
CONTROVERSIAS EN RELACIÓN CON EL CAMBIO CLIMÁTICO Y PERSPECTIVAS DEL CLIMA FUTURO

COMPAGNUCCI, Rosa Hilda

Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos FCEN-UBA / CONICET
Ciudad Universitaria, Pabellón 2, Piso 2, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Ciudad Autónoma de Buenos Aires (1428), Argentina, rhc@at.fcen.uba.ar

Resumen

El Calentamiento Global, también llamado Cambio Climático, ha generado en el ámbito científico divergencias y controversias. Las distintas evaluaciones de la tendencia del calentamiento se deben a la utilización de las distintas bases de datos disponibles y al procesamiento de dicha información. Las estimaciones de la variabilidad de la temperatura global en los últimos 2000 años también es motivo de grandes divergencias. Algunos estudios muestran un período de calentamiento igual y hasta superior al actual durante la Edad Media entre 800 y 1200 años antes del presente. En otros resultados, en especial el llamado "palo de hockey", durante ese período la temperatura aparece como inferior al promedio de 1961-90 que es el período de referencia en casi todos los estudios. Estas discrepancias se deben principalmente al uso de distintos "proxy" usados, que son datos que los paleoclimatólogos obtienen de registros naturales de la variabilidad climática (anillos de árboles, testigos de hielo, polen fósil, etc.). Las disímiles posiciones van desde adjudicar la totalidad del calentamiento al incremento de gases invernadero producido desde el comienzo de la era industrial, hasta aquellos que mayormente lo adjudican a variaciones en la actividad solar y el flujo de Rayos Cósmicos Galácticos. De acuerdo a cada una de estas hipótesis respecto a los forzantes climáticos que pudieron haber producido el calentamiento global y la magnitud de su influencia es que pueden postularse diversos escenarios del clima futuro. En el trabajo se presenta los resultados que están causando actualmente las mayores controversias e incertidumbres respecto al Cambio Climático Global.

Palabras clave: Cambio Climático, Calentamiento Global, efecto antropogénico, variaciones naturales.

CONTROVERSIES CLIMATIC CHANGE OF FUTURE SCENARIOS

Abstract

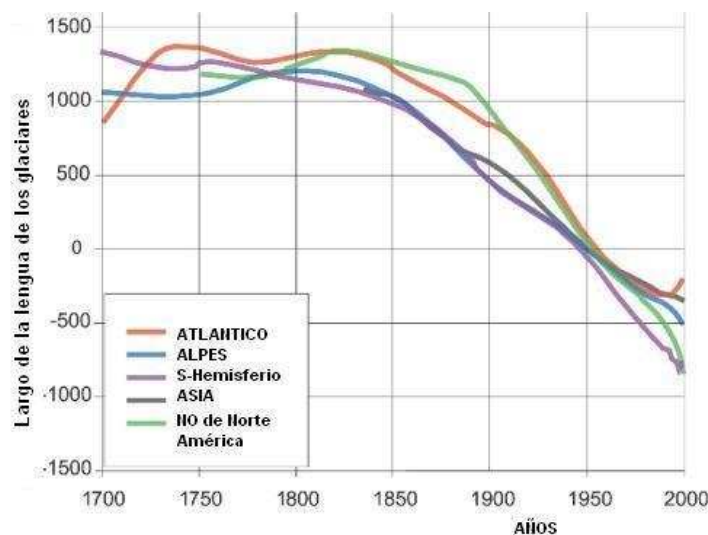
Global Warming, also called Climatic Change, has generated in the international scientific area some divergences and controversies. Differences obtained in the temperature trend are mainly due to the varied databases available, and to the methodology used in processing it. Besides, estimations of temperature have changed in the last 2000 years, and this issue added new divergences. Some researchers show that the Medieval Warm Period (between 800-1200) was almost equal or but slightly superior in warm, than our times are. But, for others, and namely in the so-called "hockey stick" period, the temperature appears to have been a little inferior to the 1961-90 average –which is the period of reference for practically all researchers. These discrepancies are likely to be due to the use of very different "proxy data" which paleoclimatologists gather from natural records of climate variation (e.g., tree rings, ice cores, fossil pollen, etc.). Dissimilar positions assumed by scientists cover from adjudging the totality of the global warming process to the increase of the greenhouse effect, while others explain the variations recorded by solar activity and the Galactic Cosmic Ray flow. According to each of these hypotheses as to what could have produced the global warming process, and as to how the magnitude of its influence could be accurately justified, scientists set a diverse kind of future scenarios. In this paper, we present some of the probable causes and some of the majors controversies and uncertainties related to the Global Climatic Change Process.

Key words Climatic Change, Global Warming , anthropogenic effect , natural variations

Introducción y antecedentes

Las noticias sobre el calentamiento global, también llamado cambio climático, están causando un gran impacto en la opinión pública. Las evidencias indican que indudablemente la temperatura global ha aumentado desde el fin de la llamada "Pequeña Edad de Hielo" ocurrida entre el siglo 16 y mediados del siglo 19. En esa época los inviernos eran mucho más fríos. Un ejemplo es el congelamiento del río Támesis durante el período invernal, fenómeno que ocurrió por última vez en 1895. También es un indicador la extensión de los glaciares los cuales tuvieron su máximo volumen entre 1750 y 1850, luego de lo cual comenzaron a experimentar un proceso de retracción que se aceleró en las últimas décadas como se ve en la figura 1 (IPCC 2007: AR4 –WG1- fig 4 -13, p357).

Figura 1.a Variación del largo de la lengua de los glaciares en escala regional

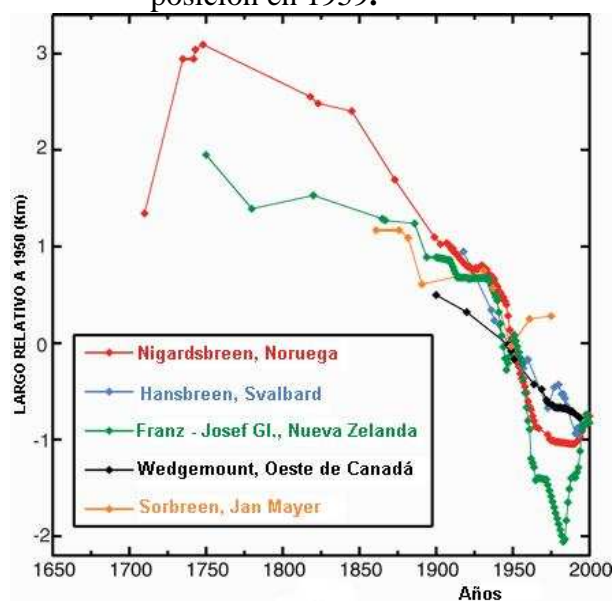


Fuente: IPCC 2007: AR4 –WG1- fig 4 -13,p357. Los datos están referidos a anomalías en metros respecto a su posición en 1950. Las curvas mostradas fueron suavizadas con el método de Stineman. Los glaciares están agrupados en las siguientes clases regionales: Atlántico (Sur de Groenlandia, Islandia, Escandinavia, Jan Mayen, Svalbard); Alpes europeos; Hemisferio Sur (áreas tropicales, Nueva Zelanda, Patagonia); Asia (Caucasos en Asia central) y Nor-oeste de Norteamérica (Rocallosas principalmente en Canadá)

Sin embargo, las figuras 1b y 1c evidencian que el retroceso de los glaciares comenzó en 1750 antes del incremento de los gases antropogénicos, revelando incuestionablemente causas naturales en la retracción inicial. La principal fuente de energía de derretimiento es la radiación solar. Las variaciones en la masa y longitud de los glaciares se deben principalmente a la temperatura y la precipitación. El balance de masa de los glaciares responde a un proceso complejo que estaría relacionado a diversos factores dependientes de la

