

# Intensificación del efecto invernadero

## Análisis del estado de conocimiento actual

Hugo H. Martínez<sup>1</sup>

### SUMARIO

Las actividades humanas contaminan el aire, el agua y los suelos. Particularmente se eyecta en la atmósfera una cantidad importante de gases que participan en la intensificación del "efecto invernadero natural". Los científicos que consagran su vida al estudio de las consecuencias de esta polución global, piensan que el riesgo que la generación actual hace correr a las generaciones futuras es suficiente como para poder justificar acciones inmediatas, en vista de atenuar los efectos causales.

### SUMMARY

Human activities pollute the air, water and land. It is particularly ejected an important amount of gases in the atmosphere which then takes part in the intensification of the "natural winter effect". Those scientists who devote their lives to the study of the consequences of this global pollution think that the risk today generation brings about to future generations is well enough to justify immediate actions to smooth the derived effects.

### EL DEBATE

El número de artículos sobre el efecto invernadero no cesa de crecer, ya se trate de artículos científicos, de vulgarización o de polémica. Polémica, ya que la controversia difundida proviene de personas que no han participado en el esfuerzo de los equipos de gente especializada. Atraídos por el suceso mediático del cuestionamiento, los polémicos se distinguen generalmente por sus declaraciones fulminantes (frecuentemente erróneas) y sin fundamento documentado (crítica gratuita). Debe quedar claro que los debates son parte de la investigación y son generalmente fuente de progreso, a condición de que sean ubicados sobre bases científicas sólidas.

Los medios de comunicación (y por lo tanto el público) tienen la costumbre de retener solamente las declaraciones extremas. Estas se reparten entre las declaraciones voluntariamente catastrofistas de aquellos que aseguran un futuro recalentamiento global con consecuencias dramáticas (como el aumento del nivel de los mares), y la pasividad inquietante de aquellos que se atrincheran detrás de sus incertezas científicas para conservar tanto el monopolio de la información como las prerrogativas, cosa de no comprometerse en invertir desde el presente en pos del porvenir de las generaciones

---

<sup>1</sup>- Master Science en Mecánica de Medios Geofísicos y del Medio Ambiente (Especialidad Atmósfera, Hielo y Océanos), Universidad Joseph Fourier (Grenoble, Francia).  
- Doctor en Geofísica, Geoquímica y Geomecánica, Universidad Joseph Fourier (Grenoble, Francia).  
- Profesor Titular Fac. Ingeniería (U. N. de Cuyo).  
- Investigador del CONICET, Area de Ciencias de la Tierra y de la Atmósfera.  
- Coordinador del Area de Física del Instituto de Ciencias Básicas (U. N. de Cuyo).

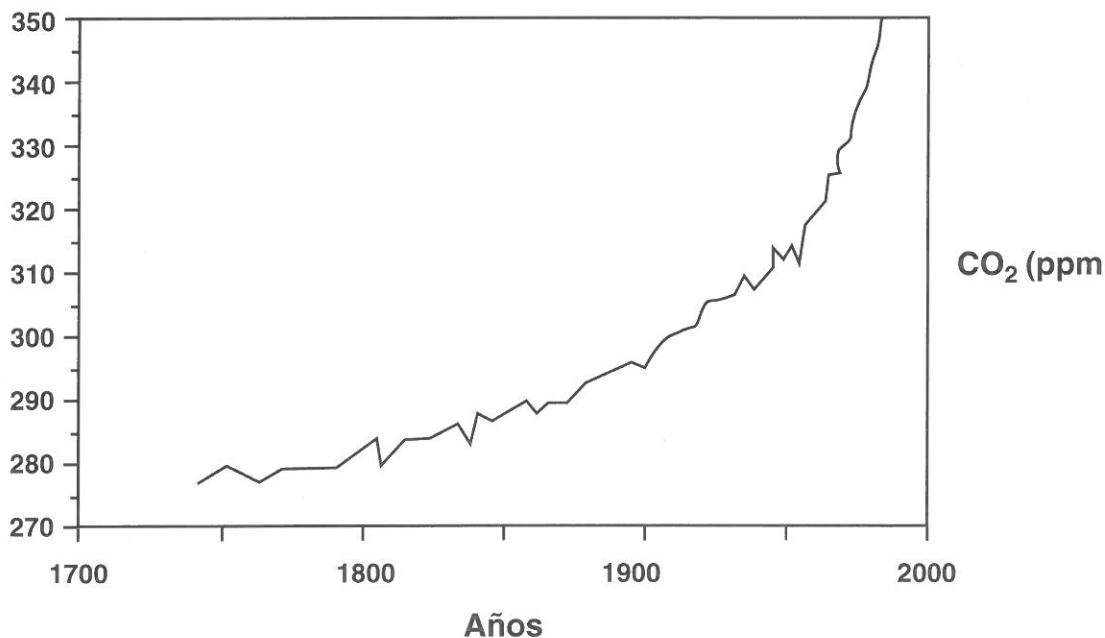
futuras. Entre las dos posiciones anteriores se encuentran los que, a partir de cálculos repetibles, piensan que un peligro real amenaza la Tierra, sin alarmismo pero en términos responsables.

### VARIACIONES NATURALES DEL CLIMA

El clima es el producto de una interacción compleja entre la atmósfera, los océanos, la superficie terrestre y los hielos (continentales y marítimos). El origen de los fenómenos climáticos proviene de la radiación solar, disponible "en permanencia" sobre la Tierra. Sin embargo, la comprensión en detalle del clima es compleja debido a las interacciones no lineales entre todas las partes involucradas. El clima ha experimentado y seguirá experimentando variaciones naturales, tal como se explica en # **Clima, Dióxido de Carbono y Radiación solar.**

### REVISION DEL PASADO

Las emisiones de origen humano aumentan sensiblemente en la atmósfera el contenido de gases responsables del efecto invernadero: gas carbónico (CO<sub>2</sub>), gas natural (metano o CH<sub>4</sub>), freones (clorofluorcarburos o CFC) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). Por ejemplo, el análisis de las burbujas de aire incrustadas en los hielos de Antártida y Groenlandia muestran, sin duda alguna, que la concentración en CO<sub>2</sub> ha pasado de 280 ppmv (partes por millón en volumen) en el inicio de la revolución industrial, a 360 ppmv en 1992. Esto significa un aumento del 29% en doscientos años y donde sólo el 10% se ha producido en el curso de los últimos treinta años (figura a).



