

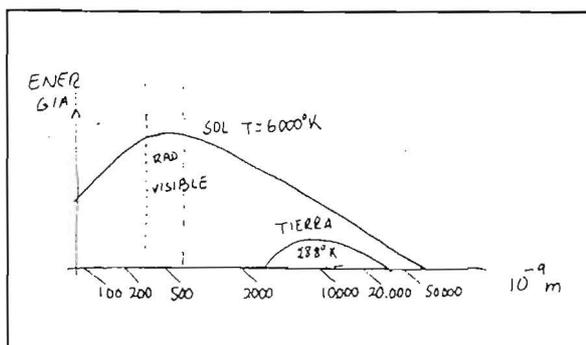
## PAPEL DE LOS GASES CON EFECTO INVERNADERO EN EL CAMBIO CLIMATICO

Alberto Linés Escardó  
Dr. en Ciencias Físicas. Meteorólogo

La expresión «efecto invernadero» ha pasado hoy día a ser de uso popular, lo cual en alguna manera indica el interés, cada vez más generalizado para cuanto se refiera a los cambios climáticos, sobre todo a escala global.

Tal vez no sea ocioso el recordar algunos conceptos, seguramente conocidos, relativos al llamado efecto invernadero. Como es sabido, parte de la radiación emitida por la Tierra al espacio exterior puede quedar retenida en la atmósfera al ser absorbida por determinados gases. El efecto es el de una retención en la atmósfera de radiación calorífica que, en ausencia de dichos gases, se hubiera disipado en el espacio. Esto mismo ocurre en los invernaderos empleados en floristería y horticultura: la radiación calorífica emitida por el suelo, queda en su mayor parte bajo el techo de vidrio. Los gases con efecto invernadero, vienen a ser como invisibles capas de vidrio capaces de retener las radiaciones en onda larga procedentes de la superficie terrestre.

Para dar un paso más en el conocimiento del papel de estos gases, recordemos el modelo de



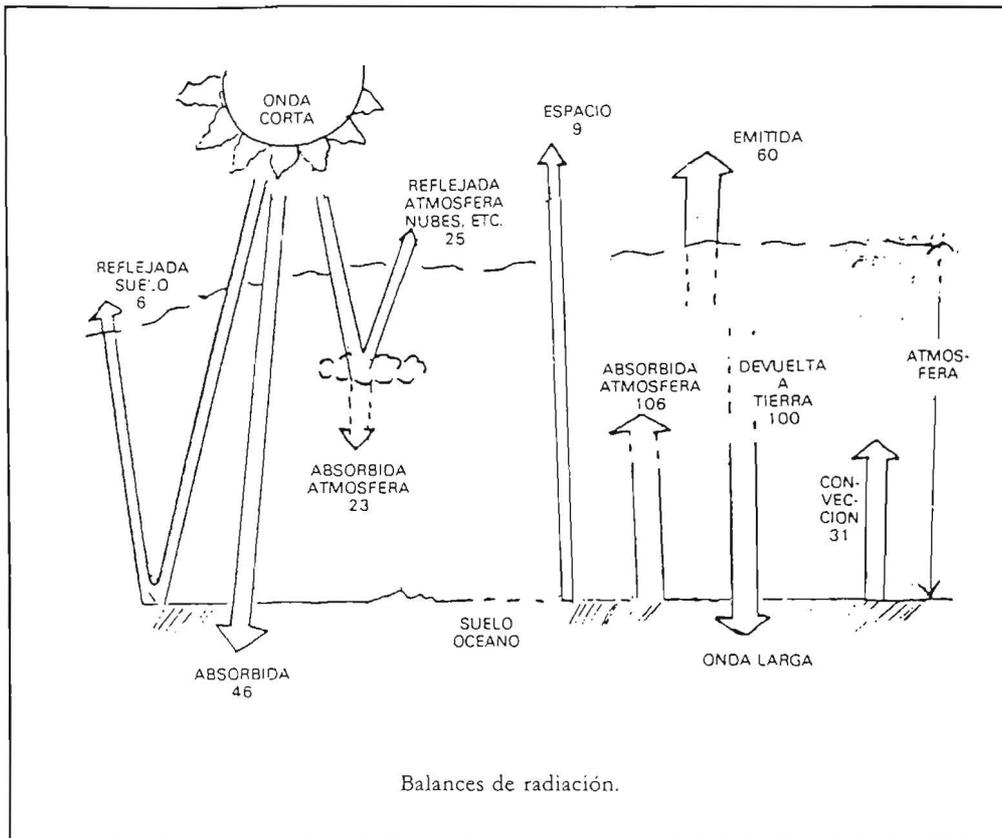
balance de radiación. De acuerdo con dichas leyes el Sol, cuya temperatura exterior es del orden de los 6.000°K, radia con un máximo de energía en el espectro visible, hacia los 300 - 600 nm.

La Tierra, con una temperatura media de unos 288°K, radia en onda larga más o menos entre los 5.000 y los 25.000 nm. Hace ya tiempo, Alt estableció un esquema de balance de radiación que, con ligeras modificaciones es admitido hoy día; ese esquema, es el siguiente:

De cien unidades de radiación emitidas por el Sol, 46 son absorbidas por el suelo, 6 reflejadas también por el suelo y 25 reflejadas por las nubes principalmente y por otros agentes atmosféricos.

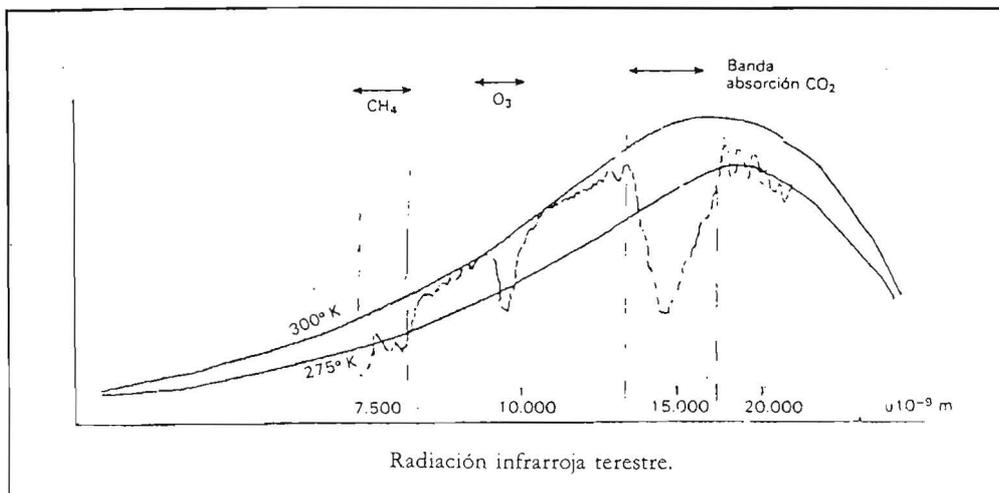
La radiación en onda larga tiene un mecanismo algo complejo. La Tierra radia 115 unidades, de las cuales 9 van al espacio exterior, 106 quedan absorbidas por la atmósfera; además, la propia atmósfera recibe 31 unidades en forma de calor sensible, transmitido desde el suelo por mecanismos de convección. A ello hay que añadir 23 unidades recibidas directamente por radiación solar. De estas 160 unidades, la atmósfera envía 100 unidades al suelo y 60 al espacio exterior. Por supuesto, estos son valores medios a lo largo del año y de la superficie terrestre.