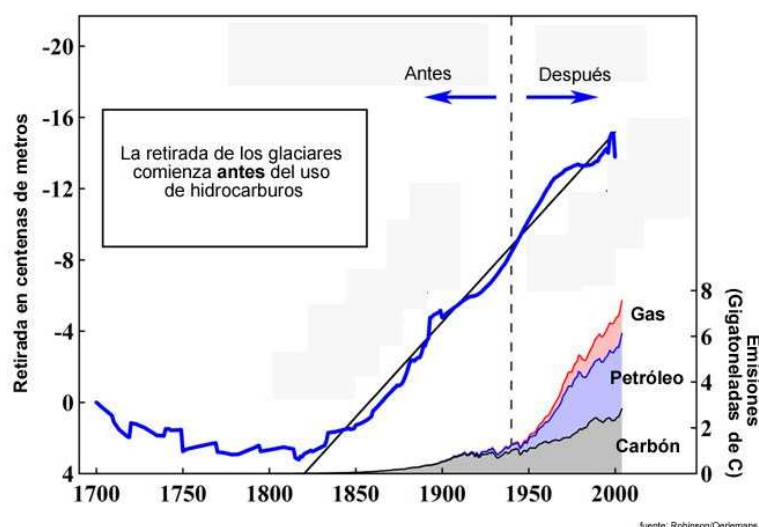
localización de los mismos (Oerlemans, 2005; Nesje, 2005; Winkler y otros, 2009; Schaefer, 2009) Esta tendencia de derretimiento lleva un rezago de 20 años con respecto a los incrementos de temperatura, y es considerablemente anterior a la década de los cuarenta en que se produce el marcado incremento en la utilización de hidrocarburos. Por ello el incremento antropogénico de CO₂ es insuficiente para explicar la tendencia a la retracción de los glaciares (Robinson et al., 2007)

Figura 1b Retroceso de la lengua de diversos glaciares del mundo relativa a su posición en 1959.



Fuente:.. adaptada de Oerlemans, 2005. Los valores en Km

Figura 1c: Longitud promedio de 169 glaciares de 1700 a 2000 versus emisiones antropogénicas de carbón.



Fuente: Robinson et al, 2007

El calentamiento global es coincidente con el comienzo de la era industrial y el incremento del uso de los combustibles fósiles. Por ello, a pesar de las claras conclusiones emergentes de los trabajos previamente mencionados, la hipótesis más frecuentemente presentada y avalada en los diversos informes científicos del Panel Intergubernamental de Cambio Climático de la ONU (*IPCC*), adjudica al retroceso de los glaciares al aumento antropogénico del CO₂ y de otros gases invernadero.

Es necesario resolver una pregunta muy importante para validar esta hipótesis y para la cual aún no existe consenso en su respuesta: *¿Cuán inusual es el calentamiento actual?*

En las respuestas dadas por los científicos persisten muchas dudas, incertidumbres, incertezas, contradicciones y controversias. Las causas son principalmente la utilización de diferentes datos y "proxy" datos, que son datos de las condiciones climáticas obtenidos indirectamente, así como disímiles métodos en su obtención, validación, consistencia y elaboración. También son fuente de discrepancias entre los resultados las diversas y sofisticadas técnicas estadísticas empleadas para su análisis.

Así mismo contribuyen a la incertidumbre los diversos modelos numéricos empleados para simular las condiciones pasadas (paleo climáticas) o futuras del clima. Con ellos se trata de representar un sistema extremadamente complejo y no lineal debido a las interacciones de sus múltiples componentes.

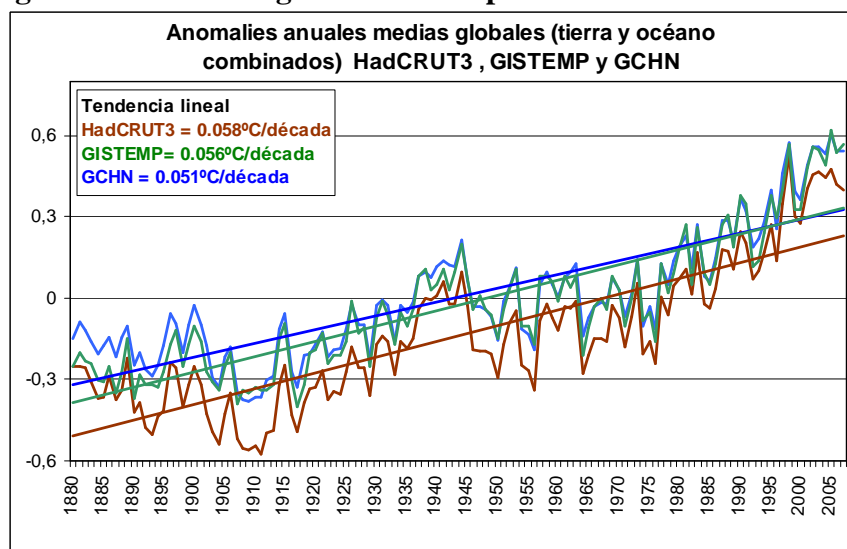
Los resultados entre los distintos modelos difieren como consecuencia de la importancia y representatividad que cada uno de ellos otorga a las diversas componentes del sistema climático y la simulación de sus diversas interacciones. Los distintos forzantes externos e internos del sistema climático, de acuerdo con la estructura dinámica interna del modelo, son sopesados en forma diversa. Las variaciones de la irradiancia solar son consideradas en varios de los estudios, pero la influencia de los Rayos Cósmicos Galácticos es casi excluida de los modelos y sólo en algunos de los más simples son tenidas en cuenta mediante la inclusión de la variación de nubes medias y bajas. Por otra parte los forzantes internos del sistema tales como los cambios en la concentración de la composición atmosférica en especial el incremento de CO₂ son los frecuentemente simulados, las variaciones del vulcanismo son tenidas en cuenta en varios estudios de modelado. En general los modelos de escenarios futuros del clima sólo contemplan la variación posible en los gases invernadero pero no tienen en cuenta cambios en otros forzantes.

Estimaciones de la temperatura media global

Existen diversos bancos mundiales de información con los datos registrados por las estaciones meteorológicas. El más importante es la red mundial de datos climáticos históricos (GHCN) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de los Estados Unidos de Norteamérica.

La evaluación de las anomalías de la temperatura media global se realiza a partir de los datos interpolados en un reticulado regular (latitud - longitud), empleando información de las distintas estaciones meteorológicas y de los buques existentes para cada uno de los años analizados. Las discrepancias que existen en el valor resultante de la temperatura entre los diversos bancos de datos interpolados disponibles tales como el de la Oficina Meteorológica del Reino Unido (Centro Hadley); GISS-TEMP procesado por NASA y el GHCN de la NOAA mostrados en figura 2, se deben a diferencias en el número y la localización estaciones y también a las diversas aproximaciones metodológicas utilizadas en la interpolación. Los diversos tratamientos de la información proveniente de observaciones en los buques generan diferencias al igual que el procesado y manejo de la influencia de los cambios en las condiciones de las estaciones terrestres, tales como el incremento de la urbanización, el cambio de los instrumentos o del emplazamiento de la estación.

Figura 2: Anomalías globales de temperatura anual media.