**Figura a:** Variaciones de la concentración del CO<sub>2</sub> en el aire (expresada en partes por millón) desde 1774.

Desde 1744 hasta 1965, las variaciones fueron obtenidas a partir del análisis del aire atrapado en testigos de hielo extraídos en el sitio Stiple, Antártida. (Fuente: Instituto de Física de la Universidad de Berna). A partir de 1965 el contenido de CO<sub>2</sub> es el que ha venido midiéndose continuamente en el sitio Mauna Loa, Hawai. La comparación de todos los tipos de medidas de CO<sub>2</sub> atmosférico realizadas en el curso de los últimos 30 años presenta una gran coincidencia, mostrando la realidad del fenómeno de aumento de gas carbónico y comprobando al mismo tiempo la validez de las medidas realizadas en testigos de hielo más ancianos.

Es necesario remarcar el carácter exponencialmente creciente de esta curva. En efecto, sobre una escala más amplia de tiempo, estos mismos análisis muestran que la concentración de CO<sub>2</sub> en el aire era de 200 ppmv en el último máximo glaciario (hace más de veinte mil años). Las actividades humanas emiten treinta mil millones de toneladas de CO<sub>2</sub> por año, ligadas a la deforestación (23%), a la producción de electricidad (23%), al transporte (22%), a la industria (16%) y a los hogares y comercios (16%). Por lo tanto estas actividades han contribuido a aumentar en el curso de los últimos doscientos años la cantidad de CO<sub>2</sub> en el aire a una velocidad cien veces más rápida que los procesos naturales. Aquí reside el verdadero problema, ya que el medio ambiente no tiene tiempo de adaptarse a los cambios que nosotros le hacemos seguir, lo que puede conducir a un deterioro irreversible.

En virtud de las leyes de la Física, el aumento de la concentración de estos gases en el aire conduce a una intensificación del efecto invernadero natural. Recordemos la importancia de este último, ya que al crear una temperatura aproximada de 15 °C en la superficie de la Tierra, ha permitido a la vida instalarse en nuestro planeta (ver # **El efecto invernadero natural y su intensificación**). No es para nada superfluo recordar que la protección de esta vida está ligada a otro fenómeno natural del que se habla bastante: la filtración de los rayos ultravioletas del sol por parte de la capa de ozono estratosférica.

## LA COMPLEJIDAD DEL PROBLEMA

Los hechos anteriormente mencionados son irrefutables. Los modelos actuales de simulación del comportamiento del clima permiten predecir que si el aumento de la concentración de los gases que contribuyen al efecto invernadero continúa, se producirá un recalentamiento de la geósfera. Tal vez se discuta sobre la validez de los modelos, pero nadie ha podido construir uno (fundado en los mejores conocimientos actuales) que no conduzca a un aumento de la temperatura a continuación de un incremento del contenido de dióxido de carbono en el aire.

De todas formas no se conoce precisamente la magnitud de tal incremento de temperatura, ya que dependerá del modo de vida de los pueblos, de la evolución demográfica y de la respuesta del océano en particular. La lentitud de las reacciones del océano y los efectos del enfriamiento debido a la presencia de polvo ambiental y de aerosoles sólidos (ya sean de origen volcánico o antrópico), impiden por el momento determinar en forma precisa la incidencia de las actividades humanas sobre el clima, en el sentido de su variabilidad natural (ver # **El clima de los últimos 100 años**).

## EL DESAFÍO A LLEVAR A CABO

Lo expuesto anteriormente no significa que el impacto humano no exista y que no haya que preocuparse. Tampoco se trata de crear pánico sino de reflexionar y saber proceder. La toma de conciencia y la identificación del peligro vencen al miedo y son los primeros pasos indispensables hacia una lucha racional que pueda conducir a una solución aceptable por una gran mayoría de países. Más que protegese frente a las evidencias cotidianas del deterioro de nuestro medio ambiente, cada uno de nosotros (y en particular los países industrializados, desde donde el ejemplo debiera provenir) debe reconocer la parte de responsabilidades que le concierne, día a día, en el proceso de polución global.

Esta toma de conciencia sólo puede concretarse a partir de una educación apropiada, con relación al medio ambiente y al clima. De esta forma cada uno podrá juzgar la importancia del problema y tomará conciencia de las responsabilidades tanto individuales como colectivas. Por supuesto que para esto hay que formar "maestros" desde el presente, de forma tal de poder garantizar una enseñanza profunda y de calidad para todos los niveles. La creación de esta enseñanza, que debe conducir a una ética del medio ambiente, debería inmediatamente ser tomada en cuenta por la Universidad, ya que requiere una información sólida pero basada sobre una investigación de calidad.

Contrariamente a lo que algunos pretenden, el mensaje de los especialistas no se quiere ni angustiante ni pesimista, sino científicamente objetivo. La lucha contra el derroche energético (para un uso más racional y eficaz de la energía) y contra la deforestación intensiva, es de todas formas benéfica ya que permite preservar nuestras fuentes naturales y también asegurar un desarrollo

durable cualquiera sea la salida final del problema ligado a las consecuencias del efecto invernadero.

El riesgo del desequilibrio (tal vez sólo transitorio) que el desarrollo industrial y económico de la segunda mitad del siglo XX hace correr a la generaciones futuras, ha alcanzado un umbral donde la gravedad exige que todos los fenómenos puedan ser estudiados con más medios y atención. Es ésta la única condición necesaria para que la calidad de las previsiones del "estado futuro" del mundo pueda mejorarse rápidamente y ayudar así a un desarrollo en armonía con nuestro sistema de vida. Debe existir entonces una concertación urgente e indispensable entre las diferentes disciplinas involucradas: por una parte, geofísicos, climatólogos, oceanógrafos, biólogos y agrónomos, y por otra, sociólogos, economistas y hombres políticos responsables y encargados de la planificación territorial y del desarrollo.

