



ESCENARIOS DE EMISION DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

Nadia Gamboa¹

*Pontificia Universidad Católica del Perú, Departamento de Ciencias,
Sección Química
Apartado 1761. Lima 100 - Perú.*

RESUMEN

El efecto invernadero es un fenómeno natural. Más aún, existe vida en la Tierra debido a la capacidad de absorber energía de los gases que ocasionan este efecto. La actividad industrial ha incrementado la concentración de estos compuestos en la atmósfera y el hombre es responsable del evidente cambio climático. Para predecir el futuro del planeta se supone seis escenarios de emisión de gases de efecto invernadero. Estas hipótesis ayudan a una mejor comprensión de este problema global.

Revisión

1 Este artículo está basado en una charla realizada por la autora en el marco de las actividades del Grupo de Expertos en Cambio Climático convocado por CONAM en 1997.

INTRODUCCION

La atmósfera transporta energía al arrastrar masas de aire húmedo y seco. Por medio de la evaporación, el aire absorbe vapor de agua por encima de los océanos cálidos. Este vapor de agua viaja a las regiones más frías y al interior de los continentes y se condensa y precipita como lluvia o nieve, desprendiendo calor en el interior de la atmósfera. La física y la dinámica atmosféricas desempeñan un papel esencial en la determinación de la temperatura de la superficie terrestre, así como en la formación y la actuación de las nubes, de las lluvias y de los vientos. Transportando agua, reactivos químicos y polvo a través del planeta, y aportando una parte sustancial del sistema de apoyo a la vida, la atmósfera se convierte en el motor del sistema climático.

La vida sobre el planeta existe pues por la combinación de varios factores, uno de los cuales es la radiación procedente del Sol. Esta energía es absorbida principalmente sobre la superficie terrestre, luego redistribuida por las circulaciones oceánica y atmosférica e irradiada al espacio a longitudes de onda mayores. La energía solar que ingresa a la Tierra está balanceada por la radiación terrestre que escapa. Cualquier factor que altera esta radiación recibida del Sol o que se pierde hacia el espacio, o que altera la redistribución de la energía al interior de la atmósfera o entre la atmósfera, tierra y océano puede afectar el clima. Un cambio en la energía disponible en el sistema tierra-atmósfera se conoce como forzamiento radiativo.

La capa de aire que rodea la Tierra contiene gases que absorben el calor que irradia la superficie terrestre y vuelven a emitir una parte de este calor hacia la superficie terrestre a temperaturas mucho más bajas. Este mecanismo de calentamiento planetario se denomina efecto invernadero. Entonces, un gas de efecto invernadero es aquél que absorbe energía en una longitud de onda específica del espectro de radiación

emitido por la superficie terrestre y por las nubes. El gas emite radiación infrarroja desde un nivel donde la temperatura es mas fría que en la superficie. El efecto neto es un atrapamiento local de parte de la energía absorbida y una tendencia a calentar la superficie del planeta. Los gases de efecto invernadero primarios son el vapor de agua (H_2O), el dióxido de carbono (CO_2), el óxido nitroso (N_2O), el metano (CH_4) y el ozono (O_3). El vapor de agua es el responsable de 80% del efecto invernadero. El resto son gases en muy poca concentración pero que tienen una gran importancia. Las actividades humanas han alterado las concentraciones y las distribuciones de estos gases y de los aerosoles en la atmósfera. Estos cambios pueden producir un forzamiento radiativo cuando cambian la reflexión o la absorción de la radiación solar, o la emisión y la absorción de la radiación terrestre. El forzamiento radiativo tendrá un efecto positivo si calienta la superficie y negativo si la enfría.

La mayoría de los gases de efecto invernadero poseen fuertes bandas de absorción en la región del infrarrojo y, por eso, actúan incrementando la capacidad de la atmósfera de atrapar calor y conducir a un cambio climático. En cambio, los aerosoles ejercen un efecto de enfriamiento en la atmósfera.