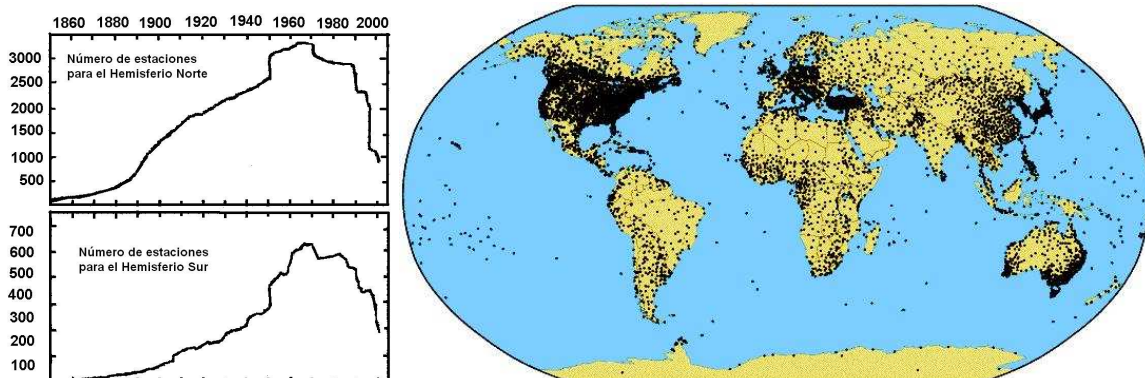


Información conjunta de mediciones en continentes y océanos a partir de las bases HadCRU3 (CRU), GISS-TEMP (Global Historical Climate Network data, analizado por NASA) y GCHN (Global Historical Climate Network, de NOAA) con sus correspondientes tendencias lineales.

El banco de datos interpolados HADCRU, que generó una de las mayores controversias sobre el Calentamiento Global y que es el material referencial del IPCC, contiene información desde 1850 y es producido por la "Met Office Hadley Centre" y el "Climatic Research Unit (CRU)" de la Universidad de "East Anglia" dirigido hasta Diciembre del 2009 por Phil Jones.

Los resultados, obtenidos a partir de estos datos interpolados, fueron criticados por la falta de uniformidad a través del tiempo del número de estaciones empleadas para la interpolación, con alrededor de 300 estaciones a comienzos y fines del registro y más de 3000 para el período 1950-1975, y la falta de homogeneidad en la distribución espacial de las estaciones utilizadas ya que las mismas se agrupan principalmente en Norteamérica y Europa (Willmott et al., 1991; Robeson, 1995; Willmott y Matsuura, 2006; McKittrick y Michaels, 2007; Pielke et al., 2007a y 2007b; Hale et al., 2008). Pueden verse en la figura 3 la variación a través del tiempo de la densidad de estaciones meteorológicas empleadas para la versión HadCRU2 de Jones y Moberg (2003). Tanto las bases de la teoría del muestreo como del teorema Central del Límite parecen violarse en los resultados obtenidos mediante este procedimiento. Otra de las mayores críticas que aparecieron en las paginas de Internet de algunos investigadores especialmente en "Climate Audit" de Steve McIntyre, fue que hasta Diciembre del 2009 los datos originales de las estaciones meteorológicas utilizadas no se encontraban disponibles y que en los trabajos que publicaron los datos interpolados como Brohan et al, (2006) y Rayner et al (2003 y 2006) del HADCRU3, los procedimientos empleados en "depurar" la información no fueron suficientemente claros.

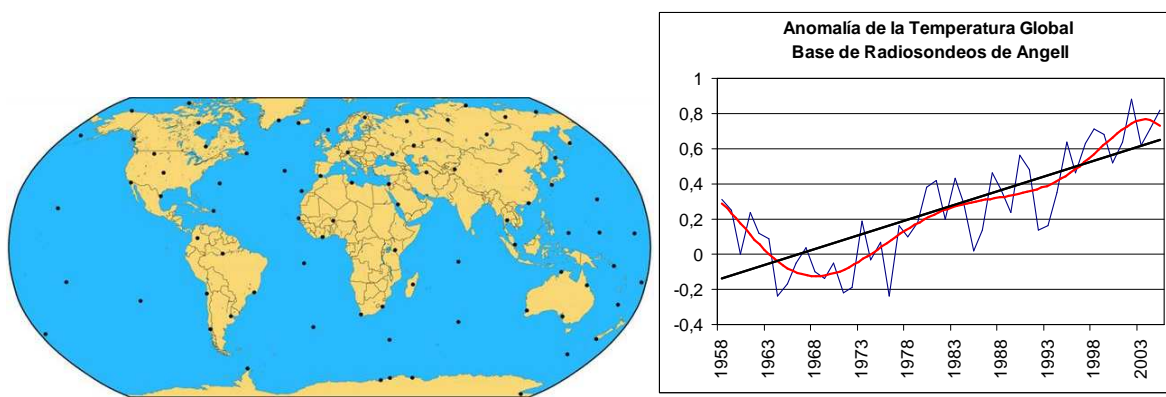
Figura 3: Estaciones meteorológicas empleadas para la interpolación de temperatura de la base HadCRUT en panel izquierdo y localización de las estaciones utilizadas por CRU en el panel derecho.



Fuente: adaptado de Jones y Moberg, 2003

La medición de la temperatura, la humedad, la presión y el viento en distintos niveles de la atmósfera se realiza mediante los radiosondeos y permite una apreciación más completa del comportamiento del clima en toda la troposfera y baja estratósfera. Estas mediciones comenzaron recién a mediados del siglo 20 y la densidad de estas estaciones de la base (2006) es mucho menor que las de superficie como puede verse en la figura 4.

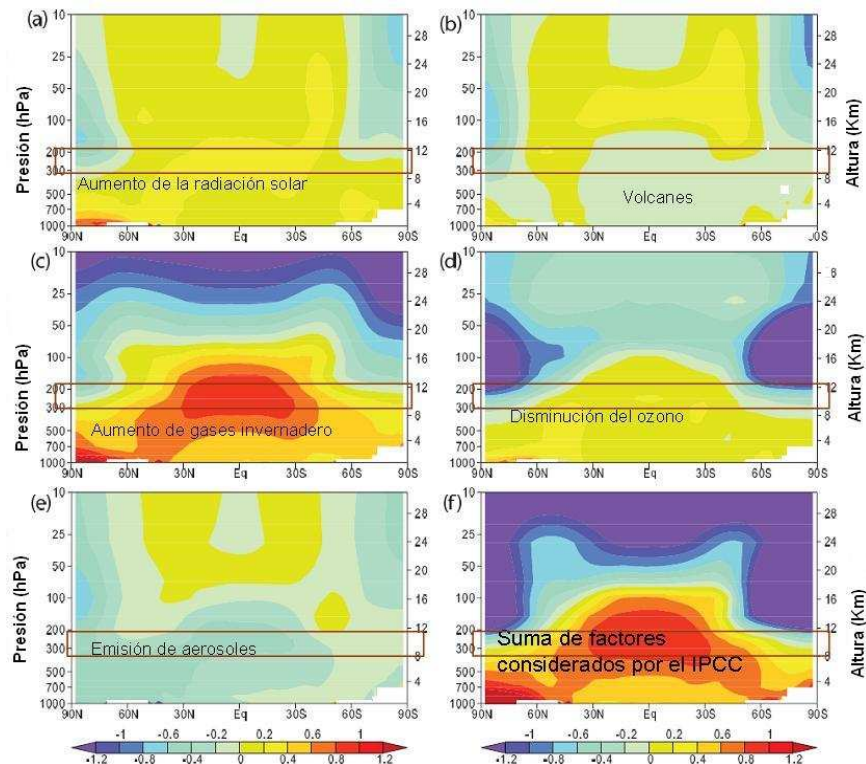
Figura 4: Estaciones de las bases de radiosondeos de Angell y serie de anomalías de temperatura de superficie calculadas con referencia al promedio 1958-77.



La tendencia en superficie dada por esta base de datos también es positiva pero disminuye con la altura, pero las capas superiores de la troposfera se estarían enfriando. Algunos investigadores como Karl et al, (2006) y Douglass et al, (2007) señalan las inconsistencias entre estas tendencias y los resultados de los modelos presentados en el informe del IPCC (2007).

