino que las alzas han estado ocurriendo al azar. Por otra parte, algunos psicólogos proponen que la preocupación por el futuro es exagerada, debido a la inseguridad y las angustias metafísicas, a las que no escapan los científicos (Llerena, 1990).

En los últimos años se ha comprobado que en las ciudades se produce el *efecto de isla de calor urbano*, que es un calentamiento, de entre 0,5 y 2 grados C aproximadamente, con respecto a las zonas rurales. Esta elevación de la temperatura se produce porque los árboles y la vegetación en general, retienen menos calor que el asfalto, el concreto y los ladrillos. Además las emanaciones de los vehículos y el lanzamiento de gases antropogénicos, más elevados que en el campo circundante, colaboran con el efecto invernadero en mayor proporción. Las edificaciones impiden la libre circulación del aire, a lo cual se suman muchas veces conglomerados de personas, dando como resultado final promedios de temperatura mayores en las áreas urbanas que en las rurales vecinas (Bate y Morris, 1995). A este calentamiento provocado, algunas veces se agrega el efecto creado en condiciones de viento débil: la

masa de aire caliente se eleva sobre la ciudad; los vientos locales corren hacia el aire de mayor temperatura, o sea hacia el centro de la ciudad, originando los llamados *vientos urbanos*, cuyo efecto es concentrar el aire contaminado y caliente, sobre la metrópoli (Boodhoo, 1997 b). Las mediciones recientes, realizadas por la NASA desde el espacio, con sensores satelitales, obvian el problema del efecto de isla de calor urbano y son estos datos los que más dudas han generado con respecto a la teoría de un calentamiento global del planeta, pues las temperaturas registradas entre 1979 y 1994, no mostraron aumentos significativos, aunque es un período muy breve, para concluir acerca de ello (Bate y Morris, 1995).

Para explicar las fluctuaciones de temperatura de hasta 0,5 grados C detectadas a nivel global, se han propuesto diversas teorías, ajenas al calentamiento provocado por el efecto invernadero, entre las cuales figuran:

- Los ciclos solares, que de por sí modifican la cantidad de radiación recibida en la Tierra. Ciertos estudios revelan que entre más corto sea el ciclo solar, mayor es la radiación que llega a la Tierra y por lo tanto eleva su temperatura. Tal influencia cíclica sería capaz de inducir fluctuaciones en la temperatura global del planeta.
- Numerosos experimentos señalan que entre mayor sea la concentración de CO₂ en el aire, más se desarrollan las plantas, mejora el follaje y se requiere menor cantidad de agua para su funcionamiento normal. Esto implica que en condiciones de sequía y con altos niveles de CO₂, como se presentan en diversas regiones áridas de la Tierra, cabría una prosperidad de la agricultura. Tales experimentos sugieren que podría operar un mecanismo de retroalimentación: al aumentar la disponibilidad de CO₂ se estimularía la actividad fotosintética y por lo tanto el consumo de este gas. Ello a su vez reduciría la tasa de acumulación de CO₂ en la atmósfera y por lo tanto no llegaría a producirse el gran calentamiento esperado.
- El calentamiento de invernadero estimula la evaporación y por lo tanto la formación de

nubes. Una capa más densa de nubosidad sería capaz de proteger mejor la superficie de la Tierra y tendería a enfriar al planeta.

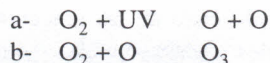
- La hipótesis tan difundida de que un calentamiento global conduciría al derretimiento de los hielos polares, provocando la subida del nivel del mar y la inundación de las zonas costeras bajas, no ha recibido apoyo de las últimas observaciones satelitales. De acuerdo con éstas, las masas heladas aumentaron su volumen de 1980 en adelante, durante los veranos calurosos, elevando así la cantidad de calor que se desprende de la Tierra. Este podría ser un mecanismo que tiende a contrarrestar el alza en la temperatura, para mantener la estabilidad del ecosistema mundial.

A pesar de que no hay certeza científica de la relación entre los gases invernadero y el cambio climático global, es muy atinado el llamado de atención que hace el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambios Climáticos (IPCC), en el sentido de que no deben usarse las incertidumbres para posponer la responsabilidad que las sociedades actuales tenemos en mantener las condiciones ambientales del Planeta, aptas para la vida futura (CMI, 1994).

EL OZONO ATMOSFÉRICO

El otro gran problema a tratar en la alteración de la atmósfera terrestre, es el relativo al ozono.

La molécula de ozono, simbolizada con O_3 , está compuesta por tres átomos de oxígeno que proceden de la separación de moléculas de O_2 , por acción de los rayos solares ultravioleta, efecto conocido como *fotodisociación*. Los átomos liberados de O reaccionan con moléculas de O_2 , formando finalmente el ozono, por lo cual se deduce que este gas es indirectamente de origen biológico (Banichevich, 1997). A continuación se esquematizan, en forma muy simplificada, esas reacciones que comúnmente están ocurriendo en las capas atmosféricas entre 20 y 60 Km de altura (Banichevich y Fernández, 1994):



Aunque fue descubierto por Schonbein en 1839, no fue sino hasta finales del siglo XIX y principios del XX, cuando se descubrió su importancia en la atmósfera de la Tierra (Banichevich, 1994), tanto para proteger a la vida de las dañinas radiaciones ultravioleta, como para actuar junto con otros gases atmosféricos, en la regulación de la temperatura del Planeta, creando el efecto invernadero (Ander-Egg, 1985).

