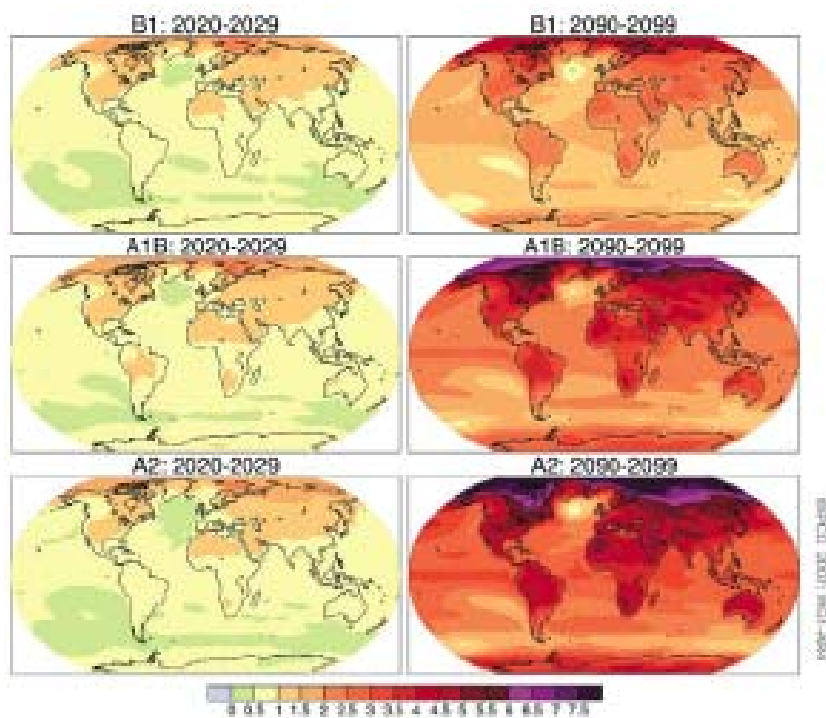


El Cambio Climático



Tecnología del medio ambiente

Olaia Fernández Vila
Eduardo Isanta Monclús
Ivan Zarco Álvarez
Carles Cruz Morató

Índice:

1. Introducción	2
2. Evidencias del cambio climático	3
2.1. Temperatura	3
2.2. Precipitaciones y humedad	3
2.3. Extensión de nieve y hielo	4
2.4. Nivel del mar	4
2.5. Variaciones en episodios meteorológicos y en sus episodios más extremos	5
3. Causas del cambio climático	6
3.1. El efecto invernadero	6
3.1.1. El efecto invernadero como fenómeno natural	6
3.1.2. Gases de efecto invernadero	7
3.1.3. Cambios en los gases de efecto invernadero	8
- Dióxido de carbono	9
- Metano	10
- Óxido nítrico	10
- Halocarbonos y compuestos relacionados	10
- Ozono atmosférico	11
3.2. Otros factores que influyen en el cambio climático	11
3.2.1. Aerosoles	11
3.2.2. Rayos cósmicos (Nueva teoría)	11
3.3. Visión conjunta de los agentes del cambio climático	12
4. Consecuencias del cambio climático	13
4.1. Modelos climáticos	13
4.2. Predicciones	13
5. Medidas tomadas y posibles soluciones	16
5.1. Evolución de la conciencia ecológica	16
5.2. Soluciones propuestas y medidas que tomar	17
6. Conclusiones	22
7. Bibliografía	23

1. INTRODUCCIÓN

Desde que se originó la Tierra hace millones de años, el clima del planeta ha estado en constante evolución. Glaciaciones, sequías, calentamientos...se han sucedido sin otra intervención que la de la propia naturaleza. Sin embargo, en las últimas décadas se han empezado a encontrar evidencias de que la etapa de cambio climático que estamos viviendo puede no tener sólo causas naturales. El ser humano, a diferencia del resto de seres vivos, no convive en equilibrio con su entorno, si no que lo cambia a su antojo afectando en el proceso a lo demás habitantes del planeta. Ha llegado el momento de preguntarnos hasta que punto podemos permitirnos introducir cambios en un equilibrio tan delicado sin saber claramente cuales pueden ser las consecuencias. Estas páginas tratarán de mostrar si el llamado cambio climático es una realidad o tan sólo una exageración alimentada por los medios de comunicación y asociaciones ecologistas.

2. EVIDENCIAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

¿Está cambiando el clima de la Tierra? Inequívocamente, la respuesta es “Sí”. Una serie de observaciones respalda esta conclusión y además son la base sobre la cual puede elaborarse la respuesta a la pregunta más difícil: “¿Por qué está cambiando?”, que se trata en secciones posteriores. (Datos de este apartado obtenidos del Tercer informe de evaluación sobre el cambio climático, IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change))

2.1. Temperatura

La temperatura media mundial de la superficie (es decir, el promedio de la temperatura del aire cerca de la superficie de la tierra y de la temperatura de la superficie del mar) ha subido desde 1861. Durante el siglo XX, el aumento ha sido de $0,6 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$. La mayor parte del calentamiento se produjo en el siglo XX y tuvo lugar en dos períodos: de 1910 a 1945 y de 1976 a 2000.

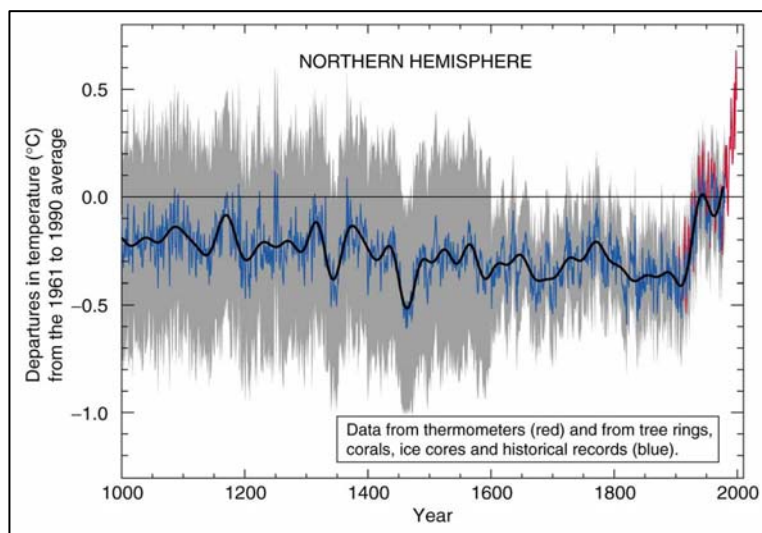


Figura 2.1: Evolución de la temperatura del hemisferio norte durante el último milenio. El área envolvente gris corresponde al intervalo de confianza del 95% de los datos. (“Cambio climático 2001”, IPCC)

Mundialmente, es muy probable que los años noventa hayan sido el decenio más cálido, siendo 1998 el año más cálido en el registro instrumental desde 1861.

El aumento de temperatura es más relevante en las temperaturas mínimas que en las máximas, ya que mientras las primeras se han incrementado un promedio de $0,2^{\circ}\text{C}$, las últimas lo han hecho en $0,1^{\circ}\text{C}$. Esto ha alargado la estación sin heladas en muchas regiones de latitudes medias y altas.

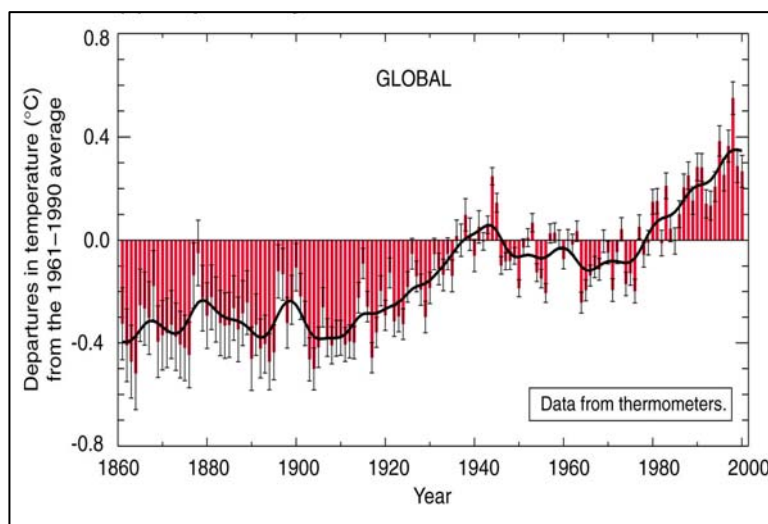


Figura 2.2: Evolución de la temperatura media mundial desde 1860 (“Cambio climático 2001”, IPCC).

2.2. Precipitaciones y humedad

Las precipitaciones han aumentado entre 0,5-1 % por decenio en muchas zonas de las latitudes altas y medias del hemisferio norte, mientras que en los trópicos ha disminuido un 0,3% por decenio. Estos cambios están directamente relacionados con los cambios en la

nubosidad de la zona. No se puede afirmar que suceda lo mismo en el hemisferio sur que en el norte.

Los estudios de precipitación y humedad son recientes y no se dispone de un abanico suficiente de datos con los que poder comparar y modelizar.