Mientras los radiosondeos muestran tendencias negativas de $-0,23^{\circ}\text{C}$ por década entre 9Km y 12Km de altura, los resultados del modelo mostrado por el IPCC (2007) en figura 5, tienen para esos niveles el máximo de calentamiento provocado por el incremento del CO_2 y también por la suma de factores considerados. Por ello estos autores sostienen que dicha incongruencia rectifica la hipótesis del efecto antropogénico y avalarían la hipótesis de la influencia solar como causante del calentamiento global.

Figura 5: Diferencias entre las condiciones pre-industriales y el período 1890-1999 simuladas mediante el modelo CSIRO.



Fuente: IPCC (2007), Grupo1, Capítulo 9, página 675

La medición de la temperatura con cobertura realmente global comenzó a partir de 1979 mediante la observación satelital de las variables climáticas para distintas capas de la atmósfera. Esta información permite obtener una respuesta más precisa a la pregunta: *¿Hay calentamiento en todas partes?*

Los datos de la serie de satelitales TIROS-N con información provista por “microwave sounding units” (MSUs) indicarían que las tendencias de la temperatura global de la capa inferior de la atmósfera es menor que las obtenidas de la información de los diversos bancos de datos interpolados a partir de las estaciones meteorológicas.

Tanto los datos interpolados, como las observaciones satelitales indicarían que el calentamiento no es general. Es de notar que utilizando la misma base de datos satelitales, los datos de radiación de la baja troposfera ajustados y convertidos en valores de temperatura en la base UAH del Global Hydrology and Climate Center de la Universidad de Alabama en

Huntsville obtenida por Christy et al (2000) difieren de la base Remote Sensing Systems (RSS) obtenida por Mears et al (2003). Ellos presentan menores tendencias globales que las tendencias obtenidas de la base interpolada GHCN por Smith y Reynolds (2005) en base a la información de estaciones de superficie de la GHCN de la NOAA. También muestran un área de enfriamiento en el Océano para altas latitudes del Hemisferio Sur. Por otra parte los resultados con datos satelitales de la base UAH indicarían menor tendencia global que los de la base RSS. Además del enfriamiento en altas latitudes del Hemisferio Sur, también muestra grandes áreas de enfriamiento en otras regiones localizadas en latitudes ecuatoriales y tropicales, como África, Australia y el Océano Pacífico Ecuatorial que son regiones de tendencia positiva en la base RSS. Estas divergencias son indudablemente debidas a las diversas metodologías utilizadas para el análisis de los datos satelitales.

La divergencia en los resultados obtenidos a partir de la medición instrumental de la temperatura dificulta la precisa estimación de la tendencia global, que, cambia de acuerdo con subperíodos determinados, y en la extensión del calentamiento.

Variación de la temperatura en los últimos 2000 años

Para determinar cuán inusual es el reciente calentamiento global y en qué medida puede responder a la variabilidad natural del sistema climático se ha tomado como referencia la variación de la temperatura en los últimos 2000 años para los cuales la topografía y los parámetros orbitales del planeta pueden considerarse constantes e iguales a las condiciones actuales. La incerteza aumenta a medida que los estudios se extienden a períodos anteriores a la medición con termómetros calibrados que comenzaron desde mediados del siglo XIX. Para análisis previos hay que remitirse a los proxy datos que proveen información indirecta y menos fiable.

Durante estos dos últimos milenios se registraron dos importantes variaciones de la temperatura global. Entre los siglos IX y XIV ocurrió un calentamiento llamado "Período Cálido Medieval" (PCM) seguido por tres sucesivos pulsos de enfriamiento conocidos como la "Pequeña Edad de Hielo" (PEH) que finalizaron a mediados del siglo XIX (Lamb, 1985 y 1995).

La evaluación precisa de las anomalías durante el PCM es relevante, pues sus causas fueron evidentemente naturales y mayormente debidas a la gran actividad solar ocurrida durante el período. La información histórica nos narra que entre los años 1000 y 1350 los asentamientos de los Vikingos se expandieron a Islandia, Groenlandia y América del Norte (figura 6). También florecieron los viñedos en Inglaterra registrándose una notable producción de vino que se exportaba a Francia (Fagan, 2004).

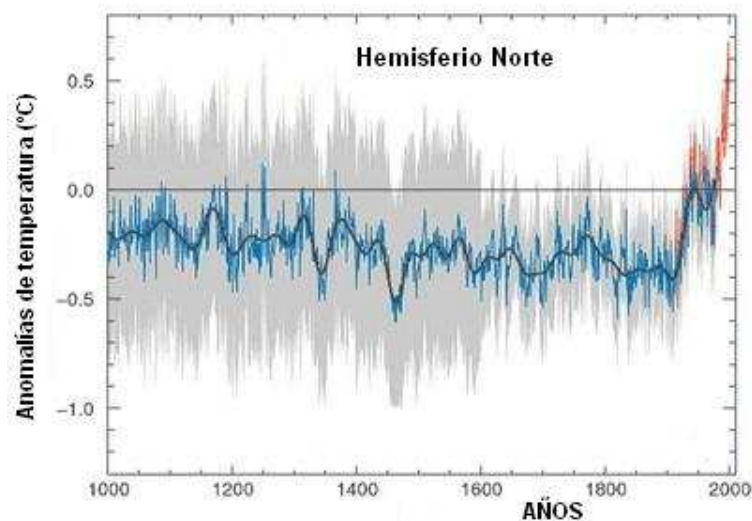
Figura 6 Diversas rutas vikingas de colonización inferidas por John N. Harris de los relatos compilados por Brent (1975) y por Ingstad Helge y Ingstad Anne Stine (2001).



Fuente: publicados en <http://www.spirasolaris.ca/1aintro.html>. Información coincidente con las rutas del noroeste publicadas por McGovern and Perdikaris (2000)

Existen dos hipótesis diferentes acerca de la magnitud de la temperatura durante el período Vikingo. La más difundida sigue los resultados de Mann y otros (1998 y 1999), cuya reconstrucción de las anomalías de temperatura media del Hemisferio Norte muestra una variación similar a la forma del "palo de jockey" (figura 7). Según estos autores los valores de temperatura durante el Período Cálido Medieval no habrían superado el promedio del período 1961-90 tomado de base para el cálculo de las anomalías. Luego la temperatura habría descendido lentamente con muy débiles variaciones hasta el siglo XIX. Posteriormente mostrarían un fuerte calentamiento alcanzando valores superiores al período de base a partir de mediados del siglo XX.

Figura 7: Reconstrucción para el Hemisferio Norte de las anomalías de temperatura respecto a la media del período 1961-90.



Fuente: Adaptado de Mann et al. (1999) Datos de anchos de anillos de árboles, corales, testigos de hielo, y registros históricos (azul), datos a partir de termómetros (rojo) y superpuesto el límite de error (gris)

Esta reconstrucción fue presentada en el informe del año 2001 del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) y es expuesta en la película de Al Gore “Una verdad inconveniente” estrenada en el 2006. Similares reconstrucciones fueron obtenidas en otros estudios (Jones y otros, 1998; Crowley y otros, 2000; Jones y otros, 2001; Briffa y otros, 2001 y 2004; Mann y Jones, 2003, entre otros). Estas reconstrucciones como la de Mann et al., 1998 fueron fundamentalmente basadas en cronologías de anchos de anillos de árboles a partir de las cuales se infiere la temperatura mediante procedimientos estadísticos.

