



Acta Bioquímica Clínica Latinoamericana

ISSN: 0325-2957

actabioq@fbpba.org.ar

Federación Bioquímica de la Provincia de  
Buenos Aires  
Argentina

#### EL CALENTAMIENTO GLOBAL

Acta Bioquímica Clínica Latinoamericana, núm. 3, 2012, pp. 17-30

Federación Bioquímica de la Provincia de Buenos Aires

Buenos Aires, Argentina

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53559383002>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

# EL CALENTAMIENTO GLOBAL

Desde que se originó, hace unos cuatro mil seiscientos millones de años (4,6 Ga) hasta el presente, la Tierra ha sido un planeta cambiante. Los motores del cambio son enormes fuerzas naturales que elevan montañas, quiebran la corteza terrestre, hacen surgir volcanes que cambian el paisaje geológico, creando islas y archipiélagos y otros fenómenos de similar magnitud que, a menudo, afectan al clima. La acción humana es irrelevante ante los cambios producidos por estas fuerzas naturales. Sin embargo, en pequeña escala, acumulativa, la humanidad genera otros cambios que pueden controlarse, evitarse o modificarse. Estos cambios se operan principalmente en la atmósfera y tienen efectos sobre uno o más subsistemas de la Tierra.

## El clima

Entre los factores que no podemos controlar están los “motores” del clima, llamados “forzadores” (Bradley 2003). Estos factores operan en diferentes escalas temporales: con baja frecuencia (en milenios) opera el forzador orbital (Fig. 1). El matemático francés, Joseph Adhemar (1767-1862) fue el primero en postular que las edades del hielo habían sido causadas por fuerzas astronómicas. Estas ideas fueron retomadas por el astrónomo y físico escocés James Croll (1821-1890) que discutió el asunto con el famoso geólogo Charles Lyell. Croll agregó a los factores orbitales la realimentación positiva del albedo del hielo que acentúa el enfriamiento. Pero fue el matemático serbio Milutin Milankovitch (1879-1958) quien en sus obras de 1920, 1930 y 1941 desarrolló la idea de los factores orbitales hasta su forma actual. Para explicar los cambios del clima del Cuaternario, Milankovitch analizó tres factores astronómicos:

la excentricidad de la órbita terrestre, la oblicuidad del eje de rotación de la tierra respecto del plano de la órbita y la precesión de los equinoccios (es decir, el cambio en la fecha de los equinoccios en relación a la fecha en que la Tierra está más cerca del Sol). Estos tres elementos cambian a través del tiempo con sus propios períodos: la excentricidad lo completa cada 92.000 años, la oblicuidad cada 40.000 y la precesión cada 21.000 años (Budyko 1977). Se han discutido los efectos y la duración de los períodos llevando la excentricidad a 110.000 años, etc., pero esta discusión excede los límites de este trabajo. La acción de estos tres factores fue detalladamente verificada por varios autores convocados por la *American Geophysical Union* en 1978.

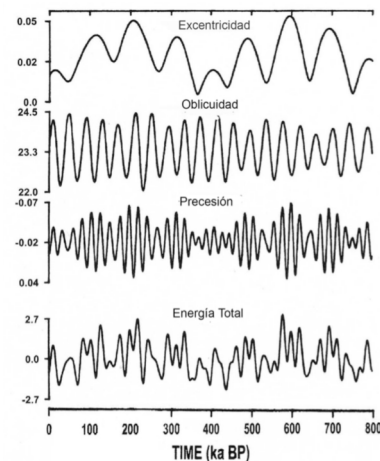
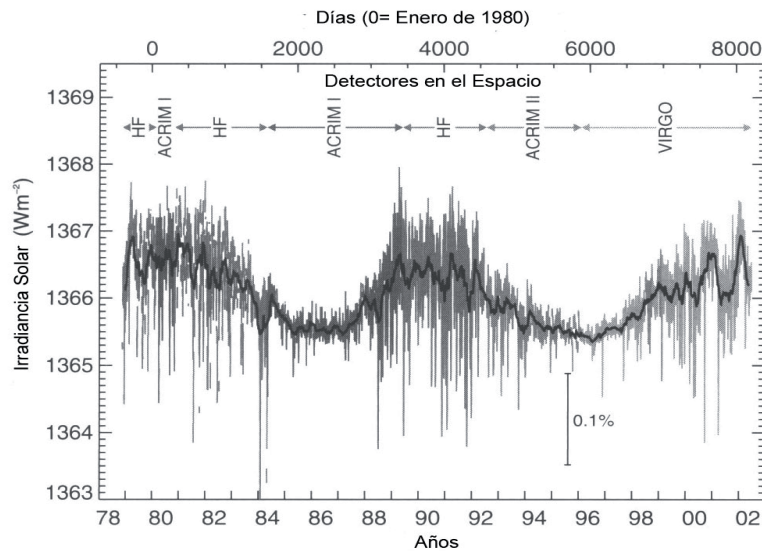


Figura 1: El “motor” o “forzador” orbital, formado por los componentes de excentricidad, oblicuidad y precesión, y la suma algebraica de sus efectos de cambio denominada ETP (= Eccentricity, Tilt, Precession (Bradley 1999, modificado).



**Figura 2:** El “motor” o “forzador” solar registrado por los detectores HF, ACRIM I y II, y VIRGO entre 1978 y 2002 (de Fröhlich 2004, modificado).

El sol emite energía electromagnética (Fig. 2) en un amplio rango de frecuencias y tiene su propio clima. Los detectores satelitales HF, ACRIM I y II, y VIRGO mostraron que la emisión solar en el lapso de 1978 a 2002 varió entre 1363 y 1368 Watts por metro cuadrado ( $W \cdot m^{-2}$ ).

La precisión de estas medidas directas de la radiación solar (que varía entre 1363 y 1368  $W \cdot m^{-2}$ ) sirve para validar la reconstrucción histórica de la radiación solar realizada por Bard (Fig. 3).

Sin embargo, el “motor” climático más importante durante los últimos 10.000 años ha sido el vulcanismo. Su efecto sobre el clima es múltiple pero produce, sobre todo, el descenso hemisférico o global de la temperatura durante lapsos cortos, se debe a la inyección de aerosoles en la atmósfera que refleja la radiación solar reduciendo el flujo de ésta que llega a la Tierra (Fig. 4). A esto se asocian los cambios de circulación que pueden conducir a grandes anomalías negativas de la temperatura en algunas regiones, pero otras áreas pueden hacerse más cálidas. Se ha demostrado (Groisman 1992, Robock y Mao, 1992, 1995) que durante el siglo XX en el interior de los continentes la temperatura de invierno se hizo más cálida en respuesta a las grandes erupciones volcánicas (Bradley 2003). La mayoría de los efectos se desvanecen en pocos años de modo que las erupciones explosivas individuales sólo contribuyen a variabilidad de corto plazo al clima total del Holoceno (Bradley 2003).

## El cambio climático

Muchos procesos biogeoquímicos y físicos determinan el clima de la Tierra y la actividad humana perturba va-

rios de estos procesos. Algunas perturbaciones pueden ser cuantificadas mientras que otras sólo pueden ser estimadas cualitativamente y, por cierto, no hemos estudiado ni descubierto todas las perturbaciones. Aún quedan muchas preguntas sin responder en términos de la realimentación física y biogeoquímica del sistema climático de la Tierra. La composición física y química de la atmósfera determina la transmisión, absorción y reflexión de la energía solar que llega y la radiación terrestre que sale, lo mismo que la distribución dinámica de la energía con la latitud. El balance energético resultante determina la temperatura de la superficie. Los ciclos biogeoquímicos del azufre (un componente crítico de las nubes y de la mayoría de los aerosoles), y del carbono que son importantes gases de traza y el ciclo del nitrógeno son importantes en la conformación de las propiedades radiativas de la atmósfera. Los ciclos de estos tres elementos son seriamente perturbados por la actividad humana.