En condiciones normales el 90% del ozono se encuentra diluido en la atmósfera a una altura aproximada entre los 15 y 25 Km de altura, o sea en las partes bajas de la estratosfera, por tanto no lo respiramos (Crutzen, 1998). En la zona inferior de la atmósfera, la troposfera, se halla únicamente el 10% del ozono (Bojkov, 1994).

Una de las grandes preocupaciones del mundo actual es la degradación del ozono, cuando desde 1971 se descubrió que gases menos densos que el aire, como el freón, se habían elevado a la troposfera. Estos gases, conocidos genéricamente como *clorofluorocarbonos* o *CFC*, se descomponen por acción de la luz ultravioleta, liberando átomos de algún halógeno como cloro o flúor. Otros parecidos son los *halones* o *halocarburos*, que liberan bromo (Graedel y Crutzen, 1989), los cuales pueden iniciar una reacción en cadena, destructora de las moléculas de ozono (Ander-Egg, 1985). Los CFC se utilizaron profusamente a partir de la década de 1960 en envases aerosoles, sistemas de refrigeración, aires acondicionados, disolventes limpiadores de fábricas y en industrias de espuma plástica. Además se han señalado también como degradadores del ozono, a los óxidos nitrosos provenientes del escape de aviones supersónicos y de ciertos fertilizantes nitrogenados que se utilizan frecuentemente en agricultura (Fournier, 1993). Pero las investigaciones recientes sugieren que en realidad los responsables máximos del deterioro del ozono son el cloro y el bromo derivados de los CFC y los halones (Bojkov, 1995), los cuales tienen tiempos de residencia en la estratosfera, que van de 50 a 100 años (Fuenzalida, 1990).

Un esquema simplificado de las reacciones por medio de las cuales estas sustancias destruyen la capa de ozono, es el siguiente (Banichevich y Fernández, 1994):



Luego de esta secuencia queda de nuevo libre el cloro —u otro halógeno— listo para unirse a una nueva molécula de ozono y continuar así su proceso destructivo.

EL OZONO Y LAS RADIACIONES ULTRAVIOLETA

Actualmente se reconoce que la importancia del ozono para los diferentes seres en el planeta, es comparable con la del agua y del oxígeno molecular (O_2), asegurándose que este trío es fuente garantizadora de vida.

Las dos propiedades más notables que tiene el ozono están íntimamente relacionadas entre sí. Una es la capacidad de regenerarse rápidamente, por lo que dichas moléculas se están construyendo y destruyendo en forma continua. La otra característica es la de absorber radiaciones solares. Cuando esto ocurre, las moléculas de O_3 se disocian como sigue:



Estas propiedades son las que tienen gran importancia para los seres vivos, pues el peligro letal que implica la radiación ultravioleta para ellos, es eliminado gracias a la filtración ejercida por el ozono, permitiendo que puedan ser aprovechadas aquellas radiaciones indispensables para procesos tan importantes como la fotosíntesis (Banichevich, 1998).

El ozono filtra las radiaciones cuyas longitudes de onda están entre los 200 y los 320 nm —un nanómetro, nm, equivale a 10^{-9} metros (Resnick y otros, 1996)— de manera que comprende la mayor parte de los rayos ultravioleta, que son de tres tipos (Wright, 1993; Bonatti, 1998; Vega, 1998 a):

- *UV-A*, con longitudes de onda de 320 a 400 nm. Son absorbidos muy levemente por la capa de ozono y por lo tanto aquellos que logran alcanzar en forma natural, la superficie terrestre. Actúan sobre la piel humana provocando el bronceado, ya que las células de la epidermis producen un pigmento oscuro llamado melanina, para evitar la penetración de estos rayos.
- *UV-B*, con longitudes de onda entre 290 y 320 nm. Son absorbidos en su gran mayoría o dispersados en la atmósfera. Estas radiaciones sumamente dañinas, causan quemaduras y diferentes tipos de cáncer, también afectan a los cultivos y a los organismos marinos, entre otras consecuencias.
- *UV-C*, con longitudes de onda entre 200 y 290 nm. Son completamente absorbidos por el ozono y el oxígeno molecular. Estas radiaciones son las más dañinas, ya que destruyen las células.

Al disminuir la cantidad de ozono en la atmósfera, se permite el paso de una cantidad mayor de radiaciones *UV-B*, con los consecuentes peligros para la vida, siendo este el punto medular de la preocupación actual por la destrucción del ozono.

Entre los efectos nocivos causados por las radiaciones ultravioleta, que en ausencia del ozono llegarían directamente hasta la superficie terrestre, se mencionan: en humanos, aumento de la incidencia de varios tipos de cáncer destacando entre ellos, el de piel, desórdenes neurológicos, alteraciones genéticas, quemaduras y envejecimiento de la epidermis, alteraciones en el sistema inmunológico, cataratas y degradación de la retina en los ojos. En plantas y animales, también trastornos genéticos, posibles enfermedades congénitas, una disminución de las cosechas y destrucción de las algas del fitoplancton marino, principales responsables de la fotosíntesis en el planeta (Ander-Egg, 1985; Fournier, 1993). Además se sabe que las radiaciones *UV* dañan materiales como el plástico (Wright y Marengo, 1992, 1996) y probablemente contribuyan al cambio climático global, pero hasta hoy no ha sido posible concluir con certeza acerca de varios de los efectos mencionados.