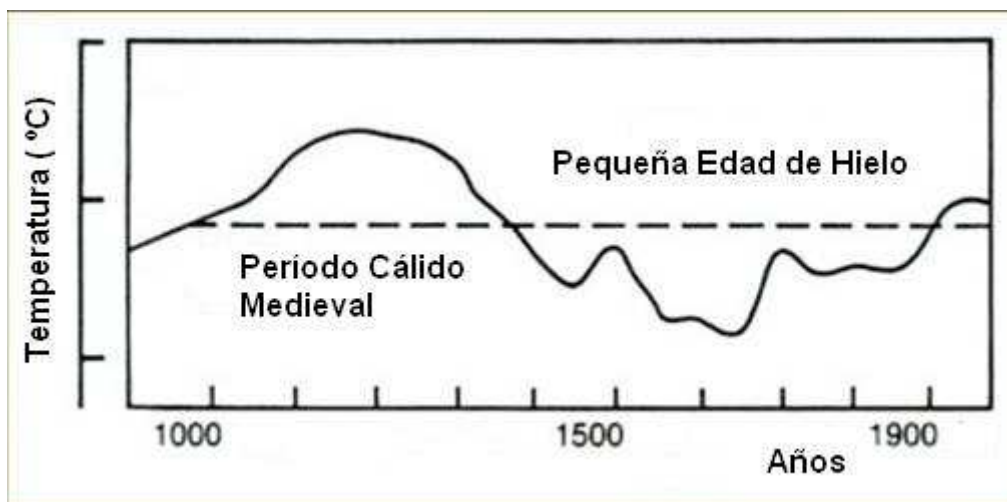
El “palo de hockey” tuvo importantes críticas las cuales sostienen que la metodología empleada llevó a desdibujar la existencia del prolongado e importante calentamiento durante el PCM (McIntyre y McKittrick, 2003 y 2005; von Storch et al., 2004; Stockwell, 2006; National Research Council, 2006, D'Arrigo et al., 2008 y el libro de Montford, 2010).

Los críticos del “palo de hockey” señalan por un lado las deficiencias de las cronologías como “proxies” de la temperatura, ya que el crecimiento de los árboles es un buen estimador para anomalías negativas pero subestiman las anomalías positivas. Por otro lado

cuestionan la metodología de Componentes Principales empleada para convertir esa información en valores de anomalías de temperatura. Como en el caso de las bases interpoladas de temperatura de superficie, critican también que la información empleada para determinar la temperatura en los primeros 1300 años cuenta con mucho menor número de cronologías y por lo tanto menor cobertura y densidad de información, así como menor homogeneidad en la distribución espacial de la misma. Los análisis comparativos realizado por Esper et al., (2002) ponen en evidencia que cambiando el procedimiento estadístico, para inferir temperaturas a partir de las cronologías, los resultados muestran mayor calentamiento que el valor promedio de 1961-90 durante el periodo medieval, mientras que con el método de Mann y colaboradores las anomalías son negativas para ese período.

La otra hipótesis, sostenida por algunos científicos antes de la publicación del "palo de jockey" (Lamb, 1977, 1985 and 1995; Tkachuck, 1983; Grove, 1988) y presentada inicialmente por el IPCC en 1990 (figura 8), indicaría que durante el período Vikingo los valores de temperatura serían comparables, y para algunos autores, aún superiores a los valores actuales.

Figura 8: Temperatura del pasado milenio antes de que las reconstrucciones cuantitativas estuvieran disponibles.



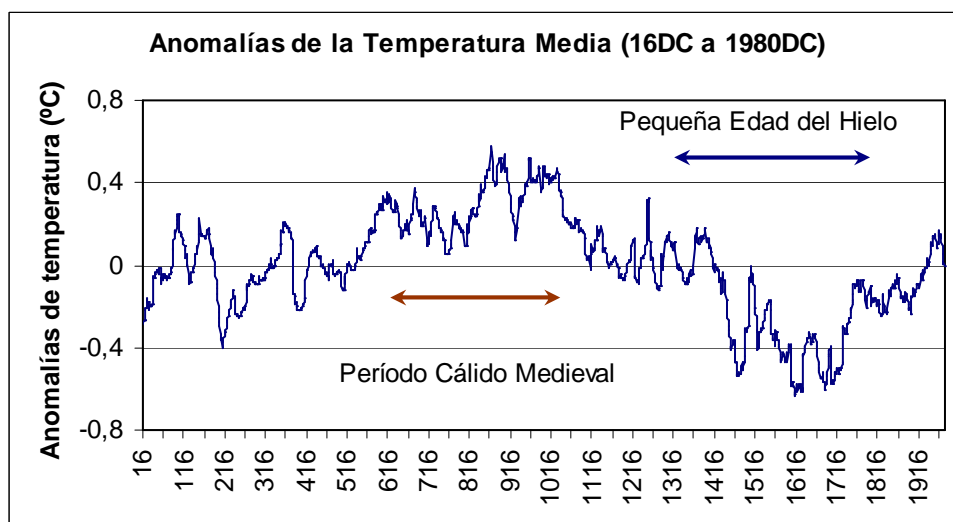
Fuente: adaptada del reporte del IPCC (1990). La curva está basada en la reconstrucción de Lamb fundamentada en la información histórica en especial de Inglaterra central.

Reconstrucciones de la temperatura posteriores a Mann y otros (1998), tales como la de Esper y otros (2002); Soon y Baliunas, 2003; Cook *et al.* (2004); Esper et al. (2005);

Moberg et al. (2005); Lohle (2007) y Esper y Frank (2009) muestran evidente el calentamiento medieval y también analizan las fuentes de error de la reconstrucción de Mann et al. (1998 y 1999).

En la figura 9 se presenta la reconstrucción de Loehle (2007) basada en 18 proxies diferentes a las tradicionales series de dendrocronologías. La anomalías respecto al período 1961-90 del PCM alcanzan valores de 0,5°C o levemente superiores, los cuales son similares a las anomalías de la década de los 90s. A partir del siglo XIV la temperatura decae y se aprecian los mínimos de temperatura correspondientes a los mínimos solares de Spörer (1450-1550), Maunder (1645-1715) y Dalton (1790-1820).

Figura 9: Promedio Global de Temperatura. Reconstrucción basada en 18 proxies de temperatura del período 1DC a 1995DC.



Fuente: adaptada de Loehle, 2007

En el informe del 2007 del IPCC se reconoció la existencia del “Calentamiento Medieval” pero manteniendo incertidumbre respecto a su magnitud y considerando que pudo haber sido inferior al calentamiento actual.

La reciente reconstrucción de temperaturas Mann et al. (2009) permanece con la postura previa de subestimar el calentamiento medieval. Este trabajo fue rápidamente criticado por Mc Intyre en su “blog” Climate Audit en una nota del 27 de Noviembre del 2009 (<http://climateaudit.org/2009/11/27/yes-another-upside-down-mann-out/>) y por la publicación “online” CO2 Science Volumen 13, Número 3, del 20 de Enero del 2010

(<http://www.co2science.org/articles/V13/N3/EDIT.php>) "Mann and Company Still Malign the Medieval Warm Period" .

Respecto al discutido posible carácter global del calentamiento medieval, existen resultados que indicarían su posible ocurrencia también en el Hemisferio Sur. Mann y Jones, (2003) presentan una reconstrucción de la temperatura para cada hemisferio en la cuál el PCM está nuevamente ausente para el HN mientras que para el HS es superior a la línea de base (período 1961-90).

Los autores que acuerdan con la posición que muestra la importancia del PCM también sostienen la hipótesis de la importante influencia de los cambios solares en el calentamiento actual. Luego del "Calentamiento Medieval" la actividad solar decayó notoriamente durante la "Pequeña Edad del Hielo" para volver a incrementarse a mediados del siglo 19 alcanzado altos valores durante el siglo 20. Según Solanski et al., (2004) el número de manchas solares, que es proporcional a la irradiancia solar, fue totalmente inusual y sólo alcanzado 8000 años antes del presente.

La discrepancia entre los resultados de ambos grupos de investigadores puede entonces claramente atribuirse en parte a los diversos proxy datos utilizados y por otro a las diversas y complejas metodologías estadísticas empleadas para su análisis, en especial su ajuste y conversión a valores de temperatura.

