



Cambio Climático Global

La vida ha prosperado en la Tierra durante casi cuatro mil millones de años. En ese tiempo, el clima ha sufrido fluctuaciones drásticas, desde glaciaciones que han durado decenas de miles de años hasta épocas de calor húmedo. Diversas especies se han beneficiado, otras se adaptaron, decayeron o perecieron.

Actualmente el ser humano podría poner en peligro su propio nicho ecológico con la amenaza del calentamiento global. Los productos gaseosos de la civilización, en la forma de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono, han atrapado en la atmósfera el calor suficiente para elevar medio grado centígrado la temperatura atmosférica promedio de la superficie terrestre durante este siglo. De persistir esta tendencia, podrían alterarse los patrones climáticos en todo el mundo, o bien podría no suceder nada. El clima mundial depende de una combinación de factores que interactúan de forma sutil y compleja y no alcanzamos todavía a comprenderlo del todo. Es posible que el calentamiento observado durante este siglo sea resultado de variaciones naturales, aunque el incremento ha sido mucho más rápido que el atestiguado por el planeta durante los últimos cien siglos. Por otra parte, quizás no sean exactas las simulaciones realizadas con supercomputadoras para proyectar las condiciones futuras.

En 1995 el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), bajo auspicios de Naciones Unidas, concluyó tentativamente que “las pruebas en su conjunto indican que el hombre influye de manera ostensible en el clima mundial”. El grupo señaló que se desconoce el grado de influencia debido a “ las dudas que aún imperan con respecto a factores clave”, incluida la medida en que las nubes y los océanos inciden en los cambios térmicos. Mientras aún las consecuencias específicas de la actividad humana son inciertas, la capacidad del hombre de alterar el equilibrio atmosférico es indiscutible.

Tan solo 18.000 años atrás la Tierra sufrió un período de glaciación en el cual los glaciares alpinos se extendieron por valles, río abajo, y amplias superficies de América del Norte y Europa fueron cubiertas por escudos de hielo. Los glaciares avanzaron tal vez en diez ocasiones en los últimos dos millones de años para volver luego a retirarse. La figura 2 muestra la posición de las isothermas de la superficie oceánica en ese período y en la actualidad. Por ello algunos científicos creen que aún nos encontramos en una era de hielo, aunque en su parte más cálida.

Actualmente los glaciares cubren tan solo el diez por ciento de la superficie terrestre, con un volumen estimado en 25 millones de kilómetros cúbicos. En el caso hipotético del total derretimiento de los hielos el nivel oceánico se incrementaría en 65 m. Tan solo un aumento de algunos grados de temperatura podría ser suficiente para elevar el nivel en aprox. 50 cm., inundando tierras bajas costeras.

Para analizar los cambios climáticos de los últimos tiempos y los predecir los que están por venir es esencial el estudio paleoclimático, es decir, el estudio del clima a lo largo de la existencia del planeta.

El estudio de la evidencia geológica dejada atrás por el avance y retiro de los glaciares es uno de los factores que sugieren que el clima global a sufrido lentos pero continuos cambios. Para la reconstrucción de climas pasados debe ser rejuntaada toda la evidencia posible. Sin embargo esto sólo nos lleva a un entendimiento general del clima.

Otra evidencia de cambio climático global proviene de las muestras tomadas en los sedimentos del fondo oceánico y de hielo de Groenlandia. El sedimento contiene restos de organismos de carbonato de calcio que alguna vez vivieron cercanos a la superficie. Debido al hecho de que algunas especies sólo viven en determinados rangos de temperaturas, estos restos son indicadores de la temperatura superficial del agua.

Por otra parte, la relación de los diferentes isótopos de oxígeno en estos organismos brinda información sobre el avance de los glaciares. El agua de mar está compuesta mayormente por 8 protones y 8 neutrones, lo que le da un peso molecular de 16. Sin embargo uno de cada

mil átomos de oxígeno contiene 2 neutrones en exceso y por lo tanto su peso molecular es de 18. Durante la evaporación de agua marina estos últimos tienden a permanecer en el agua por ser más pesados. Por lo tanto, en períodos de glaciación, al ser almacenado más oxígeno 16 en el continente en forma de hielo, los océanos tienen un mayor contenido en oxígeno 18. Una relación mayor oxígeno 18/oxígeno 16 indica un clima más frío y viceversa.

La relación de isótopos de oxígeno también se puede obtener estudiando antiguos núcleos del hielo en Groenlandia y en la Antártida. A menor temperatura de la nieve caída, mayor riqueza en oxígeno 16.

La figura 1 muestra la relación entre la concentración de oxígeno 18 y la insolación en los diferentes períodos glaciales e interglaciales.

Con esta información de fondo se ha logrado la reconstrucción de la temperatura superficial del océano para diversas eras.

Otras fuentes para la estimación de temperaturas en otras épocas son los anillos de crecimiento de los árboles, cuyo grosor depende de las condiciones de la estación en que se formó; los registros naturales de sedimentos lacustres y depósitos edáficos, el estudio del polen en cuevas de hielo, depósitos de petróleo y sedimentos marinos, determinada evidencia geológica y más recientemente, documentos sobre inundaciones, sequías y producción de granos.