Este balance de radiación es la base del sistema climático terrestre; hay en él una serie de puntos sensibles a la acción del hombre, tales



como la composición química de la atmósfera, la modificación del suelo, con posibles cambio del albedo terrestre, y otros de más complejo enunciado. Nos vamos a referir solamente al primero de estos puntos, es decir, lo relativo a la presencia y su modificación cuantitativa, principalmente por la acción del hombre, de los gases con efecto invernadero, y su papel en el balance de radiación.

Las medidas realizadas de la radiación terrestre, efectuadas principalmente por medio del «Nimbus», han probado que la Tierra, a efectos radiativos, se comporta como un cuerpo negro cuya temperatura oscila entre 275 y 300°K. En la figura, el espectro radiactivo terrestre aparece en líneas de trazo y en líneas continuas el espectro de un cuerpo negro uniforme para temperaturas de 300°K y 275°K respectivamente.



En la figura observamos que en la curva de emisión, hay varias depresiones; una muy acusada que corresponde a la banda de absorción del  $\text{CO}_2$  y otra que corresponde el  $\text{O}_3$ . En realidad, si examinamos con detalle todo el espectro, encontraremos diversas depresiones en la curva, más o menos acusadas, que no son sino las franjas de absorción correspondientes, según su importancia, a los gases con efecto invernadero presentes en la atmósfera. Tal presencia determina, por tanto, un efecto de calentamiento en la atmósfera y a su vez en la superficie terrestre. De no existir tales gases en la atmósfera, y muy especialmente el vapor de agua, la temperatura media de la superficie terrestre sería mucho menor que la existente actualmente, y se ha evaluado en unos  $-18^\circ\text{C}$ , es decir 33 grados menos que la que realmente existe.

En este efecto de calentamiento hay que incluir el debido a la absorción directa de la radiación solar por parte del vapor de agua atmosférico, absorción muy efectiva en 900 nm.

*Efecto del vapor de agua.* El vapor de agua es el agente más activo en el efecto invernadero. Su proporción es muy variable en la atmósfera (desde 2 ppm hasta un 3 %). Esta variabilidad dificulta enormemente la modelización del efecto invernadero del vapor de agua; además, el paso de la fase de vapor líquido y viceversa complica aún más los procesos. Además, el vapor de agua está presente en diversos procesos de realimentación, principalmente en el caso del anhídrido carbónico. La presencia del vapor de agua atmosférico viene a suponer un efecto de calentamiento medio de la superficie terrestre del orden de los  $20^\circ$ , de modo que su efecto es bastante superior al de los demás agentes con efecto invernadero juntos.

Podemos señalar que casi toda la absorción de onda larga debida al vapor de agua tiene lugar en los cinco primeros kilómetros de la troposfera, donde se encuentra la mayor parte del vapor de agua atmosférico.

### **Papel de los gases traza en el efecto invernadero**

Se denominan «gases traza» aquellos, presentes en la atmósfera terrestre, cuya proporción es bajísima. Solo nos vamos aquí a referir a aquellos cuyo efecto invernadero es significativo.

Bajo la óptica del efecto invernadero, sin duda el más importante de los gases traza es el dióxido de carbono, cuya proporción global es de unas 354 ppm. Otros gases que le siguen en importancia para nuestro objetivo, son el metano ( $\text{CH}_4$ ), el ozono troposférico, los óxidos de nitrógeno (principalmente el  $\text{N}_2\text{O}$ , los halocarburos (principalmente el CFC11 y CFC12), el monóxido de carbono, el tetracloruro de carbono y algunos otros.

De estos gases traza, algunos estuvieron presentes en la atmósfera desde tiempo remotísimos (caso del  $\text{CO}_2$ , del  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ). Otros, son productos artificiales que han hecho su presencia en la atmósfera en los últimos decenios.

Es preciso señalar que las bandas de absorción de muchos gases traza caen dentro de la llamada «ventana atmosférica», es decir, la porción del espectro comprendida entre 7.000 y 13.000 nm, en la cual la radiación terrestre escapa muy fácilmente al espacio. Precisamente el tener tales gases su espectro de absorción en la ventana, es lo que les proporciona un eficaz efecto invernadero.

Algunos de los gases a que nos referimos se encuentran en proporciones extraordinariamente bajas; así, el CFC11 con sólo 0,23 partes por mil millones, y sin embargo, sus efectos son muy importantes en varios procesos atmosféricos. Ello conduce a la reflexión de si existen otras sustancias de origen antropogénico, en proporciones aún menores y que pudieran tener efectos importantes en los procesos atmosféricos en forma aún desconocida. De ahí la importancia tan grande que tiene la investigación en el campo de la Química de la atmósfera en relación con cambios climáticos u otros procesos. Contamina-

ción atmosférica y variación climáticas son conceptos extraordinariamente afines.

### Efecto invernadero del dióxido de carbono.

El anhídrido carbónico, o dióxido de carbono, es, en cuanto a su proporción, el más importante de los gases traza. Es transparente a la radiación solar, pero absorbe muy bien la radiación en onda larga entre 12.000 y 20.000 nm (12 y 20 m). Como es sobradamente conocido, se produce por la respiración de los seres vivos, por las oxidaciones de la materia orgánica y por las combustiones, aparte de ciertas reacciones químicas. Entre las causas antropogénicas más importantes relacionadas con la producción de dióxido de carbono, hay que señalar el consumo de combustibles fósiles, la combustión de la madera y sustancias orgánicas combustibles y también la fabricación del cemento, ya que la descomposición del carbonato cálcico da lugar a  $\text{CaO}$  y  $\text{CO}_2$ .

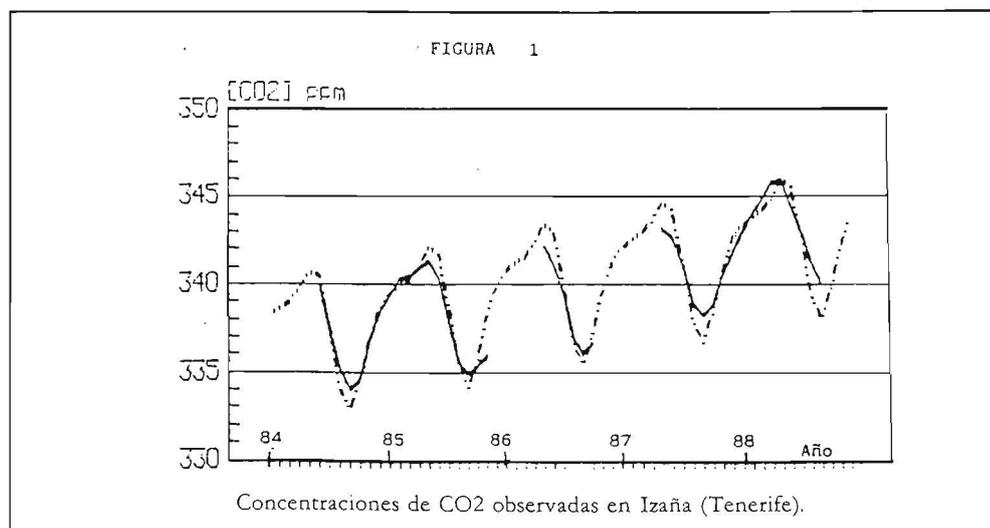
El  $\text{CO}_2$  se difunde muy bien en la atmósfera tanto por convección como por transporte horizontal, de modo que el producido en las grandes áreas urbanas e industriales se reparte fácilmente por toda la atmósfera. Además, las grandes áreas productoras y no consumidoras de  $\text{CO}_2$  se localizan principalmente en la zona donde prevalecen los vientos del Oeste, lo que agiliza la difusión. De todas formas, la proporción de  $\text{CO}_2$