2.3. Extensión de nieve y hielo.

La reducción de la extensión de hielo y nieve terrestre está directamente relacionada con el aumento de temperaturas en la superficie terrestre.

El retroceso de la mayoría de los glaciares alpinos y continentales desde el siglo XIX es

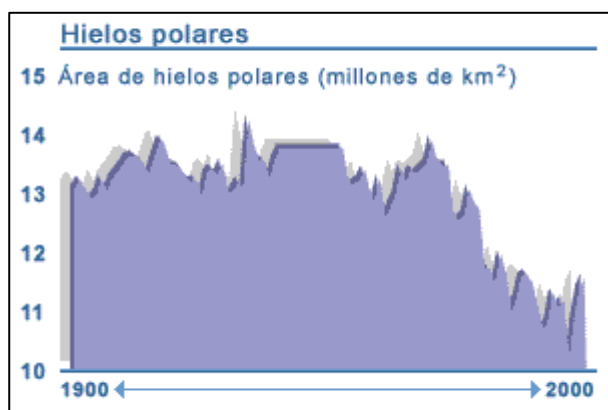


Figura 2.4: Representación de la superficie de hielo polar desde 1900. (Centro Hadley, oficina meteorológica)

un hecho evidente, y los datos satelitales muestran, desde finales de los 60, una probable reducción del 10% de la extensión de nieve. Por el contrario, en algunas zonas marinas en las que ha habido más precipitaciones que de costumbre, los glaciares han incluso aumentado.

El hielo marino del ártico está disminuyendo, pero no es tan evidente que lo haga también el antártico. De hecho, desde los 70 puede que haya aumentado ligeramente.

Así pues, en general, la extensión de nieve y hielo de la Tierra está disminuyendo, aunque hay algunas excepciones significativas.

2.4. Nivel del mar

El nivel del mar puede cambiar de muchas formas. Fijándonos en el horizonte temporal, el nivel puede verse afectado en cuestión de horas (mareas), decenios y siglos (efectos climáticos) o en millones de años (cambios tectónicos y de sedimentación). En la escala temporal a estudiar, la del cambio climático, los factores que pueden afectar al nivel son la expansión térmica y la variación de masa oceánica.

La expansión térmica es el aumento de volumen del agua al aumentar su temperatura. La variación de masa oceánica correspondería a la acumulación, tanto positiva como negativa, de agua en forma de hielo en los casquetes polares, o en tierra, ya sea en forma de hielo o líquido. Ambos factores son importantes, aunque el primero es el de mayor importancia.

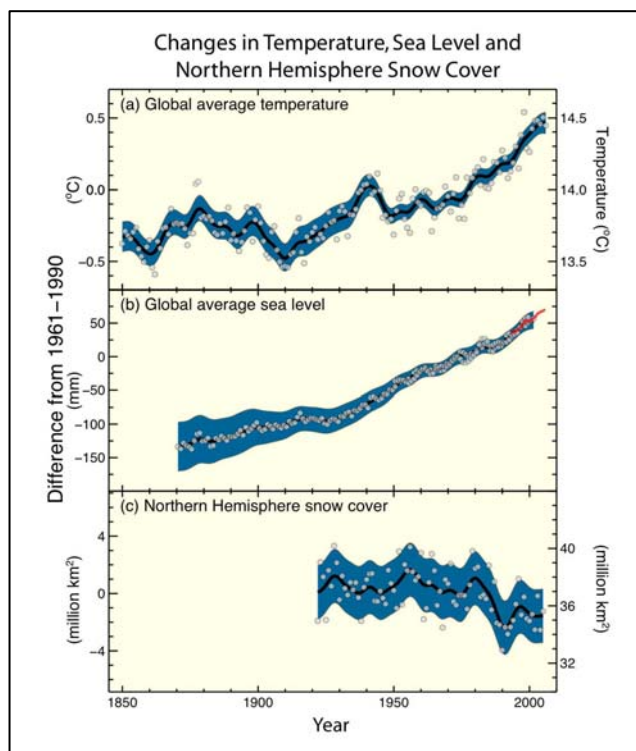


Figura 2.5: Evolución de la temperatura, el nivel del mar y la superficie de nieve del hemisferio norte durante los últimos 150 años. ("Climate Change 2007. Summary for policymakers", IPCC)

Actualmente, el nivel del mar está aumentando, debido al aumento de la temperatura global, que hace expandir el agua y funde las masas de hielo. El ritmo de aumento durante el siglo XX ha sido de 1,0-2,0 mm/año, y se sabe que ha sido mayor que en el siglo XIX.

2.5. Variaciones en episodios meteorológicos y en sus episodios más extremos

Los análisis muestran que en las zonas en que la precipitación media ha aumentado, los episodios de precipitación muy fuerte también lo han hecho, y en muchas zonas donde no ha habido aumento de la precipitación, ésta aparece con menos frecuencia pero en episodios de más intensidad.

Desde los años 70, se han observado irregularidades en los ciclos del fenómeno conocido como el Niño. Estas irregularidades, ligadas a un aumento de temperatura, consisten en una intensificación de sus efectos durante la fase cálida del mismo.

No se puede decir lo mismo de las tormentas tropicales del atlántico. Aunque en estos últimos años su frecuencia e intensidad ha sido mayor que en años anteriores, no se dispone de suficientes datos como para poder afirmar que esta tendencia no corresponda a un ciclo natural.

3. CAUSAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Se define como clima al conjunto de condiciones atmosféricas que caracterizan una región (RAE), por tanto, se puede hablar de cambio climático cuando en una región se producen condiciones atmosféricas atípicas en ella. El cambio climático se evidencia cuando existen fluctuaciones a largo plazo de la temperatura, las precipitaciones, los vientos y todas los demás componentes del clima regional, aunque comúnmente se habla de cambio climático cuando estas fluctuaciones se producen a nivel mundial.

Las perturbaciones que pueden provocar un cambio climático son muchas y de actividad muy variada, pero se pueden agrupar en 4 bloques, de los cuales los dos primeros son de origen natural y los dos segundos son principalmente de origen antropogénico. Estos bloques son la actividad solar, las erupciones volcánicas, los cambios en la concentración atmosférica y los cambios en el albedo. Todas ellas tienen en común que modifican la energía involucrada en el sistema-Tierra.

Los cambios en la actividad solar se deben a que el Sol tiene un ciclo de actividad de 11 años, durante los cuales su actividad es variable. Es posible que cambios climáticos anteriores fueran ocasionados por cambios bruscos en la actividad solar.

La causa de que las erupciones volcánicas, de carácter aleatorio, puedan ser responsables de un cambio climático, es debido a que emiten gran cantidad de partículas a la atmósfera que impiden que llegue a la superficie toda la radiación que incide sobre la Tierra. El efecto de una erupción dura, como mucho, unos pocos años.

Respecto a los cambios de la composición de la atmósfera, estos pueden ser de muchos tipos, y su alcance puede ser global o local. Puede cambiar la composición de los gases invernadero que se consideran "bien mezclados" (CO_2 , N_2O , CH_4 , HCFC) y que por tanto, afectan de manera global, o puede cambiar la concentración de aerosoles, que suele ser de carácter local.

Y, finalmente, los cambios en el albedo se producen, típicamente, al deforestar una zona, y lo que se cambia la capacidad de reflejar energía del suelo. Su efecto es de carácter local.

3.1.El efecto invernadero

3.1.1. El efecto invernadero como fenómeno natural

Se entiende por efecto invernadero el fenómeno por el cual determinados gases que componen una atmósfera planetaria retienen parte de la energía que el suelo emite por haber sido calentado por la radiación solar. En el caso del planeta Tierra, hace mantener la temperatura media en unos 15°C . Si no existiera atmósfera, no habría efecto invernadero y la temperatura media sería de unos -18°C . Por tanto el efecto invernadero permite mantener una temperatura adecuada para la vida en la Tierra.

En la Tierra, la energía media que proviene del sol es de $342 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Esta energía llega en forma de radiación con longitudes de onda comprendidas entre 200 y 4000 nm, que corresponde al rango de luz ultravioleta, visible e infrarroja. El elevado valor de

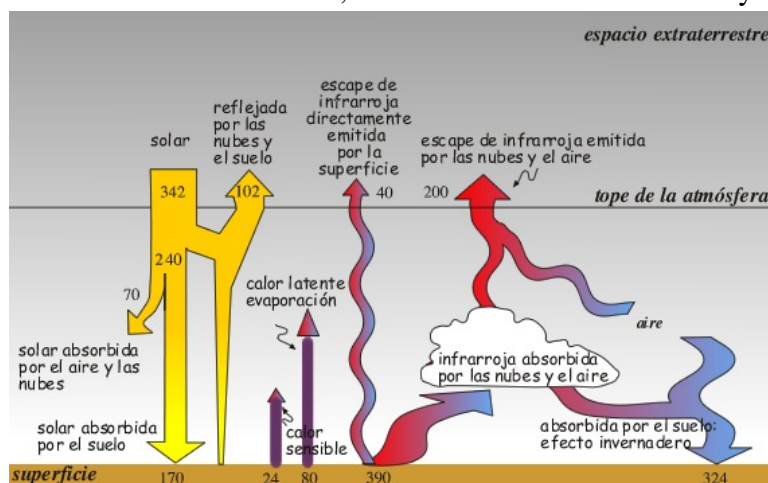


Figura 3.1: Representación del balance energético mundial expresado en ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)

estas frecuencias permite a esta radiación atravesar fácilmente la atmósfera terrestre.

