

# Repercusiones de la producción de energía en la concentración de gases de efecto de invernadero en la atmósfera

*Necesidad de reestructurar los sistemas de energía para reducir las emisiones de dióxido de carbono*

por E. Iansiti y F. Niehaus

La tierra recibe la energía que irradia el sol, y la temperatura de la superficie terrestre depende del equilibrio entre la energía que se recibe y la que se devuelve al espacio. De no existir el efecto de invernadero de la atmósfera, el equilibrio se alcanzaría cuando la temperatura media global de la superficie alcanzara los  $-19$  grados Celsius. Empero, los gases de efecto de invernadero —como, por ejemplo, el vapor de agua, incluidas las nubes, el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ), el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), el ozono ( $\text{O}_3$ ) y los clorofluorocarbonos (CFC), así como otros gases traza menos importantes— absorben las radiaciones infrarrojas que escapan de la superficie terrestre. Esto no se diferencia mucho de lo que sucede en un invernadero, donde los paneles de vidrio dejan penetrar las radiaciones solares y retienen gran parte de las radiaciones infrarrojas salientes, con lo cual aumenta la temperatura dentro del invernadero. De ahí el nombre dado al fenómeno que ha mantenido la temperatura media de la superficie de la tierra en 16 grados Celsius y permitido el desarrollo de la vida.

## Calentamiento global: el "efecto de invernadero"

Desde la revolución industrial, la concentración de gases de efecto de invernadero ha aumentado de manera sostenida. En la actualidad existe el consenso bastante generalizado de que ello aumentará el calor retenido en la atmósfera y, por consiguiente, modificará el clima global. Las modificaciones más probables son cambios en las zonas climáticas y la elevación del nivel del mar.\* También se considera posible que cambie la distribución de las lluvias y se hagan más severas las condiciones atmosféricas. Esto afectaría gravemente la vida en muchos países y, en particular, la producción mundial de alimentos.

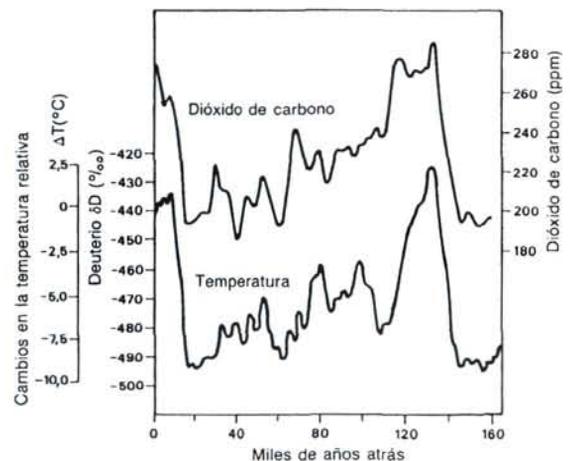
En estos momentos existen grandes incógnitas en cuanto a las fuentes y los "sumideros" que integran el presupuesto de los gases de efecto de invernadero, no tanto en el caso del  $\text{CO}_2$  y los CFC, como en el del óxido nitroso, el ozono y el metano.

Además, el calentamiento de la atmósfera debido al aumento de la concentración de gases de efecto de inver-

nadero queda hasta cierto punto enmascarado por la variabilidad del clima debido a diversas causas naturales, muchas de las cuales no se conocen aún en forma cuantificada.\* (Véase la figura adjunta.) Por otra parte, existen otras incógnitas importantes en torno a la retroalimentación de factores que podrían contrarrestar o ampliar las consecuencias de los gases de efecto de invernadero, entre ellos la capa nubosa, el aumento en la producción industrial de estos gases y los procesos oceánicos. Estas incógnitas no facilitan el proceso de formulación de una política encaminada a reducir las emisiones de tales gases. De hecho, sugieren la conveniencia de aplazar la adopción de decisiones hasta tanto dicha retroalimentación se conozca mejor y pueda comprobarse aún más la validez de los modelos analíticos. Lamentablemente, el período de vida de los gases de efecto de invernadero en la atmósfera y otros medios asociados (los océanos, la biosfera) es muy largo, y a menos que se logren reducciones radicales de las tasas de liberación actuales, su concentración seguirá

\* *Schutz der Erdatmosphäre, eine Internationale Herausforderung, Zwischenbericht der Enquete-Kommission des 11. Deutschen Bundestages, Bonn (1988).*

## Reconstrucción de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera y variaciones de la temperatura relativa



Fuente: *Schutz der Erdatmosphäre, eine internationale Herausforderung, Zwischenbericht der Enquete-Kommission des 11. Deutschen Bundestages, Bonn (1988).*

Estas tendencias se reconstruyeron empleando datos de muestras del núcleo del hielo de la estación Vostok de la URSS en la Antártida. Las temperaturas se calcularon empleando el método del deuterio.

El Sr. Niehaus es Jefe de la Sección de Evaluación de la Seguridad de la División de Seguridad Nuclear del Organismo, y el Sr. Iansiti es experto asociado de la División.

\* *The Greenhouse Effect, Climatic Change, and Ecosystems* (SCOPE 29), publicado en nombre del Comité Científico sobre Problemas del Medio (SCOPE) del Consejo Internacional de Uniones Científicas, con el apoyo del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y la Organización Meteorológica Mundial (mayo de 1988).

aumentando. Además, los océanos y otros mecanismos de retroalimentación propician una demora de hasta 100 años en los cambios efectivos de temperaturas y en otras variables climáticas debidas a las emisiones de gases de efecto de invernadero. De ahí que los cambios que se provoquen hoy sean, a todas luces, irreversibles. Por consiguiente, los gases de efecto de invernadero que ya han sido liberados en la atmósfera permiten hablar de futuros cambios climáticos.

A esto se debe que en muchas reuniones internacionales se hayan formulado recomendaciones en el sentido de que, en el marco de los programas nacionales, se adopten cuanto antes medidas encaminadas a disminuir las emisiones.

A la producción de energía, en particular al quemado de combustibles fósiles, se debe una buena parte de las liberaciones industriales de gases de efecto de invernadero. Ello ha propiciado el debate en torno al papel que la energía nuclear podría desempeñar para disminuir la producción de tales gases. Como consecuencia del quemado de combustibles fósiles, anualmente se liberan unos 20 000 millones de toneladas de dióxido de carbono. Las centrales nucleares producen electricidad sin liberar CO<sub>2</sub> u otros gases de efecto de invernadero. De ahí que con una central de 1000 megavatios se evita la emisión de los cerca de 6 millones de toneladas anuales de CO<sub>2</sub> que liberaría una central alimentada con carbón que genere la misma cantidad de electricidad. El conjunto de centrales nucleares que se encuentran en explotación hoy en todo el mundo evitan la emisión de aproximadamente 1600 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> anuales.