El balance global neto del calor es afectado por la absorción de la radiación infrarroja, la radiación solar dispersa y la reflexión de la radiación solar. La absorción de la radiación infrarroja es afectada por la concentración de (1) vapor de agua, nutrido por la evaporación de los cuerpos de agua y la evapotranspiración de las plantas y el suelo, (2) metano, nutrido por los organismos anaerobios, (3) óxido nítrico, desprendido por las bacterias denitrificantes, el dióxido de carbono derivado de la fotosíntesis y de la combustión asociada a la industria, y los (5) CFC de variados usos industriales y domésticos. La radiación solar dispersa es afectada (6) por las partículas de aerosol que también contribuyen a formar Núcleos de Condensación de las Nubes. La combustión asociada a la industria contribuye con gases reactivos de azufre.



La reflexión de la radiación solar es afectada por (7) el albedo de las nubes. Este repaso breve sobre algunos de los aspectos básicos del problema sirve para mostrar su naturaleza sisté-

mica y cómo el estudio especializado de un componente no alcanza para describir su rol como actor mancomunado de un conjunto.

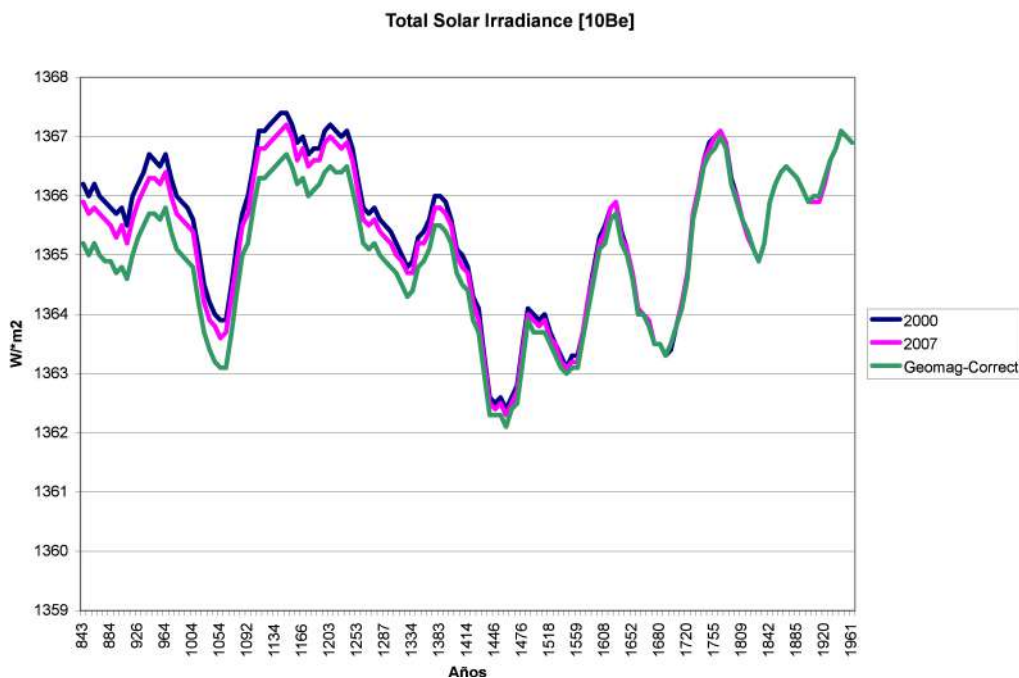


Figura 3: Variación de la irradiancia solar derivada del estudio de la concentración de <sup>10</sup>Berilio en el hielo antártico (Bard *et al.* 2000, 2007 y corregido por geomagnetismo Yang *et al.* 2000). El <sup>10</sup>Be es un isótopo radiactivo del berilio. Se forma por un proceso llamado espalación\* por los rayos cósmicos. Tiene una vida media de 1,5 x 10<sup>6</sup> años y emitiendo partículas beta decae a <sup>10</sup>Boro que es estable.

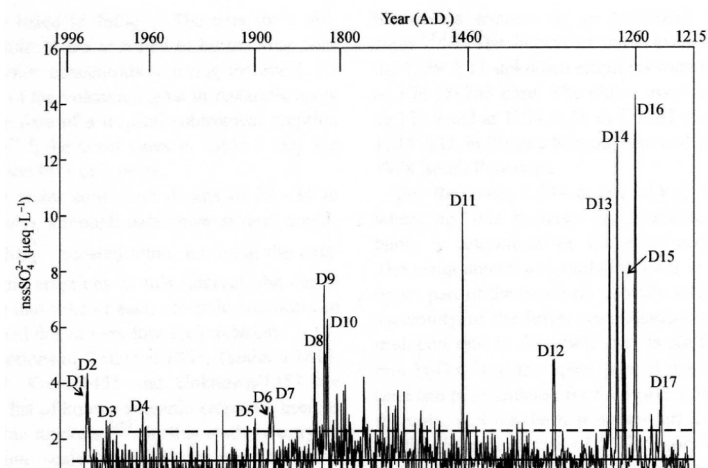


Figura 4: El “motor” o “forzador” volcánico registrado por la concentración de sulfatos no-marinos en el hielo antártico. Los datos graficados por debajo de la línea de guiones se consideran como “sulfatos marinos” parte del aerosol oceánico (Zhou *et al.* 2006, modificado).

\* La espalación es un proceso por el que uno o varios fragmentos de material son expulsados de un cuerpo debido a un impacto o a su fatiga.



## El calentamiento global

¿A qué se debe el calentamiento global producido por la humanidad? Ese calentamiento se debe a un aumento artificial del efecto invernadero natural de la Tierra por el agregado de gases de invernadero (transparentes a la luz y opacos al calor) como el vapor de agua y los gases de traza (así llamados porque suman menos del 1% de la atmósfera), como el dióxido de carbono, metano, ozono y los cloro-fluoro-carbonos). La concentración de estos gases en la atmósfera crece y ésta es una señal de alarma ya que en los últimos 160.000 años, la temperatura global varió en consonancia con la concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera.

Dentro de la atmósfera hay gases con propiedades radiativas importantes, como el vapor de agua, el dióxido de carbono, metano y óxido nitroso y los artificiales CFC. Estos gases generados por varios procesos naturales y humanos afectan los ciclos del agua, el carbono, el nitrógeno y los halocarbonos mientras que absorben radiación infrarroja en la atmósfera cambiando su balance de calor (la magnitud del efecto invernadero). Otros importantes procesos que afectan al clima son los aerosoles y la formación de nubes y parecen estar dominados por el ciclo del azufre. En efecto, los gases de azufre son oxidados a ácido sulfúrico en la atmósfera formando nuevas partículas de aerosol. Algunos tienen efectos radiativos directos y actúan como núcleos de condensación

de las nubes produciendo nubes y afectando su albedo. Por ello, el ciclo del azufre determina las propiedades de la radiación de onda corta de la atmósfera y los ciclos del agua, carbono, nitrógeno y los halocarbonos de traza determinan las propiedades de la radiación de onda larga.

Sabemos que, con la parcial excepción del ciclo del agua, todos los ciclos han sido alterados por la actividad humana y que todos estos ciclos están ligados entre sí en varias formas. El cambio climático del que puede responsabilizarse a la humanidad es el *aumento artificial* del "efecto invernadero" natural de la Tierra. El efecto invernadero (Fig. 5), al modo de los invernaderos de los agricultores y floricultores, mantiene un ambiente cálido en el planeta, con una temperatura media global de 16 °C. Sin este efecto, la temperatura global de la Tierra sería de 18 °C bajo cero. A esta temperatura no habría agua líquida en el planeta, un componente indispensable para la existencia de la vida.