La concentración de un compuesto en la atmósfera depende del tamaño de sus fuentes y de sus sumideros. Los procesos de emisión y producción en la atmósfera y de remoción en la superficie terrestre o de pérdida química en la atmósfera ocurren en diferentes escalas de tiempo. Las concentraciones históricas o pasadas de gases estables pueden ser conocidas analizando las burbujas de aire atrapadas en las muestras de hielo tomadas en la Antártida y Groenlandia. Los gases menos estables y los aerosoles son difíciles de cuantificar. La estimación de los cambios en la concentración de un compuesto en la atmósfera requiere un conocimiento cuantitativo de los procesos de remoción y las estimaciones de sus futuras emisiones.

Dióxido de Carbono

El ciclo del carbono es particularmente importante porque el carbono se encuentra presente en todas las células vivas. Dicho ciclo gira especialmente alrededor del dióxido de carbono ya que éste constituye la especie química predominante en la atmósfera entre las que contie-

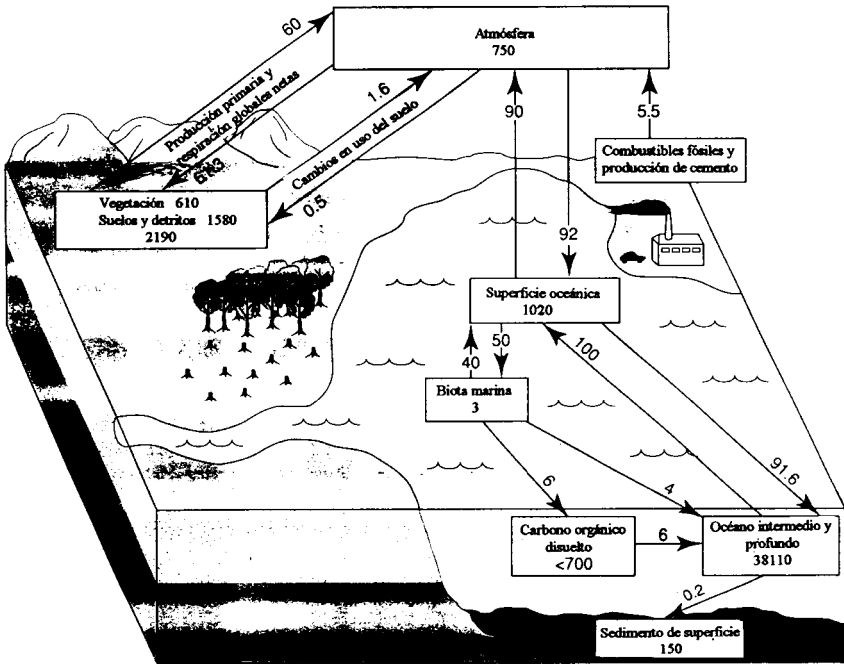


Figura 1. Ciclo global del carbono

nen carbono. La Figura 1 muestra un esquema del ciclo global del carbono señalando los reservorios y los flujos relevantes a las perturbaciones antropogénicas. El ciclo funciona básicamente a través de la fotosíntesis, la respiración, las emisiones por combustión de combustibles fósiles y las erupciones volcánicas. También la sedimentación y posterior descomposición del placton y otros organismos vegetales de los océanos permiten la emisión de CO_2 hacia la atmósfera. Este ciclo es un sistema dinámico y está acoplado al sistema climático en las escalas estacional, interanual y por décadas. Los números allí indicados corresponden a los promedios anuales durante el período 1980-1989.

Las concentraciones de CO_2 atmosférico han sido monitoreadas por cortos períodos en un gran número de estaciones atmosféricas alrededor del mundo (Figura 2). Estos sitios de medición están distribuidos

Tabla 1. Tiempos de permanencia, concentraciones y forzamientos radiativos de gases de efecto invernadero.