Cambios climáticos a través del tiempo:

Durante largos períodos de tiempo, la temperatura media terrestre superó en 8 a 15 °C la temperatura media actual. En ese tiempo los polos no estaban cubiertos por hielo. Estos espacios de clima cálido fueron interrumpidos por varias glaciaciones. La última de ellas ocurrió hace unos 2 millones de años y es llamada Era de hielo o Pleistoceno.

Hace aprox. 65 millones de años la Tierra era más templada que en la actualidad. Hace aprox. 55 millones de años el planeta comenzó a enfriarse y aparecieron los cascos polares, que se acrecentaron con el continuo descenso de temperatura. La nieve se comenzó a acumular, formando glaciares en los valles altos del hemisferio norte. Con la aparición de los hielos continentales hace dos millones de años se marca el comienzo del Pleistoceno, era en la cual los glaciares sufrieron sucesivos avances y retiros sobre grandes superficies de Norteamérica y Europa. Las épocas más templadas entre glaciaciones (de unos 10.000 años) son llamados períodos interglaciales.

El clima alcanzó su mayor enfriamiento hace unos 18.000-22.000 años. En ese momento se estima que los océanos tenían un nivel de 125 m. inferior al actual. Este fenómeno expuso grandes superficies de tierra, como por ejemplo el paso de Bering, que posibilitó la migración humana desde Asia a América del Norte. (Ver figuras 4 y 5)

El hielo se comenzó a retirar hace 14.000 años y la superficie oceánica comenzó un lento ascenso. Luego, hace 11.000 años la temperatura promedio de Europa y Norteamérica sufrió un descenso brusco, revirtiendo la situación. 1.000 años más tarde este período frío sufrió un abrupto final y hace 8.000 años los hielos continentales en esas regiones habían desaparecido. En el período de 6.000 a 5.000 años atrás, la temperatura media global era de 1 °C mayor que la actual. Se trata de un período interglacial, el Holoceno. Es una época conocida como "clima óptimo".

Luego volvió a ocurrir un enfriamiento, los glaciares avanzaron, pero no se llegaron a formar hielos continentales.

La figura 7 muestra hasta a donde avanzaron los glaciares en el hemisferio norte y como se fueron retirando en los posteriores milenios.

Hace aprox. 1.000 el clima del hemisferio norte era relativamente seco y templado. Los viñedos crecían en Inglaterra, indicando veranos secos y cálidos y la ausencia de primaveras frías; y los vikingos conquistaron Groenlandia. Alrededor de 1200 d.C. el clima suave de Europa occidental comenzó a mostrar variaciones extremas. Se sucedieron grandes inundaciones y sequías. Europa sufrió varias hambrunas a lo largo del SXIV. Durante el SXV el

clima se moderó. Sin embargo luego de 1550 d.C. la temperatura descendió y el período es conocido como la pequeña edad de hielo. Los glaciares alpinos crecieron y se desplazaron por los valles. Los inviernos eran largos y duros, los veranos cortos y húmedos. Tanto los viñedos británicos como los vikingos perecieron.

A finales del S XIX, la temperatura media comenzó a ascender. Del 1900 al 1940 la temperatura de la atmósfera inferior subió casi 0,5 °C. Luego siguió un leve enfriamiento durante 25 años. A fines de los años '60 y principios de los '70 el descenso de temperaturas se cortó en el hemisferio norte. En los años '70 y '80 las temperaturas mostraron fluctuaciones en las diferentes regiones con una tendencia general de calentamiento que continuó en los '90, contándose los ocho años más calurosos del siglo desde 1979.

En este siglo la superficie terrestre incrementó su temperatura en 0,6 °C. El calentamiento sin embargo no es uniforme: ha sido mayor en el hemisferio sur y por otra parte fue mayor de noche. (Ver figura 3)

Los cambios de la temperatura del aire tienen como causas principales a la temperatura del aire sobre el suelo, la temperatura sobre los océanos y la temperatura superficial de los mares.

Tomando en cuenta en los registros el calentamiento urbano y correcciones realizadas en las medidas de temperaturas de superficie marinas se obtiene un incremento de temperatura en un rango de 0,3-0,6 °C.

Puede no parecer mucho, sin embargo las catástrofes producidas durante la pequeña edad de hielo se debieron a un descenso en la temperatura media de 0,5 °C.

Posibles causas del cambio climático:

Las razones de los cambios climáticos a lo largo de la historia de la Tierra no han sido completamente comprendidas y aún existen muchas incógnitas. Esto se debe principalmente a la gran cantidad de elementos interrelacionados que forman parte de la determinación de un clima. Las interacciones entre la atmósfera, la corteza y la hidrósfera son extremadamente complejas y ningún elemento de ellas está aislado de los demás.

A continuación presentamos algunas de las teorías de cambio climático.

Mecanismos de retroalimentación:

Debido al delicado balance de energía de la Tierra este puede ser modificado, aún por leves cambios, trayendo consigo una serie de complicados cambios. Existen dos tipos de mecanismos de retroalimentación: positivo y negativo.

Un caso retroalimentación positiva es el que se da durante una época de calentamiento global, en la cual, al aumentar continuamente las temperaturas a lo largo de los años, produce un aumento de evaporación. El vapor de agua absorbe la radiación infrarroja terrestre, reforzando el efecto invernadero. Esto a su vez produce un nuevo aumento de temperaturas, lo cual causa aún más evaporación. El fenómeno llevaría a un aumento ilimitado de la temperatura si no fuera controlado por otros factores, como es el caso en la realidad.