A pesar de lo perjudiciales que nos parezcan las radiaciones ultravioleta, también tienen consecuencias benéficas. Son las responsables del desencadenamiento de la síntesis de vitamina D en el cuerpo humano. Han sido utilizadas en medicina, bajo estricto control, para tratamientos de tuberculosis y problemas dermatológicos como la psoriasis y el acné, saneamiento de heridas, control de plagas e insectos, purificación de aguas para uso doméstico e inactivador de virus y bacterias causantes de diversas enfermedades, entre otros usos (Wright y Marengo, 1992, 1996).

Los trabajos de Wright y Marengo (1992, 1996) realizados en Costa Rica, han demostrado que las radiaciones ultravioleta recibidas en las partes altas, como las montañas, son mayores que aquellas recibidas en las zonas costeras, a nivel del mar. De ahí que se recomiende tomar las precauciones del caso, a las personas que viven a mayor altitud o cuando se visiten esos lugares. Por otra parte, también se ha detectado un incremento de las radiaciones ultravioleta al mediodía durante la época lluviosa, con respecto a la época seca, probablemente porque la purificación que sufre la atmósfera con las precipitaciones, la torna más permeable al paso de los rayos UV (Wright, 1993).

DESTRUCCIÓN DE LA CAPA DE OZONO

La voz de alarma acerca de las amenazas a la capa de ozono, fue dada en 1974 por los científicos norteamericanos Mario Molina y Sherwood Rowland, pero hasta en 1985, fue descubierto el agujero, por el británico Crotton Farman (Banichevich, 1994).

Cuando se habla del agujero en la capa de ozono, no significa la total ausencia de ese gas en la atmósfera, sino una disminución parcial del mismo. Según la definición operativa, el hueco en la capa de ozono se presenta cuando la columna total de ozono sobre un determinado lugar se ha reducido en más de un tercio del valor promedio que había allí mismo, antes de ser afectado (OMM, 1994 a).

La disminución del ozono es notablemente mayor en el hemisferio sur, durante la primavera

antártica y en el hemisferio norte, durante el invierno septentrional (Bojkov, 1994).

Las mayores pérdidas de ozono registradas se han presentado en la estratosfera baja, entre los 14 y 20 Km de altura. Durante setiembre y octubre de 1992, 1993 y 1994, el ozono se merió en un 70% sobre la Antártida, ocupando una área aproximada de 23 millones de Km² y desapareció totalmente entre los 14 y los 19 Km de altura, por donde pasaron directamente hacia la troposfera, las radiaciones ultravioleta procedentes del sol. Es posible que esta pérdida de ozono esté asociada al enfriamiento, de aproximadamente 0,4 grados C por década, registrado en la Antártida, de 1970 en adelante, donde actualmente se presentan temperaturas anormales, inferiores a -80 grados C. Las temperaturas inferiores a -78 grados C aceleran las reacciones químicas causantes de la destrucción del ozono (Bojkov, 1995).

Se ha comprobado que la destrucción del ozono en regiones más allá de los 60 grados latitud sur de América, Australia, Nueva Zelanda y África se debe a la presencia de compuestos halógenos antropogénicos de cloro y bromo, derivados de los CFC y los halones principalmente. Las observaciones satelitales demuestran que en la atmósfera donde éstos son abundantes, hay disminución del O₃ (Bojkov, 1995).

Para el hemisferio norte la situación es diferente. A pesar de la disminución de hasta un 20% del ozono estratosférico en el cinturón comprendido entre los 45 y 60 grados latitud norte (OMM, 1994 b), no se ha registrado orificio de ozono semejante al aparecido en el sur. Es probable que en el Artico no se den las condiciones para un agujero de ozono, debido al frecuente intercambio de masas de aire meridional y a las temperaturas relativamente altas de la baja estratosfera, presentes en el invierno (Bojkov, 1994).

En las regiones pobladas del norte, el ozono ha incrementado su concentración en la troposfera en más del 50% durante los últimos 30 años debido a la producción fotoquímica de los precursores antropogénicos (Bojkov, 1995). Esta elevación del O₃ troposférico, se presenta en alturas de los 8 a los 12 Km y es considerada contaminante. Entre los efectos nocivos provocados,

se cita el que contribuye al efecto invernadero, absorbiendo las radiaciones salientes de onda larga y parte de la radiación solar ultravioleta. Además, la fotodisociación del ozono modifica la concentración y la permanencia de otros gases invernadero, especialmente óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y metano (Mohnen y otros, 1995), cuyo origen tiene causas antropogénicas, entre las cuales cobra importancia la combustión de biomasa en los trópicos durante la estación seca. También se culpa a los aviones supersónicos de lanzar trazas de sustancias que degradan al ozono en las capas altas de la estratosfera, fundamentalmente los que surcan el Atlántico norte, pero esta afirmación no está corroborada (Bojkov, 1995).

El flujo de O₃ troposférico que se da desde América del Norte hacia la región del Atlántico norte durante el verano, ayudado por las corrientes aéreas, es poco lo que puede agregar para contrarrestar el faltante en capas de la estratosfera, ya que el O₃ troposférico solo comprende un 10% de la columna total de ozono, de ahí que el acumulado compensa apenas una pequeña fracción (Bojkov, 1994). Por otra parte, la vida del ozono es relativamente corta en la troposfera, de días o semanas, mientras en la estratosfera dura varios meses (Mohnen y otros, 1995). La distribución mundial y el balance entre el exceso de ozono en la troposfera y la deficiencia en la estratosfera, no está aún claro, ni tampoco su efecto climático (OMM, 1998).