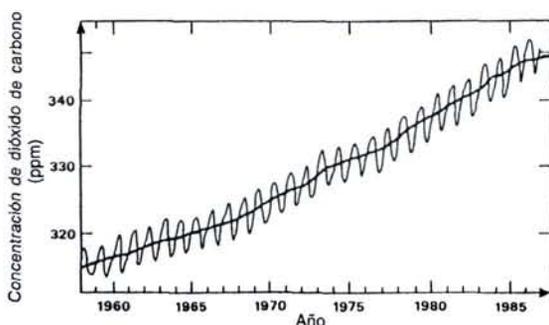
**Principales gases de efecto de invernadero**

Hay dos categorías de gases que se relacionan con el efecto de invernadero: Los gases de efecto de invernadero —como, por ejemplo, el CO<sub>2</sub>, el metano, el óxido nitroso, el CFC11 y el CFC12— absorben el calor que se desprende de la superficie terrestre y lo devuelven, calentando así la tierra. (El ozono también absorbe la energía en el campo de radiación directa solar e infrarroja.) Los gases que interactúan químicamente —como el óxido de nitrógeno, el monóxido de carbono y el radical hidroxilo— afectan la concentración de esos gases de efecto de invernadero.

A continuación se describen brevemente algunos de los principales gases de efecto de invernadero, a los que se debe más del 95% del calentamiento global. Al evaluar las emisiones de estos gases, es preciso establecer claramente la diferencia entre los ciclos del equilibrio natural y las emisiones debidas al hombre que alteran ese equilibrio. Las emisiones artificiales comparativamente pequeñas pueden alterar de modo significativo el equilibrio natural de las tasas de circulación.

**Dióxido de carbono.** La concentración de CO<sub>2</sub> en la troposfera ha aumentado a una media anual de 350 ppmv (partes por millón por volumen). En el hemisferio norte, el ciclo anual es de hasta 15 ppmv. (Véase la figura adjunta.) Las diferencias se deben fundamentalmente a las variaciones regulares de la fotosíntesis en la tierra y, en menor grado, a las variaciones anuales de la temperatura de la superficie del mar, que repercuten en la solubilidad del gas en el mar. Las variaciones de la fotosíntesis marina también tienen un reducido efecto.

**Concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, 1958-1986**



Fuente: Schutz der Erdatmosphäre, eine internationale Herausforderung. Zwischenbericht der Enquete-Kommission des II. Deutschen Bundestages, Bonn (1988).

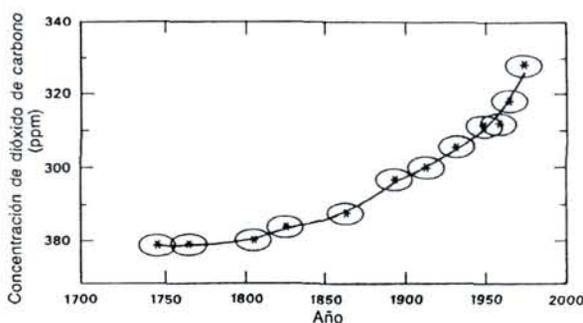
Las medidas mensuales y anuales observadas en Maunahoa, Hawaii, indican que las variaciones están relacionadas con factores estacionales como la fotosíntesis y las temperaturas de la superficie del mar.

Las concentraciones en el aire de épocas anteriores se han podido determinar mediante el análisis del aire atrapado en el hielo. La tendencia general demuestra que antes de la revolución industrial y el desarrollo de la actividad agrícola, la concentración era de  $275 \pm 10$  ppmv; el aumento actual de dióxido de carbono es de  $1,5 \pm 0,2$  ppmv, o sea, 0,4% anual.\* (Véase la figura adjunta.)

El ciclo del CO<sub>2</sub> es muy complejo y las fuentes y los sumideros naturales son mucho mayores que los que crea la actividad del hombre. (Véase el cuadro adjunto.) El carbono es el elemento clave de la vida en la tierra. El tiempo de residencia en la atmósfera y en los medios estrechamente vinculados (capa superior oceánica, biosfera) es muy prolongado, del orden de muchas centurias. Sólo entre el 40% y el 50% (fracción en suspensión en el aire) de todas las emisiones de CO<sub>2</sub> permanece en la atmósfera bajo las condiciones actuales.

\* Véase la obra ya citada, *The Greenhouse Effect, Climatic Change, and Ecosystems* (SCOPE 29).

**Concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera medidas en hielo de glaciar durante los últimos 200 años**



Fuente: Neftel et al., 1985, citado en "How much CO<sub>2</sub> will remain in atmosphere?", por B. Bolfin, *The Greenhouse Effect, Climatic Changes, and Ecosystems* (SCOPE 29) (mayo de 1988).

**Presupuesto global anual de dióxido de carbono**

Fuentes naturales	10 <sup>9</sup> toneladas anuales	Porcentaje
Bruto de los océanos	~ 376-390	~ 60
Bruto de la tierra	~ 32-440	~ 36
Fuentes naturales totales	~ 619 (408-830)	~ 96
<b>Fuentes artificiales</b>		
Uso de combustible fósil	~ 16-20	~ 3
Conversión del uso de la tierra	~ 0-10	~ 1
Fuentes artificiales totales	~ 22 (16-30)	~ 4
Fuentes totales	~ 642 (424-860)	100
<b>Sumideros</b>		
Incorporación bruta oceánica	~ 389-396	~ 64
Producción primaria neta de la tierra	~ 183-257	~ 36
Sumideros totales	~ 612 (572-653)	100

Fuentes: Basado en *A primer on greenhouse gases*, Departamento de Energía de los Estados Unidos (marzo de 1988) y "Energy, climate, environment", *Energy and climate change: What can Western Europe do?*, Directorate General for Environmental Protection, Países Bajos (febrero de 1988).