La energía que llega a la Tierra es absorbida principalmente por el suelo y el mar ($170 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$), aunque también hay una parte absorbida por las nubes y el aire ($70 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$). La Tierra tiene una cierta capacidad de reflejar la energía que proviene del sol, lo que se denomina como albedo. De esta energía reflejada, solo una pequeña parte va a parar al espacio, ya que la mayoría es absorbida por los gases de efecto invernadero (nubes y aire). Esta absorción es posible debido a que la radiación devuelta por la Tierra es infrarroja, es decir, de longitudes de onda más altas que la emitida directamente por el Sol, que es a la que son capaces de absorber radiación. De toda la energía absorbida por estos gases una parte se emite hacia el espacio y otra vuelve a la superficie de la Tierra, cerrando así un ciclo que corresponde al efecto invernadero.

Bajo un cielo claro, alrededor del 60 al 70% del efecto invernadero es producido por el vapor de agua. Después de éste son también importantes, por este orden, el dióxido de carbono, el metano, ozono y óxidos de nitrógeno. No se citan los gases originados por la actividad humana que no afectan, lógicamente, al efecto invernadero que hemos llamado natural.

Esta retención de la energía hace que la temperatura sea más alta, aunque hay que entender bien que, al final, en condiciones normales, es igual la cantidad de energía que llega a la Tierra que la que esta emite. Si no fuera así, la temperatura de nuestro planeta habría ido aumentando continuamente, cosa que, por fortuna, no sucede, ya que esto conduce a una emisión mayor de la captación. Digamos que el sistema se autoequilibra en función de la concentración de los gases invernadero presentes.

Bajo un cielo claro, alrededor del 60 al 70% del efecto invernadero es producido por el vapor de agua. Después de éste son también importantes, por este orden, el dióxido de carbono, el metano, ozono y óxidos de nitrógeno. No se citan los gases originados por la actividad humana que no afectan, lógicamente, al efecto invernadero que hemos llamado natural.

3.1.2. Gases de efecto invernadero

Los gases responsables del efecto invernadero natural, o gases invernadero, son: vapor de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxidos de nitrógeno (NO_x), ozono (O_3).

En nuestro planeta, continuamente se forman gases invernadero de forma natural. Estos gases pueden formarse en mayor o menor proporción según la fuerza del efecto causante de éstos:

- El **dióxido de carbono** se origina, llegando así a la atmósfera, por actividades volcánicas, al disolver calizas y por la respiración y descomposición de seres vivos.
- El **metano** puede provenir de pantanos, termitas, herbívoros...
- Los microorganismos y el agua son los principales causantes de la formación de **óxido nítrico**.
- El **vapor de agua** se forma por evaporación de la misma.
- El **ozono** es una forma alotrópica del oxígeno que se forma en interacción con la luz ultravioleta.

Los gases invernadero pueden actuar con mayor o menor efecto, según su concentración y su capacidad de absorción de energía, aunque sin duda alguna, el vapor de agua es el más poderoso en lo que se refiere al efecto invernadero natural.

3.1.3. Cambios en Gases de efecto invernadero:

Desde la invención de la máquina de vapor, y más intensamente desde la Revolución Industrial, se inició la emisión a la atmósfera de gran cantidad de gases invernadero, donde se llevan acumulando desde entonces. Esta acumulación, es uno de los agentes más importantes de cambio climático, ya que el aumento de la concentración de gases de efecto invernadero incrementa el efecto de este.

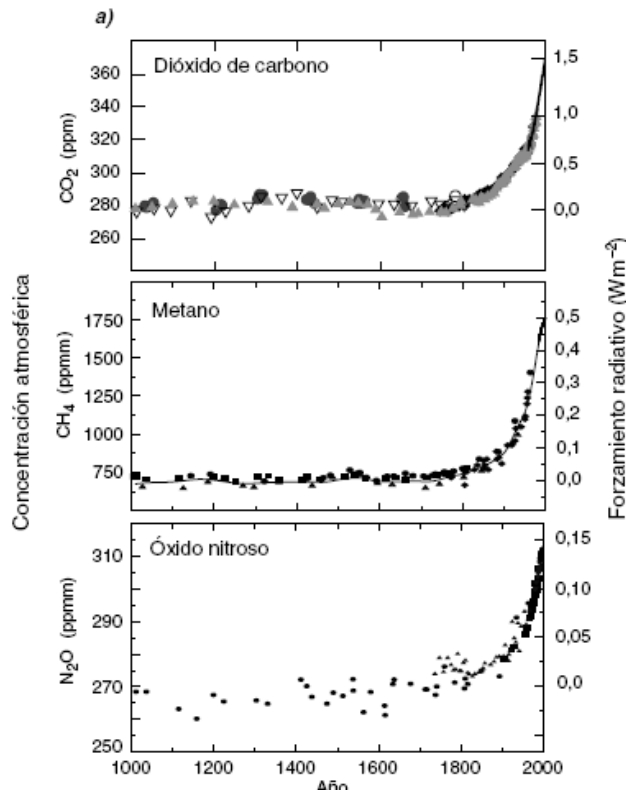


Figura 3.2: Concentración atmosférica de CO₂, CH₄ y N₂O de los últimos 1000 años. Los datos no disponibles de medidas directas se han obtenido del hielo. La escala de la derecha indica el forzamiento radiativo estimado (IPCC)

Los gases que se emiten en mayor cantidad son el CO₂, el CH₄ y el N₂O, y de ellos el CO₂ es que tiene un mayor efecto sobre el incremento del efecto invernadero, no tanto por su poder calorífico sino por su mayor concentración.

Para poder comparar el efecto de los diferentes agentes de cambio climáticos se usa la magnitud llamada forzamiento radiativo.

Se define el forzamiento radiativo ($W \cdot m^{-2}$) como un cambio en la energía disponible para el sistema Tierra-atmósfera mundial debido a los cambios en los agentes de forzamiento del sistema climático. Si un agente tiene un forzamiento radiativo de $1 W \cdot m^{-2}$, su efecto es el equivalente a aumentar en $1 W \cdot m^{-2}$ la radiación que llega a la Tierra.

De los gases invernadero, el que tiene mayor forzamiento es el CO₂.

El vapor de agua, no se considera agente de forzamiento climático, a pesar de que sus emisiones también hayan aumentado, ya que al llegar a su saturación atmosférica precipita.

Otros gases, como los HCFC's y los compuestos de azufre también influyen, aunque en menor medida, en el efecto invernadero.

	CO ₂ (Dióxido de carbono)	CH ₄ (Metano)	N ₂ O (Óxido nitroso)	CFC-11 (Clorofluoro-carbono-11)	HFC-23 (Hidrofluoro-carbono-23)	CF ₄ (Perfluoro-metano)
Concentración preindustrial	unas 280 ppm	unas 700 ppmm	unas 270 ppmm	cero	cero	40 ppb
Concentración en 1998	365 ppm	1 745 ppmm	314 ppmm	268 ppb	14 ppb	80 ppb
Ritmo del cambio de concentración ^b	1,5 ppm/año ^a	7,0 ppmm/año ^a	0,8 ppmm/año	-1,4 ppb/año	0,55 ppb/año	1 ppb/año
Tiempo de vida en la atmósfera	5 a 200 años ^c	12 años ^d	114 años ^d	45 años	260 años	>50 000 años

a El ritmo ha fluctuado entre 0,9 ppm/año y 2,8 ppm/año para el CO₂ y entre 0 y 13 ppmm/año para el CH₄ en el período 1990–1999.

b El ritmo se calcula para el período 1990–1999.

c No puede definirse un solo período de vida para el CO₂, dados los diferentes índices de absorción por diferentes procesos de eliminación

d Este período de vida ha sido definido como un “tiempo de ajuste” que tiene en cuenta el efecto indirecto del gas en su propio tiempo de residencia.

Figura 3.3: Forzamientos radiativos (Wm^{-2}) medios anuales mundiales debidos a varios agentes en el periodo desde la era preindustrial (1750) hasta el presente (finales de los años 90)

A continuación se presentan algunos de los gases de efecto invernadero más importantes, incluyendo su concentración en 1998, su modificación en los años noventa y sus períodos de vida en la atmósfera.

Dióxido de carbono

El más importante de los gases invernadero es el dióxido de carbono. La concentración de este compuesto en la atmósfera ha aumentado desde 280 ppm en 1750 hasta 379 ppm en 2005 (IPCC, 2007). Este aumento se debe predominantemente a la oxidación de carbono orgánico por la quema de combustibles de origen fósil. La deforestación ha causado además que su absorción biológica haya disminuido. Las emisiones de gas carbónico representan el 50% del efecto invernadero derivado de la actividad humana.