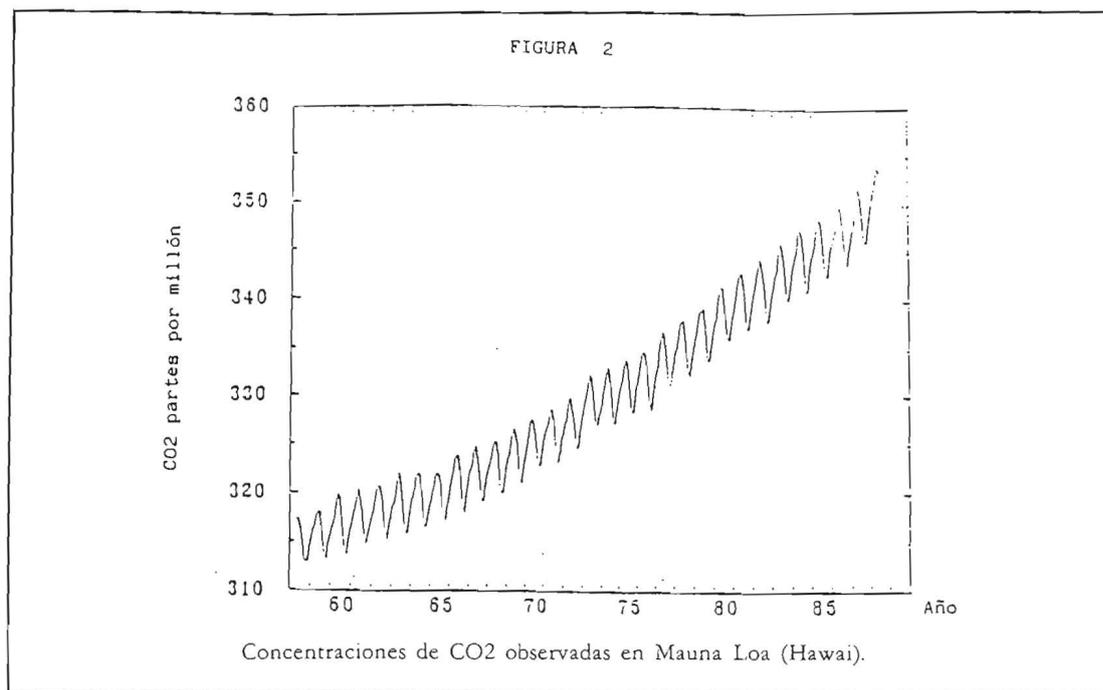
dista de ser completamente uniforme; es menor en la alta atmósfera que en las capas bajas troposféricas y desde luego, las mayores proporciones se encuentran inmediatamente junto al suelo.

A partir de 1958, con el establecimiento del Observatorio de Mauna Loa (Hawai), en pleno oceano, se iniciaron medidas sistemáticas de la proporción media de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera. Actualmente hay otras estaciones que proporcionan valores globales de la proporción de  $\text{CO}_2$  a escala planetaria. Entre otras, son muy importantes las que se encuentran en Samoa, Polo Sur, Alaska, Alberta (Canadá), Tasmania y en Izaña (Isla de Tenerife).

El seguimiento continuado de los valores globales del dióxido de carbono presente en la atmósfera, es de extraordinario interés para el estudio de los cambios climáticos y para la previsión y tendencia de los mismos en el futuro. En las figuras que siguen a continuación, se representan en la evolución de los valores globales de  $\text{CO}_2$  desde 1958 (datos de Mauna Loa) y las evaluaciones de Izaña iniciadas en 1984. En 1958 se evaluó la proporción global de  $\text{CO}_2$  en unas 315 ppm, y desde entonces dicha proporción ha ido creciendo de año en año.

La curva de  $\text{CO}_2$  presenta el aspecto de un perfil de sierra, de modo que durante el verano en cada hemisferio disminuye la proporción de  $\text{CO}_2$ .





Por efecto de la fotosíntesis vegetal. En invierno el crecimiento es muy acusado, y superior al decrecimiento estival; en el período invernal disminuye drásticamente la fotosíntesis vegetal y se origina a la vez un gran consumo de combustibles fósiles para calefacción, sobre todo en el hemisferio boreal. El aumento medio anual viene a ser de 1,5 ppm, con tendencia a acelerarse.

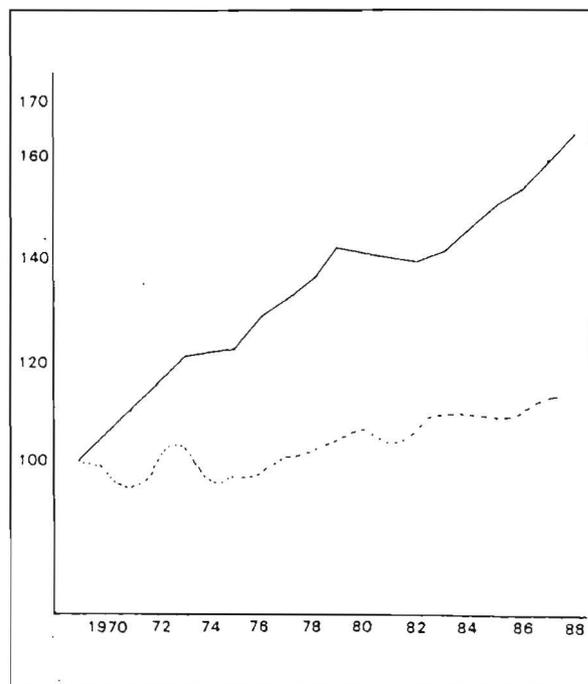
Los recientes análisis de las partículas de aire atrapadas en glaciares han permitido una primera evaluación de la proporción de CO<sub>2</sub> en épocas pretéritas. Se ha encontrado una apreciable correlación entre los periodos glaciares y las bajas proporciones de dióxido de carbono; en cambio, en los periodos interglaciares se ha observado una mayor proporción de CO<sub>2</sub>. De todas formas, no puede establecerse relaciones demasiado simplistas, ya que en la génesis de los ciclos glaciares, hay que considerar otros factores como los de tipo orbital. Así, hay un periodo muy frío entre 130.000 y 115.000 años que no fue acompañado por acusados descensos de CO<sub>2</sub>. De todas formas, merece ser destacado el hecho de que en los últimos 200.000 años, probablemente no bajó la proporción de CO<sub>2</sub> de 180 ppm ni excedió de las 300 ppm.