**Presupuesto global anual de metano**

Fuentes naturales	10 <sup>6</sup> toneladas anuales	Porcentaje
Tierras pantanosas	~ 60-160	~ 24
Termitas	~ 5-45	~ 5
Océanos	~ 7-13	~ 2
Animales salvajes	~ 2-8	~ 1
Lagos	~ 2-6	~ <1
Tundras	~ 1-5	~ <1
Otros	~ 0-80	~ 9
Fuentes naturales totales	~ 197 (77-317)	~ 43
<b>Fuentes artificiales</b>		
Ganado	~ 40-110	~ 16
Quemado de biomasa	~ 30-110	~ 15
Arrozales	~ 40-100	~ 15
Gas natural y pérdidas en extracción de minerales	~ 25-75	~ 11
Fuentes artificiales totales	~ 265 (135-395)	~ 57
Fuentes totales	~ 462 (212-712)	100
<b>Sumideros</b>		
Reacción con radical hidroxilo en la troposfera	~ 250-450	~ 85
Reacción con radical hidroxilo, cloro y oxígeno en la estratosfera	~ 30-70	~ 12
Incorporación por microorganismos en los suelos	~ 5-15	~ 3
Sumideros totales	~ 410 (285-535)	100

Fuentes: Basado en *A primer on greenhouse gases*, Departamento de Energía de los Estados Unidos (marzo de 1988) y "Energy, climate, environment", *Energy and climate change: What can Western Europe do?*, Directorate General for Environmental Protection, Países Bajos (febrero de 1988).

De conformidad con los modelos en uso (en los que hay que validar mejor muchos de los factores de retroalimentación), la duplicación de la concentración de CO<sub>2</sub> aumentaría el equilibrio medio global de la temperatura de la superficie entre 1,5 y 4,5 grados Celsius. No obstante, los análisis realizados recientemente indican que existen suficientes pruebas para exigir decisiones de política. En la actualidad, cerca del 50% de recalentamiento global se atribuye a la emisión artificial de CO<sub>2</sub>. El porcentaje podría ser aún mayor si se tienen en cuenta algunos mecanismos de retroalimentación en proceso de ampliación; por ejemplo, la producción natural de metano.

**Metano.** En 1985 la concentración de metano era de 1,7 ppmv en el hemisferio norte y de 1,6 ppmv en el hemisferio sur. La tendencia actual en la atmósfera es un crecimiento anual de 1,1 ± 0,1%, según estimaciones realizadas entre 1951 y 1983. (*Véanse los gráficos adjuntos.*) Esta tendencia a largo plazo se obtuvo a partir de burbujas de aire atrapadas en la capa de hielo de Groenlandia y la Antártida. El metano es liberado principalmente por la actividad microbiana que ocurre durante la mineralización del carbono orgánico bajo estrictas condiciones anaerobias, por ejemplo, en terrenos pantanosos y en los intestinos de animales herbívoros. También es liberado como consecuencia de la actividad del hombre, por ejemplo, por la extracción de gas natural, el quemado de biomasa, y la explotación de las minas de carbón. (*Véase el cuadro adjunto.*) La producción global total de metano debido a la actividad del hombre se estima entre 135 y 395 millones de toneladas anuales; estos valores constituyen una gran incógnita. El principal sumidero de metano se halla en la reacción con el radical hidroxilo en la troposfera. Otros sumideros son el transporte a la estratosfera seguido de la oxidación. El período de vida del metano en la atmósfera es de 7 a 10 años.

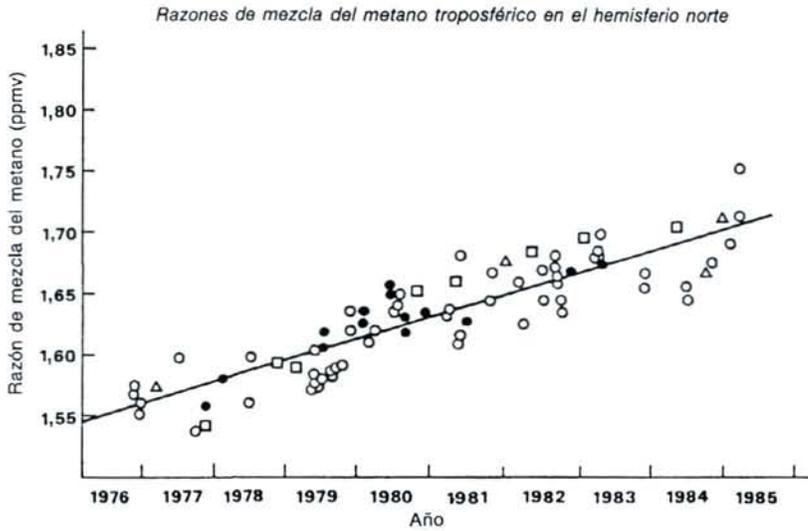
Un hecho importante es que, como gas de efecto de invernadero, el metano es 32 veces más efectivo por molécula que el dióxido de carbono\*. Se estima que aproximadamente el 19% del calentamiento global actual se puede atribuir al metano.

**Oxido nitroso.** La concentración de óxido nitroso viene observándose desde fines del siglo XIX a partir de mediciones del aire atrapado en los núcleos de hielo de la Antártida. En 1985 la concentración fue de 0,31 ppmv y la tendencia denota un aumento de 0,2% a 0,3% anual. El período de vida del óxido nitroso en la atmósfera es muy prolongado, del orden de los 150 años. Es liberado de forma natural en la atmósfera, principalmente por la acción microbiana en los suelos y el agua como parte del ciclo del nitrógeno. Las fuentes artificiales son la combustión de combustibles fósiles y el cultivo de los suelos. (*Véase el cuadro de la página 16.*) El principal sumidero es la fotólisis en la estratosfera y la reacción con el oxígeno. Se estima que cerca del 4% del recalentamiento global presente se puede atribuir al óxido nitroso.

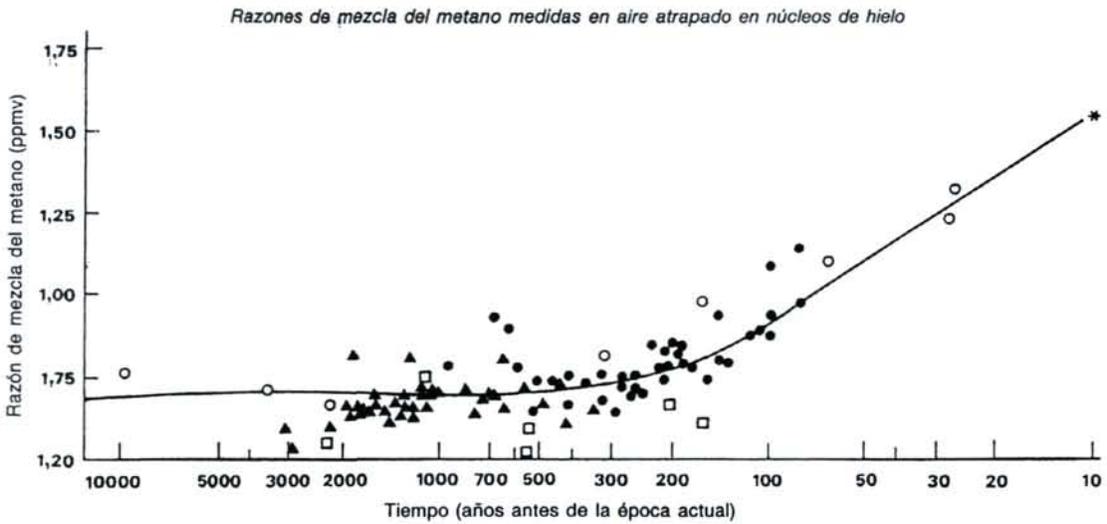
**Clorurofluorocarbonos.** Los principales clorofluorocarbonos son el CFC<sub>13</sub> (CFC11) y el CF<sub>2</sub>C<sub>2</sub> (CFC12). No existen fuentes naturales. Todos ellos son producidos