Un dato significativo es que no todo el CO₂ emitido acaba en la atmósfera, sino que casi un 40% es absorbido por el océano. Sin esta absorción, la concentración atmosférica actual de CO₂ sería mucho más elevada.

En la Figura 2.4 se presenta un balance mundial del CO₂ para los años ochenta y noventa. En la realización de estos balances se emplearon mediciones de la reducción del oxígeno y del aumento del CO₂ en la atmósfera.

	SIE ^{a,b}	Este informe ^a	
	1980 a 1989	1980 a 1989	1990 a 1999
Aumento en la atmósfera	3,3 ± 0,1	3,3 ± 0,1	3,2 ± 0,1
Emisiones (combustible de origen fósil, cemento) ^c	5,5 ± 0,3	5,4 ± 0,3	6,3 ± 0,4
Flujo océano–atmósfera	-2,0 ± 0,5	-1,9 ± 0,6	-1,7 ± 0,5
Flujo tierra–atmósfera ^d	-0,2 ± 0,6	-0,2 ± 0,7	-1,4 ± 0,7

Figura 3.4: Balances mundiales de CO₂ (en PgC/año). Los valores positivos son flujos hacia la atmósfera y valores negativos representan absorción de la atmósfera.

La biosfera terrestre ha ganado carbono durante los años ochenta y noventa, es decir, el CO₂ liberado por los cambios en el uso de la tierra fue más que compensado por otras zonas de absorción terrestre, probablemente situadas tanto en el hemisferio norte como en los trópicos. Del Hemisferio Norte, es significativo el aumento de masa forestal en al perderse parte de la tundra por el aumento de la temperatura y la fusión del permafrost. No obstante, sigue habiendo grandes incertidumbres relacionadas con el cálculo de CO₂ liberado debido a los cambios en el uso de la tierra, como también en la magnitud de la absorción terrestre residual.

Metano

El metano es un gas de efecto invernadero que puede proceder de fuentes naturales (los humedales) o debidas a la actividad humana (agricultura, donde arrozales principalmente, granjas masivas de ganado, actividades de gas natural y vertederos). Poco más de la mitad de las emisiones actuales de CH_4 son antropogénicas.

La abundancia del metano en la atmósfera ha aumentando desde unas 1.610 ppmm en 1983 a 1.745 ppmm en 1998, pero el incremento anual observado ha disminuido durante este período.

El forzamiento radiativo directo actual del CH_4 representa un 20% del total de todos los gases de efecto invernadero “muy persistente y mundialmente bien mezclados”.

Óxido nítrico

De menor importancia que los anteriores pero igualmente significativo es el efecto del óxido nítrico. Como los anteriores, el óxido nítrico en la atmósfera ha aumentado constantemente durante la Era Industrial siendo un 16% mayor que en 1750.

Proviene principalmente de las chimeneas de las centrales energéticas que utilizan carbón, de los tubos de escape de los automóviles, y de la acción de los fertilizantes nitrogenados que se utilizan en agricultura. El óxido nítrico también se libera por la degradación de fertilizantes nitrogenados y estiércol del ganado.

Aunque su concentración en la atmósfera es escasa, una molécula de N_2O tiene un poder de calentamiento global 230 veces superior a la del CO_2 , con un tiempo de permanencia en la atmósfera de 150 años, lo que causa que el forzamiento radiativo sea el 6% del total de todos los gases de efecto invernadero “muy persistentes y mezclados mundialmente”.

Halocarbonos y compuestos relacionados

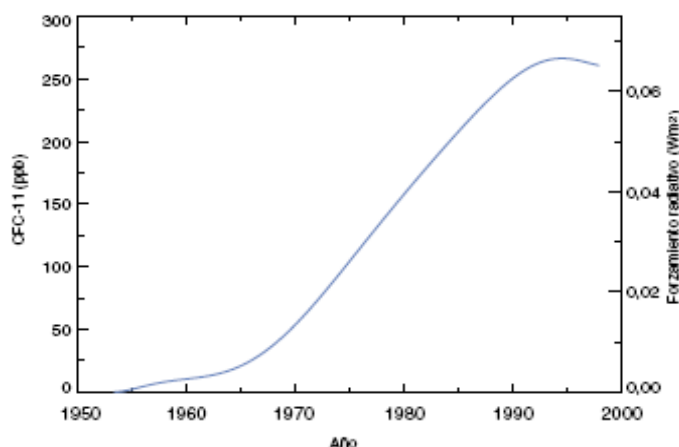


Figura 3.5: Concentración de CFC-11 en la troposfera desde 1950 hasta 1998. Su evolución se puede extrapolar a otros CFC's

Otros agentes del forzamiento del cambio climático son los gases halocarbonados, los cuales además de ser gases de efecto invernadero son destructoras de la capa de ozono. Los halocarbonos son compuestos de carbono que contienen flúor, cloro, bromo o yodo y muchos de estos tienen como única fuente las actividades humanas. Estos compuestos están disminuyendo gracias a la reducción de emisiones en virtud de la reglamentación del Protocolo de Montreal y sus enmiendas.

Aunque su concentración atmosférica es pequeña, su poder de causar efecto invernadero es muy grande (de 3500 a 7200 veces la del CO_2) con lo que aportan el 14% del forzamiento radiativo de todos los gases de efecto invernadero.

Ozono atmosférico (O₃)

El ozono es un gas importante de efecto invernadero, presente en la estratosfera y en la troposfera. No es un elemento emitido directamente, sino que se forma en la atmósfera a partir de procesos fotoquímicos en que intervienen especies precursoras, tanto naturales como influidas por el ser humano. Una vez formado, el tiempo de residencia del ozono en la atmósfera es relativamente breve, variando de semanas a meses. Como resultado, la estimación de la función radiativa del ozono es más compleja y mucho menos segura que para los gases de efecto invernadero muy resistentes y bien mezclados en todo el mundo citados anteriormente. El ozono troposférico ha aumentado en un 35% desde la era preindustrial, aunque algunas regiones experimentan más aumentos que otras.

3.2. Otros factores que influyen en el cambio climático

3.2.1. Aerosoles

Los aerosoles, diminutas partículas y gotas en suspensión en el aire, influyen significativamente sobre el balance radiativo de la tierra/atmósfera. El efecto de los aerosoles se produce de dos formas diferentes. El efecto directo, por el cual los propios aerosoles dispersan y absorben radiación infrarroja solar y térmica, y el efecto indirecto, por el cual los aerosoles modifican las propiedades microfísicas y por lo tanto las radiativas y la nubosidad. Estos compuestos se pueden producir de forma natural, como por ejemplo las tormentas de polvo y la actividad volcánica, o de forma antropogénica, como la quema de combustibles de origen fósil y la combustión de biomasa. Por último, se cree que las concentraciones atmosféricas de aerosoles han aumentado en los últimos años debido al incremento de las emisiones antropogénicas.

3.2.2. Rayos cósmicos (Nueva teoría)

Científicos del Centro Nacional Espacial de Dinamarca aseguran que nuestras emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera tienen un efecto mínimo en la transformación del clima terrestre en comparación con otro factor, mucho más radical pero natural: los rayos cósmicos procedentes de la explosión de estrellas y que llegan a la atmósfera de la Tierra con mayor o menor intensidad dependiendo del campo magnético del Sol, que puede repelerlos a su vez con mayor o menor fuerza antes de que nos alcancen. Mediciones de dos décadas vía satélite han demostrado que existe un vínculo directo entre la intensidad de dicha incidencia de rayos cósmicos y el clima terrestre, que se vuelve más frío o más cálido en función de la cantidad de nubes que se forman. Otras investigaciones recientes refuerzan el descubrimiento danés, que ha suscitado cierta polémica en la comunidad científica.

3.3. Visión conjunta de los agentes del cambio climático

La gran mayoría de estudios señalan como principal responsable del actual cambio climático al cambio de concentración de gases invernadero debido a las emisiones de origen antropogénico. No se pueden menospreciar, ni se podría explicar el actual cambio climático sin el resto de agentes de cambio climático, como el cambio en la superficie de albedo o la emisión de aerosoles, ambos también de origen antropogénico. El resultado de todos ellos, es un calentamiento global del planeta Tierra.

Para llegar a esta conclusión, se han usado modelos climáticos, que han servido tanto para corroborar la causa del cambio climático como para predecir sus efectos en el futuro. De este tema se hablará en el siguiente apartado.

De los compuestos presentados, no todos acentúan el calentamiento global, sino que algunos incluso lo disminuyen. Este es el caso de los aerosoles, que al ser partículas sólidas en suspensión reflejan parte de la radiación que llega a la Tierra. De todas formas, el efecto global del conjunto de agentes de forzamiento climático causa un aumento del efecto invernadero con el consiguiente calentamiento de la superficie terrestre, siendo el CO₂ el agente con mayor relevancia.