En la época preindustrial, la proporción fue de unas 270 ppm; probablemente, a lo largo de los 8 ó 10 siglos anteriores hubo un crecimiento lento, ya que en dicho período hubo grandes deforestaciones quemadas y talas de bosques, y en los siglos más próximos, roturaciones en áreas forestales y prácticas bastante generalizadas de carbón. En Europa, en un milenio la superficie ocupada por los bosques pudo reducirse de cerca de un 80 por ciento a un 20 ó 25 por ciento. En América del Norte, entre mediados del siglo XVIII hasta el último tercio del XIX, hubo una fantástica reducción de bosques.

La curva anual del CO<sub>2</sub> no es uniforme en todas las latitudes. Así, la oscilación o diferencia entre el máximo y el mínimo anual es de unas 2 ppm en el Polo Sur, mientras que llega a 12 ppm en el Polo Norte. En Izaña y en Mauna Loa, la variación es de unas 8 ppm. En cambio, en Samoa, apenas se llega a unas 3 ppm. Estos valores tan dispares de la oscilación anual, no resultan muy sencillos de explicar satisfactoriamente. Por una parte, es preciso tener en cuenta que es precisamente en el Hemisferio Norte donde se producen los mayores contingentes de CO<sub>2</sub> de naturaleza entropogénica, ya que en dicho he-

misferio se encuentran las principales áreas industrializadas del mundo. Por otra parte, en el hemisferio austral prevalecen las superficies oceánicas sobre las terrestres, y el océano es un factor estabilizador de la proporción del dióxido de carbono en la atmósfera. Sin embargo, las áreas forestales del hemisferio meridional son quizá, comparativamente más significativas que las existentes en el hemisferio norte. En cualquier caso, esta notable asimetría es un tema en el que posiblemente no se ha profundizado lo suficiente.

Un fenómeno que no debe ser pasado por alto es el incremento de la oscilación anual al crecer la proporción de dióxido de carbono. Conforme han crecido las emisiones del CO<sub>2</sub>, han crecido con rapidez las proporciones, pero el decrecimiento ha variado en casi paralela proporción. Es decir, la atmósfera ha contado con mecanismos de respuesta más eficaces conforme las emisiones han sido crecientes. Por otra parte, el incremento porcentual de emisiones de CO<sub>2</sub> es menor que el relativo al crecimiento de la concentración invernal en la atmósfera.



Línea continua: crecimientos porcentuales sobre 1969 del consumo mundial de combustibles fósiles. En puntos: valores porcentuales sobre 1969 del crecimiento invernal de CO<sub>2</sub> (curva suavizada).

Las fuentes del dióxido de carbono están bastante bien identificadas en el ecosistema terrestre: respiración de todos los seres vivos, incluidos por supuesto la flora y fauna marina; las combustiones y numerosos procesos industriales. De todas estas fuentes, aunque las relativas a la respiración animal han aumentado significativamente en el último siglo, tal aumento no tiene probablemente parangón con el debido al espectacular incremento de las combustiones de combustibles fósiles. Este incremento, como es sabido, se ha disparado muy especialmente en los últimos decenios, aún teniendo en cuenta el menor consumo durante los años más agudos de la crisis energética.

El tiempo medio de residencia del dióxido de carbono en la atmósfera es de unos cuatro años, entendiéndose por tal el tiempo medio empleado por una molécula desde que es liberada hasta que es disuelta en el océano o captada por un proceso de fotosíntesis vegetal. Este tiempo no debe ser confundido con el tiempo necesario para que el nivel de dióxido de carbono atmosférico alcance un nuevo nivel de equilibrio cuando las fuentes emisoras o los sumideros cambian apreciablemente; el tiempo de ajuste es del orden de 50 a 200 años.

A la hora de evaluar la causas antrópicas que pueden incidir en el cambio climático, resulta de la mayor importancia la identificación de las emisiones de dióxido de carbono en la atmósfera debidas a cada uno de los agentes emisores, y en la medida de lo posible, la cuantificación de las mismas así como la evolución histórica de la cuantía de las emisiones. Este es un tema del mayor interés en la investigación del cambio climático y en el que quedan todavía puntos por esclarecer.

En una tosca aproximación, podríamos expresar así el flujo de emisiones de CO<sub>2</sub>:

$$E = E_b + E_c + E_t$$

$$\Delta CO_2 = E - A_f - S$$

donde:

- E = son emisiones totales de CO<sub>2</sub>
- E<sub>b</sub> = emisiones de tipo biológico (respira-

ción, combustión y oxidación de biomasa, incluida la deforestación).

$E_C$  = emisiones por quema de combustibles fósiles.

$E_I$  = emisiones por oxidaciones no orgánicas (industriales, etc.).

$A_F$  = absorción de  $CO_2$  por fotosíntesis.

$S$  = sumideros de  $CO_2$  distintos de  $A_F$  (incluido el océano).

Durante períodos muy largos, de limitadas actividades industriales se dio más o menos esta relación de equilibrio:

$$\Delta CO_2 \simeq 0$$

$$E_B - A_F - S \simeq 0$$

lo que supone que quedaban compensadas las emisiones y absorciones de  $CO_2$ .

En la actualidad cabe esperar:

$$\frac{dE}{dt} > 0 \quad \frac{dE_C}{dt} > 0 \quad \text{y posiblemente} \quad \frac{dE_B}{dt} > 0$$

$E_I$  es de un orden de unas cien a doscientas veces menor que  $E_C$ .

En una primera aproximación podríamos poner:

$$E_C = E_{CT} + E_{CH}$$

donde  $E_{CT}$  y  $E_{CH}$  son las emisiones producidas por actividades de transporte e industriales en general, y  $E_{CH}$  las producidas por consumos domésticos y climatización artificial, principalmente calefacción.

De los dos términos  $E_{CT}$  y  $E_{CH}$ , el primero tiene una estacionalidad no muy acusada, aún teniendo en cuenta la dificultad de diferenciar si actividades de transporte son mayores en verano que en invierno o al revés. En cambio,  $E_{CH}$  tiene una estacionalidad acusadísima, de modo que podría hablarse de un cierto paralelismo entre  $E$  y  $E_{CH}$ .

### Evaluación de las emisiones de dióxido de carbono

El planteamiento del calentamiento global inducido por los gases con efecto invernadero, así

como el impacto de dicho efecto, y las estrategias para hacerle frente exigen un conocimiento de las fuentes de emisiones de tales gases y su evaluación, así como de los sumideros y de los procesos seguidos por los gases durante su vida activa.

En el caso concreto del dióxido de carbono, son bastante bien conocidas las fuentes de emisión, la magnitud de la vida media del gas y en forma algo menos perfecta los sumideros. Los procesos implicados tienen ciclos hiperanuales lo que complica el proceso simplista de evaluar anualmente las emisiones, así como la proporción que queda en la atmósfera y suponer el resto en sumideros más o menos bien conocidos.

En cualquier caso, resulta básica la evaluación de las emisiones. Las procedentes de la quema de combustibles fósiles es relativamente sencilla, puesto que son bastante bien conocidas las cifras de producción de dichos combustibles. Se han hecho diferentes evaluaciones, bastante concordantes, sobre las emisiones globales de dióxido de carbono. Conviene tener en cuenta en todos los cálculos numéricos que 12 gramos de carbono producen 44 de dióxido de carbono, es decir, existe la razón 11/3 entre el C consumido y el  $CO_2$  producido.