Especie		Tiempo de permanencia (años)	Concentración (ppbv)		Forzamiento radiativo	
			1992	Preindustrial	W.m ² /año	W.m ⁻²
Gases naturales y de influencia antropogénica						
dióxido de carbono	CO ₂	50-200	356000	278000	1,8 · 10 ⁻⁵	1,56
metano	CH ₄	12,2	1714	700	3,7 · 10 ⁻⁴	0,47
óxido nitroso	N ₂ O	120	311	275	3,7 · 10 ⁻³	0,14
cloruro de metilo	CH ₃ Cl	1,5	~0,6	~0,6	0	
bromuro de metilo	CH ₃ Br	1,2	0,010	<0,010	0	
cloroformo	CHCl ₃	0,51	~0,012		0,017	
diclorometano	CH ₂ Cl ₂	0,46	~0,030		0,03	
monóxido de carbono	CO	0,25	50-150			
Gases que deben ser suspendidos antes del 2000 según el Protocolo de Montreal						
CFC-11	CCl ₃ F	50	0,268	0	0,22	0,06
CFC-12	CCl ₂ F ₂	102	0,503	0	0,28	0,14
CFC-113	CCl ₃ FCF ₂	85	0,082	0	0,28	0,02
CFC-114	CClF ₂ CClF ₂	300	0,020	0	0,32	0,007
CFC-115	CF ₃ CClF ₂	1700	<0,01	0	0,26	<0,003
tetracloruro de carbono	CCl ₄	42	0,132	0	0,10	0,01
metil cloroformo	CH ₂ CCl ₃	4,9	0,135	0		
halon-1211	CBrClF ₂	20	0,007	0	0,05	0,007
halon-1301	CBrF ₃	65	0,003	0		
halon-2402	CBrF ₂ CBrF ₂	20	0,0007	0	0,28	

continúa

Especie	Tiempo de permanencia (años)	Concentración (ppbv)		Forzamiento radiativo		
		1992	Preindustrial	W.m ⁻² /año	W.m ⁻²	
Hidrocarburos clorados controlados según el Protocolo de Montreal						
HCFC-22	CHClF ₂	12,1	0,100	0	0,19	0,02
HCFC-123	CF ₃ CHCl	1,4		0	0,18	
HCFC-124	CF ₃ CHClF	6,1		0	0,19	
HCFC-141b	CH ₃ CFCl ₂	9,4	0,002	0	0,14	
HCFC-142b	CH ₃ CF ₂ Cl	18,4	0,006	0	0,18	
HCFC-225ca	C ₃ HF ₅ Cl ₂	2,1		0	0,24	
HCFC-225cb	C ₃ HF ₅ Cl ₂	6,2		0	0,28	
Compuestos perfluorados						
hexafluoruro de azufre	SF ₆	3200	0,032	0	0,64	0,002
perfluorometano	CF ₄	50000			0,10	0,007
perfluoroetano	C ₂ F ₆	10000	0,070	0	0,23	
perfluoropropano	C ₃ F ₈	2600	0,004	0	0,24	
perfluorobutano	C ₄ F ₁₀	2600		0	0,31	
perfluoropentano	C ₅ F ₁₂	4100		0	0,39	
perfluorohexano	C ₆ F ₁₄	3200		0	0,46	
perfluorociclohexano	c-C ₆ F ₈	3200		0	0,32	

continúa

Especie	Tiempo de permanencia (años)	Concentración (ppbv)		Forzamiento radiativo	
		1992	Preindustrial	W.m ⁻² /año	W.m ⁻²
Gases de efecto invernadero antropogénicos no regulados					
HFC-23	CHF ₃	264	0,100		0,18
HFC-32	CH ₂ F ₂	5,6			0,11
HFC-41	CHF ₃	3,7			0,02
HFC-43-10mee	C ₃ H ₂ F ₁₀	17,1	0,002		0,35
HFC-125	C ₂ H ₂ F ₅	32,6	0,006		0,20
HFC-134	CF ₂ HCF ₂ H	10,6			0,18
HFC-134a	CH ₂ FCF ₃	14,6			0,17
HFC-143	CF ₃ HCH ₂ F	3,8			0,11
HFC-143a	CH ₃ CF ₃	48,3			0,14
HFC-152a	CH ₃ CHF ₂	1,5			0,11
HFC-227ea	C ₃ H ₂ F ₇	36,5			0,26
HFC-236fa	C ₃ H ₂ F ₆	209			0,24
HFC-245ca	C ₂ H ₃ F ₅	6,6	0,032		0,20
HFOC-125e	CF ₃ OCHF ₂	82			
HFOC-134e	CHF ₂ OCHF ₂	8	0,070		
trifluoroyodometano	CF ₃ I	<0,005	0,004		0,38