Otro ejemplo es el efecto del albedo. Un aumento en la temperatura produciría el derretimiento de hielos y nieves, lo que reduciría el albedo de la superficie, permitiendo una mayor absorción de radiación solar y con ello un calentamiento global.

La retroalimentación negativa se presenta por ejemplo en un hecho inverso: situándonos en un período de enfriamiento, el aumento de la superficie terrestre cubierta por hielo traería aparejado un mayor albedo y por lo tanto menor radiación absorbida y la acentuación del descenso de temperatura.

Tectónica de placas y orografía:

En el pasado geológico la Tierra sufrió grandes modificaciones. Entre ellas se encuentra el lento movimiento de los continentes y de las placas oceánicas. Según la teoría de la tectónica de placas los continentes actuales formaron hace miles de millones de años un solo gran continente que se fracturó. Sus partes se fueron deslizando sobre la superficie, cambiando la distribución de los continentes y de los lechos oceánicos. Existen hipótesis que sostienen que cuando las masas continentales se encuentran concentradas en latitudes medias y altas, hay una tendencia para la formación de placas de hielo. En ese período la retroalimentación del albedo provocaría un mayor enfriamiento.

El variable arreglo de los continentes puede influir en el movimiento de las corrientes oceánicas, lo que alteraría el transporte de calor de latitudes bajas a altas, ocasionando un cambio en la circulación general de vientos y en el clima de las latitudes medias y altas. Si por ejemplo se cortara el paso a una corriente cálida, como la del Golfo de Méjico, una gran parte del océano Atlántico se vería privado de aguas cálidas. (Ver figura 8)

Los procesos tectónicos pueden influir en el clima de una forma menos directa. La formación de placas oceánicas comienza en las dorsales, donde el magma surge de las profundidades de la corteza, formando el lecho marino al solidificarse. Esta divergencia tiene lugar cuando dos placas oceánicas se separan. En cambio, cuando una placa oceánica choca contra una placa continental, menos densa, se produce la subducción de la primera. El gradiente geotérmico, la presión y el rozamiento entre las masas producen la fusión de las rocas en subducción, las cuales son generalmente rocas calcáreas y volcánicas. Las erupciones volcánicas consecuentes emiten vapor de agua, dióxido de carbono y en menor medida otros gases como dióxido de azufre. Esta formación de gases también se produce en las dorsales oceánicas, antes mencionadas.

Algunos científicos especulan, diciendo que el cambio climático ocurrido a lo largo de millones de años podría estar relacionado al movimiento de las placas y por consiguiente, a la concentración de dióxido de carbono en el aire. Durante períodos de fuerte divergencia se eleva el nivel del océano y simultáneamente crece la actividad volcánica, venteanado grandes cantidades de dióxido de carbono a la atmósfera, acentuando el efecto invernadero.

Variaciones de la órbita terrestre:

Teoría de Milankovitch: A medida que la tierra viaja por el espacio, tres movimientos cíclicos distintos se combinan para producir una variación en la cantidad de energía solar que llega a la Tierra.

El primer ciclo se refiere a los cambios en la forma de la órbita de la tierra alrededor del sol. Esta órbita puede pasar de una forma elíptica a una casi circular. Para pasar de una órbita elíptica a una circular y luego volver a la elíptica toma aproximadamente 100.000 años. Cuanto mayor es la excentricidad de la órbita elíptica, mayor va a ser la variación de energía solar recibida en la parte superior de la atmósfera entre los momentos en que la tierra está más lejos y más cerca del sol. (Ver figura 9).

Actualmente estamos en un período de baja excentricidad. La Tierra está más cerca del sol en enero y más lejos en julio. La diferencia de distancia, del 3%, es la responsable por el 7% de aumento en la energía recibida desde julio a enero. Cuando la diferencia en la distancia es del 9%, se da en una órbita con excentricidad elevada, la diferencia de energía solar recibida va a ser del 20%. A esto hay que sumarle que una excentricidad mayor cambia la duración de las estaciones en cada hemisferio, variando el intervalo de tiempo entre los equinoccios de primavera y otoño.

El segundo ciclo tiene en cuenta el hecho de que a medida que la tierra rota sobre su eje, se tambalea como un trompo. Este movimiento se conoce como precesión del eje de la tierra y se da en un ciclo de 23.000 años. Actualmente, la tierra está más cerca del sol en enero y más alejada en julio. Debido a la precesión esto va a darse a la inversa en 11.000 años. En 23.000 años el movimiento será igual que ahora. Esto significa, que si todo lo demás permanece

constante, en 11.000 años las variaciones estacionales en el hemisferio norte van a ser mayores que en el presente. Lo opuesto se va a dar en el hemisferio sur. (Ver figura 10)

El tercer ciclo tarda 41.000 años para completarse, y está relacionado con cambios en la inclinación del eje de la tierra a medida que orbita alrededor del sol. En la actualidad, el ángulo de inclinación es de $23,5^\circ$, pero durante el ciclo de 41.000 años varía desde 22° hasta $24,5^\circ$. Cuanto menor es el ángulo, menor es la variación estacional entre el verano y el invierno en altas y medianas latitudes. Por lo tanto, los inviernos tienden a ser menos fríos y los veranos menos calurosos. Durante los inviernos menos fríos, probablemente cae más nieve en las regiones polares debido al aumento en la capacidad de retener vapor de agua del aire. Durante los veranos menos cálidos, menos nieve se va a derretir. Debido a esto, en los períodos con menos inclinación se promueve la formación de glaciares en latitudes altas.