Si tomamos como punto de partida el año 1860, desde el mismo el incremento anual de los combustibles fósiles fue del orden del 4 %, con interrupciones en las guerras mundiales e inmediatos años de postguerra; también hubo un significativo estancamiento en las crisis iniciadas en 1973; entre 1979 y 1985 las emisiones se mantuvieron casi constantes en unos 5,3 GtC/año, con ligero incremento hasta 1990 en que nuevamente tienden a estabilizarse.

Según evaluaciones que asume el IPCC, entre 1850 y 1986 por quema de combustibles fósiles hubo emisiones por 195 + 20 GtC, a lo que habría que añadir por deforestación y cambios en el uso del suelo 117 + 35 GtC (Houghton y Skole, 1990), lo que totalizaría aproximadamente 312 + 40 GtC. Durante el mismo período la con-

centración de CO<sub>2</sub> atmosférico aumentó de 288 a 348 ppmv, es decir, 60 ppmv lo que equivale a poco más de 127 GtC. La proporción entre el CO<sub>2</sub> presente en la atmósfera libre y el producido, es lo que podríamos llamar «fracción atmosférica» (airborne fraction); desde el comienzo de la era industrial, dicha fracción viene a suponer un (41 + 6) %. Este porcentaje no es constante y es función de todo el ciclo del carbono en el sistema climático y en particular, del incremento anual, positivo o negativo de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Además, es precisamente en las capas más bajas de la atmósfera donde principalmente se decide el contingente de dióxido de carbono que pasa a la atmósfera libre.

Si nos referimos al decenio 1980-89, que es sin duda el mejor conocido, el IPCC ofrece estas cifras:

Emisiones a partir de combustibles fósiles  $5.4 \pm 0,5$  GtC/Año.

Emisiones por deforestación y uso del suelo  $1,6 \pm 1,0$  GtC/Año.

Acumulación en la atmósfera  $3,4 \pm 0,2$  GtC/Año.

Capturado por el océano  $2,0 \pm 0,8$  GtC/Año.

Desequilibrio en el balance  $1,6 \pm 1,4$  GtC/Año.

El aclarar esta falta de ajuste en el anterior balance supone una serie incertidumbre en los procesos climáticos inducidos por el dióxido de carbono, y obligada a profundizar en el papel de los océanos y en el de la fotosíntesis vegetal, que ha podido intensificarse en los últimos decenios por el efecto «nutriente» o «fertilización» a que seguidamente nos referimos.

### **Incógnitas acerca de los sumideros del dióxido de carbono**

Aún admitiendo la flexibilidad de estas cifras, es evidente que hay una importante cantidad de carbono con una estimación más probable de 1,6 GtC cuyo sumidero es insuficientemente conocido, a lo cual tal vez hubiera de añadirse cierta

cantidad adicional si no se descartar la posibilidad de que en la biomasa las emisiones de CO<sub>2</sub> superarán a las absorciones.

Es forzoso de admitir que hay muchos procesos no totalmente explicados en el ciclo del carbono. Un hecho que llama la atención es que mientras el consumo de combustibles fósiles prácticamente se ha duplicado en los últimos 30 años, sin embargo, el crecimiento global anual de la proporción del CO<sub>2</sub> atmosférico es sólo un poco superior al de los años sesenta. A esto podríamos añadir el hecho de la enorme deforestación habida a lo largo de los últimos decenios por la consiguiente merma de la capacidad de absorción de CO<sub>2</sub> por fotosíntesis. Todo ello pone de actualidad el tema de los sumideros desconocidos o insuficientemente evaluados de CO<sub>2</sub>, así como de la importancia de su preservación, ya que en caso de ser significativamente alterados, podría haber un explosivo crecimiento de dióxido de carbono, de incalculables consecuencias para el sistema climático.

Un sumidero importantísimo de gas carbónico lo tenemos en la fotosíntesis vegetal. Este proceso, posibilitado por la altísima calidad energética de la radiación solar, retiene el carbono en la biosfera de modo que para la misma supone la primera fuente de dicho elemento; además libera oxígeno, es decir, se trata del más importante regenerador del ciclo bioclimático.

La riqueza forestal del Planeta ha sufrido un enorme deterioro en los últimos tres mil años, y muy especialmente en el último siglo en áreas tropicales. Pese a ello la capacidad fotosintética tal vez no ha disminuido mucho, al menos en los últimos decenios, como parece probarlo el hecho de que la oscilación anual de la curva de Mauna Loa es ahora igual o quizá algo mayor que hace 30 años. Este hecho aunque relevante, no justifica por sí solo el suponer que la capacidad de absorción de la biomasa terrestre ha aumentado significativamente ya que, entre otras razones, hay que tener en cuenta que el ciclo del carbono es hiperanual. De todas formas, es preciso admitir el llamado efecto «fertilización», que

podemos enunciarlo muy simplemente diciendo que a más CO<sub>2</sub>, mayor capacidad de sintetizar hidratos de carbono. Es indudable que ahora por razones muy diversas y entre ellas la creciente presencia de abonos nitrogenados, hay mayor rendimiento global tanto agrícola como forestal. Encontrar un índice de medida de ese efecto ofrece muchas dificultades; no obstante se ha evaluado que en caso de una duplicación del CO<sub>2</sub> podría suponer un aumento de un 15 por 100 en la biomasa. Algún autor apunta una cifra de 1 GTC anual. Se trata pues de una realimentación negativa del efecto invernadero, ya que a más biomasa vegetal podría haber más absorción del dióxido de carbono.

En la búsqueda de sumideros del dióxido de carbono hay que señalar que aún cuando la deforestación ha sido y sigue siendo muy importante en grandes áreas tropicales, en los últimos decenios la repoblación forestal ha sido importante sobre todo en latitudes templadas y polares del hemisferio norte, precisamente en el escenario de las más importantes emisiones de dióxido de carbono.

El gran sumidero de CO<sub>2</sub> está sin duda en las masas oceánicas; globalmente contienen unas 60 veces más que la atmósfera; una gran parte del carbono contenido en el mar acaba precipitando en forma de carbonatos. A corto y medio plazo, el que vaya al océano el excedente de dióxido de carbono parece una buena solución; a muy largo plazo, no lo es, porque sólo una pequeña parte del carbono que va al mar vuelve a la biosfera terrestre, de modo que el océano pudiera ser en un plazo suficientemente prolongado, un gran sumidero, casi un cementerio de la biosfera terrestre.

Los intercambios de CO<sub>2</sub> entre la atmósfera y el océano son complejos. Oeschger y algo después Siegenthaler han desarrollado modelos que parecen concordar con la evolución histórica de la proporción del CO<sub>2</sub> atmosférico, según las medidas de las burbujas de aire atrapadas en los glaciares. En la absorción del dióxido de carbono por el océano hay tres procesos especialmente

importantes: el intercambio entre la atmósfera y las aguas superficiales, los intercambios verticales entre las aguas superficiales y las profundas, y la difusión horizontal. En el intercambio entre la atmósfera y las aguas superficiales oceánicas, los incrementos en la presión parcial del CO<sub>2</sub> atmosférico controlan los incrementos de carbono absorbido por el océano por medio de un factor «tampón» (buffer) mediante la ecuación:

$$\frac{\Delta p^{\text{CO}_2}}{p^{\text{CO}_2}} = \xi \cdot \frac{\Delta \Sigma \text{CO}_2}{\Sigma \text{CO}_2}$$

donde  $p^{\text{CO}_2}$  es la presión parcial del CO<sub>2</sub> disuelto en el océano, y que está en equilibrio con la presión parcial del CO<sub>2</sub> de la atmósfera, y  $\Sigma \text{CO}_2$  es el carbono inorgánico total disuelto. El factor  $\xi$  es adimensional y es función de la temperatura y del pH, con lo que se involucran procesos de realimentación. El orden de magnitud de  $\xi$  viene a ser diez, o algo más en el caso del CO<sub>2</sub>.