\* *Schutz der Erdatmosphäre, eine Internationale Herausforderung, Zwischenbericht der Enquete-Kommission des 11. Deutschen Bundestages, Bonn (1988).*

**Metano: concentraciones anteriores y actuales en la atmósfera**



Los datos se obtuvieron de mediciones llevadas a cabo en aviones (círculos), embarcaciones (cuadrados), y en distintas estaciones de base terrestre en condiciones de aire limpio (triángulos). La figura incluye los datos (puntos) de las mediciones realizadas por Rowland y sus colegas (véase Blake, 1984) en latitudes similares y aire del océano Pacífico.



Fuente: "Other greenhouse gases and aerosols", por H.J. Bolle, W. Seiler y B. Bolin, *The Greenhouse Effect, Climatic Change, and Ecosystems* (SCOPE 29) (mayo de 1988).

Los puntos y triángulos oscuros responden a datos tomados de Rasmussen y Khalik (1984) y representan valores obtenidos de núcleos de hielo en Groenlandia y la Antártida, respectivamente. Los círculos en blanco responden a datos publicados por Craig and Chou (1982), y los cuadrados en blanco, a datos publicados por Robbins et al. (1973).

por el hombre, en particular como refrigerantes, fluidos, propelentes de aerosoles, y para el espumado de plásticos. No hay sumideros en la troposfera y los CFC se disocian en la estratosfera donde contribuyen al proceso de agotamiento del ozono. El período de vida en la atmósfera es de 75 años aproximadamente para el CFC11 y de unos 110 años para el CFC12. En 1983, la concentración de CFC11 fue de 200 ppbv (partes por mil millones por volumen) y la de CFC12, 310 ppbv. Se calcula que su crecimiento anual es del orden del 5% aproximadamente.

En 1987 se concertó un acuerdo internacional (el Protocolo de Montreal) debido al papel de los clorofluorocarbonos en el agotamiento del ozono en la estratosfera. La finalidad del acuerdo es reducir en un 50% el empleo de los CFC en los países industrializados para el año 2000. En fecha más reciente, los objetivos internacionales se han encaminado a la prohibición de su utilización.

Como gases de efecto de invernadero, el CFC11 y el CFC12 son 14 000 y 17 000 veces, respectivamente, tan efectivos por moléculas como el dióxido

**Presupuesto global anual de óxido de nitrógeno**

Fuentes naturales	10 <sup>2</sup> toneladas anuales	Porcentaje
Suelos naturales	~ 9-31	~ 42
Océanos y estuarios	~ 3-9	~ 13
Fuentes naturales totales	~ 12-40	~ 55
<b>Fuentes artificiales</b>		
Combustión de combustibles fósiles	~ 9-16	~ 26
Cultivo de suelos naturales	~ 3-6	~ 9
Fertilización de los suelos	~ 2-3	~ 5
Quemado de biomasa	~ 2-3	~ 5
Fuentes artificiales totales	~ 22 (16-28)	~ 45
Fuentes totales	~ 48 (28-69)	100
<b>Sumidero principal</b>		
Fotólisis en la estratosfera y reacción con el oxígeno	~ 24-42	~ 100
Total	~ 33 (24-42)	

Fuentes: Basado en *A primer on greenhouse gases*, Departamento de Energía de los Estados Unidos (marzo de 1988) y "Energy, climate, environment", *Energy and climate change: What can Western Europe do?*, Directorate General for Environmental Protection, Países Bajos (febrero de 1988).

de carbono.\* Se ha calculado que hoy día cerca del 5% del calentamiento global se puede atribuir al CFC11 y el 10% al CFC12. Entre 5% y 10% de las emisiones se relacionan indirectamente con la energía; es decir, tienen su origen en la producción del material aislante que se emplea para conservar la energía.

**Ozono.** Tiene un alto poder de absorción de las radiaciones solares e infrarrojas. El ozono troposférico se deriva, en parte, del transporte proveniente de la estratosfera y, en parte, de las reacciones fotoquímicas que tienen lugar en la troposfera. El ozono estratosférico se produce, fundamentalmente, mediante fotodisociación del oxígeno molecular, después de la cual se produce la combinación de los átomos de oxígeno resultantes con O<sub>2</sub> en presencia de un catalizador. La destrucción del ozono se produce por la recombinación con átomos de oxígeno y por procesos reactivos catalíticos. El período de vida del ozono en la troposfera es muy breve (entre horas y días); por consiguiente, su concentración local es muy variable y resulta difícil detectar sus tendencias. En la literatura sobre el tema se halla un valor de concentración medio en la troposfera de entre 0,02 y 0,1 ppmv, mientras que en la estratosfera los valores oscilan entre 0,1 y 10 ppmv. Las mediciones realizadas mediante satélite y desde la tierra indican que su concentración está disminuyendo en la estratosfera y aumentando en la troposfera. En la actualidad cerca del 8% del calentamiento global se atribuye al ozono.

**Producción de energía**

El ámbito de las estimaciones sobre el papel que desempeña la producción de energía en la emisión de gases de efecto de invernadero es muy amplio. (Véanse el cuadro que figura a continuación y el gráfico de sectores de la página 17.)

\* Véase la obra citada anteriormente, *The Greenhouse Effect, Climatic Change, and Ecosystems* (SCOPE 29).

**Emisiones totales de dióxido de carbono a partir de combustibles.** Desde 1950 se ha producido un aumento sostenido de las emisiones de CO<sub>2</sub>, aunque sus valores máximos se alcanzaron a raíz de la crisis del petróleo en 1975 y 1979. (Véase la figura adjunta.) Pese a que la crisis del petróleo de 1979 dio lugar a la estabilización del consumo de petróleo, el consumo de gas natural mantuvo una tendencia ascendente. En el consumo de carbón se registró un aumento significativo, incluso superior a su tendencia histórica. De ahí que volviera a convertirse en el principal agente de emisiones de CO<sub>2</sub>, tal como sucedió a fines del decenio de 1970. Resultado de ello fue el nivel de emisiones de CO<sub>2</sub> sin precedentes registrado en 1986. Este aumento real contradice de lleno todas las recomendaciones de los científicos en el sentido de que se disminuyan las emisiones de CO<sub>2</sub>. Los planes actuales de aumentar el consumo de carbón empeorarán la situación drásticamente.