### ¿Qué actividades humanas son responsables del calentamiento global?

*La Revolución Agrícola.* Esta expresión incluye: (a) la *revolución neolítica* ocurrida alrededor de 10.000 años AP. que fue la transición inicial de la caza y recolección trashumante a la agricultura sedentaria; (b) la *revolución agrícola ára-*

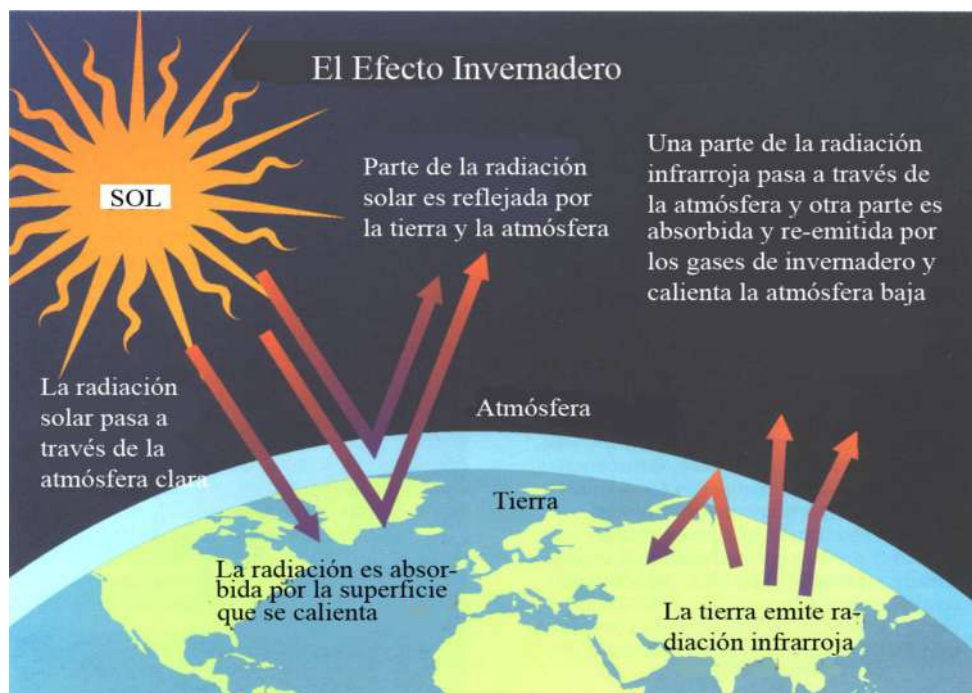


Figura 5: La Tierra intercepta una pequeña parte de la energía emitida por el Sol. Parte de ésta es reflejada por la tierra y la atmósfera. La energía, especialmente infrarroja, emitida por la Tierra y que no logra atravesar la barrera de los gases de invernadero es reflejada nuevamente a la Tierra donde calienta la superficie y la atmósfera baja (USGCRP 1996, modificado).



be ocurrida entre los siglo VIII y XIII de nuestra era que transformó la agricultura mediante la difusión de cultivos a través del mundo islámico, la preservación del suelo y la distribución equitativa del agua de riego<sup>2</sup>; (c) la *revolución agrícola británica* de los siglos XVII a XIX, que incrementó la productividad agrícola ayudando a producir la revolución Industrial; (d) La *revolución agrícola escocesa* de los siglos XVIII y XIX que causó la deforestación de las tierras bajas; (e) la *revolución verde* (1943 a la década de 1970) que, con investigación y transferencia de la tecnología, incrementó la agricultura industrial en la India y otros países en desarrollo. Todas estas revoluciones tienen en común haber extendido el cultivo de plantas y la cría de ganado reemplazando bosques por pasturas y cultivos, pero también haber generado un aumento del CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub>.

La *Revolución Industrial* (desde el Siglo XVIII) usa energía para producir y operar las máquinas. La energía se obtiene desde entonces de la combustión de leña, carbón, gas y petróleo. La combustión inyecta en la actualidad miles de millones de toneladas de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Desde 1929 también se inyectaron CFC, los “gases ideales” desarrollados inicialmente para proteger la vida de los obreros de la industria frigorífica (Fig. 6).



**Figura 6:** La deforestación tiene numerosos efectos negativos sobre el ambiente. En términos del efecto invernadero, agrega 1,6 Gt de carbono a la atmósfera cada año.

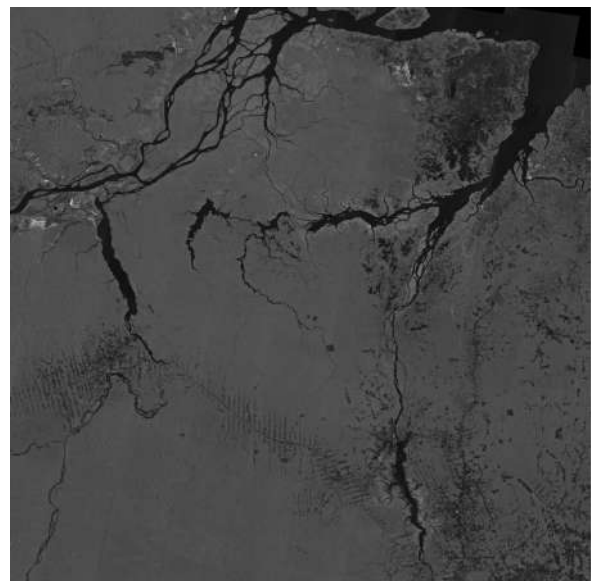
La *industria de la madera* daña la cubierta vegetal del planeta cuando fomenta la deforestación. Ésta inyecta unos mil seiscientos millones de toneladas de carbono a la atmósfera que aumentan artificialmente el efecto invernadero. También es responsable de la pérdida de biodiversidad de 137 especies por día. La práctica del “clear-cut” consiste en remover todos los árboles de un área dada y tiene efectos similares a la deforestación (Fig. 7).

<sup>2</sup> Aún existe en Valencia el Tribunal del Agua creado durante la ocupación árabe de la Península Ibérica hasta 1492.



**Figura 7:** La práctica del “clear-cut” en un bosque de coníferas de la Península Olímpica, en el Noroeste del Estado de Washington en los Estados Unidos.

La *fragmentación de ecosistemas* es ejemplificada por la explotación maderera de la selva lluviosa tropical de Brasil, la que se muestra en la Fig. 8. El encharcamiento de las huellas de los camiones conecta entre áreas anteriormente separadas que pueden crear condiciones favorables para la conversión de microorganismos normales de un lugar en agentes patógenos en otros. Las imágenes captadas por radares satelitales muestran la dramática extensión de estas explotaciones del más importante de los “pulmones” de nuestro planeta.



**Figura 8:** Imagen de radar satelital de las proximidades de la desembocadura del Río Amazonas en el Océano Atlántico. El radar omite la vegetación pero describe el contenido de agua del suelo. Las marcas similares a peines que se ven en varios sectores de la imagen son las huellas anegadas dejadas por los camiones que transportan la madera a los centros de distribución y comercialización (Imagen de NASDA).



La enorme población vacuna desarrollada para satisfacer la industria de la carne se ha convertido en una fuente importante de gas metano, un gas de invernadero que es 25 veces más poderoso que el dióxido de carbono. También algunas áreas anegadas ofrecen nuevos hábitats para bacterias metanogénicas (Fig. 9).



Figura 9: Concentración de vacunos para engorde en Coalinga (California, USA), destinados a la industria de la alimentación. Los vacunos son grandes productores de metano por flatulencia y regurgitación.

### ¿Dónde pueden verse los efectos del calentamiento?

La dramática reducción de la superficie helada del Polo Norte entre 1979 y 2003 es una prueba del aumento de la temperatura. Este Polo responde rápido al calentamiento porque el casquete glacial es una capa de hielo que flota en el mar en contraste con el hielo antártico que se apoya sobre un continente (Fig. 10).



Figura 10: Extensión del casquete de hielo del Polo Norte en 1979 (línea roja) y en 2003 (Imagen de NASA).

La aceleración del desprendimiento de “estantes” costeros del hielo antártico es otra evidencia del calentamiento. Éstos son masas de hielo flotante procedentes del interior de un continente (Antártida, Groenlandia y Canadá) a medida que la masa de hielo continental fluye hacia el mar. Los estantes se desprenden formando enormes témpanos (Fig. 11). El estante Wilkins desprendido de la Antártida en Abril de 2009 tiene el tamaño de Jamaica.