globalmente en la Antártida, Australia, Asia, Europa, Norteamérica y varias islas. Las mediciones de dióxido de carbono atmosférico empezaron en las estaciones del Polo Sur (1957) y Mauna Loa, Hawaii (1958). Las concentraciones promedios globales de CO₂ se determinan por análisis de los datos NOAA/CMDL². En el período 1980 - 1989 se observó un incremento de $1,53 \pm 0,1$ ppmv/año, lo que corresponde a una tasa de cambio promedio anual de $3,3 \pm 0,2$ GtC/año. Otros compuestos que contienen carbono (CH₄, CO e hidrocarburos) contienen alrededor de 1% del carbono almacenado en la atmósfera y pueden no ser considerados. El tiempo de permanencia en la atmósfera, las concentraciones anteriores a la Revolución Industrial y en 1992, así como el forzamiento radiativo para gases de efecto invernadero y otros se presentan en la Tabla 1. La columna de forzamiento radiativo en W.m⁻² se refiere a este parámetro desde la época preindustrial y la columna con unidades W.m⁻²/año es exacta sólo para pequeños cambios en la composición atmosférica actual.

Metano

La concentración de metano en la atmósfera ha aumentado irregularmente desde comienzos del siglo XIX. Los niveles actuales son los más altos observados, incluso cuando son comparados con los resultados de las muestras de hielo que proporcionan información de hasta 160000 años de antigüedad. La concentración de metano en la atmósfera está en aumento aunque a una velocidad menor que la observada en décadas pasadas.

Oxido Nitroso

Es un gas de efecto invernadero muy importante debido a su largo tiempo de permanencia en la atmósfera y su gran forzamiento radiativo, casi 200 veces el de CO₂ en base a una molécula. Su concentración continua en crecimiento aunque parece detenerse. Esta disminución se asocia tentativamente con el enfriamiento por los aerosoles emitidos por el Monte Pinatubo.

2 Laboratorio de Monitoreo Climático y Diagnóstico de la Administración Nacional de la Atmósfera y del Océano, EEUU.

Halocarbonos

Los clorocarbonos y los bromocarbonos absorben fuertemente la radiación infrarroja (calentamiento directo) y destruyen ozono en la estratosfera baja (enfriamiento indirecto). La disminución de las concentraciones de los clorofluorocarbonos, especialmente CFC-11 y CFC-12, es consistente con lo señalado en el Protocolo de Montreal.

Las especies perfluoradas antropogénicas CF_4 , CF_3CF_3 y SF_6 tienen tiempos de permanencia en la atmósfera muy largos y altos valores de potencial de calentamiento global. El tetrafluorometano y el hexafluoroetano son subproductos eliminados al ambiente durante la producción de aluminio, y el hexafluoruro de azufre es usado como fluido dieléctrico en equipos eléctricos pesados. Las pequeñas emisiones de estas especies se acumulan y conducen a concentraciones atmosféricas radiativamente significativas.

Ozono troposférico

El ozono se produce en la troposfera durante la oxidación de metano y a partir de varios gases precursores de corta vida. Se transporta desde la estratosfera hacia la troposfera. Los cambios en su concentración son variables espacialmente, tanto en forma regional como vertical, haciendo difícil la evaluación de las tendencias globales a largo tiempo. Existe evidencia de que el ozono troposférico se ha incrementado en el Hemisferio Norte (al norte de $20^\circ N$) durante las últimas tres décadas. Las mediciones disponibles han sido efectuadas principalmente en países industrializados, de manera que la cobertura geográfica es marcadamente regional. Los cambios en este gas de efecto invernadero tienen consecuencias potencialmente importantes para el forzamiento radiativo.

Escenarios de emisión

Los científicos requieren pruebas estadísticamente convincentes para afirmar que el cambio climático es por causas netamente antropogénicas. A la fecha, los registros instrumentales y paleoclimáticos no proporcionan suficiente información que permita una aseveración en este sentido, y los modelos están en una etapa de desarrollo tal que no

es posible manejar todavía todas las variables para cualquier escala geográfica y, menos aún, predecir el comportamiento del clima ante posibles alteraciones naturales de gran magnitud.