Más preocupados por un bienestar inmediato, nosotros hemos ignorado hasta el presente una síntesis aproximada del impacto de nuestras múltiples actividades. Por eso es el momento de considerar y examinar nuestra acción global en un sistema a la escala de la Tierra. Nosotros deberíamos estar inquietos por poner en marcha una medicina preventiva de la geósfera, antes que se imponga la medicina curativa tradicionalmente utilizada para la salud. Está en nosotros la elección, al menos que prefiramos esperar (con los riesgos que ello significa) que la Naturaleza decida por nosotros.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- "Atmospheric Chemistry and Physics, from Air pollution to Climate Change". John H. Seinfeld & Spyros N. Pandis. Wiley Interscience. ISBN 0-471-17816-0.
- "Microphysics of Clouds and Precipitation". Hans R. Pruppacher & James D. Kett. Kluwer Academic Publishers. ISBN 0-7923-4409-X.
- "Fundamentals of Atmospheric Physics". Murry L. Salby. Academic Press. ISBN 0-12-615160-1.
- "Thermodynamics of Atmospheres and Oceans". Judith A. Curry & Peter J. Webster. Academic Press. ISBN 0-12-199570-4.
- "Topics in atmospheric and interstellar physics and chemistry". ERCA (European Research Course on Atmospheres), Edited by C. Boutron. Published by Les Editions de Physique Les Ulis ; 477 pp, 1994. ISBN 2-86883-241-5.
- "Clouds Dynamics". Robert A. Houze, Jr. Academic Press. ISBN 0-12-356881-1.
- "Le climat de la Terre: un passé pour quel avenir?". André Berger. Editorial De Boeck Université; 479 pp, 1994. ISBN 2-8041-1497-00.
- "Glossary of Weather and Climate" with related oceanic and Hidrologic Terms. Ira W. Geer, Editor. American Meteorological Society. ISBN 1- 878220-21-7.

## # CLIMA, DIOXIDO DE CARBONO (CO<sub>2</sub>) Y RADIACIÓN SOLAR

Las dos curvas de la figura b representan las variaciones, en el curso de los últimos 160.000 años, de la temperatura y del contenido de CO<sub>2</sub> del aire en la región de Vostok (Antártida del Este). Esta información ha sido obtenida a partir de análisis de testigos de hielo extraídos en la estación soviética de Vostok. Las perforaciones realizadas alcanzaron los 2.546 m de profundidad, permitiendo remontar en el tiempo hasta 250.000 años aproximadamente (fuente: Laboratorio de Glaciología y de Geofísica del Medio Ambiente del Centro Nacional de la Investigación Científica (CNRS) de Francia y de la Universidad Joseph Fourier de Grenoble, Francia). La concentración de CO<sub>2</sub> proviene del análisis químico de las burbujas de aire atrapadas en el hielo, que son testigos de la atmósfera del pasado. Los valores de temperatura se deducen a partir de las variaciones en la composición isotópica del hidrógeno del hielo (figura b). Esta curva de temperatura del aire es similar a la del volumen total de hielo obtenido a partir de medidas de la relación <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O efectuadas en conchas de foraminíferos bentos que reposan en el fondo de los océanos (curva punteada de la figura c (fuente: Laboratorio de Bajas Radiactividades de Giv-sur-Ivette, Francia).

Hace veinte mil años el volumen de hielo sobre la Tierra superaba el valor actual en aproximadamente cincuenta millones de metros cúbicos. El norte de los continentes americano y europeo estaba recubierto de hielo (de dos a tres kilómetros de espesor). El nivel de los océanos era 130 metros más bajo que el presente y la temperatura media del aire en la superficie terrestre era de sólo 5°C inferior a la que conocemos hoy en día.

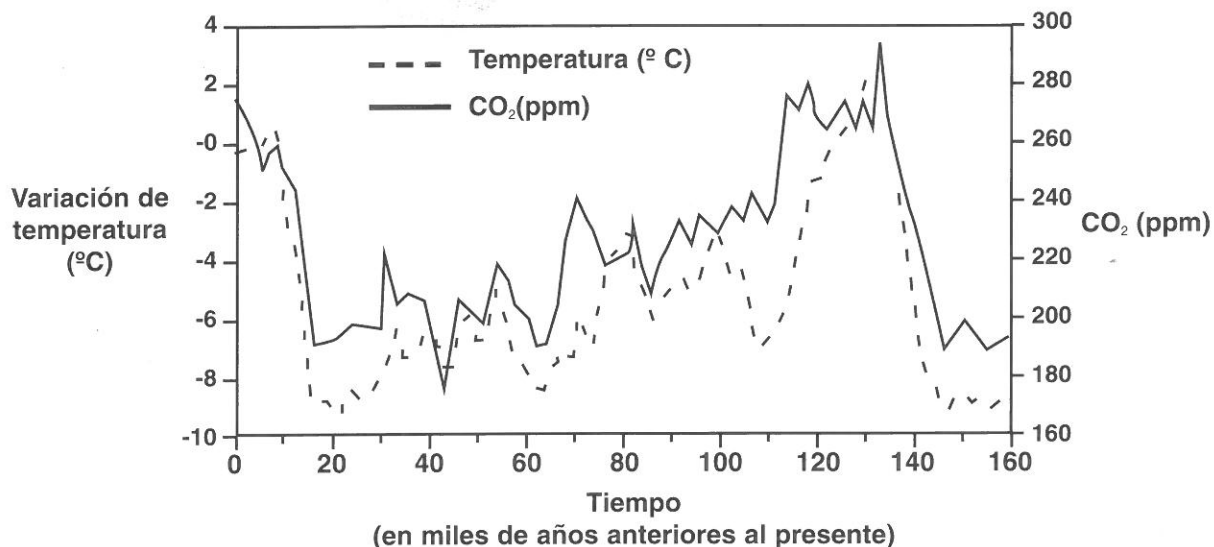


Figura b: Variaciones de temperatura y de CO<sub>2</sub> en el curso de los últimos 160.000 años