En la franja del planeta comprendida entre los 20 grados latitud norte y los 20 grados latitud sur, no se han observado tendencias decrecientes de la concentración de ozono (Bojkov, 1995; Sabogal, 1994). En esta área se encuentra comprendido el territorio costarricense, razón por la cual aquí no se ha detectado este fenómeno.

PROTECCIÓN DE LA CAPA DE OZONO

La preocupación originada por el descubrimiento de la destrucción del ozono motivó que en 1985 se firmara el Convenio de Viena para la Protección de la Capa de Ozono, el cual fue variado durante 1987 en Montreal, en las Enmiendas y Modificaciones al Protocolo Original, escrito mejor conocido como *Protocolo de Montreal*.

Este mismo documento, fue enmendado en Londres, en 1990 y posteriormente en Copenhague, 1992, pero aún se le sigue llamando Protocolo de Montreal, (Bojkov, 1995; Vega, 1998 b). Desde el inicio estos convenios internacionales han perseguido disminuir, hasta la eliminación, el uso de sustancias antropogénicas, destructoras de la capa de ozono, entre las cuales destacan los clorofluorocarbonos. Como resultado de la Conferencia Cumbre de la Tierra, celebrada en Río de Janeiro en 1992, los 170 países participantes se comprometieron, entre otras cosas, a promover las tecnologías y los productos naturales capaces de reducir la demanda de sustancias dañinas para la capa de ozono (OMM-PNUMA, 1992).

Sin embargo, suponiendo que todas las naciones cumplan con el compromiso contraído, el cloro y el bromo estratosférico continuarán aumentando hasta finales del presente siglo, época en que se hallarán en sus máximos niveles. Su concentración empezará a descender durante el siglo XXI y comienzos del XXII. Los cálculos indican que las emanaciones antropogénicas lanzadas a la atmósfera durante la década de 1960, causarán la máxima destrucción del ozono, de aquí al 2005 aproximadamente. Y hasta después de este período, se empezará a notar el efecto de los acuerdos internacionales citados, en caso de que todos cumplieran, porque de no hacerlo, la destrucción del ozono empezará a frenarse hasta la segunda mitad del próximo siglo (Bojkov, 1995).

Costa Rica ratificó el Convenio de Viena y el Protocolo de Montreal el 30 de julio de 1991. Al hacerse un inventario nacional acerca de la utilización de sustancias antropogénicas que causan el deterioro del ozono, se encontró un consumo total de 252,4 toneladas por año (Brenes y otros, 1995), distribuido como aparece en el cuadro 5:

CUADRO 5

Sustancias destructoras del ozono,
utilizadas por los costarricenses en 1991

gases refrigerantes	78,3 %
espumas	10,2 %
solventes	9,4 %
halones	2,1 %
aerosoles	0,0 %

Fuente: Brenes y otros, 1995:4

Los datos recopilados motivaron que en 1992 se redactara el Programa País, donde se establecen una serie de lineamientos a seguir para descender en un 70 % el consumo nacional de dichas sustancias (Brenes y otros, 1995).

LA LLUVIA ÁCIDA

La voz de alarma acerca de la acificación de las precipitaciones se dió en la década de 1960 en Europa y este de los Estados Unidos (Mohnen, 1988). A partir de entonces se generó una gran cantidad de investigaciones, que han venido a arrojar apenas parcialmente, luz sobre el problema, pero sí dejado en claro, que en este tipo de contaminación y sus efectos, así como en los otros analizados, tienen una influencia determinante las actividades humanas. El daño forestal en Europa, evaluado durante 1986, se presenta resumido a continuación en el cuadro 6.

CUADRO 6

Porcentaje de bosques dañados
en algunos países europeos, hasta 1986

Holanda	55%
Alemania Occidental	54%
Suiza	50%
Inglaterra	49%
Austria	37%
Bulgaria	34%
Francia	28%

Fuente: Llerena, 1990

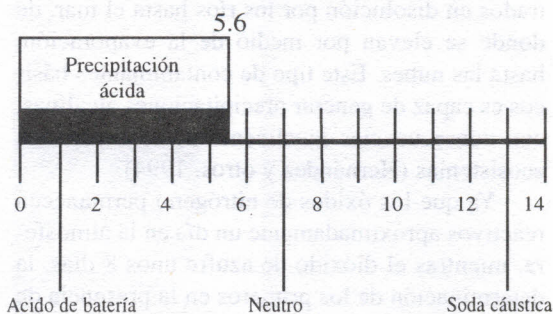
Uno de los factores antropogénicos que más se ha estudiado, como inductor de la destrucción de los bosques, es la *precipitación ácida*, que es conceptualizada como la deposición, sólida en forma de nieve o granizo, líquida como lluvia, o de gotitas de niebla, con un pH inferior a 5,6 (Hernández y otros, 1994).

El grado de acidez o pH del medio alude a la concentración de iones Hidronio (H_3O^+). Las moléculas de agua al reaccionar entre sí se disocian en iones Hidroxilo (OH^-) e Hidronio (H_3O^+) y es la concentración de éste último, presente en el medio, la que se utiliza como parámetro para me-

dir el pH. Cabe resaltar su importancia, pues ciertos compuestos químicos actúan y algunas reacciones sólo se llevan a cabo, en determinado pH. Casi todas las células animales y vegetales mantienen un pH cercano al neutro, a 7, o sea que no son ni ácidas ni alcalinas. Por encima de ese valor el medio es básico o alcalino y por debajo del mismo, es ácido (Montiel, 1994), como se esquematiza en la figura 1.