Cabe señalar que si se cumplen los pronósticos actuales para el año 2000, China por sí sola consumiría más carbón que el que consumen hoy todos los países de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE). El 40% de aumento planificado a escala mundial es aproximadamente igual al consumo actual de los países de la OCDE y cerca del doble del consumo en los Estados Unidos. (Véase el cuadro infra.)

**Emisiones de dióxido de carbono por países.** Desde 1950, se viene registrando un rápido aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub> en los países en desarrollo y una disminución relativa de esas emisiones en los países industrializados. (Véase la figura de la página 17.) Con raras excepciones, las emisiones *per caput* han aumentado drásticamente desde 1950. Las grandes diferencias que se observan en las actuales emisiones *per caput* también indican cuán difícil sería lograr que los países convinieran en disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub>; por ejemplo, cumplir el objetivo trazado en la Conferencia de Toronto de 1988 de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en

**Porcentaje de producción de gases de efecto de invernadero procedentes de la energía**

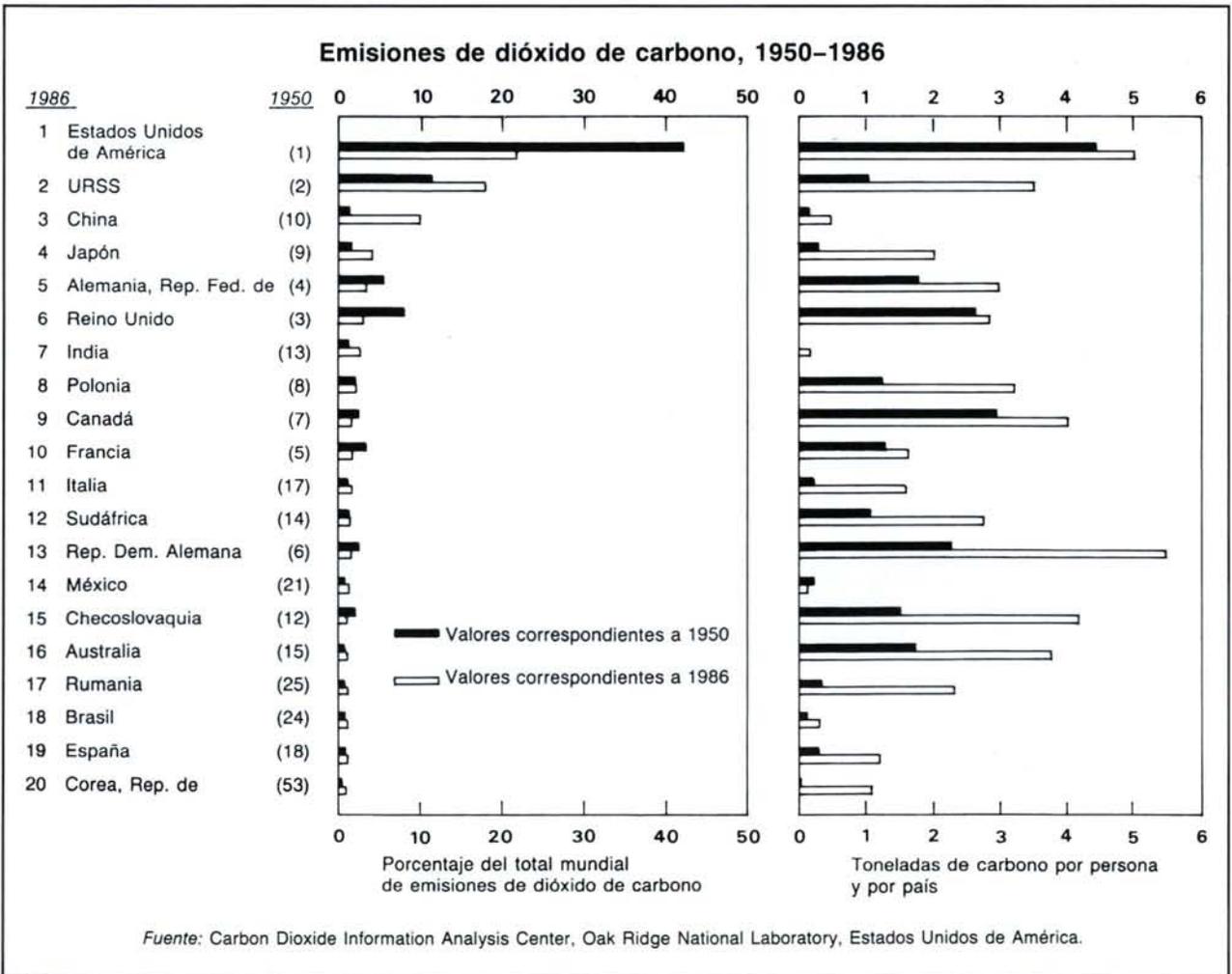
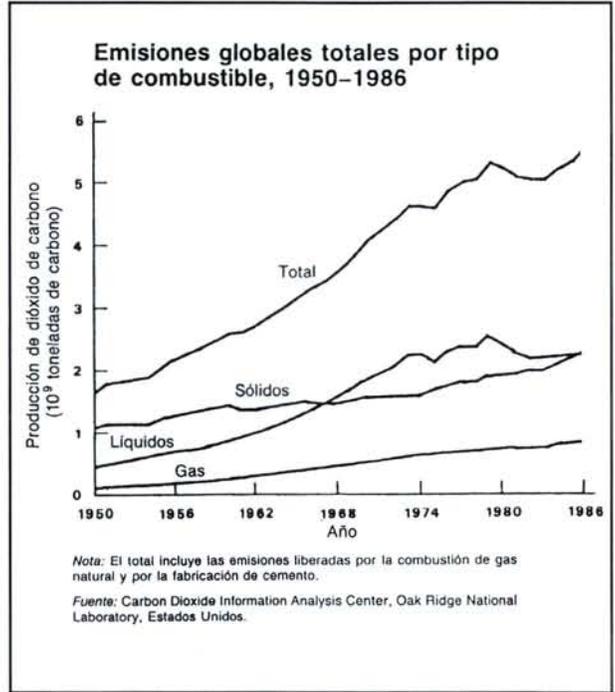
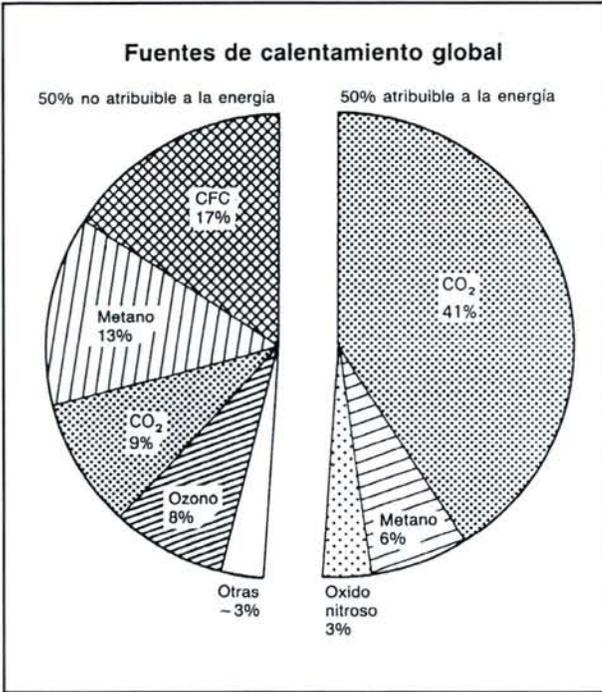
Porcentaje debido a la energía en comparación con la totalidad de:	Fuentes naturales		Fuentes artificiales	
Dióxido de carbono	2-4		65-98	
Metano	10-30		16-48	
Oxido de nitrógeno	18-38		65-100	
CFC	n.d.		5-10*	