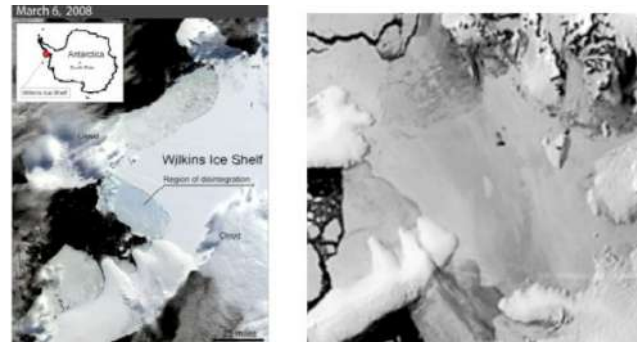


Figura 11: Imágenes satelitales del Estante Wilkins. A la derecha, Enero de 1996, a la izquierda, Marzo de 2008 (Imagen: [http://nsidc.org/data/iceshelves\\_images/wilkins.html](http://nsidc.org/data/iceshelves_images/wilkins.html)).

Otro testimonio dramático del calentamiento es el retroceso de los frentes glaciares. En la Argentina se aprecia en aquellos que drenan desde la Cordillera a la Patagonia en la Provincia de Santa Cruz (Fig. 12) (Fig.13).



Figura 12: Frente del Glaciar Upsala<sup>3</sup> al oeste del Lago Argentino (Provincia de Santa Cruz). Este glaciar ha perdido 13,4 km cuadrados de su masa en siete años. Algunos de sus afluentes son ahora glaciares “colgados” debido al retroceso del Upsala (foto D’Antoni, Noviembre de 2007).

A estas evidencias del calentamiento global puede agregarse el derretimiento de los suelos permanentemente helados, “Permafrost” de Siberia que está destruyendo la estupenda colección de restos de la fauna extinguida del Pleistoceno y que se habían conservado intactos en el suelo helado. Asimismo se destruyen las tumbas de los escitas,

3 Uppsala escrito con una sola p es el antiguo formato, usado por la Universidad de Uppsala que realizó investigaciones en ese glaciar.



**Figura 13:** El Glaciar Seco, que en el pasado fue afluente del Upsala y actualmente se halla a unos 3 km de la zona de ablación de éste y “colgado” por su propio retroceso (foto D’Antoni, Noviembre de 2007).

pueblo de la antigüedad de origen iraní de pastores nómades y criadores de caballos de monta. La arqueología descubrió montículos funerarios de los escitas en Ucrania y sur de Rusia (Fig. 14).



**Figura 14:** Investigadores suizos tratan de rescatar información de las tumbas de los escitas que se están destruyendo por el deterioramiento del permafrost siberiano. (Curry 2009).

El ascenso del nivel del mar hace que el batir de las olas llegue a niveles más altos en la costa de Groenlandia destruyendo los testimonios del poblamiento Thule, con una antigüedad de 2.000 años (Fig. 15).

El viaje de los ancestros de los indígenas americanos que entraron al continente por el istmo que se formó entre Siberia y Alaska con el descenso del nivel del mar durante la última glaciación del Pleistoceno fue la etapa final de un proceso de migración y colonización que se inició un millón y medio de años antes. El desplazamiento continuo hacia el norte y hacia el este de los grupos de cazadores y recolectores extendió el rango de la ocupación humana del planeta desde las sabanas tropicales del sur y este de África a las frías y secas estepas de la tundra del norte de Asia (Fiedel 1999). La última etapa de este proceso, el poblamiento de América por asiáticos de los



**Figura 15:** Restos de la cultura de los Thule en la costa de Groenlandia que se van destruyendo por el ascenso del nivel del mar (Curry 2009).

alrededores del Lago Baikal a través del istmo de Bering dejó huellas que se están destruyendo. Los asiáticos caminaron detrás de sus presas pero sólo quedan testimonios de su paso en la costa de algunas islas de California. El actual ascenso del nivel del mar está destruyendo esos testimonios milenarios del poblamiento de América (Fig. 16).



**Figura 16:** Los restos del poblamiento de América por los asiáticos de los alrededores del Lago Baikal (Siberia) que cruzaron por el istmo que ocupaba el actual estrecho de Bering cuando el nivel del mar era más bajo, dejaron sus restos en la costa de algunas islas californianas que sufren acelerada erosión debido al ascenso del nivel del mar (Curry 2009).



En Europa occidental, el ascenso del nivel del mar está empezando a amenazar sitios de gran valor histórico y cultural para nuestra civilización. Así, en Diciembre de 2008 Venecia se inundó y el agua llegó a niveles de 1,5 metros en el centro histórico de la ciudad. Lejos de ser un fenómeno aislado, la Plaza de San Marcos se inundó 200 veces en el año 2010 (Fig. 17).



**Figura 17:** La Plaza de San Marcos en Venecia (Italia) se inundó (Acqua alta) 200 veces durante el año 2010 (Giancarlo Rossi 2010).

En el otro extremo del cambio, la acentuada aridización del Sudán acelera la erosión de las famosas figuras amarillas de 2.000 años de antigüedad, que se conectan con las tradiciones culturales del antiguo Egipto (Fig. 18).



**Figura 18:** La mayor aridización del Sudán acelera la erosión de las “figuras amarillas”, tesoros de la arqueología del antiguo Egipto. (Foto de Osman Elkhair, Khartoum Sudan e Imad-eldin Ali, Monterey California).

Así, el calentamiento produce el derretimiento de los hielos polares, de los glaciares de montaña y del permafrost. Es necesario ser cautos en el uso de esta evidencia ya que la dinámica de los glaciares es un problema complejo en el que los casos particulares son relevantes. Con el derretimiento

del hielo glacial, esa “agua indirecta” retenida en los continentes vuelve al mar y sube su nivel, dañando diversos tipos de materiales y asentamientos costeros actuales, arqueológicos y paleontológicos. La aridización causada por el mismo calentamiento sustrae tierra arable a la agricultura y rompe testimonios culturales de la humanidad, como los de Sudán.

## Predicción del calentamiento global

La primera predicción del cambio climático debido a las actividades humanas fue hecha por el químico sueco Svante Arrhenius en 1896. Arrhenius señaló que las actividades relacionadas con la Revolución Industrial aumentaban la cantidad de dióxido de carbono que se introducía en la atmósfera. Pensó que la concentración de dióxido de carbono seguiría aumentando con el creciente consumo de combustibles fósiles, especialmente carbón. Su comprensión del papel del dióxido de carbono en el calentamiento global le permitió predecir que la temperatura de la Tierra se elevaría varios grados más si la concentración de dióxido de carbono de la atmósfera aumentaba al doble. Nadie prestó atención a las predicciones de Arrhenius, porque a fines del siglo XIX no parecían tener consecuencias inmediatas para la población humana.

Arrhenius se refería a la posible modificación del “efecto invernadero” (Fig. 5), por el cual la radiación solar de onda corta pasa a través de la atmósfera pero la radiación infrarroja de onda larga emitida por las superficies calentadas de la Tierra es parcialmente absorbida y reemitida hacia la superficie por varios gases (especialmente vapor de agua y dióxido de carbono) que se encuentran en la atmósfera. La ruptura del equilibrio entre la radiación infrarroja que sale y la radiación solar que entra, produce un calentamiento mayor de la atmósfera y de la superficie terrestre. En nuestro tiempo, el efecto invernadero tiene un componente natural y otro debido a las actividades humanas. El efecto natural, hace que la temperatura media de la Tierra sea unos 34 °C más alta de lo que sería, en ausencia de los gases de invernadero. Por su parte, el efecto invernadero aumentado por las actividades humanas produce un ascenso adicional de la temperatura media de la superficie terrestre. Este calentamiento global puede producir cambios indeseados en las precipitaciones, tipos de tormentas y nivel de los océanos.