Los desplazamientos verticales el CO<sub>2</sub> hacia aguas profundas o viceversa son muy lentos, del orden de centenares de años para desplazamientos significativos. La configuración de las plataformas submarinas juegan un papel importante en el proceso de absorción del dióxido de carbono, juntamente con los procesos de absorción del CO<sub>2</sub> por la biosfera marina. Hay motivos para suponer que el empobrecimiento o enriquecimiento del CO<sub>2</sub> en aguas superficiales debido a movimientos verticales ha podido alterar la absorción de CO<sub>2</sub> atmosférico e inducir cambios climáticos. Procesos de este tipo parece se produjeron en épocas glaciares e interglaciares según se desprende de análisis de isótopos de carbón en aguas profundas. Se han localizado algunas áreas de análisis de isótopos de carbón en aguas profundas. Se han localizado algunas áreas del hemisferio norte que por su especial configuración facilitan el intercambio entre aguas superficiales y profundas, paso esencial en la captura del CO<sub>2</sub>. Seguramente también existen en el hemisferio austral áreas oceánicas semejantes.

El tema de otros sumideros no bien identificados entendemos no puede darse por completamente cerrado y explicado. Algunos autores suponen que no existen grandes sumideros por descubrir (Oeschger, Siegenthaler, 1988); admiten sin embargo la existencia de sumideros adicionales menores.

Tal vez un sumidero pudiera estar en la lluvia. Algún autor le da una importancia primordial, lo cual parece poco sostenible. Es cierto que la eficacia de la lluvia está en su presencia bastante continuada en las zonas húmedas. Sin embargo, aun admitiendo cantidades de  $\text{CO}_2$  significativas en la lluvia, resultaría difícil justificar algo más de 0,1 GTC al año por este mecanismo; además gran parte iría al océano, y al evaporarse la lluvia en el suelo se libraría parte del  $\text{CO}_2$ . Además, las lluvias más copiosas y eficaces en su recorrido por la atmósfera atraviesan las capas superiores atmosféricas donde al ser menor la presión, también lo es la solubilidad.

Tal vez un sumidero transitorio pudiera estar en una también transitoria acumulación de  $\text{CO}_2$  en las capas más bajas atmosféricas y en una cierta lentitud en su mezcla con la capa libre. Esta posibilidad no parece que pueda aclarar grandes cosas, pero pudiera ser tenido en cuenta. El hecho de que solo una parte del dióxido de carbono pase a corto plazo a formar parte de la llamada contaminación de fondo de la atmósfera, probablemente no alivia demasiado la gravedad del problema del calentamiento global, ya que los contingentes de dióxido de carbono de la baja atmósfera, ya están induciendo efecto invernadero.

### Otros gases traza: el metano

El metano es de extraordinaria importancia en cuanto a su efecto invernadero. Tiene actualmente una concentración de unas 1.7 ppm. La tasa de crecimiento anual es de poco más de 1,1 %, muy superior a la del dióxido de carbono. El tiempo de permanencia en la atmósfera es de unos 4 a 7 años.

Hay emisiones de  $\text{CH}_4$  en las zonas pantanosas, en los arrozales y en general en fermentaciones y actividades de microbios y bacterias en espacios no oxigenados. El aparato digestivo de los rumiantes principalmente, y también de otros vertebrados son fuentes de emisiones importantes de metano. También lo son algunos insectos, como las termitas. El área del mundo donde las emisiones de  $\text{CH}_4$  son mayores en el Este de Asia.

Se realizan medidas fiables de  $\text{CH}_4$  en la atmósfera desde 1960. Los análisis de las burbujas de aire atrapadas en glaciares, parecen mostrar que la proporción de metano guarda una relación simple con el crecimiento de la población.

El metano se oxida por la presencia del radical OH; es preciso señalar que la presencia de este último tiende a disminuir debido al aumento del monóxido de carbono.

El metano absorbe muy bien la radiación entre 6.500 y 7.500 nm. El metano que alcanza la estratosfera, al oxidarse puede favorecer la formación de vapor de agua estratosférico.

Todos estos inconvenientes pueden aconsejar la combustión de los escapes controlados de metano; es decir, son menos indeseables los efectos de la combustión del metano, que la presencia de éste en la atmósfera.

### Oxido nitroso

La concentración actual del  $\text{N}_2\text{O}$  en la atmósfera libre es del 0,3 ppm. El crecimiento anual oscila entre el 0,2 % y el 0,5 %. El tiempo medio de permanencia en la atmósfera es sumamente prolongado y puede estimarse en bastante más de 150 años.

Este gas ya estuvo presente en la atmósfera antes de la aparición del hombre, ya que una de las fuentes productoras son los rayos. Otras, hay que buscarlas en algunos procesos del ciclo del Nitrógeno, en determinadas prácticas agrícolas, uso

de fertilizantes, actividades industriales que precisan de muy altas temperaturas y aún algunos procesos en los océanos. La quema de combustibles fósiles y de la biomasa son asimismo fuentes de emisiones del  $N_2O$ .

El óxido nitroso es un gran depredador del ozono; en realidad, el más eficaz sumidero del  $N_2O$  es el ozono atmosférico.

### Ozono troposférico

Este gas, muy tóxico, tiene una proporción muy variable, y puede admitirse que un 10 % del ozono atmosférico se encuentra en la troposfera actualmente, con una clarísima tendencia a aumentar dicha proporción.

Las fuentes del ozono troposférico, son en primer lugar el ozono estratosférico y además, diversos procesos fotoquímicos en que quedan implicados hidrocarburos, óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono. La vida del  $O_3$  troposférico es bastante corta, a veces tan sólo un mes aunque lo más probable es que la vida media sea de unos tres meses. Ello contribuye a que la difusión en la troposfera no sea uniforme, por lo que las mayores concentraciones se encuentran junto a las zonas donde se genera este gas.

### Halocarbuos

Estas sustancias son de carácter netamente antropogénico, de suerte que hicieron presencia en la atmósfera a partir de la era industrial. Son numerosos los compuestos bajo este nombre, entre los que podríamos distinguir los CFC, compuestos que incluyen flúor y cloro, y los que contienen bromo o halones, empleados como extintores de excepcional eficacia.

Como es sabido, los CFC, de los cuales los más empleados son el CFC 11 y el CFC 12, se han venido utilizando en forma creciente debido a su bajísimo punto de ebullición, carácter muy inerte y nada tóxicos, como propelentes, disolventes, en la industria del frío, en la conservación de ali-

mentos, cosmética, fabricación de espumas, y muy recientemente, en el cepillado de circuitos electrónicos y «chips».