Cuando se toman en cuenta los tres ciclos, la tendencia actual es hacia un clima más frío en el hemisferio norte con glaciación extensiva.

En los años setenta, científicos del CLIMAP encontraron evidencia en los sedimentos del fondo oceánico que indican que las variaciones en el clima en los últimos cientos de años están asociadas con los ciclos descritos arriba.

Sin embargo, los cambios en la órbita no son los únicos responsables por el avance y retroceso del hielo. Hay evidencia (de burbujas de aire atrapadas en los hielos de Groenlandia y la Antártida que representan miles de años de acumulación de nieve) que indica que los niveles de dióxido de carbono eran un 30% menor durante los períodos glaciares más fríos que durante los períodos interglaciales más cálidos. Este conocimiento sugiere que las concentraciones menores de este gas tuvieron un efecto amplificador del enfriamiento iniciado por los cambios orbitales. El incremento en la concentración de dióxido de carbono hacia el fin del período glacial pudo haber sido la causa del rápido descongelamiento de los hielos. Las variaciones en la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera pudo deberse a cambios en la actividad biológica en los océanos.

Quizás, las variaciones en la concentración de dióxido de carbono indican un cambio en los patrones de circulación en el océano. Estos cambios causados por variaciones en la precipitación y evaporación pueden alterar la distribución de la energía calórica en el mundo. Estas alteraciones pueden afectar la circulación de los vientos, lo cual puede explicar porqué los glaciares del hemisferio sur se contrayeron y expandieron al mismo tiempo que en el hemisferio norte durante la última edad de hielo, a pesar de que el hemisferio sur no estaba en una posición orbital (según Milankovitch) para la glaciación.

Hay otros factores que actúan conjuntamente con las variaciones orbitales para explicar la variación de la temperatura entre los períodos glacial e interglacial:

1. Cantidad de polvo atmosférico.
2. Reflexión de los hielos.
3. Concentración de otros gases traza.
4. Cambios en las características de las nubes.

1- Partículas atmosféricas:

Los aerosoles que ingresan a la atmósfera ya sea por causas antropogénicas o naturales tienen un efecto sobre el clima. El efecto es muy complejo y depende de ciertos factores como ser, el tamaño de las partículas, su forma, el color y la distribución vertical sobre la superficie.

2- Aerosoles en la troposfera:

Los aerosoles ingresan a la atmósfera baja de diversas formas (de industrias, incendios de bosques, etc.). Una vez en la atmósfera los aerosoles absorben la radiación solar y la contraradiación terrestre (rayos infrarrojos). Es por esto que tienden a calentar el aire a su alrededor. Estas mismas partículas reflejan y dispersan la luz solar hacia el espacio. Este efecto reduce la cantidad de energía de onda corta que alcanza la superficie terrestre, causando un enfriamiento de la capa superficial de aire durante el día. A la noche, la absorción y la reemisión de energía de onda larga (infrarroja), produce un calentamiento del aire superficial.

En los últimos años, el efecto de aerosoles de sulfato, que reflejan mucho, fue muy estudiado. En la atmósfera baja, la mayoría de estas partículas provienen de la combustión de combustibles fósiles con contenido de azufre. La contaminación debido al azufre que se ha más que duplicado globalmente desde los tiempos preindustriales entran a la atmósfera principalmente como dióxido de azufre gaseoso. Una vez en la atmósfera se transforma en pequeñas partículas o gotitas de sulfatos. Como estos aerosoles solo permanecen en la atmósfera unos pocos días, no tienen tiempo de esparcirse por todo el mundo. Es por esto que no se diluyen y su efecto se siente más que nada en el hemisferio norte sobre las zonas contaminadas. Sobre los océanos, otra fuente de aerosoles de sulfato es el fitoplancton, que produce dimetilsulfuro. El DMS difunde a la atmósfera donde se oxida a dióxido de azufre, que luego se convierte en aerosoles de sulfatos.

Los aerosoles de sulfatos no solo dispersan la luz solar hacia el espacio, sino que sirven como núcleos de condensación. En consecuencia, tienen potencial para cambiar las características físicas de las nubes. Por ejemplo, si un cierto número de aerosoles de sulfatos, ingresan en una nube, ésta tiene que compartir su humedad con estos nuevos núcleos de condensación, produciéndose muchas más gotitas, pero a la vez más pequeñas. La mayor cantidad de gotitas reflejan más la luz solar y se reduce la cantidad de luz solar que alcanza la superficie.

En resumen, los aerosoles de sulfatos reflejan la luz solar, lo que tiende a enfriar la superficie terrestre durante el día. Estudios estiman que sobre el hemisferio norte este efecto de enfriamiento es prácticamente igual al efecto de calentamiento producido por el dióxido de carbono. Estos aerosoles también pueden modificar las nubes aumentando su reflexión. Debido a que este tipo de contaminación se da sobre áreas industrializadas del este de Europa y el noreste de Norte América, el efecto de enfriamiento que causa explica, primero, porqué el hemisferio norte se calentó menos que el hemisferio sur durante las últimas décadas, segundo, porqué los Estados Unidos sufrieron un menor calentamiento en comparación con el resto del mundo .y tercero, porqué el calentamiento se da durante la noche y no durante el día.