\* Indirectamente debido a la conservación de la energía.

**Pronósticos del consumo de carbón (millón de toneladas de equivalente de petróleo anual)**

	1985-1986	2000	Aumento
China	700	1400	+ 100%
Estados Unidos	680	900	+ 32%
Australia	43	62	+ 44%
India	140	440	+ 214%
Total mundial	3200	4500	+ 40%
Participación de la OCDE en el total	1200	1640	+ 37%

Fuentes: Agencia para la Energía Nuclear de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos, 1986 (datos de los Estados Unidos y Australia); Conferencia Mundial de Energía, 1986 (datos mundiales totales).



**Emisiones de carbono en 1984 por región y sector económico**

	Porcentaje (en cifras redondas)					Total (10 <sup>6</sup> toneladas)
	Industria	Transporte	Otros	Electricidad	Consumo propio* (sector de la energía)	
Asia	38	11	21	26	3	642,54
Africa	28	20	11	40	1	136,31
América Latina	23	32	12	19	15	203,69
OCDE	23	24	17	28	8	2622,00
CAME	21	8	17	43	11	1378,94
Total	24	18	17	32	8	4983,48

\* Energía secundaria: pérdidas de distribución y conversión.

*Notas:* La región de Africa incluye 17 países más el Irán (datos de 1982) y Argelia (datos de 1982). La región de Asia incluye 15 países más China (datos de 1980) y Taiwán, China (datos de 1984). América Latina incluye 16 países más México (datos de 1982). Los datos de la OCDE abarcan 25 países; los datos del CAME abarcan 7 países. No se consideraron algunos países o sólo se consideraron parcialmente: Argelia, Liberia, Jamahiriya Arabe Libia, Sudáfrica, Irán, República Popular Democrática de Corea y Siria.

*Fuentes:* Datos extraídos de *Energy balances and electricity profiles*, Naciones Unidas (1982) en el caso de Africa, Asia y América Latina; de *Energy balances 1970-1985*, Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE) en el caso de los países miembros de la OCDE; de *Energy balances for Europe and North America 1970-2000*, Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa, en el caso de los países miembros del Consejo de Ayuda Mutua Económica (CAME).

*Fuente:* T. Müller (consultor). Sección de Estudios Económicos y Planificación del OIEA, División de Energía Nucleoeléctrica.

un 20% para el año 2005. Resulta evidente que las emisiones de CO<sub>2</sub> sólo podrán estabilizarse con el concurso de todos los países. Sin embargo, se precisan distintas estrategias que respondan a la capacidad tecnológica de cada país y a la disponibilidad de opciones.

**Emisiones de dióxido de carbono por sectores.** Otro importante aspecto de las emisiones de CO<sub>2</sub> es su distribución por sectores de la economía. La producción de electricidad ocupa un lugar destacado. (*Véase el cuadro adjunto.*) Aproximadamente una tercera parte de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el mundo se debe a la producción de electricidad, una cuarta parte a la industria, menos de una quinta parte se debe a las actividades relacionadas con el transporte y la misma proporción a otras actividades (incluidos los servicios, la agricultura y el hogar), y menos de una décima parte proviene de las pérdidas por conversión y las prácticas de las industrias de elaboración. El porcentaje atribuible a la producción de electricidad oscila entre el 19% en América Latina y el 43% en los países del Consejo de Ayuda Mutua Económica (CAME).

La importancia de la producción de electricidad ha crecido a un ritmo mucho más acelerado que el producto nacional bruto (PNB) o la producción de energía. En los países de la OCDE, la producción total de energía en el período 1973-1985 ha aumentado sólo un 4%, mientras que la producción de electricidad ha crecido un 39%. En el plano mundial, la producción de electricidad aumentó un 57% durante ese período. (*Véase el cuadro infra.*)

**Opciones de política para controlar las emisiones de dióxido de carbono**

En vista de esas tendencias, se ha llegado al consenso de que ya no podemos permitirnos el lujo de llevar

**Crecimiento del producto interno bruto, energía y electricidad de 1973 a 1985**

	PIB	Energía	Electricidad
En el mundo	42%	29%	57%
OCDE	33%	4%	39%

adelante el experimento global de aumentar los gases de efecto de invernadero en la atmósfera, en particular el CO<sub>2</sub>, cuya fuente principal es, con mucho, el quemado de combustibles fósiles. Es preciso recordar que la evolución comercial de los sistemas de energía muestra tendencias históricas definidas, apenas interrumpidas por acontecimientos como la crisis del petróleo. No es posible (ni tampoco conveniente) cambiar las tendencias históricas abruptamente si se tiene en cuenta, por ejemplo, el tiempo de vida de las inversiones en la esfera de la energía y su relación con el desarrollo económico e industrial.