Actualmente, las dudas respecto a los resultados obtenidos por Mann y colaboradores son cada vez mayores, en especial después del famoso "Climate Gate" de fines del 2009. Los correos electrónicos intercambiados entre los investigadores, que forman la cúpula científica del IPCC, fueron extraídos ilegalmente de la computadora del "Climatic Research Unit" de la cuenta de Phil Jones. Esta correspondencia revelaría intencionalidad en tratar de hacer "desaparecer" al calentamiento medieval de los resultados que se publicaron.

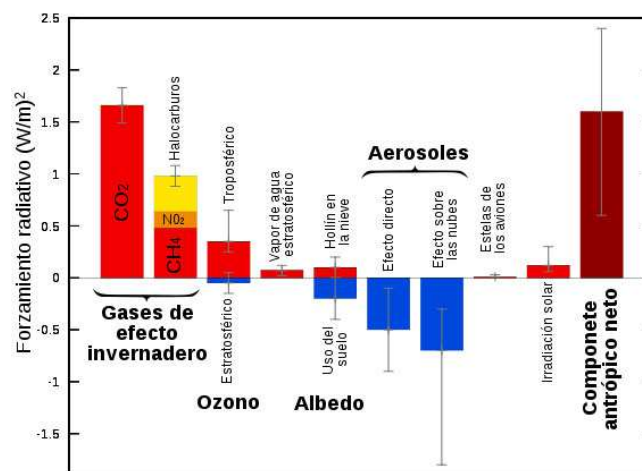
Hipótesis sobre las causas del calentamiento del Siglo XX

Surgen más preguntas: *¿Cuán natural puede ser el presente calentamiento? ¿Cuánto ha influido la actividad humana? ¿Que magnitud hubiese alcanzado el actual calentamiento de no existir la influencia humana?*

Son diversas las respuestas e hipótesis que existen actualmente:

1. De acuerdo con el informe del IPCC 2007 el aumento del CO₂ antropogénico es casi el total responsable del calentamiento, mientras la influencia solar sería menor al 10% del efecto del incremento antropogénico de CO₂. (Figura 10)

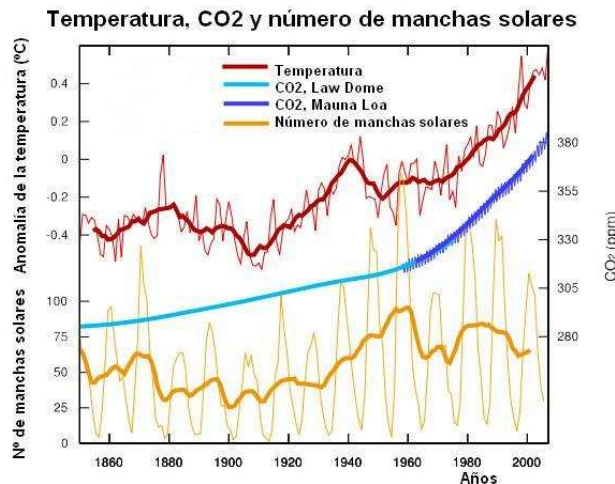
Figura 10: Estimaciones de los forzados radiativos medios global y sus intervalos en 2005 para los gases invernadero antropogénicos y otros mecanismos y agentes importantes.



Fuente: figura realizada por Leland McInne. Las cifras utilizadas para generar esta figura han sido obtenidos del Grupo de trabajo I del IPCC Cuarto Informe de Evaluación Resumen para Políticos, página 4. 1

2. Estudios del Centro Solar de Stanford dependientes de la NASA (Nacional Aeronautics and Space Administration) indicarían una estrecha relación entre la variabilidad de la temperatura y de la actividad solar hasta 1960. Mientras que para los años posteriores, mostrarían que el aumento de la temperatura seguiría la curva del aumento de CO₂. Este grupo sostiene que el calentamiento de los últimos cuarenta años no podría ser explicado por la actividad solar. (Figura 11)

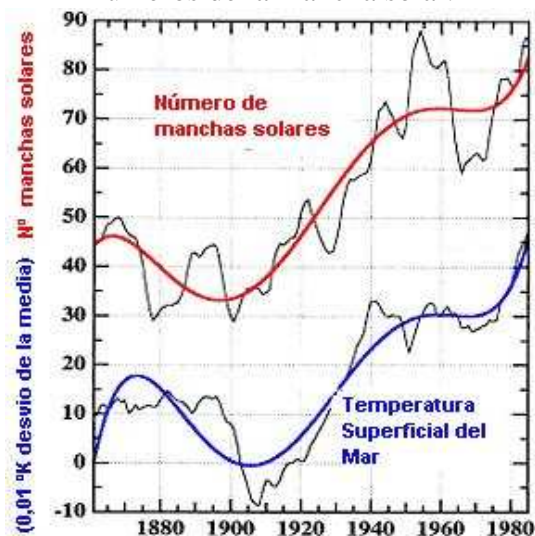
Figura 11: Anomalías de la Temperatura Global, el número de manchas solares y el contenido de CO2 de la atmósfera.



Fuente: adaptada de <http://solar-center.stanford.edu/sun-on-earth/glob-warm.html>

3. De acuerdo con los resultados de Reid (1999), presentados por la NOAA en http://www.oar.noaa.gov/spotlite/archive/spot_sunclimate.html, la variación de la temperatura superficial del mar seguiría concordantemente, al menos hasta 1982, las variaciones del número de manchas solares. La semejanza de las curvas evidencia que el sol ha influenciado el clima de los 150 años pasados. (Figura 12)

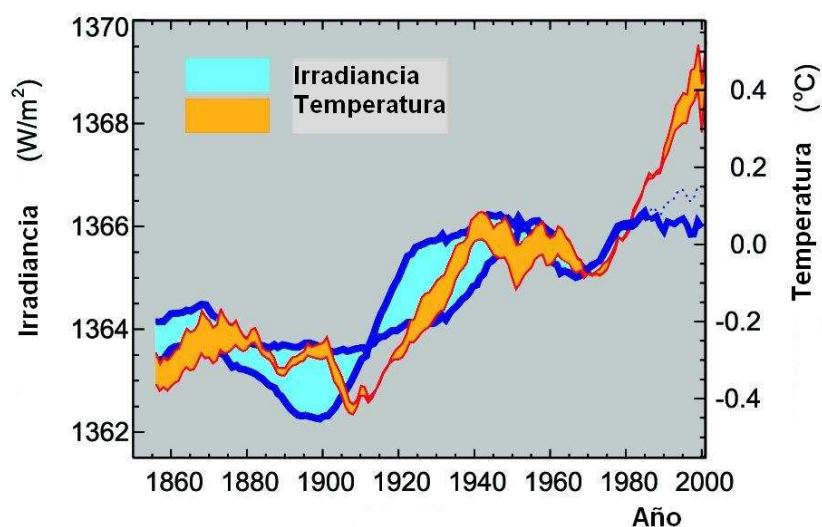
Figura 12: El promedio global de la temperatura superficial del mar versus el números de la mancha solar.