FIGURA 1

Escala de pH y zona de caracterización
de la precipitación ácida



Fuente: Alfaro y Rodríguez, 1993: 177.

El ácido sulfúrico (H_2SO_4) y el ácido nítrico (HNO_3), son principalmente los que le confieren el carácter ácido a la precipitación. Ambos se forman en la atmósfera a partir del dióxido de azufre (SO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x) respectivamente (Hernández y otros, 1994). El SO_2 proviene en un 50% de fuentes naturales, tales como emisiones volcánicas (Rampino y Self 1984) y producción metabólica del fitoplancton marino (Charlson y Wigley, 1994), pero es posible que estas emisiones se hallan mantenido constantes durante períodos prolongados, por lo cual no se cree que induzcan cambios en la atmósfera actualmente (Charlson y Wigley, 1994). El otro 50% es de origen antropogénico, como la fundición de minerales y la quema de combustibles fósiles, al igual que la mayor parte de los NO_x , pues ambos se liberan principalmente en áreas industriales y urbanas, en los gases expulsados por los vehículos automotores. En las regiones tropicales poco industrializadas también

es importante el desprendimiento de gases NOx procedentes de la combustión de biomasa, como por ejemplo la quema de pastos y de bosques para establecer cultivos y ganaderías (Graedel y Crutzen, 1989).

Otros compuestos que en menor escala contribuyen a este tipo de precipitación, son algunos ácidos orgánicos y el ácido clorhídrico, el cual es muy importante en Gran Bretaña (Hernández y otros, 1994). Las partículas iónicas de calcio, sodio, potasio, magnesio y amonio, presentes en el suelo, pueden causar alteraciones en el pH, pero en forma opuesta, o sea hacia la alcalinidad. Al ser estos cationes tan solubles en agua, son arrastrados en disolución por los ríos hasta el mar, de donde se elevan por medio de la evaporación, hasta las nubes. Este tipo de contaminantes básicos es capaz de generar precipitaciones alcalinas, con consecuencias igualmente nocivas para los ecosistemas (Hernández y otros, 1994).

Ya que los óxidos de nitrógeno permanecen reactivos aproximadamente un día en la atmósfera, mientras el dióxido de azufre unos 8 días, la determinación de los primeros en la presencia de lluvia ácida, es local. Mientras los segundos, tienen tiempo para actuar en zonas más amplias, al ser difundidos por las corrientes atmosféricas (Hernández y otros, 1994; Zárate, 1994). Se calcula que las partículas sulfurosas causantes de la acidez industrial pueden dispersarse hasta 1 000 kilómetros de su fuente, antes de que precipiten (Charlson y Wigley, 1994).

EFFECTOS DE LA PRECIPITACIÓN ÁCIDA:

A consecuencia de la precipitación ácida los ecosistemas se ven sometidos a graves tensiones. Por ejemplo, en Estados Unidos y Canadá la lluvia ácida ha acidificado los lagos, restringiendo el tamaño y la diversidad de las poblaciones de peces. Otros medios acuáticos contaminados son las aguas subterráneas y las litorales (Graedel y Crutzen, 1989).

Desde 1980 muchos bosques de Estados Unidos y Europa vienen manifestando una pérdida drástica de su vitalidad, sobre todo los de coníferas ubicados a elevada altitud, a tal extremo

que en Alemania los científicos le han dado el nombre de "muerte forestal" (Mohnen, 1988).

También la lluvia ácida contribuye a la corrosión de objetos al aire libre, edificios y obras de arte, principalmente en zonas urbanas (Graedel y Crutzen, 1989).

Los contaminantes atmosféricos y especialmente las partículas de sulfato presentes en la troposfera, aumentan el albedo o reflectividad, ya que dispersan la luz solar y la devuelven al espacio, logrando que se pierda parte de la energía. Consecuentemente se reduce el total de luz que llega a la superficie de la Tierra, lo cual se observa como una nubosidad sobre ciudades contaminadas, conocida como *bruma fotoquímica*. Al aumentar del albedo se propicia un descenso de la temperatura, que en alguna medida compensa el calentamiento producido por los gases invernadero (Charlson y Wigley, 1994).

Esta habilidad de los aerosoles de absorber y reflejar la luz solar, propicia la aparición de efectos ópticos: las puestas de sol adquieren luminosidad verdosa que cambia gradualmente al amarillo y al rojo, debido a que la luz solar es reflejada por la nube de aerosol (Rampino y Self, 1984).

Aunque hasta hace poco tiempo el problema de la lluvia ácida estaba circunscrito a Europa y norte de América, según Fournier (1993), ya ha tenido sus manifestaciones en zonas tan alejadas como Venezuela, Brasil, Sudáfrica, China y Australia.

En Costa Rica los estudios relacionados con el tema se han restringido a la precipitación ácida provocada por las emanaciones naturales, principalmente del Volcán Poás. En 1981 se reportó que las emisiones diarias de dióxido de azufre de dicho volcán alcanzaron cientos de toneladas (Cheminee y otros, 1981). Las emisiones de 1988 y 1989 afectaron áreas más distantes de la fuente emisora, que en años anteriores, de manera que la precipitación ácida afectó una serie de cultivos como cafetales y otras actividades productivas, causando pérdidas cuantiosas (Alfaro y Rodríguez, 1993). Los investigadores han dado una serie de recomendaciones para reducir el impacto sobre la salud humana y las actividades productivas, sin embargo hay mucho desconocimiento al respecto, pues hasta recientemente

se analiza la calidad del aire (Adamson, 1997; Alfaro, 1995; Pujol, 1996) con miras a determinar los diferentes tipos de contaminación atmosférica que afectan a la vida.