3- Erupciones volcánicas y aerosoles en la estratosfera:

Las erupciones volcánicas pueden tener un impacto definitivo sobre el clima. Durante las erupciones volcánicas, partículas muy pequeñas de ceniza y polvo son eyectadas a la estratosfera. A veces pueden liberarse gases ricos en azufre. Estos gases, en un período de 2 meses, se combinan con vapor de agua en presencia de luz solar para producir pequeñas partículas de ácido sulfúrico que crecen en tamaño, formando una capa densa de una especie de niebla. A medida que las partículas más pesadas caen de la estratosfera, se forman nuevas partículas. Debido a ello, esta capa de niebla puede permanecer en la estratosfera por muchos años, absorbiendo y reflejando la luz solar. Esto puede causar un calentamiento de la estratosfera y un enfriamiento de la superficie terrestre, especialmente en el hemisferio donde ocurre la erupción. Para erupciones muy grandes, los modelos matemáticos estiman que las temperaturas promedio de los hemisferios pueden caer entre 0,2 y 0,5 °C entre un año y tres años después de la erupción.

Las erupciones volcánicas ricas en azufre calientan la estratosfera baja. Durante el invierno, cuando la luz solar es más intensa en latitudes bajas y muy poca luz solar llega a las latitudes altas, la estratosfera tropical se calienta más que la estratosfera polar. Esta situación produce un gradiente de presión horizontal y fuertes vientos oeste-este estratosféricos. Estos vientos bajan a la troposfera alta, donde orientan al aire marítimo hacia los continentes. Este aire templado, produce inviernos más cálidos en los continentes del hemisferio norte durante el primer o segundo invierno después de la erupción. Mientras tanto en los trópicos y subtrópicos, los aerosoles estratosféricos bloquean la luz solar y producen un enfriamiento de la superficie. (Ver figura 14)

Cambios en la radiación emitida por el sol:

En el pasado, se pensaba que la energía solar no variaba mucho. Sin embargo, mediciones realizadas por sofisticados radiómetros puestos en satélites, sugieren que la radiación emitida por el sol varía considerablemente.

Las emisiones solares también varían debido a manchas negras que aparecen en el sol. Estas manchas son enormes tormentas magnéticas que enfrían la superficie del sol. Estas tormentas ocurren en ciclos, alcanzando un máximo en número y tamaño cada 11 años. Durante los períodos de máximas tormentas magnéticas, el sol emite mayor energía que en los períodos de mínimas. Evidentemente la mayor cantidad de zonas más brillantes alrededor de las manchas irradian mayor energía.

Estudios realizados proveen de evidencia que hace pensar que los cambios en la longitud del ciclo de estas manchas solares pudieron tener un efecto en las temperaturas globales durante los últimos cien años. Cuanto menor es este ciclo, mayor va a ser la energía emitida por el sol. De hecho, un estudio sobre las temperaturas de la tierra, realizado en el hemisferio norte desde 1860 hasta 1985 revela que la temperatura del aire tendía a ser más elevada cuando la longitud del ciclo era más corta, y que la temperatura del aire disminuía cuando la longitud del ciclo era más larga. A esto hay que sumarle que los ciclos mas cortos, se corresponden con una reducción del hielo del mar.

Parece ser que este ciclo de 11 años no siempre prevaleció. Aparentemente, entre 1645 y 1715, hubo pocas o casi ninguna mancha solar. Es interesante destacar que el mínimo ocurrió durante la etapa mas fría de la pequeña edad de hielo. Algunos científicos sugieren que una disminución en el brillo del sol fue responsable de este enfriamiento.

En un intento por entender el comportamiento del sol, se están estudiando estrellas similares en edad y masa a nuestro sol. Observaciones recientes sugieren que, en algunas de estas estrellas, la energía emitida puede variar hasta en un 0.4%, haciendo especular a los científicos sobre el hecho de que estas variaciones en el brillo del sol, pueden ser causa de parte del calentamiento global, en los últimos cien años.

El campo magnético del sol varía con estas manchas que aparecen en el sol, y se invierte cada 11 años. Como le toma 22 años en volver a su sentido original, el ciclo magnético del sol es de 22 años mas que de 11 años. Investigadores señalaron el hecho de que el período de 20 años de sequía en las grandes llanuras de los Estados Unidos se correlaciona con este ciclo solar de 22 años. Recientemente, algunos científicos, encontraron una correlación entre el ciclo de 11 años de las manchas solares y las tendencias climáticas del hemisferio norte. Parece ser que los inviernos más cálidos pueden estar relacionados con variaciones en las manchas solares y con una tendencia de los vientos estratosféricos a invertirse sobre los trópicos. Como un cambio tan pequeño en las emisiones solares puede alterar el clima es todavía un misterio.

Las fluctuaciones en las emisiones solares pueden ser causa de cambios climáticos a un nivel de décadas o siglos. (Ver figura 16)

Dióxido de carbono, el efecto invernadero y el reciente calentamiento global:

El dióxido de carbono es un gas invernadero que absorbe las radiaciones infrarrojas y juega un papel muy importante en el calentamiento de la atmósfera baja (Ver figura 11). Se sabe que el mismo ha ido aumentando en la atmósfera debido principalmente a la quema de combustibles fósiles. Sin embargo, la deforestación aporta a este incremento a medida que las selvas tropicales son removidas y reemplazadas por plantas menos eficientes. En 1993, el promedio anual de dióxido de carbono era de 335 ppm y se estima que este valor se va a duplicar en el siglo que viene.