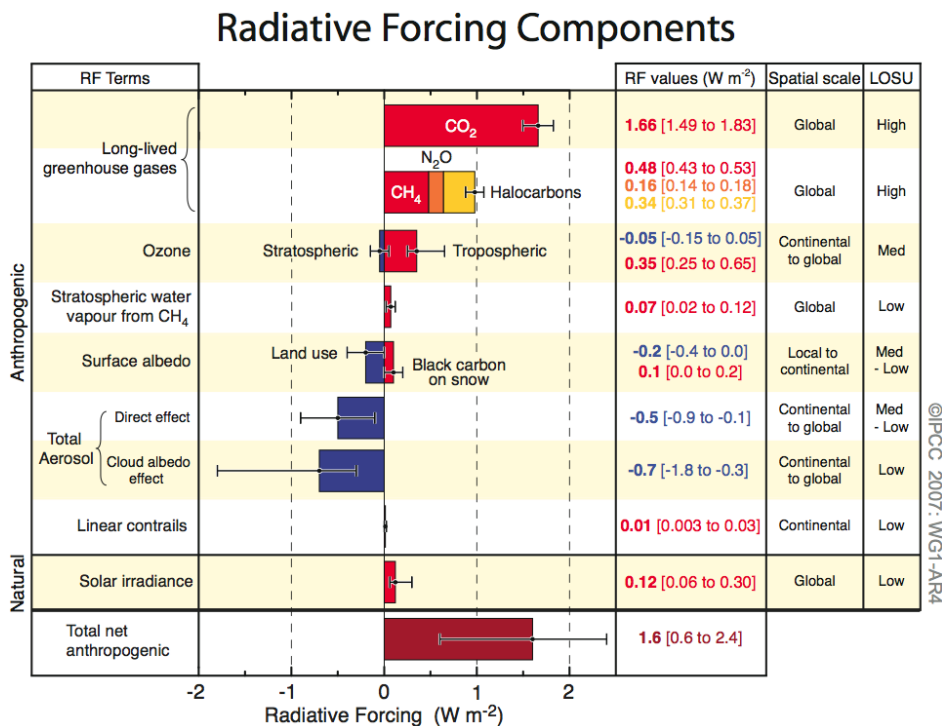


Figura 3.6: Esquema del efecto de los agentes más importantes de forzamiento radiativo. También se especifica el alcance de su efecto y el grado de conocimiento científico (LOSU)

4. CONSECUENCIAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO.

4.1. Modelos climáticos

Las predicciones del cambio climático se obtienen por modelos que simulan matemáticamente las interacciones de la tierra, mar y aire, que en combinación, determinan la temperatura de la Tierra. La confianza depositada en estos modelos se debe a que se basan en leyes físicas conocidas, en su capacidad para describir correctamente muchos aspectos del clima actual, y en su habilidad para reproducir algunas de las características más importantes de climas pasados. Otra importante razón para tener confianza en los modelos climáticos es por su capacidad de reproducir muchos de los fenómenos observados en el océano y en la atmósfera.

Un modelo puede simular bien el clima actual pero aun así fallar en sus predicciones sobre el cambio climático. Para comprobar que no ocurra esto, se simula el comportamiento del clima en el pasado a partir de datos históricos, y se comparan estas simulaciones con lo ocurrido en realidad.

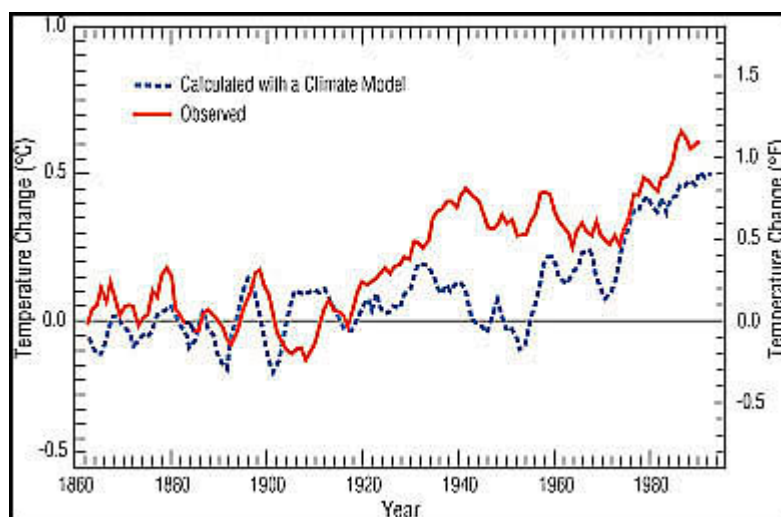


Figura 4.1: Comparación de la evolución del incremento de temperatura calculado según un modelo climático con los datos históricos (IPCC)

Los modelos climáticos pueden reproducir muchos cambios observados en el último siglo, incluyendo el calentamiento global medio de entre 0.3 y 0.6°C, la reducción de la diferencia de temperatura entre día y noche, el enfriamiento de la atmósfera a 14 km sobre el nivel del mar, el aumento de precipitaciones a altas latitudes, la intensificación de precipitaciones en ciertas áreas continentales, y un aumento del nivel del mar.

La mayor debilidad de los modelos es su dependencia en aproximaciones de algunos aspectos del clima. Representar algunos de los procesos clave que tienen lugar a pequeña escala y que afectan al clima lleva mucho tiempo de cálculo, o simplemente está más allá de la capacidad incluso de los superordenadores. Aún disponiendo de los ordenadores adecuados, son pocos los científicos que entienden los procesos físicos detallados de estos procesos. Por ejemplo, no es posible representar los detalles sobre la formación y disipación de las nubes, por lo que se utilizan aproximaciones, siendo dichas aproximaciones la mayor fuente de incertidumbre en los modelos climáticos.

4.2 Predicciones

El IPCC ha predicho aumentos en la temperatura global de la tierra de entre 1 y 3.5°C de cara al año 2100 con respecto al año 1990. Esta predicción se basa en estimaciones de las concentraciones futuras de gases invernadero y partículas de azufre en la atmósfera. Los distintos modelos se basan en diferentes escenarios para dichas emisiones, según el ritmo de crecimiento económico y demográfico mundial, y según las distintas medidas tomadas para evitar el calentamiento global.

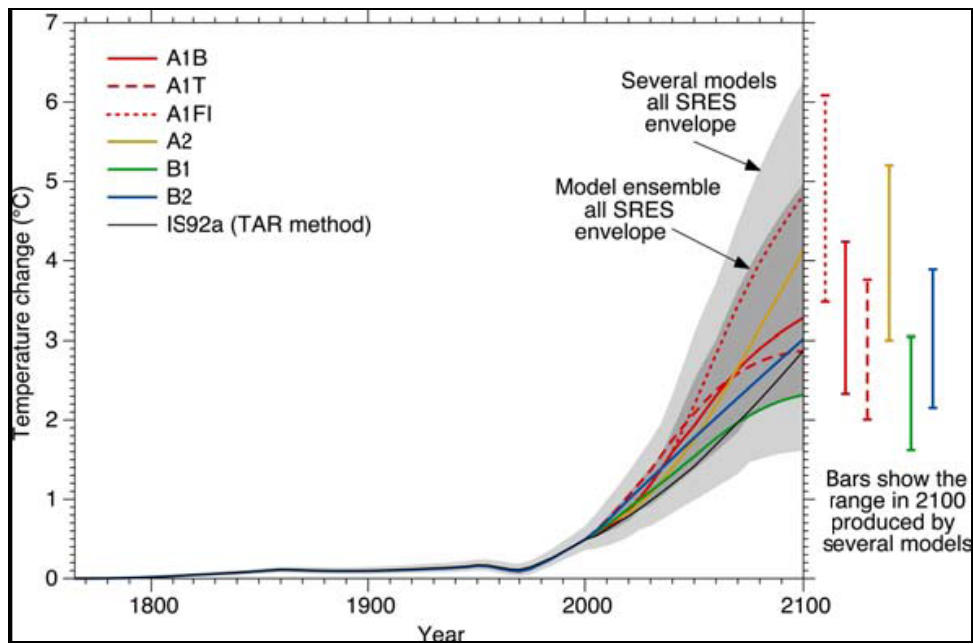


Figura 4.2: Posible rango de aumento de la temperatura global de la superficie terrestre para el periodo entre 1990 a 2100. (IPCC)

La figura muestra los cambios de temperatura previstos hasta el 2100, relativos a los niveles preindustriales. Se muestran nueve escenarios de emisión de gases invernaderos distintos. La parte sombreada de color oscuro representa el área envolvente de todo el conjunto de 35 escenarios del IE-EE (Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones del IPCC), que se obtiene utilizando el promedio de los resultados del modelo. La parte sombreada en un tono más claro es el área envolvente que se obtiene sobre la base de las proyecciones de los siete modelos. Las barras muestran, para cada uno de los seis escenarios ilustrativos del IE-EE, el margen de variación de los resultados del modelo simple para el año 2100.

La tasa de calentamiento de la superficie terrestre dentro de los próximos cien años será probablemente la mayor de los últimos 10,000 años. Sin embargo, los cambios específicos de temperaturas variarán considerablemente entre distintas regiones. El mayor cambio de temperatura esperado afectará al invierno Ártico. Las temperaturas nocturnas aumentarán más que las diurnas.