Un siglo después de las predicciones de Arrhenius el dióxido de carbono sigue aumentando y es posible que a mediados del Siglo XXI su concentración atmosférica sea el doble de la que existía en la última década del siglo XIX. El crecimiento de la industria que se produjo al fin de la Segunda Guerra Mundial aceleró el aumento en la concentración de dióxido de carbono de la atmósfera. A medida que crece la probabilidad de un cambio atmosférico considerable, se aplican nuevos modelos computacionales al estudio del clima. Estos modelos tienen en cuenta los procesos naturales que



constituyen el problema total. Los modelos incluyen el efecto “amplificador” o de realimentación que causa más efectos atmosféricos en respuesta al calentamiento iniciado por el aumento de la concentración de dióxido de carbono. Además de la humedad y el efecto de las nubes, estos modelos tienen en cuenta el papel de la vegetación, en el control de la cantidad de dióxido de carbono que va a la atmósfera. La vegetación “captura” dióxido de carbono y tiene otros efectos sobre el clima. Las plantas calientan o enfrían el aire que las rodea (por la reflexión y absorción de la radiación solar y por evaporación del agua), reducen la fuerza de los vientos de superficie, toman y liberan humedad del aire (afectando el ciclo hidrológico). A su vez, los cambios climáticos afectan el crecimiento de la vegetación. Por ejemplo, los bosques templados podrían ser incapaces de ajustarse al calentamiento relativamente rápido que se ha predicho para algunos climas. Los científicos consideran que con un calentamiento lento los bosques del norte de América del Norte se desplazarán lentamente hacia condiciones más favorables y que los límites meridionales cederán lugar a pastizales más adaptados a condiciones más cálidas. Sin embargo, con tasas de calentamiento muy rápidas, la pérdida del lado sur será más extrema y la migración hacia el límite norte no podrá compensar las pérdidas del sur (Fig. 19) (Fig. 20).

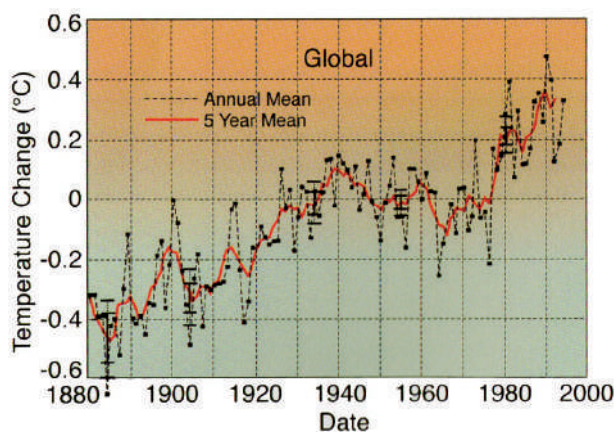


Figura 19: Cambios de Temperatura entre 1880 y 1996. La línea negra muestra los datos anuales y la roja el “smoothing” por promedio móvil de 5 años (USCGRP 1996).

También deben considerarse otros efectos de realimentación. En condiciones normales las hojas de las plantas incorporan dióxido de carbono del aire y liberan humedad al aire como parte del proceso de la fotosíntesis. La liberación de humedad por evapotranspiración enfría el aire mientras que el aumento de dióxido de carbono en la atmósfera puede modificar la tasa de intercambio del carbono y del agua. Esto podría reducir las tasas de evaporación y aumentar el calentamiento continental de verano. Sin plantas, la tierra y el aire se calentarían más.

## Los gases del “efecto invernadero”

Los gases que producen el efecto invernadero son vapor de agua, dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, ozono troposférico y clorofluorocarbonos (CFC). Excepto el vapor de agua, son gases de traza porque en el presente sólo hay trazas de ellos en la atmósfera (menos del 1% en la composición del aire), pero la actividad humana está haciendo crecer rápidamente su concentración. Por otra parte, los principales gases de la atmósfera, nitrógeno (N) y oxígeno (O), son transparentes tanto a la radiación solar que entra como a la radiación calórica que sale de la tierra de modo que tienen poco o ningún efecto en el calentamiento por efecto invernadero (Fig. 21).

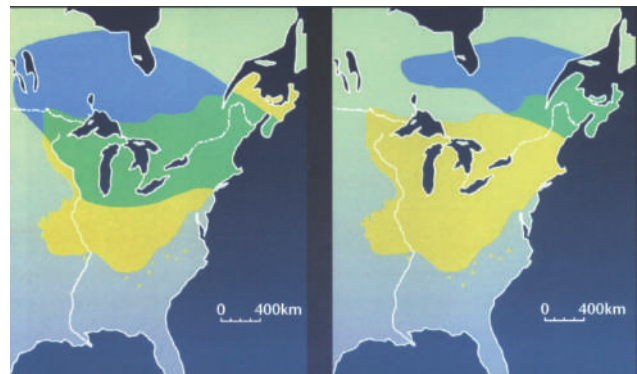


Figura 20: Desplazamientos del arco de azúcar. Área actual (amarillo), desplazamiento previsto (azul) y superposición (verde). Con un aumento de temperatura se obtiene la figura de la izquierda; con aumento de temperatura y reducción de la humedad se obtiene la figura de la derecha (NASA).

El dióxido de carbono es el más abundante de los gases de invernadero en la actualidad. Su concentración en la atmósfera ha crecido un 25% desde fines del siglo XIX. Por el aire atrapado en las muestras columnares de hielo en Groenlandia y la Antártida, sabemos que la concentración de dióxido de carbono, era de alrededor de 280 partes por millón (ppm) del aire total antes de la Revolución Industrial y de 350 ppm en 1996. Su tasa de incremento actual es casi 0,5% por año. Con este incremento, el dióxido de carbono atmosférico se duplicará en 140 años. Conocemos la causa de este aumento: casi todo se debe al uso de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural). Una fuente secundaria es la deforestación, porque el carbono se acumula en los árboles y cuando se los corta o quema lo liberan a la atmósfera. El quemado libera dióxido de carbono rápidamente como producto de la combustión, mientras que los árboles que se cortan y se dejan descomponer liberan dióxido de carbono más lentamente, a través de los procesos respiratorios de los microorganismos que se alimentan de la madera. Alrededor del 50 a 60% de este dióxido de carbono permanece en la atmósfera y el resto se acumula en los océanos y las plantas (Fig. 22).

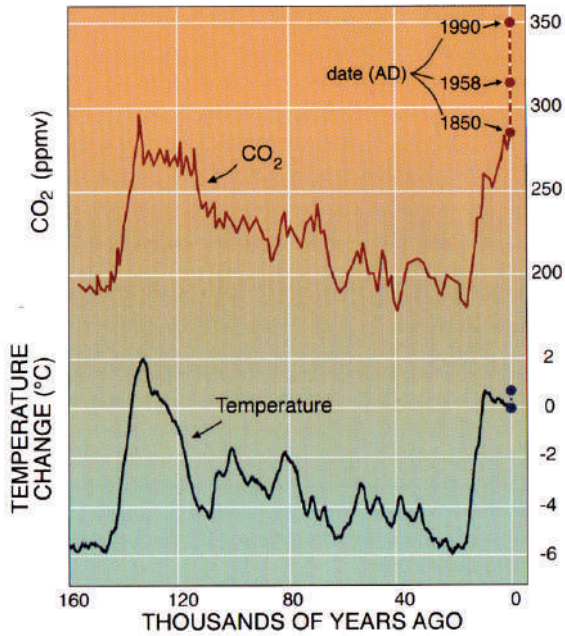


Figura 21: Relación entre la temperatura y la concentración atmosférica de dióxido de carbono en los últimos 160.000 años (USGCRP 1996).

Los otros gases responsables del efecto invernadero están presentes en la atmósfera en cantidades más pequeñas. El 25% de dióxido de carbono adicional, que hemos agregado a la atmósfera en el último siglo es más o menos igual al total del efecto invernadero de todos los otros gases (metano, óxido nitroso, los CFC y el ozono troposférico). Sin embargo, esto está cambiando porque la concentración de los otros gases crece a mayor velocidad que la del dióxido de carbono.