No debemos olvidar que para cualquier lugar del planeta, este tipo de contaminación proviene de tres fuentes importantes: las emanaciones naturales, los gases antropogénicos producidos en el mismo lugar adonde manifiestan sus efectos nocivos y los gases antropogénicos arrastrados desde otras regiones distantes del mundo hasta ese lugar específico. De ninguno de los tres tipos de fuentes estamos exentos, de ahí que sea necesario establecer una vigilancia acerca de la lluvia ácida en Costa Rica, que hasta el momento ha sido poco investigada.

CONCLUSIONES

La atmósfera terrestre tuvo un proceso evolutivo de millones de años, pero su composición fue constante desde la aparición de la especie humana. En tan poco tiempo como dos siglos, la humanidad ha logrado inducir cambios insospechados, que atentan contra la vida misma, a consecuencia del desarrollo científico tecnológico y como resultado de factores culturales, entre los que destaca el consumismo.

Los científicos prevén que los cambios atmosféricos inducidos por la contaminación ambiental tendrán efectos drásticos, muchos de ellos desconocidos, sobre la vida terrestre, por eso se habla hoy día de cambio climático global, para referirse a las alteraciones ocurridas como consecuencia de los gases antropogénicos, que se perciben como una amenaza.

Un estudio somero de los tratados internacionales para disminuir las emanaciones de gases causantes del efecto invernadero, delata acuerdos tímidos, pues al comparar los volúmenes de contaminantes lanzados a la atmósfera, con las reducciones convenidas, estas últimas cifras quedan muy por debajo. Además, países en pleno desarrollo, sumamente poblados, no están participando en esos tratados reductores. Puede inferirse que todavía no se ha llegado a ninguna solución, ya que continúan acumulándose sustancias nocivas en la atmósfera.

Aún no se han obtenido corroboraciones científicas definitivas de un cambio climático global, pero debemos tener presente que a pesar de la incertidumbre imperante, no es conveniente posponer la responsabilidad que las sociedades actuales tenemos en mantener las condiciones aptas para la vida en la Tierra.

La destrucción de la capa de ozono, que filtra parte de los rayos ultravioleta, los UV-B, provocaría graves consecuencias para las diferentes formas de vida, incluyendo humanos, animales y vegetales. Este cambio drástico en las condiciones a las que durante millones de años se han adaptado los organismos, atenta contra la vida en el planeta, modificación de la cual somos responsables exclusivamente los humanos.

Los perjuicios más importantes a la capa de ozono ya fueron inducidos desde la década de 1960 hasta la actualidad. Debido a ello los convenios internacionales para protegerla, empezarán a notarse por ahí de la segunda mitad del siglo XXI, lo cual nos lleva a pensar que en lo que resta de vida a las presentes generaciones, y aquellas que nazcan en los próximos años, estaremos afrontando el problema.

También en la presencia de la precipitación ácida tienen influencia determinante las actividades humanas. Sus principales efectos se observan en bosques y lagos, cuya apariencia desmejora notoriamente. En las áreas urbanas se ven afectadas las edificaciones, esculturas y todo tipo de objetos expuestos al aire libre. Sólo imaginemos cómo lucirán las vías respiratorias de los que habitan en zonas de gran circulación vehicular, que es la principal fuente de este tipo de contaminación.

En cada una de las modificaciones atmosféricas inducidas por los factores antropogénicos que se analizaron: la alteración del efecto invernadero, la destrucción de la capa de ozono y la precipitación ácida, Costa Rica como país no desarrollado, tiene apenas una pequeña cuota de responsabilidad, a primera vista. Sin embargo, si se suman todas esas débiles participaciones de países que se encuentran en situaciones iguales o parecidas a la del nuestro, que son la mayoría, el conjunto de emanaciones dañinas deja de ser insignificante, pues no debemos olvidar que la Tierra es única para todos.

El análisis global de las alteraciones atmosféricas pone de relieve la distribución y uso tan poco equitativo que se hace de los recursos naturales y los bienes económicos. Puede asegurarse que el mundo actual está polarizado, de un lado los países ricos que consumen, despilfarran, contaminan, destruyen y toman las decisiones. En el otro extremo se encuentran los países pobres que disponen de recursos muy restringidos y aunque en menor grado, también contaminan, que están sometidos a las decisiones político-económicas adoptadas por los primeros, aún hasta para tomar un baño de sol. A pesar de la distribución injusta, todos pagamos la cuenta por igual.

Estas reflexiones finales no deben de conducirnos a pensar que nuestra participación como ciudadanos del mundo es menor. Al contrario, si asumimos una actitud responsable y leal con la especie humana y la Naturaleza en general, debemos estar vigilantes de no caer en consumismos absurdos, que finalmente empiezan a revertirse contra nuestra propia existencia.