Fuente: adaptado de Reid; 1999

4. Similares resultados y conclusiones son presentados por el Instituto de Investigación del Sistema Solar del Max Planck. Sus estudios indicarían que la temperatura seguiría a la señal solar hasta principios de la década de los ochenta. El incremento posterior de la temperatura, que alcanzaría a 0.4°C en 1998 para luego descender unas centésimas de grado hasta el 2000, no podría ser explicado por el incremento de la irradiancia solar ya que estos valores se estabilizan a partir de 1980 mostrando luego una leve disminución. La presencia de otros factores tales como el indudable aumento antropogénico de los gases invernadero, del vapor de agua y de la deforestación habrían colaborado en el aumento de la temperatura durante las dos últimas décadas. (Figura 13)

Figura 13: Curvas suavizadas por un promedio móvil de 11 años de irradiancia total solar y anomalías de temperatura media global



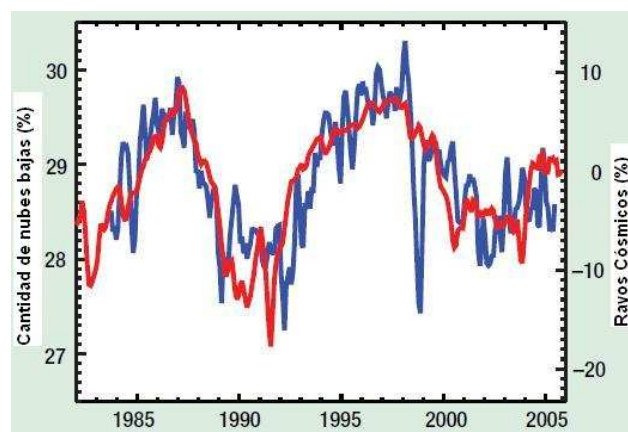
Fuente: Adaptada de Krivova y Solanki, 2003

5. También, el aumento de la temperatura de las dos últimas décadas por causas naturales, podría llegar a ser explicada por la reciente teoría que propone la influencia de los Rayos Cósmicos Galácticos (RCG) en el incremento de nubes medias y bajas. Esta hipótesis proviene del Centro Espacial Danés, DTU con el experimento SKY (Dinamarca para las “nubes”).

La mayor actividad solar, equivalente a un mayor número de manchas solares, implica mayor irradiancia solar y también produce mayor viento solar. Este es un “escudo protector” al ingreso de los RCG con lo cual el flujo de los RCG que penetran en la atmósfera es menor cuando el número de manchas solares es mayor. Los RCG ayudarían a la formación de nubes

bajas espesas y de cálidas temperaturas llamadas cúmulos y estratos, como las de regiones extra polares. Carslaw et al., (2002) propone el modelo físico de esta teoría y Svensmark (2007) muestra la significativa relación entre la variabilidad del flujo de RCG y las nubes bajas (figura 14). Este tipo de nubes reflejan mucha luz solar y además emiten abundante radiación infrarroja desde su tope hacia el exterior, con lo cual contribuirían al enfriamiento de los niveles bajos de la atmósfera. Opuestamente, al disminuir el flujo de RCG disminuirían las nubes medias y bajas y aumentarían las nubes altas y finas formadas por cristalitas de hielo, llamadas cirrus. Estas nubes son transparentes a la radiación solar y su emisión infrarroja hacia el espacio es pequeña pues su superficie está muy fría colaborando por lo tanto al calentamiento de la superficie terrestre.

Figura 14: En azul el porcentaje de nubes bajas (banco de datos del International Satellite Cloud Climatology Project) y en rojo la variación mensual de la cantidad de RCG contabilizadas en la estación Huancayo.

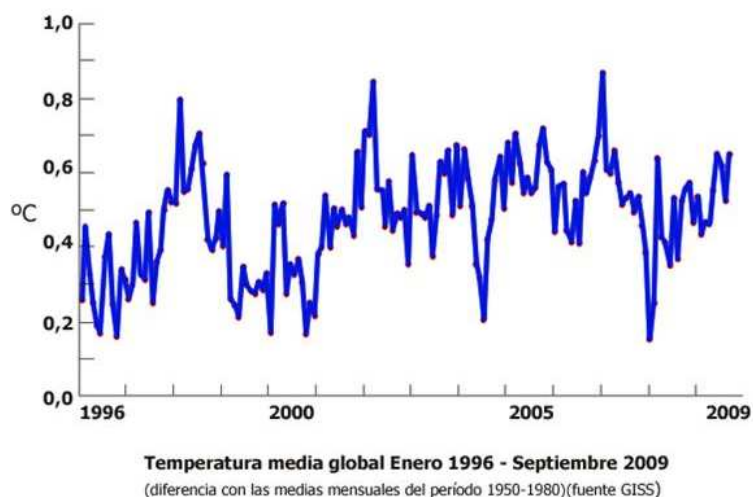


Fuente: adaptado de Svensmark, 2007

El clima del siglo XXI y perspectivas futuras

Después del máximo de temperatura global de 1998, a pesar del continuado aumento de las emisiones, la temperatura global en lugar de seguir ascendiendo empezó a oscilar entorno a un valor constante generando un quiebre en la tendencia positiva que se observó en las décadas anteriores (figura 15). Algunos archivos, como las mediciones satelitales de temperatura muestran una leve tendencia negativa pero la misma es poco significativa.

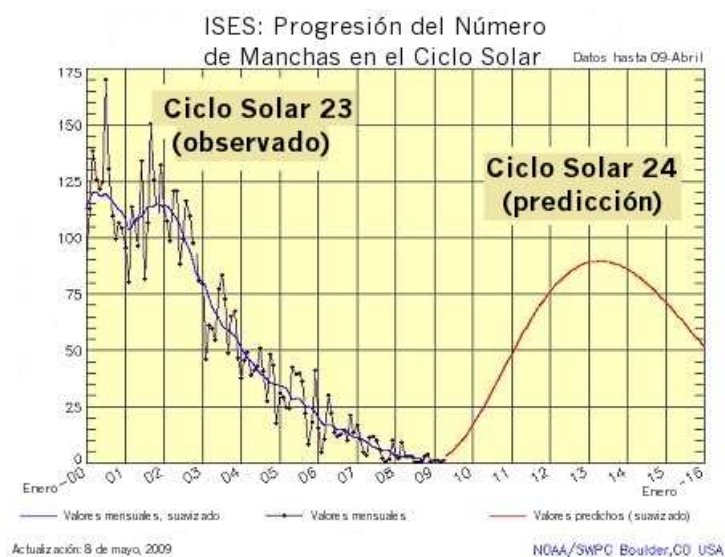
Figura 15: Temperatura media global mensual desde Enero de 1996 a Septiembre del 2009.



Fuente: Datos provenientes del archivo GISS de la NASA. Las anomalías son calculadas respecto a la media del período 1950-80

Este comportamiento de la temperatura inesperado por parte de los principales miembros del IPCC, coincide con la declinación del ciclo 23 de manchas solares. El mínimo solar posterior al ciclo 23 (figura 16) se volvió tan profundo que desde mediados del año 2007 hasta comienzos del 2010 las manchas solares fueron casi inexistentes.

Figura 16: Número de manchas solares mensual para el siglo XXI y pronóstico del ciclo 24.



Fuente: http://ciencia.nasa.gov/headlines/y2009/29may_noaprediction.htm

Durante el 2007 el invierno en Sudamérica fue muy frío con frecuentes e intensas irrupciones de aire polar que llegaron a afectar latitudes muy bajas. También se registraron frecuentes nevadas en Argentina una de ellas el 9 de Julio en la Ciudad de Buenos Aires y alrededores, donde el fenómeno no ocurría desde principios del siglo 20. El invierno en el Hemisferio Norte de 2007-08 se caracterizó por la presencia de olas de frío intenso y fuertes tormentas de nieve que afectaron principalmente los Estados Unidos de Norteamérica, Canadá, China y Afganistán produciendo enormes daños y pérdida de vidas humanas. Ocurrieron nevadas en lugares inusuales como la Acrópolis de Atenas y en Turquía donde se produjo la muerte de dos personas. El mínimo solar continúa aún a principios del 2010. La ausencia de manchas solares durante los inviernos 2008-09 y el 2009-10 del Hemisferio Norte podrían relacionarse con las olas de intenso frío y las tormentas de nieve que producen condiciones críticas especialmente en Europa y que también afectan a Norteamérica.