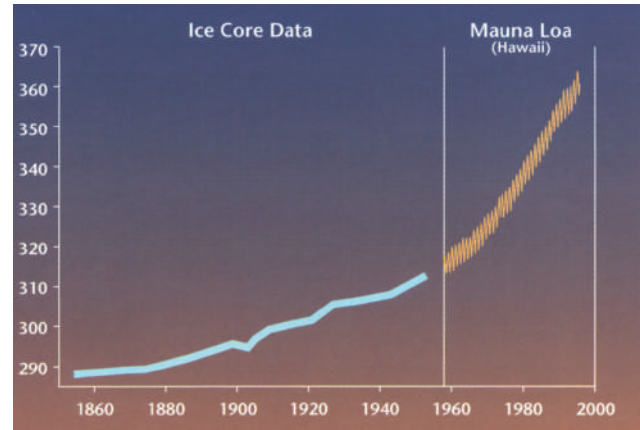


Figura 22: Historia de la concentración de dióxido de carbono (en partes por millón) en la atmósfera reconstruida por análisis del aire atrapado en columnas de hielo fósil de la Antártida y, desde 1957, en el observatorio de Mauna Loa en Hawái (NASA).

El Metano es el siguiente gas en importancia para el efecto invernadero. En la actualidad tiene un efecto equivalente a un 40% del efecto del dióxido de carbono. Se genera por la quema de combustibles fósiles, las bacterias de los pantanos, los arrozales, los terrenos rellenados (donde se entierra basura, por ejemplo), la descomposición del suelo, las termitas, las pérdidas en las líneas de gas, las operaciones mineras de carbón y gas, las regurgitaciones y flatulencias de las vacas, etc. El metano ha aumentado casi el 100% en la atmósfera desde 1800 y está aumentando en la actualidad a una tasa del 1% anual (dos veces más rápido que el dióxido de carbono). La molécula de metano es 20 ó 30 veces más efectiva para atrapar calor que la de dióxido de carbono (Fig. 23).

Los Clorofluorocarbonos (CFC), usados como refrigerantes, solventes y vehículos para los aerosoles aumentan su por-

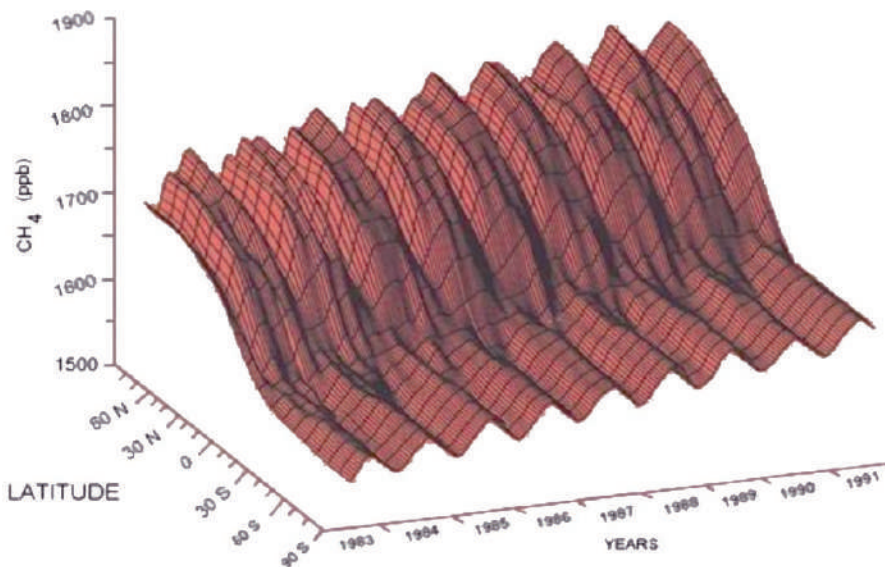


Figura 23: La concentración de metano (en partes por billón) desde el Polo Norte al Polo Sur a lo largo de cada año, entre 1983 y 1991 (imagen del Dominio Público).



**Figura 24: Las usinas que queman carbón para producir vapor que mueve una turbina conectada a un generador producen un alto porcentaje de la energía que consumen muchas naciones (Imagen del dominio público).**

centaje en varias unidades por año y son unas diez mil veces más potentes que el dióxido de carbono para atrapar el calor. En la actualidad son responsables del 15 al 20% del calentamiento global pero si no se los controla, pueden producir el 25% del aumento del efecto invernadero en el próximo siglo. Se están remplazando y su producción está ya prohibida por el Protocolo de Montreal (un tratado internacional destinado a proteger la capa de Ozono estratosférico que también puede ayudar a mitigar el calentamiento global). Desgraciadamente, el freón y otros CFC siguen produciéndose ilegalmente en algunas naciones y ciertos sustitutos de los CFC, los hidroclorofluorocarbonos (HCFC), son también gases de invernadero.

El Ozono troposférico es otro gas de invernadero que se ha hecho importante. Este ozono a nivel del suelo se produce cuando los óxidos de Nitrógeno del quemado de combustibles reaccionan con la luz del Sol. En las áreas urbanas, los automóviles son la fuente principal, pero las plantas de energía y los procesos industriales son también fuentes importantes. El Ozono troposférico es el mayor componente del “smog”. Este es el “ozono malo” y no debe confundirse con el “ozono bueno” de la estratosfera que protege a la Tierra de los excesos de radiación solar ultravioleta. El Ozono troposférico es peligroso para el bienestar de la humanidad a largo plazo porque es un gas de invernadero pero también es responsable, en el corto plazo, de muchos problemas de salud como los desórdenes respiratorios. A este Ozono a nivel del suelo se refieren los avisos locales de “alta contaminación” y “alertas de smog”. Algunas soluciones rápidas a la reducción de los gases de invernadero se presentan incompletas. Es cierto que los transportes públicos utilizan uno o muy pocos motores para transportar gran cantidad de pasajeros en contraste con el clásico de un automóvil-un pasajero durante las horas pico, siempre acompañadas por una cantidad de “smog”. El automóvil eléctrico y los híbridos aparecen como soluciones lógicas que pueden ponerse a funcionar in-

mediatamente. Sin embargo, que el vehículo no contamine no significa que su uso no sea contaminante. La pregunta, ¿De dónde proviene la energía que consume un auto eléctrico? puede tener una respuesta decepcionante como la de la Fig. 24.

En 2005 se cerró la Mohave Power Station (en Laughlin, Nevada), una usina que generaba 1580 mega Watts porque no cumplía con las restricciones ambientales. Era innovadora en el modo de enviar desde las minas en Arizona, el carbón mezclado con agua por un conducto tubular. Su poder de generación podía proveer electricidad a un millón de viviendas normales del sur de California. Sin embargo, sus tasas de contaminación atmosférica estaban por encima de los niveles permitidos por lo que se dispuso la interrupción de sus servicios.

Mientras el auto eléctrico no contamina su ruta, la usina que recarga sus baterías, lo hace. En cuanto a los híbridos, todavía producen dióxido de carbono por la combustión interna de gasolina en sus motores, pero además acumulan electricidad en baterías que al final de su vida útil contaminan el medio ambiente. En su favor vale decir que sus motores de combustión interna son más pequeños y que cuando funcionan a electricidad en el tránsito urbano, la contaminación es cero. Así, aunque los híbridos y los autos eléctricos representan avances tecnológicos importantes, están muy lejos de llegar a la meta de contaminación cero (Tabla I).

## La precipitación ácida

No sólo el calentamiento de la atmósfera baja y sus consecuencias climáticas pueden asignarse al uso de combustibles fósiles. En efecto, la oxidación del nitrógeno en el aire de la combustión ha modificado ampliamente los ciclos naturales del carbono, nitrógeno y azufre particularmente en la vecindad de grandes concentraciones humanas, como las del este de los Estados Unidos, Europa y el Este de Asia. Aunque el cambio del dióxido de carbono atmosférico tiene poco efecto en la composición de la precipitación, los ácidos que contienen azufre y nitrógeno tienen mucha importancia en la composición de la lluvia y la nieve. A su vez, estos ácidos perturban los ciclos del aluminio y otros que tienen importancia en los procesos de meteorización de las rocas y el suelo. Para hacer un modelo simple que cuantifique y explique este fenómeno es necesario comprender la naturaleza química del equilibrio ácido-base de soluciones acuosas, tales como el agua de lluvia y el agua del derretimiento de la nieve. Hace poco que entendimos los fenómenos que controlan el pH del agua de lluvia en el ambiente natural no-contaminado. Estos son los ciclos de los compuestos del azufre y el nitrógeno. Hace falta un modelo del sistema natural, para predecir los cambios que ocurren cuando se introducen ácidos fuertes de azufre y de nitrógeno en la atmósfera, lo mismo que anticipar los efectos complejos del agua de lluvia perturbada sobre otros ciclos biogeoquímicos y procesos ecosistémicos.