La mayoría de los modelos numéricos experimentales, predicen que el aumento del dióxido de carbono al doble va a llevar a un calentamiento global del aire de la superficie entre 1,5 y 4,5°C en los siguientes 50 años (Ver figuras 12 y 13) Sin embargo hay algunas incertidumbres en estos modelos. Por ejemplo, si la deforestación es la responsable principal

por el aumento de dióxido de carbono (mas que la quema de combustibles fósiles), el incremento de dióxido de carbono se va a producir mas lentamente que lo estimado, y el calentamiento global no va a ser tan grande.

Para complicar la situación, los gases traza tales como el metano, óxidos de nitrógeno y los CFCs, todos los cuales absorben las radiaciones infrarrojas, han ido aumentando en concentración en el último siglo. Sumados, estos gases son similares al dióxido de carbono en cuanto al efecto invernadero. Hay que agregar que los modelos predicen que el aumento de la temperatura de los océanos va a incrementar la evaporación y por ende va a aumentar el vapor de agua atmosférico que es el gas invernadero mas potente. Este vapor de agua agregado produce una retroalimentación positiva al acelerar el aumento de la temperatura. Sin esta retroalimentación, la mayoría de los modelos predicen que al duplicarse la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera se producirá un aumento de la temperatura de aproximadamente 1-2°C.

Los océanos, las nubes en el calentamiento global:

Los océanos juegan el papel más importante en el sistema climático, sin embargo el efecto que se producirá en ellos debido al cambio climático es incierto. Los océanos son enormes depósitos para el dióxido de carbono. Plantas microscópicas, extraen el dióxido de carbono de la atmósfera durante la fotosíntesis y una parte queda bajo la superficie del océano cuando mueren ¿Podrá una tierra mas caliente desencadenar una explosión de estas pequeñas plantas, reduciéndose así el dióxido de carbono en la atmósfera?, ¿ será posible que el aumento gradual en la temperatura del océano incremente la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera debido a que la solubilidad de los gases disminuye con la temperatura? Además los océanos tienen gran capacidad para guardar energía calórica. Por esto, a medida que se calientan lentamente, retrasarían la velocidad a la que la atmósfera se calienta. La respuesta de la temperatura de los océanos, la circulación de los mares y el hielo oceánico al calentamiento global determinará la tendencia y la velocidad del cambio climático global.

Si el vapor de agua atmosférico aumenta, entonces también aumentará la nubosidad global. Las nubes reflejan la luz solar lo cual disminuiría la temperatura global, pero también absorben la radiación infrarroja de la tierra, calentándola. Como responde el clima a las variaciones en la nubosidad depende del tipo de nubes, su forma y sus propiedades físicas, como estados de agua, contenido tamaño y distribución de las gotitas. Datos satelitales confirman que en sumatoria las nubes tienen un efecto de enfriamiento de nuestro planeta, lo que significa que sin nubes nuestra atmósfera sería más cálida.

Nubes adicionales en un mundo más caliente, sin embargo no tendrían un efecto de enfriamiento. Su influencia en la temperatura promedio del aire superficial, dependerá de la extensión y de la altura de las nubes que dominan la escena. La retroalimentación de las nubes podría aumentar o reducir el calentamiento producido por los gases de efecto invernadero. Muchos modelos muestran que a medida que la superficie se calienta va a haber más convección, más nubes del tipo convectivo, y un aumento en las nubes cirrus que son barridas horizontalmente en lo alto de las tormentas. Esta situación tenderá a proveer una retroalimentación positiva en el sistema climático, y el efecto de las nubes en el enfriamiento de la tierra sería minimizado.

Posibles consecuencias del calentamiento global:

Algunos modelos climáticos predicen que si la temperatura global promedio aumenta 3 o 4°C, los vientos van a girar de su posición normal. El calentamiento de la superficie aumentará la evaporación, lo que llevará a un aumento en las precipitaciones. Sin embargo el cambio de los vientos altos puede reducir la precipitación en ciertas áreas, especialmente en regiones continentales interiores de latitudes medias.

Otra consecuencia puede ser un incremento del nivel del mar de aproximadamente medio metro. El aumento será de 2 a 4 cm por década. El aumento en el nivel de los océanos puede tener graves consecuencias en la fauna costera marítima. Además las aguas subterráneas pueden contaminarse con agua salada.

Modelos climáticos predicen que el calentamiento va a ser mayor en las regiones polares que en latitudes medias y bajas. En latitudes altas del hemisferio norte, los bosques boreales verde-oscuro absorben hasta tres veces la energía solar absorbida por la tundra cubierta de nieve. En consecuencia, las temperaturas del invierno en estas regiones son en promedio de 11,5°C más elevadas que lo que serían sin árboles. Si el calentamiento permite que los bosques boreales avancen sobre la tundra, los bosques pueden acelerar el calentamiento en esas regiones. A medida que la temperatura aumenta, la materia orgánica en los suelos se descompone más rápidamente, aumentando el dióxido de carbono de la atmósfera, aumentando el calentamiento global.