La proporción conjunta de CFC 11 y CFC 12 viene a ser de  $0,5 \times 10^{-3}$  ppm, y la de los restantes CFC, también en conjunto, pueden alcanzar una proporción algo menor. La concentración de estos gases creció muy rápidamente hasta 1970, en que la producción se estabilizó. Sin embargo, en años más recientes, al encontrarse nuevas aplicaciones sobre todo en la industria electrónica y en los extintores de fuego, las emisiones volvieron a intensificarse, hasta el punto de que el ritmo de las emisiones ha crecido últimamente a razón de un 4 % anual. La adopción del Protocolo de Montreal pudiera suponer un eficaz freno a este crecimiento desmedido.

Debido al carácter inerte de estos gases, así como a otras causas, su permanencia en la atmósfera es muy prolongada: unos 80 años para el CFC 11, 170 años para el CFC 12 y hasta 400 años para el CFC 13. Los halones también tienen una permanencia centenaria. El único sumidero conocido de los CFC es la descomposición fotoquímica en la estratosfera.

Se han popularizado tristemente los CFC por su acción depredadora del ozono estratosférico, pero se ha hablado mucho menos de su extraordinaria capacidad para absorber la onda larga, es decir, su eficaz papel como gas traza con efecto invernadero.

### Otros gases a considerar

En proporción bajísima, lo cual no es obstáculo para que sus efectos sean significativos, existen otros gases traza, tales como el monóxido de carbono,  $CO$ , en proporción muy variable, que pudiera cifrarse en la troposfera como de  $0.1 \times 10^{-3}$  ppm. Tiene una vida muy corta, por lo que su mayor densidad se encuentra cerca de sus fuentes, que son principalmente, los motores de explosión, las combustiones incompletas, quemadores más ajustados y algunas emisiones volcánicas. Los sumideros se encuentran en los pro-

cesos oxidantes, especialmente en la presencia del radical OH y en el ozono troposférico.

También pueden citarse como gases traza con efecto invernadero, el tetracloruro de carbono cuya proporción viene a ser de 0,12 ppmv. En similar proporción se encuentra el metil cloriformo, que es quizá el gas traza con mayor ritmo de crecimiento que puede cifrarse en un 7 % anual.

### **Las emisiones de gases traza con efecto invernadero en el futuro y su impacto en el clima**

De mantenerse las actuales proporciones de los gases con efecto invernadero, la tendencia global de la temperatura sería probablemente creciente en los decenios inmediatos, afortunadamente, el problema es aún mayor, ya que el crecimiento de las emisiones se mantiene a ritmo importante y aún puede acentuarse en varios gases en el futuro. El problema es muy serio y existe una honda preocupación en la comunidad científica mundial, preocupación que ya se ha extendido a la comunidad política internacional. El impacto de las emisiones de los gases a que nos referimos puede alterar el clima, con el consiguiente efecto en la sociedad humana en general, y aún en la seguridad mundial. Esta preocupación ha quedado reflejada en diferentes resoluciones de las Naciones Unidas y en otros foros internacionales. Por vía de ejemplo, citaremos únicamente la Resolución de la ONU del 11 de diciembre de 1987.

Un punto de referencia importantísimo en relación con el efecto invernadero y el futuro del clima, es la Declaración de la Conferencia Científica de Villach (Austria), celebrada en octubre de 1985. Tanto la Organización Meteorológica Mundial (OMM) como el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), habían insistido anteriormente en la necesidad de una evaluación de lo que podría suponer para el cambio climático una duplicación equivalente del contenido del CO<sub>2</sub> atmosférico, par-

tiendo de la proporción existente al final de la época preindustrial.

La conferencia de Villach reunió a los primeros especialistas del mundo, y fue convocada por la OMM, el PNUMA y el ICSU (International Council of Scientific Union). En la declaración final, entre otras cosas se dijo:

«Como resultado de la creciente concentración de gases con efecto invernadero, en la primera mitad del próximo siglo podrá ocurrir una elevación global de la temperatura media mayor que cualquier otra en la historia del hombre».

«Muchas e importantes decisiones económicas y sociales a largo plazo se toman .... En la suposición de que el clima pasado, sin modificación, es una guía confiable para el futuro... Es materia de urgencia refinar las estimaciones de las futuras condiciones climáticas, para mejorar aquellas decisiones».

En la Conferencia de Villach se convino que, de continuar la presente tendencia, el efecto combinado de todos los gases con efecto invernadero podría ser equivalente a duplicar la concentración del CO<sub>2</sub> en fechas tan próximas como el año 2030, con un consecuente calentamiento en la superficie terrestre comprendido entre 1,5°C y 4.5°C. Este calentamiento podría ser retrasado una o dos décadas debido a la gran capacidad de almacenamiento calorífico de las capas superiores de los océanos. Tal calentamiento se estima que llevaría a una elevación global del mar comprendida entre los 20 y los 140 centímetros, debido más bien a una expansión térmica de los océanos que a una masiva fusión de las masas de hielos, lo que podría requerir cientos de años. Evaluaciones posteriores apuntan a una elevación algo menor del nivel del mar.

Como hemos indicado, la Declaración de Villach ha supuesto un punto de referencia para todos los trabajos y estudios relacionados con los gases con efecto invernadero.

Tendríamos que citar como otro acontecimiento científico la Conferencia que tuvo lugar

en junio de 1988 de Toronto, bajo el lema «La atmósfera en evolución». Dicha Conferencia constituyó un éxito; congregó a 300 especialistas de todo el mundo y pudo resumir sus trabajos en una importante declaración en la que diagnosticó tres grandes alteraciones que sufre la atmósfera, alteraciones que no dudó en calificar como amenaza para la seguridad del mundo. Estas alteraciones, por orden de importancia, las definió así:

1º) Caldeamiento climático y elevación del nivel de los mares, y alteración de la configuración de las precipitaciones, motivado por los gases con efecto invernadero.

2º) Debilitamiento de la ozonósfera

3º) Transporte atmosférico a larga distancia de sustancias tóxicas y acidificantes.

La Declaración de Toronto, en algunos aspectos, fue aún más pesimista que la de Villach, y llamó la atención acerca de que en los últimos cien años la temperatura media terrestre se ha incrementado en 0,7°C. También se refirió a que determinadas prácticas agrícolas tienden a la reducción de la capacidad de la capa vegetal para absorber dióxido de carbono. Entre las medidas propuestas en Toronto, destaca la petición de que, de ahora al año 2005, las emisiones de dióxido de carbono se reduzcan en un 20 %.

La reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, es sin duda, uno de los aspectos cruciales del tema del cambio climático, que suscita grandes interrogantes y no pocas suspicacias, principalmente por parte de los países empeñados en grandes planes de industrialización, como China, India, Brasil y otros.

### **Evaluación del calentamiento global por el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC)**

Cinco años después de la Conferencia de Villach, el IPCC elevó sus conclusiones acerca del cambio climático global. El propio Panel reco-

noció que todavía restaba mucho por investigar y por hacer, y que, en no pocos aspectos del tema del Cambio Climático, hay todavía incertidumbres.

El IPCC, en lo relativo a las consecuencias del calentamiento global, inducido primordialmente por la presencia de los gases con efecto invernadero, presentó una metodología más desarrollada y pormenorizada que la de Villach, al evaluar los efectos de calentamiento global según diferentes hipótesis, de manera que partió de cuatro planteamientos o mejor dicho, desarrolló cuatro escenarios a saber:

— **Escenario A**, en que se supone que las cosas continúan como hasta ahora («Business as usual», o BaU). Se supone que continuaría el uso de la energía empleando carbón como fuente primaria y seguirá la deforestación; el Protocolo de Montreal se implementaría sin modificaciones más limitativas. En este escenario, la duplicación equivalente del CO<sub>2</sub> preindustrial se alcanzaría hacia el año 2025..