Para poder analizar este problema ante comportamientos variados que suponen compromisos adoptados por todos los gobiernos, el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) definió escenarios de emisión que representan futuros posibles muy diferentes. Los cinco escenarios de emisión definidos en 1989 fueron:

1. de emisiones altas para el año 2030,
2. de emisiones bajas para el año 2060,
3. de políticas de control,
4. de políticas aceleradas de control, y
5. de políticas alternativas aceleradas,

que luego se convirtieron en seis denominadas de la siguiente forma³: IS92a, IS92b, IS92c, IS92d, IS92e, IS92f.

La construcción de estos escenarios se efectuó mediante un proceso de:

1. identificación y estimación de las fuentes de emisión naturales y antropogénicas,
2. identificación de los factores claves que probablemente influyen en las emisiones futuras a partir de estas fuentes,
3. elaboración de hipótesis sobre cómo pueden cambiar estos factores en el futuro, y
4. estimación del impacto de estos cambios en conjunto sobre las emisiones.

Se utilizó dos modelos alternativos para la construcción de estos escenarios:

1. Marco de estabilización atmosférica ASF⁴ de la U.S. EPA⁵, y

3 IPCC Scenarios 1992.

4 Sistema de Estabilización Atmosférica.

5 Agencia de Protección Ambiental, EEUU.

2. Modelo integrado para la evaluación del efecto invernadero IMAGE del RIVM⁶.

Los modelos permiten comprender cómo los distintos factores económicos y físicos influyen sobre las emisiones de los gases de efecto invernadero. Asimismo, son un medio para aplicar distintas estimaciones sobre cómo estos factores pueden cambiar y calcular el efecto que tales cambios producirán sobre las emisiones futuras.

Para definir los escenarios, los expertos emplearon el concepto de concentración equivalente de CO₂. Ésta es definida como la concentración de CO₂ que por si misma daría lugar al incremento en el forzamiento radiativo producido por todos los gases de efecto invernadero. Se deduce estimando, en primer lugar, el incremento del forzamiento radiativo directo de todos los gases de efecto invernadero con respecto a los niveles preindustriales y, luego, se calcula la concentración de CO₂ que produciría el mismo incremento suponiendo que las concentraciones atmosféricas de los demás gases de efecto invernadero se mantienen en los niveles preindustriales.

Las hipótesis empleadas para la construcción de los escenarios consideran cambios en:

1. la estimación de la población; los datos provienen del Banco Mundial (1991) o de Naciones Unidas,
2. el crecimiento económico en base a las estimaciones del PNB⁷ empleando los datos del Banco Mundial,
3. el suministro de energía considerando las variaciones en las fuentes energéticas (combustibles fósiles, gas natural, energía solar, energía nuclear, biomasa),
4. la demanda de energía considerando una eficiencia moderada o alta del proceso generador de energía,
5. la tecnología de control de las emisiones; si se ejerce poco o riguroso control sobre las fuentes móviles y fijas que eliminan NO_x y CO,

6 Instituto Nacional para la Protección de la Salud Pública y el Medio Ambiente, Holanda.

7 Producto Nacional Bruto.

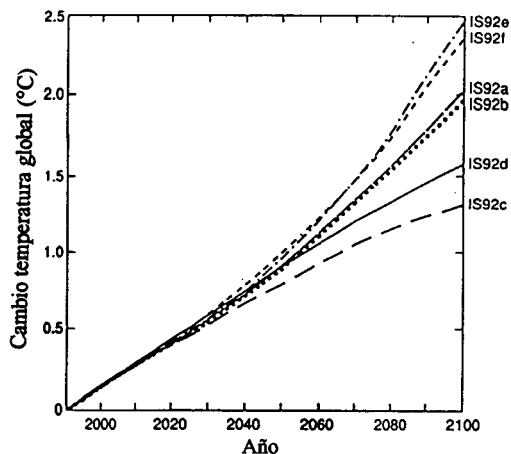


Figura 3. Cambios proyectados en la temperatura global media para los escenarios de emisión IS92

El principal efecto potencial del cambio climático es el calentamiento global del planeta a consecuencia de la intensificación del efecto invernadero. En los últimos cien años, la temperatura media ha aumentado entre 0,3 y 0,7°C. Una parte importante de este calentamiento se atribuye al aumento de las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero. Según los modelos matemáticos, se ha predicho que el aumento será más significativo en las zonas de mayor latitud del planeta. Si el contraste entre las temperaturas de los polos y del ecuador es menor, esto repercutirá en una menor conversión de energía potencial y provocará una variación del sistema global de circulación de las masas de aire. Habría transformaciones en los climas regionales y locales; las zonas situadas en latitudes medias y bajas tendrían climas más húmedos que los actuales. En cambio, el norte de Europa y la mayoría de las zonas centrales de Norteamérica y de la antigua Unión Soviética tendrían climas más secos y cálidos.