Las concentraciones elevadas de dióxido de carbono en la atmósfera actuaría como un fertilizante para ciertas plantas, acelerando su crecimiento. El incremento en el crecimiento de éstas plantas, hace que se consuma mas dióxido de carbono , lo que retardaría el incremento del mismo en la atmósfera. Otros científicos opinan que el incremento en el crecimiento de las plantas, forzaría a algunos insectos a comer más. El aumento de dióxido de carbono puede modificar el balance de la naturaleza, haciendo que algunas especies de plantas se vuelvan dominantes y que otras sean eliminadas.

Los bosques también pueden sentir el efecto de un planeta más caliente. Los árboles que crecen en zonas determinadas por la temperatura pueden ser afectados. En un estado tan débil son más susceptibles a los insectos y enfermedades.

El efecto de los niveles crecientes de dióxido de carbono en la atmósfera no está totalmente claro. Sin embargo, los modelos climáticos sugieren que mientras la troposfera se calienta la estratosfera se enfría. Este enfriamiento se debe al exceso de moléculas de dióxido de carbono y otros gases traza que reflejan la radiación solar. Algunos cálculos indican que el enfriamiento de la estratosfera puede retardar la destrucción de la capa de ozono. Además el ozono irradia los rayos infrarrojos de vuelta hacia la tierra.

Calentamiento climático actual:

Desde el principio de este siglo, la temperatura global aumentó entre 0,3°C y 0,6°C. ¿Es este calentamiento real? El efecto invernadero es real. Nuestro mundo, sin vapor de agua, dióxido de carbono y otros gases traza sería 33°C mas frío y la mayor parte del planeta sería inhabitable. Los gases de la atmósfera equilibran la radiación que entra y sale. El aumento de los gases de efecto invernadero modifican este equilibrio. Muchos científicos dicen que solo una parte del calentamiento de la tierra se debe al incremento de los gases de efecto invernadero. Otros científicos creen que el calentamiento global está dentro de las variaciones naturales del cambio climático.

Según un reporte del IPCC:

*Las emisiones resultantes de la actividad humana están incrementando las concentraciones atmosféricas de los gases de efecto invernadero.

*Al duplicarse la concentración de dióxido de carbono se va a producir un aumento en la temperatura global de 1,5-4,5°C

*En cuanto a las predicciones climáticas es todo muy incierto.

*En los últimos 100 años, la temperatura del aire superficial se ha incrementado 0,3-0,6°C

*La magnitud de esta variación es consistente con las predicciones de los modelos, pero también es del orden de la variabilidad natural del clima (Ver figura 17).

*Durante las últimas décadas, el calentamiento por efecto invernadero en el hemisferio norte fue minimizado por efecto de aerosoles resultados de emisiones con azufre.

Aunque no haya nada certero sobre las tendencias climáticas para el futuro, una reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero puede tener potencialmente grandes beneficios, como la reducción de la lluvia ácida y la disminución del adelgazamiento de la capa de ozono.

A continuación presentamos un informe sobre la situación de Argentina en el cambio climático global. Presenta escenarios que utilizan observaciones climáticas obtenidas por la Unidad de Investigación Climática, un juego de escenarios para gases invernadero preparados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change o IPCC), y una serie reciente de experimentos en cambio climático que utilizan siete modelos climáticos globales. La investigación se realizó para prever el impacto del calentamiento global en cada país y región específicamente

Tendencias observadas recientemente en el Clima

Precipitación

Argentina recibe más del 60 por ciento de su precipitación durante el período de diciembre a mayo.

La Figura 2 muestra esto para las estaciones de verano y otoño, habiéndose incrementado la precipitación durante el siglo en alrededor de 10 y 5 por ciento respectivamente. La tendencia en precipitación anual para el siglo como un todo, ha sido de alrededor de 10 por ciento/siglo. Los cambios en la precipitación pueden tener efectos sobre los ríos Argentinos.

Varios ríos importantes drenan hacia el este de los Andes y algunos registros del flujo fluvial muestran interrelaciones con la Oscilación Sureña/ El Niño (OSEN). Los ríos de la provincia de Mendoza, por ejemplo, son más propensos a experimentar altos flujos durante los estados tempranos de los eventos cálidos de El Niño (OSEN) debido el aumento de las nevadas sobre los Andes.

Temperatura

La temperatura anual media en Argentina ha aumentado en cerca de 1°C en el último siglo. La década de lo 1990 ha sido la más calurosa en este siglo (Figura 1) con 1995 como el año más caliente registrado en el siglo. Este calentamiento ha ocurrido en todas las estaciones casi igualmente, siendo un poco mayor en la estación invernal de Junio a Agosto.

Paralelamente con el calentamiento del clima, la frecuencia de heladas ha ido disminuyendo. Aunque la mayor parte del noreste de Argentina es virtualmente libre de heladas, la cordillera Andina y las planicies y penínsulas del sur este experimentan muchas heladas cada año. Cuando se hacen promedios a lo largo del país, ha existido una disminución en el número de días de heladas por año en cerca del 10 por ciento durante este siglo.