Sólo se podrá dar solución al problema del CO<sub>2</sub> si se adopta de inmediato un conjunto de medidas que se complementen entre sí. Una combinación de medidas de esa índole, en la que cada una aporta su grano de arena a la solución del problema, resulta también más flexible y entraña menos trastornos al desarrollo económico. Los beneficios de tales medidas se multiplican si resultan útiles para otros propósitos, por ejemplo, para disminuir las emisiones de otros gases de efecto de invernadero y contaminantes atmosféricos, o la producción de desechos.

Sin embargo, cabe señalar que la estabilización de las emisiones de gases de efecto de invernadero (es decir, mantener el ritmo actual de liberación en la atmósfera) no impedirá que aumenten las concentraciones atmosféricas. En estos momentos se desconoce el nivel de concentración tolerable, por lo que resulta de vital importancia reducir el ritmo de su incremento e introducir cambios en los estilos de vida, el desarrollo industrial y la producción de energía que permitan elaborar estrategias flexibles de respuesta, teniendo en cuenta la inercia del sistema. Una mayor comprensión del problema podría fortalecer y acelerar dichas estrategias. En tal sentido, el Grupo Intergubernamental sobre Cambios Climáticos (IPCC) está investigando las repercusiones de escenarios que duplicarían la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera en los años 2030, 2060 y 2090, sin aumentos previstos en este último escenario.

Es preciso reestructurar el sistema de energía de modo que al abastecer las unidades de servicios de

energía se reduzcan los niveles de emisión de CO<sub>2</sub>.

Las opciones básicas para lograrlo son las siguientes:

- El uso más eficaz de la energía primaria a partir del carbono. Con ello se reduciría también la emisión de todos los gases de efecto de invernadero relacionados con la energía.

- La sustitución del carbón por combustibles que liberen menos CO<sub>2</sub>, con lo que se reduciría también la contaminación ambiental. Sin embargo, la repercusión de esta medida en el caso de los gases de efecto de invernadero distintos del CO<sub>2</sub> no sería muy significativa. El uso de gas natural provocaría mayores emisiones de metano (por lo general se calcula que las pérdidas en la distribución son de fracciones del 1%). No obstante, el metano es, como gas de efecto de invernadero, 32 veces más eficaz por molécula que el CO<sub>2</sub>.

- El uso de la energía nucleoelectrónica. La energía nucleoelectrónica no provoca emisiones de gases de efecto de invernadero. Además de la producción de electricidad, sus futuras aplicaciones podrían incluir la producción de calor para fines industriales y de otra índole, así como de combustibles especiales para el transporte que no produzcan gases de efecto de invernadero.

- El uso de fuentes de energía renovables (como, por ejemplo, la solar, la eólica y la de biomasa). Las fuentes de energía renovables no liberan gases de efecto de invernadero. En la actualidad dichas técnicas no pueden obtenerse a costos económicos, y a menos que se logren avances tecnológicos importantes, su utilización se limita a aplicaciones descentralizadas en pequeña escala. No obstante, las aplicaciones de este tipo llegan a ser numerosas en países que tienen condiciones favorables.

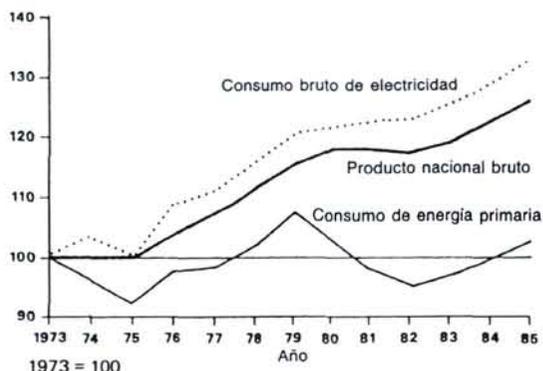
- La formulación de estrategias atenuantes. Entre ellas cabe mencionar medidas tan distintas como la reforestación o el vertimiento de CO<sub>2</sub> en las aguas profundas de los océanos o en campos de petróleo o gas agotados.

El conjunto de medidas que un país adopte, y la importancia que le atribuya, dependerán en gran medida de su nivel de desarrollo tecnológico y de las opciones que tenga a su alcance.

**Análisis de casos ilustrativos.** En los Estados Unidos, por ejemplo, las emisiones totales de CO<sub>2</sub> se han mantenido estables a lo largo de los últimos 15 años. Por unidad de producción económica, la "eficiencia de las emisiones" de CO<sub>2</sub> ha aumentado en un 20% aproximadamente, es decir, las emisiones específicas han disminuido de 470 000 a 350 000 toneladas métricas por cada mil millones de dólares del PNB (al valor del dólar de los Estados Unidos en 1982).\* Ello ha sido posible, fundamentalmente, gracias al aumento de la eficiencia de la energía, el incremento del uso de la electricidad y al aumento sustancial de la energía nucleoelectrónica.

Estas medidas se adoptaron con miras a minimizar los costos y las repercusiones ambientales, aunque ello no constituyó una política declarada que tuviera por objeto disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> en particular.

**Tendencias observadas en el consumo de energía primaria, el consumo bruto de electricidad y el producto nacional bruto de la República Federal de Alemania, 1973-1985**



Fuente: Informe sobre Energía del Gobierno de la República Federal de Alemania, Ministerio Federal de Economía, Bonn (1986).

Algo similar se observa en la República Federal de Alemania.\* Durante el período 1973-1985, el PNB aumentó (+26%), mientras que las emisiones de dióxido de carbono disminuyeron (-11%). Esto se debió a los cambios en la producción y el uso de la energía que se relacionan a continuación:

- **Uso más eficiente de la energía.** Con algunas desviaciones, el consumo total de energía primaria ha permanecido casi uniforme, a pesar del notable aumento del PNB. (Véase la figura adjunta.) Paralelamente se produjo un marcado aumento en la demanda de energía eléctrica. (Esta tendencia a la electrificación se ha observado en todo el mundo y, en particular, en los países de la OCDE.) Se lograron ahorros en el consumo de energía en la industria mediante la introducción de productos y servicios más eficientes; así como en la calefacción de locales y el consumo de petróleo. El aumento en el consumo de electricidad se produjo a pesar de que su uso se hizo más eficiente.

- **Sustitución de combustibles.** En 1973, las emisiones específicas de CO<sub>2</sub> producidas por combustibles de todo tipo fueron 13% menores de lo que habrían sido si se hubiera empleado carbón para generar toda esa energía. Esta diferencia aumentó a 24% en 1985 gracias a la reducción del empleo de petróleo y carbón y una mayor utilización de gas natural y energía nucleoelectrónica.

- **Utilización de la energía nucleoelectrónica.** La participación de la energía nucleoelectrónica en la producción de energía primaria aumentó de 1% a 11%.