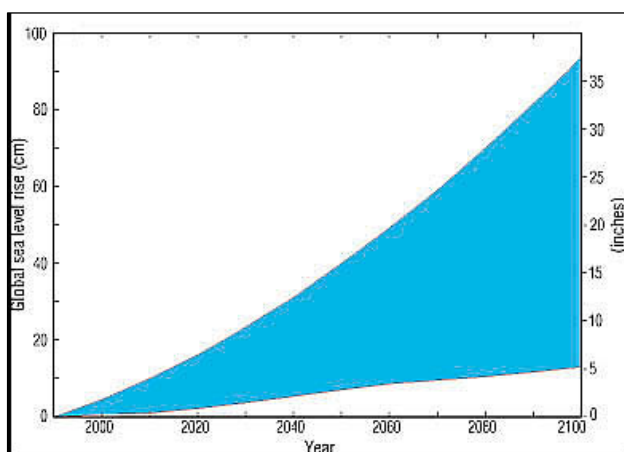


Figura 4.3: Posible rango del aumento global del nivel del mar para el periodo entre 1990 y 2100

Como resultado del calentamiento, se espera que el nivel del mar aumente entre 15 y 95 centímetros de aquí al año 2100 debido a la expansión volumétrica y fusión de glaciares.

Además del aumento de temperatura y el nivel del mar, los modelos permiten predecir otros cambios, como un aumento en la frecuencia de sucesos extremos (lluvias intensas, sequías, etc.).

Todas estas predicciones se basan en la suposición de que el cambio climático tendrá lugar gradualmente. Sin embargo, hay pruebas que sugieren que el clima terrestre ha cambiado en ocasiones de forma rápida en el pasado. Puede que sucedan transiciones bruscas similares debido al cambio climático inducido por el ser humano. Estas transiciones abruptas

aumentan la posibilidad de que ocurran sorpresas significativas a lo largo del siglo, quizá con rápidos e inesperados cambios en corrientes oceánicas y climas regionales. La posibilidad de que tengan lugar estos cambios rápidos aumenta con el aumento de las emisiones de gases invernadero.

Por otra parte, el informe Stern ha estudiado los efectos que podría tener en el planeta un aumento de la temperatura superficial global. Los resultados esperados se recogen en el siguiente esquema:

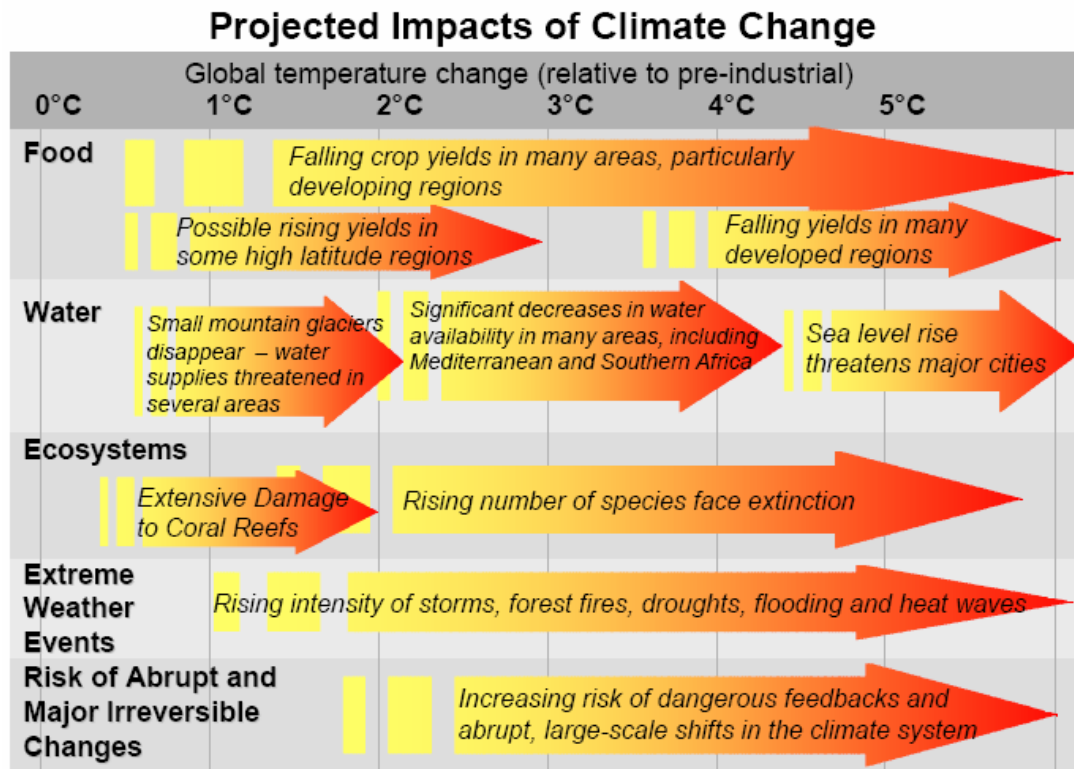


Figura 4.4: Cuadro con los posibles efectos del aumento de temperatura de la superficie terrestre

5.-MEDIDAS TOMADAS Y POSIBLES SOLUCIONES

5.1 Evolución de la conciencia ecológica

“Todavía estamos a tiempo para evitar las peores consecuencias del Cambio Climático”
(Stern, “**La economía del Cambio Climático**”, HM Tesoro, UK)

Desde principios de los 70, la creciente industrialización despertó en la juventud y en los intelectuales de la época una nueva conciencia ecológica, que les llevó a exigir a las autoridades actuaciones para paliar la contaminación generada. Esa presión hizo que los gobiernos fueran poco a poco tomando conciencia del impacto que la actividad humana podía tener sobre el equilibrio natural de nuestro planeta.

La consecuencia de todo esto fue la celebración en 1972 de la “Conferencia sobre el Medio Humano” en Estocolmo, en la que participaron 113 naciones. Las conclusiones de esta Conferencia se recogieron en el Informe Brundtland, titulado *Nuestro Futuro Común*, dirigido por Gro Harland Brundtland, ex-Primera Ministra de Noruega.

Veinte años después (en junio de 1992) tuvo lugar la “Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo”, conocida comúnmente como Cumbre de Río o Cumbre de la Tierra, en Río de Janeiro (Brasil). El objetivo de la Cumbre, a la que asistieron representantes de 172 países, fue el de establecer los problemas ambientales existentes y proponer soluciones a corto, medio y largo plazo. Los acuerdos aprobados en dicha cumbre fueron:

1) Declaración de Río sobre Medio Ambiente y Desarrollo, también conocida como Carta de la Tierra, que define los derechos y responsabilidades de las naciones en la búsqueda del progreso y el bienestar de la humanidad.

2) La Agenda 21: un programa de acción para lograr el desarrollo sostenible y afrontar las cuestiones ambientales y de desarrollo de forma integrada a escala mundial, nacional y local.

3) Convenio sobre la Diversidad Biológica: un acuerdo cuyos objetivos son conservar la diversidad biológica, utilizar de forma sostenible los componentes de dicha diversidad, es decir, los recursos naturales vivos, y conseguir una participación justa y equitativa de los beneficios derivados del uso de los recursos genéticos.

4) Convención Marco sobre el Cambio Climático: un acuerdo para estabilizar las concentraciones de gases causantes del efecto invernadero en la atmósfera, hasta unos valores que no interfieran en el sistema climático mundial.

5) Declaración de Principios sobre los Bosques

En 1997, en la tercera reunión de la Convención Marco sobre el Cambio Climático, se aprobó el **Protocolo de Kioto**, un acuerdo que establece que los países desarrollados deben reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero en un 5,2% para el año 2012, respecto a las emisiones del año 1990. Sin embargo, este protocolo debe ser ratificado por al menos 55 países desarrollados cuyas emisiones de gases de efecto invernadero sumen el 55% del total.

En julio de 2001, en la cumbre celebrada en la ciudad alemana de Bonn, se logró un acuerdo global sobre las condiciones para poner en práctica el Protocolo de Kioto. El acuerdo de Bonn fue firmado por 180 países, entre los que no figuraba Estados Unidos, que no ratificó

este acuerdo mundial. En octubre de ese mismo año, se celebró en Marrakech la VII Reunión de las Partes de la Convención Marco sobre el Cambio Climático, en la que se terminaron de resolver algunos asuntos que habían quedado pendientes en Bonn. El acuerdo adoptado establece cómo tienen que contar los países sus emisiones de efecto invernadero, cómo pueden contabilizar los llamados sumideros de dióxido de carbono (bosques y masas forestales capaces de absorber los gases de efecto invernadero), cómo serán penalizados si no lo cumplen y cómo deben utilizar los mecanismos de flexibilidad (compraventa de emisiones entre países). Este acuerdo también regula las ayudas que recibirán los países en vías de desarrollo para afrontar el cambio climático.

5.2 Soluciones propuestas y medidas que tomar

“El coste de la estabilización del clima es significativo pero viable; todo retraso resultaría peligroso y mucho más costoso”.