BIBLIOGRAFÍA

- Adamson, M. y otros. *Aire del Gran Área Metropolitana: el caso del eco-marchamo*. Programa Desarrollo Urbano Sostenible ProDus. Mimeografiado, 1997.
- Alfaro, M.R. *Metodología para la evaluación de la contaminación del aire*. Publicación limitada de ProEco SwissContact, 1995.
- Alfaro M.R. y Rodríguez J.J. "Variaciones en la química de las precipitaciones por efecto de las emisiones naturales y su impacto en el medio". En: *Revista Geofísica* 38: 176-188.
- Ander-Egg, E. *El desafío ecológico*. Editorial Universidad Estatal a Distancia, 1985.
- Baldicero, L.C. "Global impacts of Amazonia deforestation". *Revista Geofísica*. México: Instituto Panamericano de Geografía e Historia. No.42, 1995, pp.89-101.
- Banichevich, A. "La ambivalencia del ozono". En: *Tecnología en Marcha*. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica. Vol.12 No.3: 1994, pp.133-141.
- Banichevich, A. "La capa de ozono: su historia". En: Banichevich, A., Castro, V. y Bonatti, J. (eds), *Una biosfera en convulsión: el potencial cambio global*. San José: Instituto Meteorológico Nacional: Universidad de Costa Rica, 1998, pp.47-77.
- Banichevich, A. y Fernández, W. "La capa de ozono y su modificación por la actividad antropogénica: los huecos en las regiones polares". En: *Revista Geofísica*. México: Instituto Panamericano de Geografía e Historia, No.40, 1994, pp.139-182.
- Bate, R. y Morris, J. "Calentamiento mundial: ¿apocalipsis o falsa alarma?". En: *Estudios Públicos* Santiago: No,57, 1985, pp.193-230.
- Bojkov, R. "La capa de ozono: últimos descubrimientos". En: *Boletín Organización Meteorológica Mundial* Ginebra: Naciones Unidas. Vol.43 No.2, 1994, pp.117-120.
- Bojkov, R. "La evaluación internacional del ozono". En: *Boletín Organización Meteorológica Mundial*. Ginebra: Naciones Unidas Vol.44 No.1, 1995, pp.42-50.
- Bonatti, J. "El efecto invernadero: ¿está usted preparado para el cambio climático en el paraíso?". En: Banichevich, A., Castro, V. y Bonatti, J. (eds). *Una biosfera en convulsión: el potencial cambio global*. San José: Instituto Meteorológico Nacional: Universidad de Costa Rica, 1995, pp.34-45.
- Boodhoo, Y. "Vigilancia estratosférica mundial". En: *Boletín Organización Meteorológica Mundial*. Ginebra: Naciones Unidas. Vol.5 No.1, 1997 a, pp.69-72.
- Boodhoo, Y. "Servicios climáticos y desarrollo urbano". En: *Boletín Organización Meteorológica Mundial*. Ginebra: Vol.4 No.1, 1997 a, pp.43-45.
- Brenes y otros. "Costa Rica, la Convención de Viena y el Protocolo de Montreal". En: *Boletín Meteorológico Mensual*. San José: Ministerio de Recursos Naturales Energía y Minas Año XIX, set, 1995, pp.4-5.

- Castro, V. y Banichevich, A. "La evolución de la atmósfera en la Tierra". En: Banichevich, A., Castro, V. y Bonatti, J. (eds). *Una biosfera en convulsión: el potencial cambio global*. San José: Instituto Meteorológico Nacional: Universidad de Costa Rica, 1998, pp.1-16.
- Charlson, R. y Wigley, T. "Aerosol de sulfatos y cambio climático". En: *Investigación y Ciencia*. Barcelona: Prensa Científica, S.A. No.211, 1994, pp.46-53.
- Cheminee, J.L. y otros. "Some physical and chemical aspects of the activity of volcanoes Poas and Arenal". En: *Boletín de Vulcanología* Heredia: Universidad Nacional, No.11, 1981, pp.12-16.
- CMI Consejo Mundial de Iglesias. *El cambio climático acelerado. Prueba de nuestra fe*. Ginebra: Imprenta del Centro Ecueménico, 1994.
- Crutzen, P.J. "Las entrevistas del Boletín". En: *Boletín Organización Meteorológica Mundial*. Ginebra: Naciones Unidas. Vol.47 No.2, 1998, pp.127-140.
- Fournier, L. *Recursos naturales*. 2 ed. San José: Editorial Universidad Estatal a Distancia, 1993.
- Fuenzalida, H. "Disminución primaveral del ozono sobre la Antártica". En: *Revista Geofísica* México: Instituto Panamericano de Geografía e Historia. No.32, 1990, pp.123-133.
- García, E. "Impacto de la explosión demográfica y la urbanización sobre el ambiente". En: *Panorama ecológico: problemática y perspectivas en Costa Rica*. San José: Ediciones ABC, 1995.
- Hernández, E. y otros. "Lluvia ácida sobre España". En: *Investigación y Ciencia*. Barcelona: Prensa Científica, S.A. No.209, 1994, pp.20-27.
- Kibby, H. "El Sistema Mundial de Observación del Clima". En: *Boletín Organización Meteorológica Mundial*. Ginebra: Naciones Unidas. Vol. 45 No.2, 1996, pp.141-148.
- Kundzewicz, Z.W. "Las inundaciones en los años 90, ¿sigue el tema igual?". En: *Boletín Organización Meteorológica Mundial*. Naciones Unidas. Vol.47 No.2, 1998, pp.175-180.
- Llerena, C. "Posibles impactos del cambio global sobre los bosques tropicales". En: *Revista Geofísica* México: Instituto Panamericano de Geografía e Historia. No.32, 1990, pp.223-244.
- Mohnen, V.A. "El desafío de la lluvia ácida". En: *Investigación y Ciencia* Barcelona: Prensa Científica, S.A. No.144, 1998, pp.8-18.
- Mohnen, V.A., Goldstein, W y Wang, W. "El papel potencial del ozono troposférico como gas del clima". En: *Boletín Organización Meteorológica Mundial*. Ginebra: Naciones Unidas Vol.44 No.1, 1995, pp.38-42.
- Montiel, L. *Organización, función y ecología de los seres vivos*. San José: Universidad Estatal a Distancia, 1994.
- Nason, A. y De Haan, R. *El mundo biológico*. México: Editorial Limusa, S.A. de C.V. Grupo Noriega Editores, 1990.
- Novelli, P.C. y otros. "Cambios recientes en el dióxido de carbono, el monóxido de carbono y el metano y sus implicaciones en el cambio climático mundial". En: *Boletín Organización Meteorológica Mundial*. Ginebra: Naciones Unidas. Vol.44 No.1, 1995, pp.32-38.
- OMM Organización Meteorológica Mundial. Programa de Investigación Atmosférica y Medio Ambiente. "Medio ambiente atmosférico. El agujero en la Antártida, 1993". En: *Boletín Organización Meteorológica Mundial* Vol.43 No.2, 1994 a, pp.141-142.
- OMM Organización Meteorológica Mundial. Programa de Investigación Atmosférica y Medio Ambiente. "Reuniones de los firmantes del Protocolo de Montreal y del Convenio de Viena sobre asuntos del ozono". En: *Boletín Organización Meteorológica Mundial* Ginebra: Naciones Unidas. Vol.43 No.2, 1994 b, pp.143-144.
- OMM Organización Meteorológica Mundial. "El Protocolo de Kioto. Un hito en el camino hacia el desarrollo sostenible". En: *Boletín Organización Meteorológica Mundial* Ginebra: Naciones Unidas. Vol.47 No.2, 1998, pp.181-184.
- OMM-PNUMA. *Cambio climático: las evaluaciones del IPCC de 1990 y 1992*. Ginebra: Secretaría Conjunta OMM/PNUMA del IPCC, 1992.