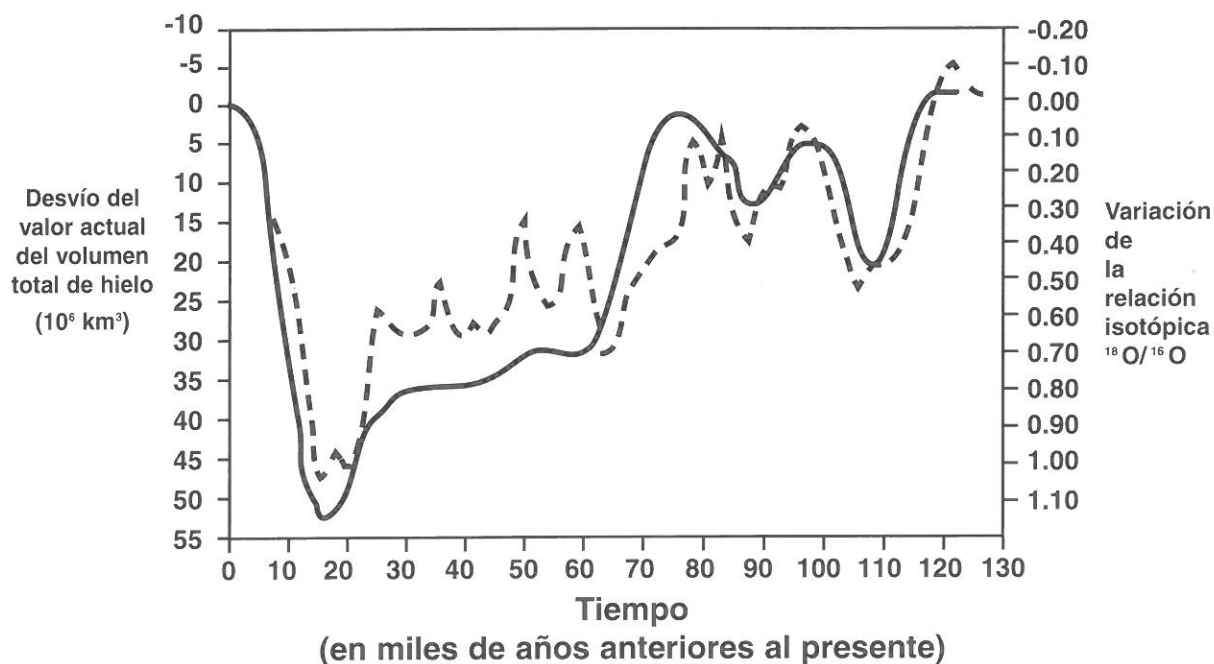


Figura c: Variaciones de volumen total de hielo deducido de las medidas <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O en los foraminíferos bentos (curva punteada) y calculadas por uno de los modelos (curva continua).

Estas variaciones en grandes períodos de tiempo han sido simuladas y reproducidas por primera vez de manera confiable (ver curva continua de la figura c) en el Instituto de Astronomía y de Geofísica de la Universidad Católica de Lovaina (Bélgica), en 1992. El modelo utilizado, basado en las ecuaciones de conservación de la masa, de la cantidad de movimiento y de la energía, tiene en cuenta las interacciones complejas entre los diversos componentes del sistema climático, a saber: la atmósfera,



los océanos, la criósfera y los continentes. También utiliza la concentración atmosférica de  $\text{CO}_2$  y las variaciones astronómicas de la energía solar. Estas últimas fueron calculadas en los años setenta en el Instituto anteriormente mencionado y actualmente son utilizadas por todos los laboratorios en el mundo que se interesan y ocupan de los problemas de paleoclimas. En dicha gran escala de tiempo, las variaciones de los elementos o parámetros ligados a la órbita terrestre (definidos por la Mecánica Gravitacional o Celeste) y a la energía solar recibida (que se corresponden con los primeros), inducen cambios climáticos que perturban los ciclos bio-geoquímicos. Estos a su vez varían la concentración en  $\text{CO}_2$  del aire, modificación que por retroacción amplifica aún más el cambio climático inicial.

Si tan sólo la energía solar recibida por la Tierra continúa variando, las previsiones en la escala astronómica nos muestran que vamos hacia una nueva edad glaciaria a una tasa de enfriamiento medio del orden de  $0,01\text{ }^\circ\text{C}$  por siglo, y esto durante los próximos sesenta mil años. Este tipo de investigación fundamental sobre el comportamiento pasado y futuro del clima sirve para mostrar el rol independiente del efecto invernadero natural (ver # **El efecto invernadero natural y su intensificación**).

### # EL EFECTO INVERNADERO NATURAL Y SU INTENSIFICACIÓN

Los satélites nos permiten saber que la intensidad de la radiación solar incidente sobre el sistema terrestre es de  $342\text{ W/m}^2$ , pero también nos dicen que nuestro planeta utiliza  $237\text{ W/m}^2$ , reflejando los  $105\text{ W/m}^2$  restantes hacia el espacio interplanetario (ver # **El clima y las variaciones climáticas**, figura e). Si la atmósfera no existiera (ver # **Estructura vertical de la atmósfera**, figura f), el equilibrio entre esta energía solar absorbida por la superficie terrestre y la energía infrarroja que esta última emite en función de la ley del cuerpo negro (cuadro nº 6), conduciría a una temperatura efectiva de  $-18\text{ }^\circ\text{C}$ , es decir  $33\text{ }^\circ\text{C}$  menos que la temperatura actual del aire en superficie (que es efectivamente de  $15\text{ }^\circ\text{C}$  en media global y anual). Estos  $33\text{ }^\circ\text{C}$  de más son la manifestación de la importancia del rol de nuestra atmósfera y representan a la vez la potencia del "efecto invernadero natural".

Este efecto se cuantifica, para el caso de la Tierra real con su atmósfera (ver # **Clima y circulación general de la atmósfera**, figura g), por la diferencia entre lo que la superficie emite ( $390\text{ W/m}^2$ ) y lo que la Tierra globalmente restituye al espacio ( $237\text{ W/m}^2$ ). Dicha diferencia ( $153\text{ W/m}^2$ ) representa el porcentaje (38%) de la energía emitida por la superficie que resta atrapada por la atmósfera. Esto se debe a la presencia de gases que absorben eficazmente la energía infrarroja, llamados precisamente gases de efecto invernadero, que por orden de importancia son: el vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), el dióxido de carbono o anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ), el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), el ozono ( $\text{O}_3$ ) y los clorofluorcarburos (CFC). Si bien estos últimos son únicamente de origen antrópico, los otros provienen a la vez de fuentes naturales y de fuentes ligadas a las actividades humanas.