Tabla I: Los gases de invernadero en 1750 y en 2003 (Datos: Pidwirny 2006).

Gas de invernadero	Concentración 1750	Concentración 2003	Cambio %	Causas naturales y humanas
Dióxido de carbono	280 ppm	376 ppm	34	Descomposición orgánica, fuegos forestales, Volcanes, uso de combustibles fósiles, deforestación, cambio en el uso de la tierra.
Metano	0.71 ppm	1.79 ppm	152	Humedales, descomposición orgánica, termitas, extracción de gas natural y petróleo, quemado de biomasa, cultivo de arroz, ganadería y relleno de basurales.
Óxido Nitroso	270 ppm	319 ppm	18	Bosques, pastizales, océanos, suelos, cultivo de suelos, fertilizantes, quema de biomasa, quema de combustibles fósiles.
CFC	0	880 ppm	n/a	Refrigeradores, acondicionadores de aire, propelentes de aerosoles, limpiadores, solventes, extintores de incendios, inflado de espumas plásticas, etc.
Ozono	?	Varia con la latitud	Estratosfera ↓ Troposfera ↑	Creado naturalmente por la radiación UV sobre las moléculas de oxígeno. Artificialmente producido por la radiación UV sobre la smog.

## Modelado del calentamiento global

En los últimos 100 años la temperatura global media ha aumentado medio grado centígrado. Para valorar este aumento hay que tener en cuenta que hace unos 21.000 años, en el máximo de la última Glaciación, la temperatura media global era sólo tres a cinco grados más baja que la actual. Sabemos que el cambio es normal en la Tierra pero, el cambio de temperatura que produce la humanidad es alarmante. El problema se agrava por la tendencia creciente de las emisiones de gases de invernadero debida al aumento de la población y del desarrollo tecnológico en todo el mundo. Estados Unidos es el mayor emisor global de gases de invernadero, pero a medida que naciones superpobladas como China e India y otras naciones menos desarrolladas continúen creciendo y se industrialicen, sus emisiones excederán las de Estados Unidos y es posible que los niveles globales de dióxido de carbono se dupliquen entre el 2030 y el 2050. Con esa concentración de dióxido de carbono y otros gases de invernadero, los modelos predicen que el promedio anual de la temperatura de la Tierra subirá entre uno y cinco grados. Esto significa que dentro de 40 años el clima de la Tierra puede ser tan diferente del actual como lo fue en el máximo de la Gran Edad del Hielo, sólo que más cálido en vez de más frío (Fig. 25).

¿Qué significará ese Cambio Global para la humanidad? Algunas consecuencias serán el ascenso del nivel del mar (porque el agua se expande cuando se calienta y por derretimiento parcial del hielo polar antártico y los glaciares de montaña) que puede inundar muchas áreas bajas como la costa de Florida, Bangladesh, amplios sectores de la costa de la Ciudad de Buenos Aires y la provincia homónima y muchos otros asentamientos humanos en las costas de mares. Los cambios climáticos mayores pueden afectar severamente a la agricultura y a otros sistemas que sostienen la vida en el planeta. Como se vio más arriba, muchos lugares del mundo ya están sufriendo estos efectos.

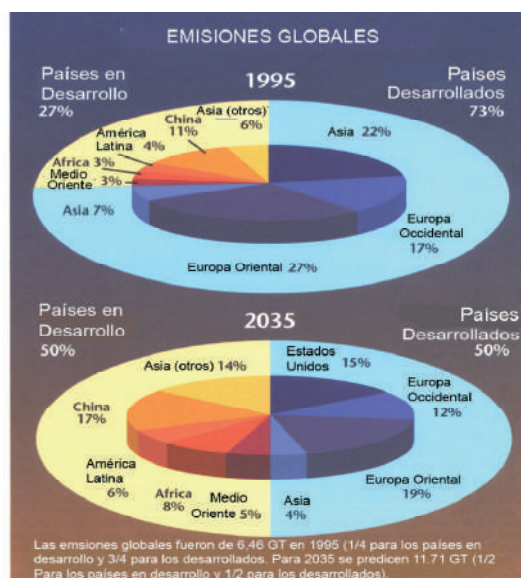


Figura 25: Emisiones globales pasadas y futuras. Arriba, emisiones globales en 1995 por un total de 6,46 GT. Abajo, emisiones globales por un total de 11,76 GT. En 1995, tres cuartas partes de las emisiones se debieron a los países desarrollados y una cuarta parte a los países en desarrollo. Se prevé que en 2035 las emisiones estarán repartidas por mitades en ambos grupos de países.

Para predecir el cambio climático es necesario simular el clima futuro con distintas hipótesis usando modelos computacionales. Una prueba fuerte de la confiabilidad de las predicciones es la capacidad de los modelos para reproducir el clima actual basándose en una o más de las hipótesis propuestas. La física y la química de los procesos que conocemos son componentes esenciales de los modelos. Éstos deben incluir las características de la tierra y los océanos que inciden en la condición de la atmósfera. También tienen que tener en cuenta las características radiativas de los gases que forman



la atmósfera, incluyendo el vapor de agua (el gas radiativo clave), que es muy variable en la atmósfera.

Los registros globales de temperatura de superficie de los últimos 100 años muestran un ascenso de la temperatura global, pero el ascenso fue interrumpido por períodos en que la temperatura descendió. Si los modelos no pueden explicar estas variaciones de la tendencia no podremos confiar en sus predicciones de los cambios por venir. La disminución de la temperatura entre 1945 y 1970 nos hizo suponer que se acercaba una nueva edad del hielo. En cambio, desde la década de 1980 se ha visto un aumento sostenido de la temperatura, lo que parece asegurar que estamos en una etapa de calentamiento global. Este aumento ha sido interrumpido brevemente por erupciones volcánicas de importancia, como la del Monte Pinatubo (Filipinas) en 1991.

Como dijimos, se ha producido un aumento del 25% de dióxido de carbono en la atmósfera, desde las 270 o 280 partes por millón (ppm) de hace 250 años hasta de 350 ppm en la actualidad. El registro de dióxido de carbono en la atmósfera muestra variaciones estacionales. Estas variaciones son más pronunciadas en el hemisferio norte por su mayor superficie continental que en el hemisferio sur. Las variaciones son modificadas también por las interacciones de la atmósfera y la vegetación. En la estación de crecimiento y a la luz del día la vegetación toma dióxido de carbono; a la noche y en la estación de senescencia la vegetación libera dióxido

de carbono. El efecto es más pronunciado en el hemisferio norte porque allí se encuentra la mayor masa de tierra. De modo similar hemos mostrado que el Metano tiene una concentración mayor en el hemisferio norte.

Para entender y predecir los cambios de clima se necesitan modelos de los siguientes tipos:

a) Modelos socioeconómicos que predigan el consumo futuro de combustibles fósiles y el uso de otros combustibles. Las predicciones de estos modelos dependen de los métodos de producción industrial, de la eficiencia en el uso de la energía, de los nuevos materiales, de las políticas públicas, de la preocupación social por el ambiente y el desarrollo económico, del nivel de vida y de la dependencia social del uso de energía y de productos químicos.

b) Modelos físicoquímico-biofísicos que muestren qué pasa con los gases de invernadero en la atmósfera, por ejemplo, cuánto dióxido de carbono es capturado por los océanos y la biosfera y cómo los procesos químicos (agrícolas) y naturales de la superficie de la Tierra afectan la entrada en la atmósfera del metano, los óxidos de nitrógeno y otros gases de invernadero.

c) Modelos océano-atmósfera que expliquen como responde el sistema climático a los cambios de composición química de la atmósfera (Fig. 26).