Durante el siglo XX, el nivel global de los océanos ha subido un promedio de 12±5 cm. Con el calentamiento global, habría un ascenso

112 Tabla 2. Resumen de hipótesis para los escenarios de emisión IS92

Esc.	Año	Población, miles de millones ⁹	Crecimiento económico, %	Energía					Control de gases ¹⁰	CFCs	
				Combustible convencional, miles de EJ	Gas natural, miles de EJ	Energía solar ¹¹	Biocombustibles, EJ y US\$/barril	Energía nuclear ¹²		Adhesión al Protocolo de Montreal ¹³	Otros ¹⁴
IS92a	1900-2025	11,3	2,9	12	13	↓	191		+	p	x (2075)
	1990-2100		2,3			0,075					
IS92b	1900-2025	11,3	2,9	12	13	↓	191		+, CO ₂	g	
	1990-2100		2,3			0,075					
IS92c	1900-2025	6,4	2,0	8	7,3			↓	+	p	x (2075)
	1990-2100		1,2								
IS92d	1900-2025	6,4	2,7	8	7,3		272		+, CO ₂		x (1997)
	1990-2100		2,0								
IS92e	1900-2025	11,3	3,5	18,4	13			x (2075)	control de emisiones		x (1997)
	1990-2100		3,0								
IS92f	1900-2025	17,6	2,9	18,4	13	↓		↑	+	p	x (2075)
	1990-2100		2,3			0,083					

8 Estimada al año 2100. Fuentes: Banco Mundial y Naciones Unidas.

9 SO_x, NO_x y NMVOC (compuestos orgánicos volátiles no metánicos); + : control de gases

10 ↓ : baja el costo; US\$ por kWh

11 ↓ : declinación del costo; ↑ : incremento del costo; x : discontinuación gradual (año)

12 p : parcial; g : global

13 x : discontinuación gradual (año)

14 Se detiene la deforestación; captura y uso de emisiones provenientes de minas de carbón y producción de gas.

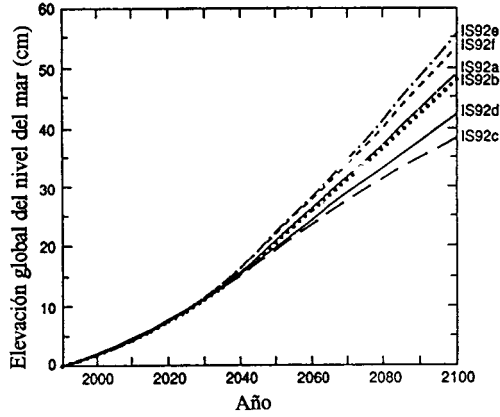


Figura 4. Cambios proyectados en la elevación del nivel del mar para los escenarios de emisión IS92

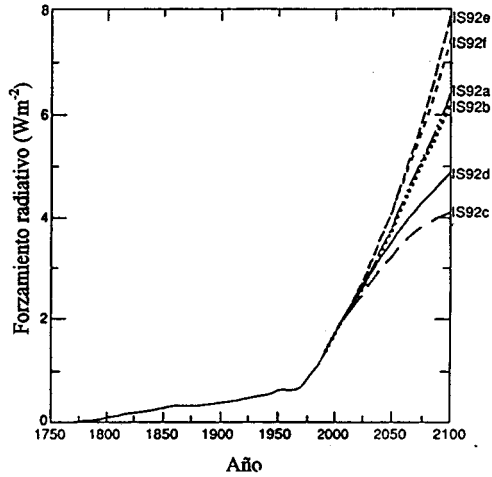


Figura 5. Cambios proyectados en el forzamiento radiativo total global y promedio anual para los escenarios de emisión IS92