De todas formas, cualquiera sea el origen, el aumento de estos gases en la atmósfera refuerza la captura de parte de la energía emitida por la superficie terrestre, conduciendo así a una intensificación del efecto invernadero natural. Esta intensificación directa ha sido calculada para las emisiones antrópicas de los últimos 250 años, gracias al conocimiento detallado de las propiedades radiactivas de dichos gases.

A menudo surge la siguiente pregunta: si el vapor de agua es el principal de estos gases que contribuye a reforzar el efecto invernadero, por qué se habla tan poco de él? En realidad, existen tantas moléculas de vapor de agua en el aire, que las actividades humanas (vía irrigación intensa o incluso construcción de grandes embalses) no alcanzan a modificar la concentración inicial de manera medible. El efecto directo debido al aumento de la concentración en vapor de agua es por lo tanto despreciado. Sin embargo, tal no es el caso si se considera el efecto indirecto del "gas agua". Si la superficie terrestre sufre un calentamiento o aumenta levemente su temperatura (cualquiera sea la causa, por ejemplo un aumento significativo de  $\text{CO}_2$  en el aire) entonces la evaporación aumenta (teniendo en cuenta que la superficie del globo está constituida en sus tres cuartas partes por océanos).

Por lo tanto, la concentración en vapor de agua (primer gas a efecto invernadero) aumenta significativamente reforzando así el calentamiento inicial. Esta retroacción ligada al vapor de agua, es

un proceso tenido en cuenta hoy en día por todos los modelos de simulación de cambios climáticos globales, y juega un rol primordial en el calentamiento final inducido inicialmente por el solo aumento de la concentración de otro gas de efecto invernadero.

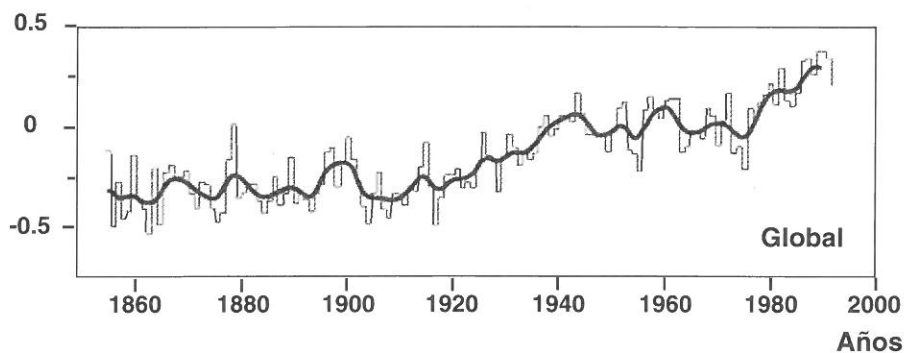
## # EL CLIMA DE LOS ÚLTIMOS 100 AÑOS

En el curso de los últimos 100 años, la temperatura media del globo ha aumentado entre 0,5 °C y 1 °C, teniendo en cuenta el intervalo de error proveniente de la incerteza de las medidas (fuente: Unidad de Investigación Climática de la Universidad de East Anglia, EEUU). Este calentamiento global es del mismo orden que el previsto por los modelos, cuando se toma en cuenta sólo el aumento observado (en la era industrial) de gases de efecto invernadero. Sin embargo, dicho aumento de temperatura es del mismo orden que la variabilidad natural del clima en la escala del siglo. En efecto, desde el último período interglaciario (hace algunos 6000 años) el clima no ha dejado de fluctuar con una amplitud media de alrededor 1 °C, en la escala de algunos siglos. Es así que el clima cálido de la Edad Media permitió a los Vikingos atravesar el Atlántico Norte para establecerse en Groenlandia, sin ser perturbados por la deriva excesiva a causa de los icebergs. Este período fue seguido de una Pequeña Edad Glaciar entre los siglos XVI y XIX. El retroceso de los grandes glaciares desde fines del siglo XIX, marcan el comienzo del recalentamiento que caracteriza el siglo XX.

Es cierto que este recalentamiento no es uniforme sobre la Tierra, ni constante en el tiempo: ciertas regiones se calientan más que otras, incluso algunas se enfrían. Tal complejidad no es más que la imagen del sistema climático mismo. Por ejemplo, la figura d muestra claramente un enfriamiento en los años 1945 a 1955, y 1960 a 1975.

Este último intervalo es seguido de un calentamiento importante en el curso del decenio 1980-1990, siendo el año 1990 el más cálido (batiendo todos los récords absolutos desde que se realizan las observaciones meteorológicas).

Además de los gases de efecto invernadero, hay que considerar otros factores de perturbación, tales como los polvos ambientales (también llamados aerosoles sólidos), ya sean de origen natural (volcánico por ejemplo) o antrópico (industrial, en particular). La confiabilidad de los modelos de simulación, utilizados para el cálculo (o modelado) del clima, ha podido ser también verificada con relación al efecto de estos polvos ambientales, como por ejemplo luego de la erupción en 1991 del Monte Pinatubo, en Filipinas. El enfriamiento en unas décimas de grado centígrado observado hacia fines de 1991 y en 1992, fue correctamente previsto por los modelos algunos meses después de la erupción. Este efecto de enfriamiento por parte del polvo ambiental comienza a comprenderse mejor. Una de las razones por las cuales el recalentamiento que debería resultar de las emisiones de gases de efecto invernadero (que ocurren desde el siglo XIX) no ha podido separarse del ruido de la variabilidad natural, puede deberse justamente al enfriamiento que provocan los polvos emitidos por las actividades humanas, conjuntamente a las emisiones de gases de efecto invernadero.