- Pujol, R. *The spatial structure of urban and metropolitan regions as a critical variable in the long reduction of urban air pollution*. San José: Congreso mundial de contaminación del aire en países en vías de desarrollo, mimeografiado, 1996.
- Ramírez, P. "Un acuerdo internacional para proteger la atmósfera y el clima". En: Banichevich, A., Castro, V. y Bonatti, J. (eds). *Una biosfera en convulsión: el potencial cambio global*. San José: Instituto Meteorológico Nacional: Universidad de Costa Rica, 1998, pp.131-140.
- Rampino, M. y Self, S. "Efectos atmosféricos de El Chichón". En: *Investigación y Ciencia*. Barcelona: Prensa Científica, S.A., No.90, 1984, pp.22-32.
- Resnick, R. y otros. *Física* Vol.1 4 ed. México: Compañía Continental, S.A. de C.V., 1996.
- Sabogal, N.A. "Posibles cambios en la concentración del ozono en los trópicos". En: *Revista Geofísica México*: Instituto Panamericano de Geografía e Historia. No.40, 1994, pp.125-137.
- Vega, G. "Efectos sobre el clima y los seres vivientes, de la contaminación atmosférica y la destrucción de la capa de ozono". En: Banichevich, A., Castro, V. y Bonatti, J. (eds). *Una biosfera en convulsión: el potencial cambio global*. San José: Instituto Meteorológico Nacional: Universidad de Costa Rica, 1998 a, pp.79-90.
- Vega, G. "La comunidad internacional lucha contra el agotamiento del ozono". En: Banichevich, A., Castro, V. y Bonatti, J. (eds). *Una biosfera en convulsión: el potencial cambio global*. San José: Instituto Meteorológico Nacional: Universidad de Costa Rica, 1998 b, pp.91-96.
- Vegas, M. "El calentamiento global del Planeta". En: *Revista Geofísica México*: Instituto Panamericano de Geografía e Historia. No.32, 1990, pp.173-179.
- Victoria, R.L. y otros. "South American Ecosystems as sources of methane". En: *Revista Geofísica México*: Instituto Panamericano de Geografía e Historia. No.32, 1990, pp.197-206.
- White, R. "El gran debate sobre el clima". En: *Investigación y Ciencia* Barcelona: Prensa Científica, S.A. No.168, 1990, pp.4-12.
- Wright, J. "Variación anual de la radiación solar global ultravioleta en Heredia, Costa Rica". En: *Revista Geofísica México*: Instituto Panamericano de Geografía e Historia. No.38, 1993, pp.159-173.
- Wright, J. y Marengo, H. "Mediciones experimentales de la radiación ultravioleta en el rango 0.295 a 0.385 m en Costa Rica". En: *Revista Geofísica México*: Instituto Panamericano de Geografía e Historia. No.36, 1992, pp.135-150.
- Wright, J. y Marengo, H. "Mediciones de los componentes espectrales de la radiación ultravioleta UV-A y UV-B en Costa Rica". En: *Revista Geofísica México*: Instituto Panamericano de Geografía e Historia. No.44, 1996, pp.153-169.
- Zárate, E. "Emanaciones contaminantes del Volcán Poás". En: *Boletín Meteorológico Mensual*. San José: Ministerio de Recursos Naturales Energía y Minas Año XVIII, feb, 1994, pp.4-6.