Para desarrollar y verificar los modelos de clima es necesario adquirir, compilar y analizar buenos datos climáticos. Los datos que se adquieren con el Sistema de Observación

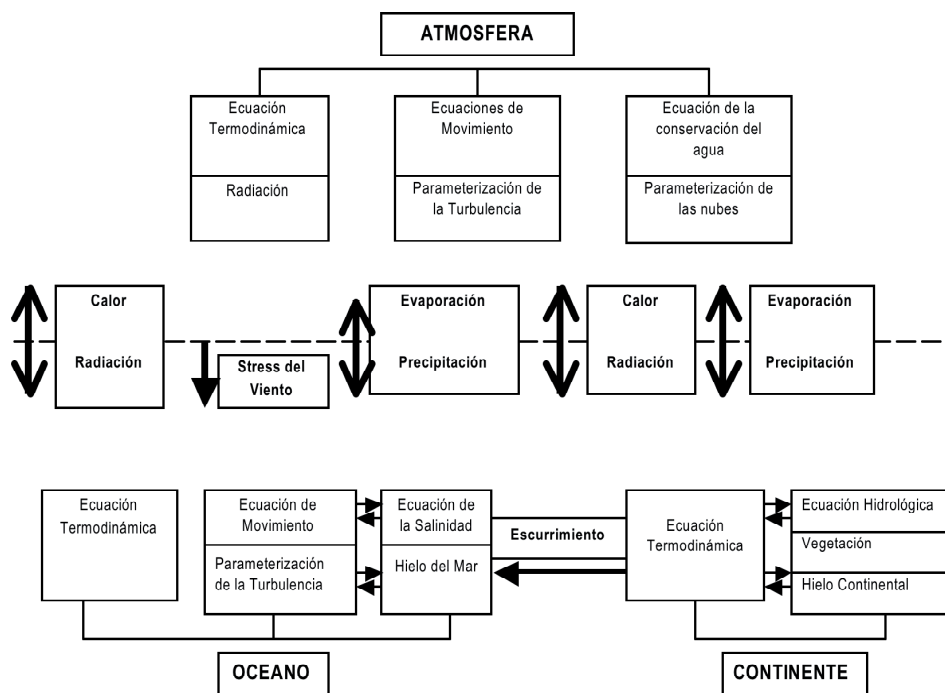


Figura 26: Esquema de un modelo global del clima. En la sección superior (Atmósfera) se incluyen la radiación, la turbulencia y las nubes. En la sección media se ven los fenómenos naturales que conectan la atmósfera con el océano y la tierra: Calor sensible y radiación, stress del viento, evaporación y precipitación. En la sección inferior, Océano y Continente se conectan a través del escurrimiento (según Hartmann 1994, modificado).



de la Tierra (EOS), son muy precisos e intercomparables y se recogerán durante largo tiempo. Es difícil obtener predicciones confiables de los modelos porque todavía no se entienden muchos procesos secundarios. Por ejemplo, ¿Cuándo comienza a elevarse la temperatura por efecto radiativo directo del aumento de dióxido de carbono? ¿Aumentarán o disminuirán las nubes? ¿Dejarán pasar más o menos radiación solar?

El efecto radiativo directo de la duplicación del dióxido de carbono es relativamente pequeño y no hay muchas discrepancias entre los modelos respecto de este asunto. En cambio, hay conflicto respecto a los efectos secundarios o de realimentación. Los modelos que predicen un calentamiento muy grande por el dióxido de carbono muestran cambios en la cobertura de nubes que amplifican mucho los efectos de calentamiento mientras que los modelos que predicen calentamientos más modestos muestran que las nubes tienen poco efecto o efecto negativo sobre el calentamiento.

¿Es posible equiparar la observación de las tendencias de la temperatura con las predicciones de los modelos? El registro de la temperatura de los últimos 100 años muestra un aumento de 0,5 °C. Sin embargo, la tendencia hacia el calentamiento no es enteramente consistente con el aumento de dióxido de carbono. La mayor parte del aumento de la temperatura ocurrió antes de 1940 y después la tierra empezó a enfriarse hasta comienzos de la década de 1970 en que comenzó nuevamente el calentamiento. El dióxido de carbono, por otra parte, aumentó constantemente durante el último siglo. Otros factores que pueden haber afectado al clima en ese período incluyen cambios en la energía solar que llega a la Tierra, el enfriamiento provocado por los aerosoles volcánicos y la posibilidad que el dióxido de azufre y otros contaminantes puedan haber afectado la cantidad de radiación solar que se refleja nuevamente al espacio. Algunos de estos efectos causan un enfriamiento y podrían contrarrestar el calentamiento debido al dióxido de carbono y a otros gases de invernadero. Todos estos efectos deberían tenerse en cuenta y ser correctamente modelados para predecir los cambios que podrían esperarse en el próximo siglo.

## Investigación del efecto invernadero

En las últimas décadas, la NASA ha realizado varias misiones satelitales para obtener datos del balance de la energía de la Tierra, que son críticos para entender el efecto invernadero. También desarrolló numerosos modelos climáticos que utilizan esos datos para explicar el sistema y finalmente predecirlo. El Modelo de Circulación General (GCM) creado en el Instituto Goddard para Estudios del Espacio (GISS) de la NASA en la Ciudad de Nueva York es uno de ellos. Los GCM usan computadoras muy rápidas para resolver las ecuaciones básicas de los procesos que controlan los movimientos atmosféricos. Mediante esos modelos el GISS predijo que la temperatura global anual alcanzaría un récord en los primeros tres años de la década

de 1990. El récord se produjo en 1990. Sin embargo, en junio de 1991, el volcán del Monte Pinatubo entró en erupción e inyectó 25 a 30 millones de toneladas de dióxido de azufre en la estratosfera. Allí, el dióxido de azufre reaccionó con el vapor de agua para producir un halo de gotitas de ácido sulfúrico de gran duración. El GISS insertó esta información en sus modelos, estimó la cantidad de radiación solar bloqueada por el aerosol del Pinatubo y predijo que la temperatura global descendería 0,3 °C. Las predicciones se cumplieron con exactitud. Aunque estas predicciones son estimulantes, la mayoría de los científicos está de acuerdo en que hay que mejorar los modelos climáticos para lograr predicciones realmente confiables.

## Problemas a resolver

No se sabe cómo responderá el clima ante los problemas potenciales mencionados más arriba. Hay aspectos de asunto que no podemos predecir con precisión ya que a medida que el clima se hace más cálido los “efectos de realimentación” que influyen sobre el clima pueden tomar formas o magnitudes inesperadas. Estos efectos pueden ser positivos o negativos, es decir, produciendo un enfriamiento o agregando calor. El rol de las nubes es una de las mayores incógnitas. No sabemos si la cubierta de nubes aumentará o disminuirá como resultado del calentamiento global o cuánta luz solar pueden reflejar las nubes hacia afuera del planeta. No sabemos si las nubes actuarán como un estabilizador o como un amplificador. Otra gran incógnita es la respuesta de los océanos al calentamiento.

En la actualidad hay evidencias inequívocas del efecto invernadero aumentado en el registro de la temperatura y otras variables climáticas, pero si esperamos a tener todas las certezas antes de actuar es posible que lleguemos tarde para reducir efectivamente los efectos indeseables del calentamiento. Por ello, muchos climatólogos piden que se actúe ya. No tiene sentido aumentar las concentraciones de gases que se cree que tienen un efecto importante. Se pueden solucionar problemas para gases como los CFC, pero no habrá una solución para el dióxido de carbono si no salimos de una economía basada en el uso de combustibles fósiles. Se pueden reducir las emisiones y postergar el calentamiento del invernadero mientras se lo investiga y entiende mejor.

La mitad de los cambios necesarios pueden lograrse con cambios de la conducta e inversiones relativamente pequeñas para el presupuesto familiar: la simple conservación y uso eficiente de la energía. Apagar las luces, estufas y acondicionadores de aire en las habitaciones que no se ocupan, usar menos el automóvil y cuando es posible compartir los viajes, usar automóviles con mejor kilometraje por litro de combustible o mejorar la aislación térmica de los lugares de trabajo y las viviendas son soluciones que están al alcance de la mano.