**Figura d:** Variaciones de la temperatura media del aire en la superficie de la Tierra desde 1850 hasta 1992. Los valores fueron determinados en relación a la media calculada sobre período 1950-1979.

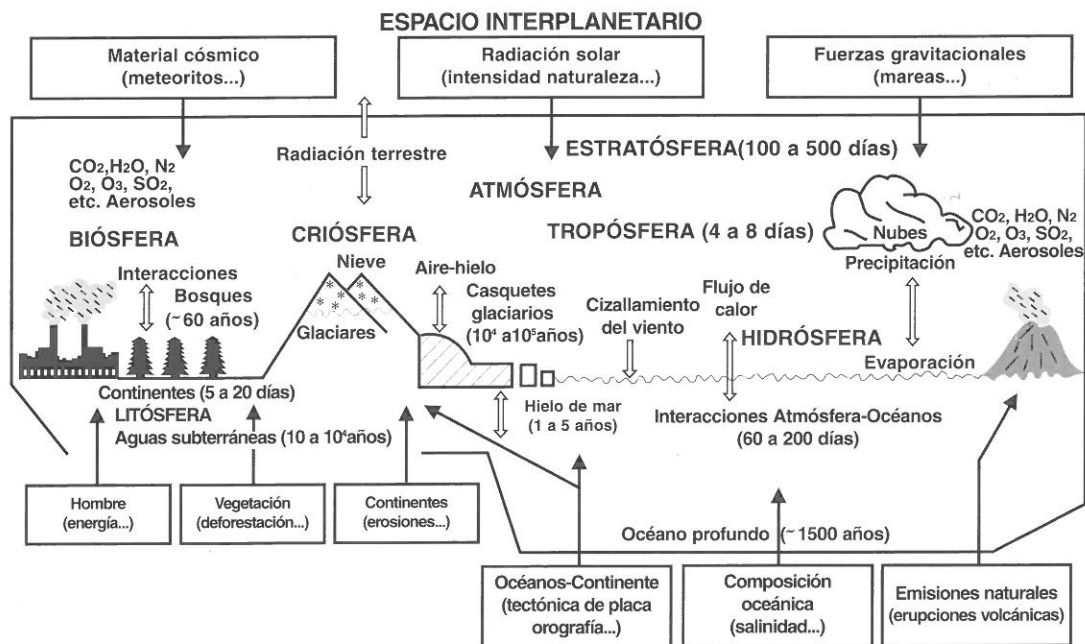
## # EL CLIMA Y LAS VARIACIONES CLIMATICAS

El clima está caracterizado por el conjunto de condiciones meteorológicas que prevalecen en un lugar dado y que dependen del tiempo: no se describe únicamente en función de valores promedios, sino también de los valores extremos y sus variaciones. La climatología estudia no solamente las leyes estadísticas de distribución temporal de los eventos meteorológicos locales y su diferenciación espacial, sino también las leyes físicas que gobiernan la evolución del sistema climático completo, constituido por la atmósfera, la hidrósfera, la criósfera, la biósfera, la litósfera más el conjunto de sus interacciones complejas (figura e).

De esta forma el clima engloba la variable tiempo y la evolución de los parámetros estadísticos que lo caracterizan, diferenciando convenientemente el tiempo de la meteorología que influencia nuestra vida cotidiana y el del clima que modela el desarrollo socio-económico a las escalas del decenio o del siglo. En todas las partes de la Tierra, el clima fluctúa no solamente de manera apreciable de año en año, sino que lo hace gradualmente, de forma que el decenio o el siglo transcurridos pueden diferir sustancialmente del precedente.

Estas fluctuaciones y los cambios a largo alcance son el resultado de procesos que actúan sobre el sistema y que determinan el clima terrestre. Hasta el presente, estos procesos estaban ligados exclusivamente a factores intrínsecos del sistema y a factores externos, tales como los elementos astronómicos y los eventos solares y cósmicos. A la hora actual, es cierto que el hombre comienza a transformarse en un factor de influencia significativa en la historia del clima. Este fenómeno, del cual se ha tomado conciencia recientemente, no está ligado únicamente a la influencia local evidente del hombre (resultante de la urbanización y la polución atmosférica clásica), sino sobre todo a la influencia que el hombre comienza a tener sobre el clima a la escala planetaria.

Si bien los científicos no pueden aún predecir exactamente cómo será la evolución temporal de dicha influencia ni cómo se hará sentir regionalmente (a pequeña escala), desde el presente ya es posible describir los cambios atmosféricos que se producirán en los próximos decenios (cambios que están esencialmente caracterizados por un recalentamiento a la escala global). A causa de las incidencias inevitables que tal efecto tendrá sobre el Medio Ambiente, es obvio que los conocimientos de la naturaleza y de tal impacto son cruciales para el desarrollo futuro en armonía por y para la humanidad.



**Figura e:** El sistema climático y sus cinco componentes: Atmósfera, hidrósfera, criósfera, biósfera y litósfera. Los números entre paréntesis representan el tiempo característico de cada parte del sistema.