Estos cambios tampoco estuvieron encaminados a minimizar las emisiones de CO<sub>2</sub>. Con todo, demostraron la posibilidad de disminuirlas mediante la formulación y aplicación de una política básica de esa índole.

\* "Energy and the greenhouse effect", Science Concepts, Inc., Washington, D.C. (marzo de 1989).

\* Según datos que figuran en SCOPE 29 (véase la referencia anterior) y en el Informe sobre energía del Gobierno de la República Federal de Alemania, Ministerio Federal de Economía, Bonn (1986).

## Repercusiones de una política y papel de la energía nucleoelectrónica

Lo que está claro, sin embargo, es que una política derivada de los ejemplos de los Estados Unidos y la República Federal de Alemania es más propia para países industrializados y se aplica en menor medida a los países en desarrollo. Estos países tendrán que aumentar de modo sustancial el consumo de energía primaria a partir de combustibles fósiles fundamentalmente, y ya están haciendo planes para ello. Como los países industrializados son los principales responsables del aumento de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, a ellos incumbe la responsabilidad especial de reducir por encima de lo que les corresponde la emisiones de CO<sub>2</sub>. Bajo condiciones climáticas favorables, los países en desarrollo deberían utilizar las fuentes de energía renovables.

La energía nucleoelectrónica puede hacer una importante contribución a la solución del problema del CO<sub>2</sub>. Cada reactor de 1000 megavatios eléctricos impide la emisión de unos 6 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> anuales, en comparación con la misma cantidad de electricidad producida mediante el quemado de carbón. En conjunto, las 430 centrales nucleares que existen en el mundo impiden la emisión de unos 1600 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>, es decir, el 8% de todas las emisiones que se producen actualmente. Esta cifra no es insignificante, si se tiene en cuenta que equivale aproximadamente al 40% de la reducción que se trazó como meta en la Conferencia de Toronto. Para lograr estos mismos resultados mediante la reforestación se necesitarían extensísimas áreas de bosques. En la República Federal de Alemania, por ejemplo, los bosques fijan unas 3 toneladas anuales de carbono por hectárea mediante el crecimiento de los troncos y las ramas de los árboles. En condiciones más favorables esa cifra podría duplicarse. Por ejemplo, una hectárea de bosque absorbe entre 10 y 20 toneladas de CO<sub>2</sub> de la atmósfera, según las condiciones climáticas. En consecuencia, se necesitarían entre 3000 y 6000 kilómetros cuadrados de bosques para absorber las emisiones de CO<sub>2</sub> que se pueden evitar con una central nuclear de 1000 megavatios, comparada con una central equivalente alimentada con carbón. De manera que los 1600 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> que en la actualidad *dejan de liberar* las centrales nucleares en su conjunto, equivalen a entre 1 y 2 millones de kilómetros cuadrados de bosques aproximadamente, es decir, de 4 a 8 veces la extensión de la República Federal de Alemania. En este cálculo no se tiene en cuenta que los árboles adultos tendrían que ser enterrados para siempre en sitios estancos para siempre a fin de impedir su oxidación en CO<sub>2</sub>.

En muchos países, aunque no en todos, hay todavía grandes posibilidades de aumentar la utilización de la energía nucleoelectrónica para producir electricidad, si se tiene presente el rápido crecimiento del consumo de electricidad. Sin embargo, aumentarla más allá y llevarla, digamos, al doble de la capacidad actual, plantearían nuevos problemas a la seguridad nuclear, a las instalaciones del ciclo del combustible y al sistema internacional de salvaguardias. Además, será necesario introducir cambios de principio para que la energía nuclear resulte más atractiva para los países en desarrollo, entre ellos el financiamiento y el mejoramiento de la cooperación internacional en las diversas etapas del ciclo del combustible nuclear.

Teniendo en cuenta la responsabilidad especial que cabe a los países industrializados en lo referente al problema del CO<sub>2</sub>, así como sus capacidades tecnológicas, esos países tienen el deber de ampliar el uso del tipo de reactor ya existente y acelerar más el desarrollo de reactores avanzados más pequeños, basados en una tecnología más sencilla y normalizada y que hagan un mejor uso de las características pasivas de seguridad. Se están creando distintos diseños de ese tipo, incluidos los reactores de alta temperatura, que estarán disponibles dentro de algunos años. A la larga, tal vez sería necesario crear diseños muy diferentes que se basen en distintas tecnologías y características del ciclo del combustible para reconsiderar aspectos tales como la evacuación de desechos, la disponibilidad de combustible, y la proliferación. Una política semejante podría también contribuir a superar, al menos parcialmente, el problema de la aceptación por parte del público.

## Conclusiones

- Debido a la importancia del problema, es preciso adoptar medidas ahora, en particular medidas eficaces desde el punto de vista del costo y que sean convenientes por otras razones ambientales y económicas.
- Deberán escogerse opciones que refuercen las actuales tendencias positivas y que, por consiguiente, trastornen menos el desarrollo social.
- Todos los países, y en particular los países industrializados, deberían aplicar una política estricta de utilización eficiente de la energía primaria producida a partir del carbono; sustitución de combustibles; utilización de la energía nucleoelectrónica cuando proceda; y uso de fuentes de energía renovables cuando las condiciones lo permitan.
- Las medidas que aplique cada país para disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> deben basarse en su capacidad tecnológica, su situación económica, sus posibles opciones en materia de energía y en la participación que ha tenido en la contaminación de la atmósfera con CO<sub>2</sub> en el pasado.
- Además de sus positivas repercusiones en lo tocante a la emisión de CO<sub>2</sub>, el uso eficiente de la energía, la sustitución de combustibles y la utilización de la energía nuclear son convenientes por otras razones relacionadas con el medio ambiente.
- Todavía no puede decirse la última palabra en torno al calentamiento global. El problema podría ser más o menos agudo de lo que hoy se cree. Por tanto, resulta sumamente importante trazar hoy una estrategia que ofrezca opciones en el futuro. Esto está relacionado, en particular, con la energía nucleoelectrónica, ya que quizás en el futuro sea preciso construir un gran número de reactores. De ahí que los países industrializados deban dar prioridad a la disponibilidad de la tecnología nuclear avanzada.
- Los países industrializados deberían ayudar a los países en desarrollo en sus esfuerzos por disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Ello podría ser muy eficaz desde el punto de vista del costo si se empleasen tecnologías de baja eficiencia en CO<sub>2</sub>.
- La disminución de las emisiones de gases de efecto de invernadero a partir de la producción de energía tiene que complementarse con medidas que eviten las emisiones de gases de efectos de invernadero a partir de otras fuentes.