Escenarios de Cambio Climático para Argentina

Los escenarios se utilizan para estimar los futuros cambios climáticos que podríamos experimentar en los próximos cien años, teniendo en cuenta la contribución de los seres humanos al calentamiento global. Los cuatro escenarios climáticos que se muestran aquí se relacionan con cuatro trayectorias de emisiones de gases con efecto invernadero (definidas en el Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones del IPCC). Estos se llaman B1, B2, A1 y A2.

El cambio en emisiones de dióxido de carbono proveniente de fuentes energéticas y/o industriales para el año 2100, varía de una disminución del 4 por ciento (escenario B1) a un aumento aproximado de 320 por ciento (escenario A2), si se compara con lo estimado para el año 2000 para estos cuatro escenarios. Estas estimaciones de futuras emisiones se calculan asumiendo que no se existe ninguna puesta en práctica de políticas climáticas. La concentración de dióxido de carbono atmosférico aumenta de la concentración actual de 1999 (370 ppmv) a una concentración cercana a 550 ppmv en el escenario B1 para el año 2100, y por encima de 830 ppmv en el escenario A2. Las concentraciones de otros gases invernadero también aumentarían.

No se conoce que efecto tendrá el aumento de gases invernadero. Depende en gran parte en que tan sensible es el clima de la Tierra, a este aumento de concentraciones. Se han escogido tres valores diferentes para esta sensibilidad climática- baja (1.5°C), mediana (2.5°C) y alta (4.5°C). Mediante la combinación de las tres elecciones de sensibilidad climática con los cuatro escenarios de emisiones del IEEEE, se calcularon las variaciones en las curvas de cambio climático global y aumento en el nivel del mar (Figura 3, Tabla 1), que tal vez, comprenden aproximadamente el 90 por ciento de las posibles fluctuaciones de los climas globales futuros. Estos varían de B1, bajo (el escenarios con menos emisiones combinado con el de menor sensibilidad) a A2, alto (el escenario con emisiones más altas combinado con el de mayor sensibilidad).

Cambios en el Clima y en el Nivel del Mar

Las temperaturas mundiales promedio aumentan entre 1.3° y 1.4°C para el año 2100 (Figura 3), lo cual representan valores de calentamiento global entre 0.1° y 0.4°C por década. Uno de los cambios más impresionantes debido al calentamiento climático será el aumento del nivel del mar. Los escenarios sugieren un futuro aumento global promedio en el nivel del mar de entre 2cm y 10 cm por década, comparado con el aumento de entre 1cm y 2cm por década que se ha observado durante el último siglo. La mayor contribución para este cambio en el nivel del mar viene de la expansión del agua más caliente del océano, un lento pero inexorable proceso, que asegurará que el nivel del mar en el mundo continúe aumentando en los próximos siglos.

Es probable que Argentina se calentará un más lentamente en el futuro, que el promedio global de temperatura (Figura 3). Sin embargo, dentro de Argentina, el norte del país se calentará considerablemente más rápido que el sur. Por ejemplo, en el escenario A2 alto la península sureña del continente se calentará a una velocidad de 0.25°/década, mientras que el norte de Argentina se calentará a una velocidad de 0.4°C/década. Para el escenario B1-bajo, estas velocidades de calentamiento están reducidas por un factor de alrededor de tres.

Cambio futuro de la temperatura:

Es probable que Argentina se calentará un más lentamente en el futuro, que el promedio global de temperatura (Figura 3). Sin embargo, dentro de Argentina, el norte del país se calentará considerablemente más rápido que el sur. Por ejemplo, en el escenario A2 alto la península sureña del continente se calentará a una velocidad de 0.25°/década, mientras que el norte de Argentina se calentará a una velocidad de 0.4°C/década. Para el escenario B1-bajo, estas velocidades de calentamiento están reducidas por un factor de alrededor de tres.

Cambio futuro de las precipitaciones:

Los cambios futuros en precipitación difieren entre las regiones del este y del oeste de Argentina. La precipitación anual declina sobre los Andes, esta puede disminuir en algunos

lugares en alrededor de un 15 por ciento para la década 2080, bajo el escenario A2-alto. El oriente del país - la región baja de la Cuenca del Río de la Plata - experimenta un incremento en la precipitación anual para el escenario B1-bajo, y aún para la década 2080, todos los cambios en precipitación son pequeños - menos del 5 por ciento. Este contraste entre un occidente seco y un oriente húmedo, es más consistente entre las estaciones.

Ríos Andinos y Suministro de Agua

Las provincias de Mendoza y de San Juan en la región seca del Cuyo en la región Argentina, dependen en gran medida de los deshielos de los Andes para satisfacer sus requerimientos de agua. El Río Mendoza, por ejemplo, proporciona agua para irrigación y energía eléctrica para la vasta región centro occidental de Argentina. La intensidad de los flujos fluviales en la región está supeditada a las precipitaciones invernales y al derretimiento de la nieve acumulada. Los escenarios sugieren un peligro real en la reducción de los flujos fluviales y por tanto, un suministro reducido de agua a la región. La precipitación disminuye en estas cuencas (Figura 6), y las temperaturas en ascenso conducen a deshielos tempranos y a pérdidas aumentadas por evaporación en las partes bajas de las cuencas. Estos pronósticos representan un estrés adicional en la ya limitada disponibilidad de agua potable en las regiones del centro y occidente de Argentina, con demandas crecientes de agua debido al aumento de las poblaciones urbanas y a la expansión de la irrigación agrícola y de la industria.