## # ESTRUCTURA VERTICAL DE LA ATMÓSFERA

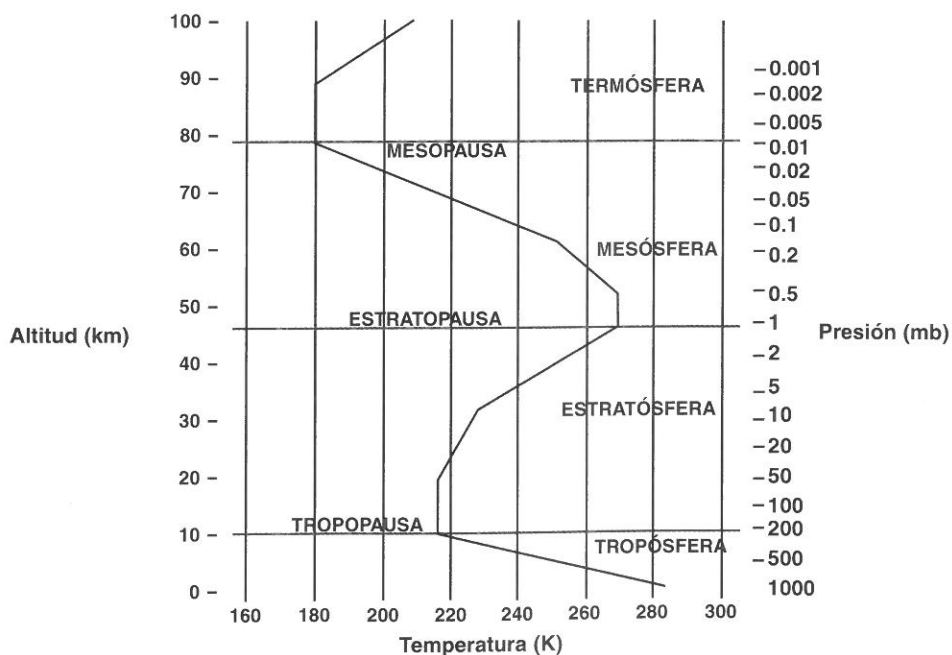
Es generalmente la temperatura quien sirve de criterio para definir la estructura vertical de la atmósfera. El gráfico de la figura f reproduce el perfil vertical de temperaturas de la atmósfera, representativo de las condiciones típicas a latitudes templadas. Se distinguen cuatro capas: la tropósfera, la estratósfera, la mesósfera y la termósfera.

La tropósfera contiene más del 80% de la masa de la atmósfera terrestre, como así también casi la totalidad del vapor de agua de las nubes y de las precipitaciones. Se caracteriza además por la disminución de la temperatura (a medida que la altitud aumenta) a razón de 6,5 °C por kilómetro, y por poseer una mezcla de gases responsable de un tiempo de residencia relativamente corto para los aerosoles (de algunos días hasta algunas semanas).

La transición entre la tropósfera y la estratósfera (tropopausa) está definida por una marcada inversión de temperatura. Esta se acompaña de un cambio neto en la concentración de ciertos constituyentes: por ejemplo, contrariamente a la tropósfera, la estratósfera es rica en ozono. Este gas absorbe la parte ultravioleta de la radiación solar, conduciendo de este modo a una temperatura próxima a 0°C en la cima de la estratósfera (llamada estratopausa). La estratósfera está en equilibrio radiativo. Su estabilidad en el sentido hidrostático permite a los aerosoles presentes (por ejemplo las cenizas volcánicas y los restos de explosiones nucleares en altitud) radicarse por largo tiempo. Por otro lado, dicha estabilidad característica de la capa estratosférica dificulta la penetración de los constituyentes troposféricos.

La mesósfera abarca una parte de la ionósfera (región por encima de los 70 km donde la absorción de una parte de la radiación solar conduce a la formación de iones y electrones libres) y la parte inferior de la región donde se observan las auroras. Como en la tropósfera, la temperatura disminuye con la altitud. Los movimientos verticales pueden ser suficientes en verano como para producir finas nubes plateadas por encima de las regiones polares.

La termósfera se extiende sobre varias centenas de kilómetros hacia el encuentro del espacio interplanetario. En esta última capa la temperatura varía de 200 a 2000 grados Kelvin, y depende por supuesto de la actividad solar.



**Figura f:** Estructura vertical de la atmósfera: distribuciones de presión (expresada en milibares) y de temperatura (en grados Kelvin).

## # TEMPERATURA EFECTIVA, EFECTO INVERNADERO Y TEMPERATURA EN LA SUPERFICIE TERRESTRE

La cantidad total de energía solar que llega a la Tierra es la que pasa a través de un disco de radio  $R$ , igual al de la Tierra, y perpendicular a los rayos provenientes del Sol. Si  $S_0$  representa la constante solar, cuyo valor actual está comprendido entre  $1365 \text{ W/m}^2$  y  $1372 \text{ W/m}^2$ , dicha cantidad de energía es igual a:  $\pi R^2 S_0$ . Una parte de esta energía ( $\alpha$ ) es reflejada por la atmósfera y por la superficie terrestre. Por lo tanto, distribuida sobre toda la Tierra de superficie  $4 \pi R^2$ , la cantidad de energía realmente disponible por unidad de superficie de nuestro planeta está dada por:

$$\frac{S_0}{4} (1 - \alpha)$$

Globalmente, la Tierra debe entonces re-emitir una cantidad de energía equivalente dada por la ley de Stéfán-Boltzman ( $\sigma T_e^4$ ), de forma que en el equilibrio se cumpla:

$$\frac{S_0}{4} (1 - \alpha) = \sigma T_e^4 \quad [1]$$

donde  $T_e$  es la llamada temperatura efectiva y representa la temperatura de emisión infrarroja de la Tierra, considerada como un cuerpo negro (tal como es percibida por los satélites);  $\sigma$  es una constante igual a  $0,567 \cdot 10^{-7} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ;  $\alpha$  medida por los satélites vale aproximadamente 0,3 y  $T_e$  es de  $255 \text{ K}$  ( $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ ), lo que corresponde a una emisión infrarroja de  $237 \text{ W/m}^2$ .

Si la atmósfera fuera transparente a esta radiación, la temperatura en la superficie de la Tierra  $T_s$  sería entonces también de  $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pero las observaciones dan una  $T_s$  del orden de  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  (correspondientes a una emisión de  $390 \text{ W/m}^2$ ). La diferencia,  $T_s - T_e$ , de  $33 \text{ }^\circ\text{C}$  representa los  $153 \text{ W/m}^2$  de la energía atrapada por la atmósfera. Esta es la manifestación del efecto invernadero y se debe al hecho que ciertos constituyentes atmosféricos, denominados gases de efecto invernadero, absorben eficazmente la radiación infrarroja emitida por la atmósfera y la superficie de la Tierra. Si la emisividad de la superficie se designa por  $\varepsilon$  ( $\varepsilon = 1$ ) y si  $\tau$  representa la transmisividad global de la atmósfera, [1] puede escribirse como:

$$\frac{S_0}{4} (1 - \alpha) = \varepsilon \tau \sigma T_s^4 \quad [2]$$

De acuerdo a los valores convencionales de  $S_0$ ,  $\alpha$ ,  $\varepsilon$  y  $T_s$ ,  $\tau$  es aproximadamente igual a 0,6.