— **Escenario B**, (Escenario de bajas emisiones). Se supone que la producción de energía se desviaría hacia gas natural; se desarrollarían grandes planes de notable mejora de la eficiencia energética, cambiaría el signo de la deforestación y las emisiones de CFCs se reducirían a la mitad de 1986. La duplicación equivalente se alcanzaría hacia 2040.

— **Escenario C**, (Escenario de políticas de control). Supondría un importante desvío de la producción energética hacia formas renovables y energía nuclear segura, supresión de la CFCs y fuertes controles en las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O procedentes de prácticas agrícolas. La duplicación equivalente tendría lugar hacia el año 2050.

— **Escenario D**, (Escenario de políticas aceleradas). Supone un rápido desplazamiento hacia energías renovables y nucleares desde principios de siglo, fuerte contención de emisiones en países industrializados y moderada en los países en vías de desarrollo. La duplicación equivalente podría tener lugar hacia finales del siglo XXI.

Conviene aclarar que estos cuatro escenarios contemplan los niveles de desarrollo económico global contenidos en las proyecciones del Banco Mundial.

L magnitud del caldeoamiento global según el IPCC es del mismo orden que la evaluación de Villach, aunque ambas no son idénticas. Así, el IPCC indica que el promedio de incremento de la temperatura media global en el siglo próximo puede ser de  $0,3^{\circ}\text{C}$  por década (con una incertidumbre de  $0,2-0,5^{\circ}\text{C}$  por década) suponiendo el escenario A (o sea por BaU). Probablemente, para el año 2025 alcanzaría ya un incremento de  $1^{\circ}\text{C}$  sobre las temperaturas actuales (unos  $2^{\circ}\text{C}$  por encima de las de la era preindustrial). Para finales de siglo, siempre en el escenario A, el incremento térmico sería de unos  $3^{\circ}\text{C}$  sobre las medias globales actuales, y  $4^{\circ}\text{C}$  sobre las preindustriales. Este crecimiento de las temperaturas sería el más rápido de los últimos 10.000 años.

El IPCC llama la atención sobre dos hechos:

— Más rápido caldeoamiento en la superficie terrestre que en la oceánica, y caldeoamiento superior a la media mundial en las altas latitudes septentrionales.

— Los océanos actúan como grandes sumideros de calor originado por el efecto invernadero de modo que el actual caldeoamiento pudiera situarse entre el 50 y el 80 % del que correspondería una vez alcanzado el equilibrio del sistema climático.

Puede afirmarse que la temperatura media mundial en superficie se ha aumentado entre  $0,3^{\circ}\text{C}$  y  $0,6^{\circ}\text{C}$ , además los cinco años globalmente más cálidos han correspondido a la década de los años ochenta. El caldeoamiento global registrado a lo largo del siglo, está acorde con los modelos empleados, lo cual viene a suponer cierta validación de las evaluaciones efectuadas mediante dichos modelos para el próximo siglo. Sin embargo, es preciso tener en cuenta, como

subraya el IPCC, que los incrementos de temperatura alcanzados en el último siglo están dentro de los que pueden esperarse debidos a causas naturales.

Las previsiones del IPCC acerca de la elevación previsible del mar, difieren algo de las de Villach. En el escenario BaU, cabría esperar una elevación de 6 cm por década, con un margen de incertidumbre entre 3 y 10 cm por década. Podría predecirse una elevación global de unos 20 cm para el año 2030 y de 65 cm para finales del siglo próximo (fig. 14).

En general las evaluaciones del IPCC, además de ser más precisas por detallarse para diferentes escenarios, dan plazos más dilatados de respuesta, en buena parte debido a un mejor conocimiento del papel de los océanos, por lo cual, a corto y medio plazo, ofrecen perspectivas menos sombrías que Villach.

## Conclusión

Dentro de la muy compleja problemática del cambio climático, el papel de los gases con efecto invernadero es esencial y puede suponerse, sin demasiada exageración, que es el primer factor de naturaleza antropogénica en dicho cambio.

Hoy se conoce el papel de una serie de gases cuya presencia creciente en la atmósfera se traduce en un caldeoamiento global. Se sabe menos acerca de las interrelaciones, principalmente con el vapor de agua y de los mecanismos de realimentación inducidos en el cambio climático. Los modelos climáticos en desarrollo pueden suponer una buena herramienta para interpretar estos fenómenos.

Así como el efecto de caldeoamiento global es bastante conocido, no puede decirse lo mismo de los efectos que tal cambio tendrá en otros elementos del clima, tales como la precipitación y su distribución. Sin duda, hacia estos aspectos se orientarán las investigaciones climáticas en los próximos años.

## Bibliografía

- BARNOLA y otros (1987): Vostoc ice core. 160.000 year record of atmospheric CO<sub>2</sub>. *Nature* 329.
- BOLIN, B. (1986): *The Greenhouse Effect, Climate Change and Ecosystems*. John Wiley and Sons.
- IPCC (1990): *Scientific Assessment of Climate Change*. WMO/UNEP, Ginebra.
- GRIBBIN, J. (Ed.) (1978): *Climatic Change*. Cambridge Univ. Press.
- LAMB, H. (1972): *Climate: present, past and future*. Methuen, London.
- LAMB, H. (1977): *Changes of climate: the perspective of time scales and particular examination of recent changes*. Seel House Press, Liverpool.
- LINES, A. (1970): *The Climate of the Iberian Peninsula*. *World Sur logy*, Vol. 5. Elsevier Ed. Amsterdam.
- LINES, A. (1984): Contribution to study of the desertization in the NW of Africa during the last 400 years. *Conf. Cientif. GATE Dakar*.
- LINES, A. (1984): *Acción del hombre en el clima y contaminación*. Instituto Nacional de Meteorología. Madrid.
- LINES, A.: *Cambios en el sistema climático. Una aproximación al problema*. Instituto Nacional de Meteorología, 1990.
- LORENTE, J. M. (1968): *Variaciones de la temperatura media anual en España*. Calendario meteorofenológico, S.M.N. Madrid.
- LORENTE, J.M. (1950): *¿Está cambiando el clima?* Calendario meteorofenológico, S.M.N. Madrid.
- MARISCAL, B. (1986): *Reconstrucción de la Paleoflora y de la Paleoclimatología durante el Holoceno en la zona oriental de la Cordillera Cantábrica*. *Symp. sobre fluctuaciones climáticas*, Univ. Autónoma de Madrid.
- MENÉNDEZ AMOR, J. y FLORSCHUTZ, F. (1961): *Contribución al conocimiento de la historia de la vegetación en España durante el cuaternario*. *Estudios Geológicos, C.S.I.C.* vol. 17.
- OESCHGER, H., SIEGERTHALER, U. (1988): *How has the Atmospheric Concentrations of CO<sub>2</sub> has changed? (The Changing Atmosphere)* John Wiley and Sons.
- RASMUSSEN, R.A. (1984). *Atmospheric methane in the recent and ancient atmospheres*. *J. Geophys.* 89.