(Stern, “La economía del Cambio Climático”, HM Tesoro, UK)

En octubre de 2006 el Departamento del Tesoro del Reino Unido publicó un informe completo sobre la economía del cambio climático, conocido como “el informe Stern”. Utilizando los resultados de modelos económicos formales, el informe ha calculado que, de permanecer inactivos frente al cambio climático, el coste y riesgo total equivaldrá a la pérdida de un mínimo del 5% anual del PIB global, de ahora en adelante. Teniendo en cuenta una gama de riesgos y consecuencias más amplios, este valor aumentaría hasta un mínimo del 20% del PIB. Por el contrario, la adopción de medidas (reducción de emisiones de gases invernadero) puede limitarse aproximadamente al 1% del PIB global cada año.

La inversión realizada en los próximos 10-20 años tendrá un profundo impacto sobre el clima durante la segunda parte del presente siglo y en el siglo próximo. Nuestras acciones actuales y de las próximas décadas podrían crear el riesgo de que se produzca una importante perturbación de las actividades económicas y sociales, cuya escala sería comparable a la asociada con las grandes guerras y depresión económica de la primera mitad del siglo XX. Estos cambios serán difíciles y aun imposibles de subsanar.

En consecuencia, se requiere la adopción de medidas prontas y firmes a nivel internacional, puesto que el cambio climático es un problema global.

Dentro de las posibles medidas a tomar, podemos distinguir dos tipos:

- Medidas preventivas: apostar por fuentes de energía alternativas que no impliquen la generación de CO₂ y de esta forma reducir las emisiones.

- Medidas correctoras: almacenar o tratar las cantidades de CO₂ y otros gases invernadero para evitar que se liberen a la atmósfera.

La búsqueda de nuevas fuentes de energía es un punto clave en el futuro de la obtención energética, ya que además de evitar las emisiones de CO₂, solucionan el problema del agotamiento de los yacimientos de combustibles fósiles.

Dentro de estas energías “limpias” encontramos la eólica, la solar térmica, la solar fotovoltaica, la hidráulica y la nuclear. Estas fuentes de energía presentan también sus propios problemas de impacto ambiental, coste de infraestructuras o por la dependencia de determinados fenómenos meteorológicos (energía eólica y energía solar).

Por desgracia, pese a todos los tratados firmados y la potenciación y financiación del uso de energías renovables, no se ha conseguido frenar el calentamiento global de una manera significativa, por lo que será necesario tomar medidas más drásticas de cara al futuro. Algunas de estas nuevas medidas que se están estudiando son el almacenamiento del CO₂ bajo tierra o en el fondo marino, y también el uso del CO₂ para la obtención de H₂ que se utilizaría como una fuente de energía limpia.

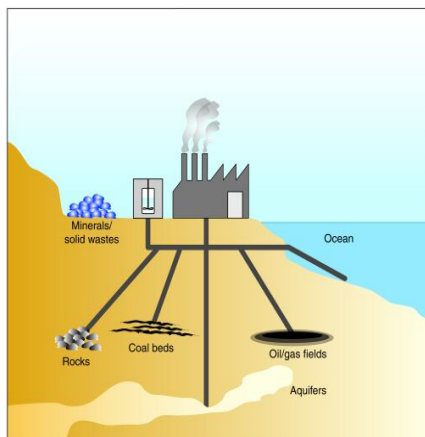


Figura 5.1: Esquemización de las diferentes posibilidades para el almacenamiento de CO₂

La captura de CO₂ atmosférico es un paso clave previo al almacenaje, y puede llevarse a cabo mediante distintos procesos físicos o químicos: adsorción en tamices moleculares, absorción química y física, procesos criogénicos o utilización de membranas.

Una vez capturado el CO₂, existen varias posibilidades para su almacenaje: en el océano, en acuíferos, en depósitos de petróleo y gas agotados o en la tierra como sólido.

El papel del océano en el cambio climático es muy importante, puesto que reduce el incremento del CO₂ atmosférico en más de un 35%. Sin embargo, esta acumulación de CO₂ en el océano está limitada por la saturación de las capas superiores, que se renuevan muy lentamente. Se ha pensado aprovechar esta capacidad de

absorber CO₂ introduciendo el dióxido de carbono directamente en el fondo del océano. A altas presiones el CO₂ se licua (condiciones supercríticas), dando lugar a un líquido más denso que el agua, con lo que es posible su almacenaje en fondos marinos.

Poco a poco este CO₂ se irá disolviendo en el agua (es un proceso muy lento). Los problemas de este método residen en que un aumento de la concentración de CO₂ en las zonas próximas al depósito podría ser perjudicial para algunos animales marinos, como por ejemplo los calamares (muy sensibles a estos cambios), y también a otros seres vivos con estructuras calcáreas, ya que un aumento del CO₂ disuelto implica una cierta acidificación del

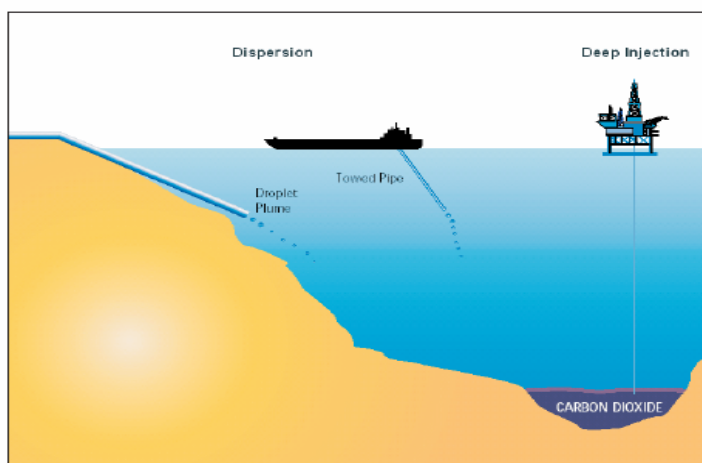


Figura 5.2: Distintas posibilidades para el almacenamiento de CO₂ en el océano profundo



Figura 5.3: Aspecto del CO₂ bajo condiciones supercríticas.

medio. Además, la capacidad del océano para absorber dióxido de carbono no es ilimitada, con lo que esta solución tendría que ser estudiada como una solución temporal.

El océano profundo puede almacenar 500 PgC durante 50-80 años con un descenso del pH de 0.2. (IEA)

Otra opción es el almacenaje de CO₂ en acuíferos situados bajo tierra. El primer almacén de

CO₂ en acuíferos a escala industrial empezó a operar en 1996 en Noruega, y pertenece a la empresa Statoil. En esta planta, se inyectan un millón de toneladas de CO₂/año a 800 metros bajo el fondo marino.

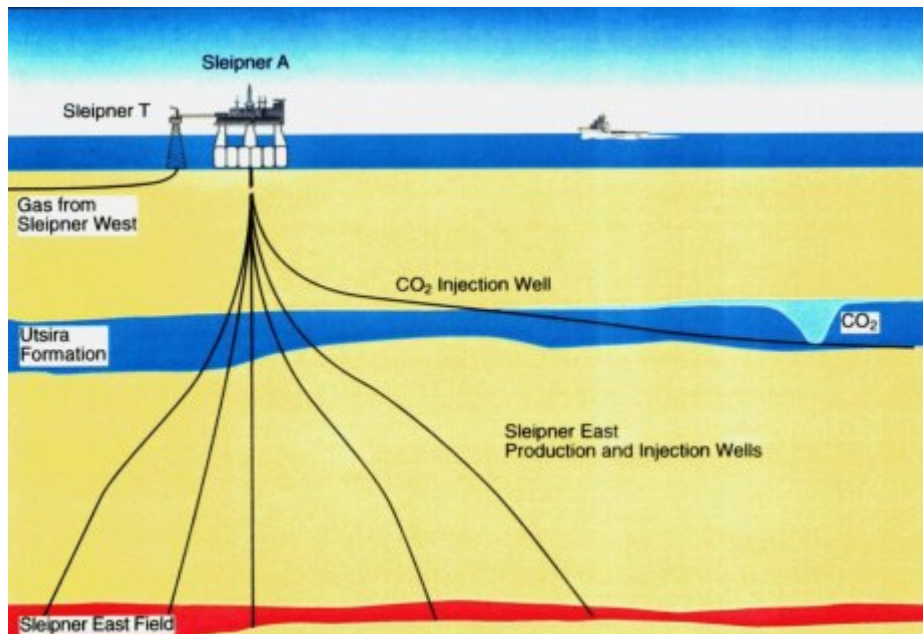


Figura 5.4: Esquema de la extracción de petróleo y almacenamiento de CO₂ en acuíferos en la empresa Statoil, Noruega

Los depósitos de gas y petróleo en desuso también son una buena opción para el almacenamiento de CO₂. En los pozos de petróleo activos, inyectar CO₂ puede ayudar a la salida de petróleo, y de esta forma el CO₂ ya quedaría ahí almacenado para cuando se agotase el pozo. De forma análoga, inyectar CO₂ en las minas de carbón permite desplazar el metano que ha sido adsorbido en dicho carbón y de esta forma, poder aprovecharlo e eliminar de paso los riesgos de explosión derivados de la presencia de este gas inflamable. Este último tipo de almacenaje ya está siendo puesto en práctica por el Consejo de Investigación de Alberta y organizaciones colaboradoras.