Finalmente, la ecuación [2] nos muestra que mientras más pequeña sea la transmisividad  $\tau$  (lo que reflejaría un almacenamiento más importante de energía infrarroja por parte de la atmósfera), más elevada deberá ser  $T_s$  para valores constantes de los otros parámetros. Tal aumento de la energía retenida por la atmósfera (debido por ejemplo al actual incremento en la concentración de gases de efecto invernadero) conduce entonces a una intensificación del efecto invernadero natural por parte del hombre, y a un recalentamiento consecuente de la superficie terrestre.

## # CLIMA Y CIRCULACION GENERAL DE LA ATMOSFERA

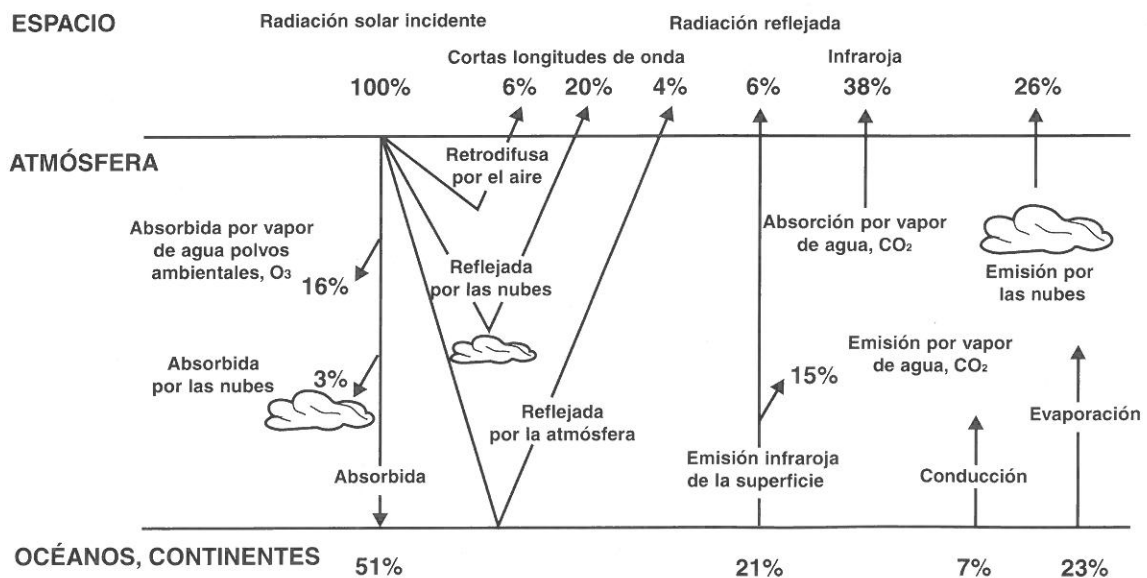
La paleoclimatología y la climatología dinámica tienen por objeto los estudios ligados a las causas de los cambios climáticos, a fin de poder estimar el clima futuro. Además de la complejidad de cada componente del sistema climático, hay que considerar la dificultad que existe debido a sus interacciones y al amplio espectro de tiempos característicos, que se extiende desde algunos días

para la atmósfera hasta varios miles de años para los casquetes polares.

El sistema climático es en efecto un enorme depósito en el que la materia, la energía y la cantidad de movimiento son no solamente almacenados sino también transformados y redistribuidos. La energía indispensable para la formación y la evolución de los movimientos atmosféricos y oceánicos, más los procesos que los acompañan, provienen en un último análisis del Sol. Es por este motivo que hace falta controlar el comportamiento de la radiación solar a través del sistema climático.

La fracción de la energía solar que es absorbida por el sistema (=70%) se transforma en calor. El sistema climático emite entonces una radiación térmica equivalente (condición de equilibrio) cuya intensidad depende sobre todo de la temperatura de los cuerpos emisores. En efecto, la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre es reabsorbida por las componentes de la atmósfera (principalmente el vapor de agua y el dióxido de carbono), lo que define también (vía efecto invernadero) la temperatura media global del aire en la superficie de la Tierra.

Para poder comprender el clima de la Tierra hace falta, en primer lugar, analizar su balance energético medio, tal como está representado en la figura g. El 99% de la radiación solar incidente en el sistema terrestre ( $342 \text{ W/m}^2$ ) es de corta longitud de onda. En promedio sobre toda la Tierra y en un año, 30% de esta radiación es reflejada hacia el espacio, mientras que el 70% restante ( $237 \text{ W/m}^2$ ) es absorbida por el ozono estratosférico, por el vapor de agua, por las nubes y los aerosoles de la tropósfera ( $68 \text{ W/m}^2$ ) y por la superficie ( $169 \text{ W/m}^2$ ). Por lo tanto para mantener el balance energético, debe emitirse radiación infrarroja hacia el espacio y en cantidad equivalente a la radiación solar absorbida. La superficie emite  $390 \text{ W/m}^2$ , de los cuales  $20 \text{ W/m}^2$  van a atravesar la "ventana atmosférica", y el resto es absorbido por la tropósfera. La atmósfera, habiendo absorbido [ $68 \text{ W/m}^2 + 370 \text{ W/m}^2$ ], re-emite  $217 \text{ W/m}^2$  hacia el espacio y  $327 \text{ W/m}^2$  hacia la superficie. Un rápido balance radiativo muestra que el exceso de energía en la superficie ( $106 \text{ W/m}^2$ ) debe ser compensado por los procesos no-radiativos como lo son la evaporación ( $90 \text{ W/m}^2$ ) y la conducción ( $16 \text{ W/m}^2$ ). El equilibrio se restablece entonces gracias a este apareamiento convectivo entre la superficie y la atmósfera.



**Figura g:** Balance energético de la Tierra. El 100% de la energía solar incidente representa  $342 \text{ Wm}^2$ . La emisión neta infrarroja de la superficie (21%) es el resultado de una emisión (6%) a través de la ventana atmosférica y del balance (15%) entre la energía emitida por la superficie y absorbida por la atmósfera (110%) y la energía emitida por la atmósfera y absorbida por la superficie terrestre (95%).