Tabla 3. Resultados esperados para los escenarios de emisión IS92

Esc.	Año	TPER ¹⁵	Deforestación tropical ¹⁶	T superficial media global °C	Elevación del mar, cm	Sensibilidad climática	Emisiones por año					
							Año	CO ₂ GtC	CH ₄ Tg	N ₂ O TgN	CFC ¹⁷ kt	SO _x TgS
IS92a	1990-2025	-0,8	678	+2,0	+50	mejor	1990	7,4	506	12,9	827	98
	1990-2100	-1,0	1447				2025	12,2	659	15,8	217	141
							2100	20,3	917	17,0	3	169
IS92b	1990-2025	-0,9	678	+1,0	+15	baja	2025	11,8	659	15,7	36	140
	1990-2100	-1,0	1447				2100	19,1	917	16,9	0	164
							2025	8,8	589	15,0	217	115
IS92c	1990-2025	-0,6	675	+1,0	+15	baja	2100	4,6	546	13,7	3	77
	1990-2100	-0,7	1343				2025	9,3	584	15,1	24	104
							2100	10,3	567	14,5	0	87
IS92d	1990-2025	-0,8	420	+3,5	+95	alta	2025	15,1	692	16,3	24	163
	1990-2100	-0,8	651				2100	35,8	1072	19,1	0	254
							1990-2025	-0,8	725	2025	14,4	697
IS92e	1990-2025	-1,0	678	+3,5	+95	alta	2025	15,1	692	16,3	24	163
	1990-2100	-1,1	1447				2100	35,8	1072	19,1	0	254
							1990-2025	-0,8	725	2025	14,4	697
IS92f	1990-2025	-0,8	725	+3,5	+95	alta	2025	14,4	697	16,2	217	151
	1990-2100	-1,0	1686				2100	26,6	1168	19,0	3	204

15 Declinación porcentual del requerimiento de energía primaria total, cambio anual promedio

16 Total de bosque clareado, en millones de hectáreas

17 Incluye CFC-11, CFC-12, CFC-113, CFC-114 y CFC-115

en el nivel del mar debido a la expansión térmica del agua oceánica. La perspectiva de la hipótesis de un ascenso en el nivel del mar representa amenazas para algunas zonas costeras, especialmente ciertas islas y deltas, tales como desaparición, inundación y consecuente desplazamiento y reinstalación de los habitantes de las zonas bajas costeras.

El calentamiento global que puede producir la intensificación del efecto invernadero puede ser perjudicial para los cultivos. También podría ocurrir grandes reducciones de los bosques boreales localizados en altas latitudes, que es donde se prevé que será más intenso el efecto invernadero. Asimismo, habría cambios en el volumen y las características de las lluvias y las tormentas, en las condiciones de los suelos, en los modelos de vegetación y en la distribución de plagas y patógenos.

En todos los casos estudiados, el escenario más severo es IS92e (de emisiones altas) y el más benigno es IS92c (de emisiones bajas). Es decir, la situación menos desfavorable ocurre cuando la población mundial alcanza 11300 millones en el año 2100, el crecimiento económico entre 1990 y 2100 es de 3,0%, se ha eliminado progresivamente la energía nuclear y el abastecimiento energético es de 12000 EJ de combustible convencional y 13000 EJ de gas natural. En síntesis, los cambios en la temperatura media global del aire superficial y en la elevación del nivel del mar son menores para el escenario IS92c, y las estimaciones son todavía dependientes de la eficacia de los modelos utilizados, del avance en el conocimiento sobre los aerosoles y del volumen de información recopilada.

BIBLIOGRAFIA

1. Ludevid, M. 1997. **El cambio global en el medio ambiente**. Marcombo Boixareu Editores, Barcelona
2. Houghton, J. T., Callander, B. A. and S. K. Varney. 1992. *Climatic Change* 1992. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Intergovernmental Panel on Climate Change. WMO, UNEP.
3. Houghton, J. T., Meira Filho, L. G., Harris, N., Kattenberg, A. and K. Maskell. 1996. *Climatic Change* 1995. The Science of Climatic Change. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.