La captura y almacenamiento de CO₂ podría ser utilizada para producir hidrógeno a partir de combustibles fósiles con emisiones de CO₂ mínimas, en lo que se denominan “Refinerías de Carbón”. De esta forma, se puede utilizar el hidrógeno como un transportador de energía “limpia”: en las plantas se produciría el H₂, generándose CO₂ que puede ser fácilmente captado y almacenado, mientras que el H₂ sería transportado para su uso como fuente de energía para vehículos, viviendas, etc.



Figura 5.5: “The Wabash River Coal Gasification Repowering Project”

Un estudio conjunto del programa IEA GHG con Statoil examina la producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles, incluyendo los costes de captura y almacenamiento del CO₂. Dicho estudio pone de manifiesto que producir hidrógeno a partir de carbón o gas natural es más barato que producirlo a partir de una fuente renovable.

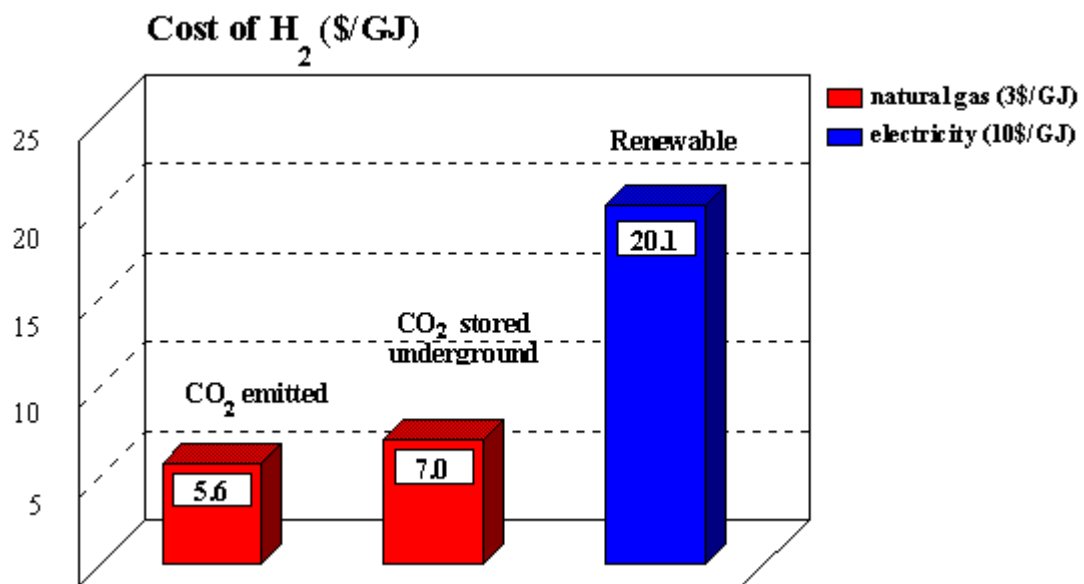


Figura 5.6: Coste de producción de H₂ a partir de fuentes de energía renovables y combustibles fósiles

Por último, se ha estudiado el papel de los bosques en la captación de CO₂. Una cuarta parte del CO₂ emitido por la actividad industrial es captado por los ecosistemas terrestres. ¿Podemos, pues, utilizar la vegetación, y en particular los bosques, para reducir el aumento atmosférico de CO₂ y frenar el cambio climático?

En un trabajo publicado en *Science* en mayo de 1999 (Evan H. DeLucia y col, “Net Primary Production of a Forest Ecosystem with Experimental CO₂ Enrichment”) se indicaba que si todos los bosques que existen en la actualidad crecieran en un 25% más rápido en los próximos 50 años, los bosques absorberían hasta el 50% de las emisiones de CO₂ futuras debido al uso de combustibles fósiles y la deforestación.

La fundación FACE (Forests Absorbing Carbon Dioxide Emissions) es una organización danesa que tiene como objetivo plantar 150 000 hectáreas de bosque para absorber el CO₂ equivalente al emitido por una planta de carbón moderna. FACE tienen proyectos en Malasia, República Checa, Ecuador, Uganda y los Países Bajos.

De todas formas, en el mejor de los casos los bosques absorberían “sólo” la mitad de las emisiones de CO₂. El otro 50% persistiría todavía en la atmósfera y sería el responsable del cambio climático, por lo que, aunque la reforestación es un importante objetivo a cumplir, son necesarias otras medidas paralelas que frenen las emisiones de gases invernadero.

6. CONCLUSIONES

¿Que es el efecto invernadero?

El efecto invernadero es un proceso atmosférico que consiste en la retención por parte de ciertos gases de parte de la radiación infrarroja que emite la Tierra por ser irradiada por el Sol.

Este proceso hace que la temperatura media de la Tierra sea más alta de lo que le corresponde. Los principales gases de origen no antropogénico responsables de este efecto son el CO₂, el N₂O, el CH₄ y el H₂O.

¿Que es el cambio climático?

El cambio climático se produce cuando existen fluctuaciones importantes en las condiciones climatológicas medias de una zona, aunque comúnmente se habla de cambio climático cuando estas fluctuaciones son a nivel mundial.

¿Están probados científicamente estos procesos?

Sí, ambos están probados científicamente. El efecto invernadero fue descubierto por Svante Arrhenius en 1896 y fue él, con la ayuda de Thomas Chamberlin, el primero que predijo que el CO₂ podría ser responsable de un aumento del efecto invernadero.

En las últimas décadas se han encontrado múltiples evidencias de que estamos viviendo un cambio climático, como el incremento de la temperatura media de la Tierra, el aumento del nivel del mar, o la fusión de glaciares. Actualmente, los gobiernos ya han aceptado la existencia de dicho cambio climático y se están empezando a tomar medidas para evitar que continúe.

¿Están relacionados ambos procesos?

Casi con toda seguridad, sí. El incremento de la concentración de gases invernadero en la atmósfera ha potenciado el efecto invernadero natural, lo que está produciendo un calentamiento global del planeta. Este calentamiento global es el responsable del cambio climático.

¿Cuáles son las causas de la existencia de ambos procesos?

El responsable del aumento del efecto invernadero es el hombre, ya que muchas de sus actividades domésticas, agrícolas, ganaderas e industriales generan emisiones de gases invernadero superiores a las que la atmósfera puede admitir sin variar su composición. Este aumento de la concentración de gases invernadero es el responsable principal del incremento del efecto invernadero, y por tanto, del cambio climático.

¿Cuáles son o serán las consecuencias de estos procesos?

La consecuencia principal es, y será aun mayor en un futuro, el aumento de la temperatura global del planeta. Este aumento de temperatura está rompiendo los equilibrios que existen en la naturaleza.

Sus efectos ya se han empezado a notar, y son: deshielo de glaciares, aumento del nivel del mar, desertización de zonas áridas, aumento de las precipitaciones en zonas húmedas, fenómenos atmosféricos menos frecuentes pero más violentos, etc.

¿Qué se puede hacer para reducir estos efectos?

Se pueden tomar dos tipos de medidas:

-A largo plazo: Las de reducción de las actividades generadoras de gases invernadero, y más en concreto, la obtención de energía a partir de procesos que no impliquen la quema de combustibles fósiles

-Temporales: Las de almacenar los gases invernadero para evitar su emisión a la atmósfera. Se están estudiando nuevas alternativas, como el almacenamiento de CO₂ en fondo del mar como una posible vía de mitigación de su efecto.

7. BIBLIOGRAFÍA.

- Echarri, Luis. “Ciencias de la Tierra y del medio ambiente” Ed. Teide, 1998 (Libro electrónico)
(<http://www.tecnun.es/Asignaturas/ecologia/Hipertexto/10CAtm1/350CaCli.htm#POBLACION>)
- Takle, Eugene S., “*Balance global de energía*” Iowa State University, 1997
(http://www.meteor.iastate.edu/gccourse/forcing/forcing_lecture_es.html)
- Evan H. DeLucia, Jason G. Hamilton, Shawna L. Naidu, Richard B. Thomas, Jeffrey A. Andrews. “*Net Primary Production of a Forest Ecosystem with Experimental CO₂ Enrichment*”. Revista *Science*, Mayo 1999.
- Houghton, J. T, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden and D. Xiaosu. “*Climate Change 2001: The Scientific Basis*”. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, UK. 2001
- Maslin, M., *Global Warming, a very short introduction*. Oxford University Press, Oxford, 2004
- Svensmark, Henrik. Astronomy & Geophysics, “*Cosmoclimatology: a new theory emerges*”, Vol. 48, Issue 1, pages 1.18-1.24, February 2007
(<http://www.spacecenter.dk/research/sun-climate/global-warming>)
- Watson, R.T. and the Core Writing Team (Eds.) “*Climate Change 2001: Synthesis Report*”. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, UK. 2001
- Working grup I. “*Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for policymakers*”, (<http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>)
- “*Declaración de la conferencia de las naciones unidas sobre el medio humano*” **Estocolmo, Suecia ,16 de junio de 1972**
(<http://www.pnuma.org/docamb/mh1972.php>)