El reciente pronóstico de la NASA sobre la actividad solar (figura 16) indicaría durante el 2010 el comienzo del ciclo solar 24 que llegaría a su máximo aproximadamente en el 2013. Previos pronósticos estimaron su magnitud similar o aún superior a la del ciclo 23, sin embargo ahora se la estima análoga o inferior al ciclo 20 que está relacionado con el enfriamiento de la década 1960/70. La NASA resume en su reporte (http://science.nasa.gov/headlines/y2009/03sep_sunspots.htm) el sorprendente decrecimiento de la actividad solar durante el siglo XXI. Algunos investigadores pronostican el comienzo de un prolongado mínimo similar al de Dalton o quizás como el de Maunder (Landscheidt, 2003; Livingston y Penn, 2009; de Jager y Duhau, 2009; Archibald; 2009). A futuro la actividad solar promedio descendería notoriamente con un mínimo de unos tres a cinco años de muy baja actividad centrado en el 2020 y seguido por un muy débil ciclo 25 con lo cual, al menos hasta el 2030, estaría pronosticada una muy baja actividad solar.

Discusión y Conclusiones

Nuevas preguntas quedan aún sin respuesta:

¿Que pasará cuando la irradiancia solar decrezca respecto a los valores actuales, como ya ocurrió en el pasado y ocurrirá en el futuro?

¿El aumento de RCG que conlleva la disminución de la actividad solar producirá enfriamiento por el aumento de nubosidad media y baja?

¿El nuevo balance energético entre la energía solar recibida y la temperatura de la tierra, que sin la presencia del incremento antropogénico de gases invernadero llevaría a un notorio enfriamiento, se verá reflejado en la disminución de la temperatura global o será amortiguado por el aumento de CO₂?

¿Si decrece la temperatura terrestre se podrán mantener los niveles actuales de CO₂ en la atmósfera y aún seguirán subiendo debido a las emisiones a pesar de las nuevas condiciones?

Se supone que estas y muchas otras preguntas podrían ser resueltas empleando los modelos numéricos para simular el clima futuro. La objeción principal con respecto a la fiabilidad de los panoramas futuros obtenidos por el modelado climático es que el sistema atmosférico/oceánico es altamente no lineal y complejo. Las ecuaciones básicas que gobiernan tanto la circulación atmosférica como la oceánica son ecuaciones de Navier-Stokes (Roulstone y Norbury 2002), un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales cuya formulación integral no tienen resolución analítica. Es necesario recurrir al análisis numérico de su formulación diferencial para determinar una solución aproximada. Además es muy difícil de modelar y requiere sistemas computacionales enormes por el gran número de interacciones de las diversas componentes en diversas escalas de tiempo y de variabilidad. De aquí que los escenarios del clima futuro obtenidos mediante el uso de Modelos de Circulación General son inciertos y poco confiables (Lorenz, 1964; Courtney, 1999; Govindan et al., 2002; Reifen y Toumi, 2009)

Los avances científicos y tecnológicos no nos deben hacer olvidar que las conclusiones y las decisiones son realizadas por los hombres y las mujeres conforme a las dudas que, son a veces, las mismas dudas que existieron en una sociedad mucho más primitiva que la actual.

¿Las medidas que se están tomando o se proyectan realizar corresponden al desarrollo sustentable de la sociedad y a la protección del ecosistema ya muy dañado por las diversas actividades humanas, o por el contrario a largo plazo nos llevarán a situaciones aún más críticas que la actual?

Los Mayas tienen un dicho: *La solución de ayer es el problema de hoy.*

Habría que pensar: *Que la solución de hoy no resulte un problema del mañana.*

Independientemente que el clima futuro sea frío, como esperan los que pronostican el advenimiento de un prolongado y profundo mínimo solar, o más caliente que el actual, como esperan los que suponen que el incremento del CO₂ antropogénico es el mayor responsable del cambio climático, podríamos soñar un futuro viable para las nuevas generaciones si buscamos lograr una vida más equilibrada basada en una relación más íntima con la naturaleza. Cualquiera sea el clima futuro se vuelve vital tener en cuenta el cuidado de los ecosistemas, el uso de recursos renovables, el desarrollo y utilización de energías "limpias" como la energía solar y eólica. Estas ideas se están difundiendo y la sociedad comienza a tomar consciencia de la gravedad del impacto del hombre en el planeta y en su propia vida.

Agradecimientos

Trabajo realizado en el marco de los proyectos PIC 5006 del CONICET, PICT 2007-00438 Prestamo BID de AGENCIA, UBACYT X-016 y del proyecto de colaboración bilateral con Sudáfrica A0811.

Citas bibliográficas

Archibald, D., 2009. "Solar cycle 24: Expectation and implications". *Energy and Environment*, 20:1-11.

Brent, P., 1975. *The Viking saga*, 263p, Book Club Associates.

Briffa, K. R., Osborn, T. J., Schweingruber, F. H., Harris, I. C., Jones, P. D., Shiyatov, S. G. y Vaganov, E. A., 2001. "Low-frequency temperature variations from a northern tree ring density network", *Journal of Geophysical Research*, 106:D3, 2929–2941.

Briffa, K.R., Osborn, T.J. y Schweingruber, F.H., 2004. "Large-scale temperature inferences from tree rings: a review", *Global Planetary Change*, 40:1–2, 11–26.

Carslaw, K.S., Harrison, R.G. y Kirkby, J., 2002. "Cosmic rays, clouds, and climate", *Science* 298:1732–1737.

Courtney, R.S., 1999: "An assessment of validation experiments conducted on computer models of global climate using the general circulation model of the UK's Hadley Centre", *Energy & Environment*, 10: 5, 491-502.

Crowley, T.J. y Lowery, T.S., 2000. "Northern Hemisphere Temperature Reconstruction". *Ambio*, 29, 51-54.

D'Arrigo, R., Wilson, R., Liepert, B. y Cherubini, P., 2008. "On the 'Divergence Problem' in Northern Forests: A review of the tree-ring evidence and possible causes", *Global and Planetary Change*, 60, 289-305.

de Jager, C. y Duhau, S., 2009. "Forecasting the parameters of sunspot cycle 24 and beyond", *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 71, 239 – 245.

Douglass, D. H., Pearson, B. D. y Singer, S. F., 2004. "Altitude dependence of atmospheric temperature trends: Climate models versus observation", *Geophysical Research Letters*, 31, L13208, doi:10.1029/2004GL020103.

Douglass, D.H., Christy, J.R., Pearson, B.D. y Singer, S.F., 2007. "A comparison of tropical temperature trends with model predictions", *International Journal of Climatology*, 27, 1693-1701.

Esper, J., Cook, E.R. y Schweingruber, F.H., 2002. "Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability", *Science*, 295, 2250-2253.

Esper, J., Wilson, R.J.S., Frank, D.C., Moberg, A., Wanner, H. y Luterbacher, J., 2005. "Climate: past ranges and future changes", *Quaternary Science Reviews*, 24, 2164-2166.

Esper, J. y Frank, D., 2009. "The IPCC on a heterogeneous Medieval Warm Period", *Climatic Change*, 94, 267-273.

Fagan, B., 2004. *The Long Summer: How Climate Changed Civilization*, 304p, Basic Books.

Govindan, R. B., Vyushin, D., Bunde, A., Brenner, S., Havlin, S. y Schellnhuber, H.-J., 2002. "Global climate models violate scaling of observed atmospheric variability", *Physics Review Letters*, 89:028510, 1-4.

Hale, R. C., Gallo, K. P. y Loveland, T. R., 2008. "Influences of specific land use/land cover conversions on climatological normals of near-surface temperature", *Journal of Geophysical Research*, 113: D14113, doi: 10.1029/2007JD009548.

Ingstad, H. y Ingstad, A. S., 2001. *The Viking discovery of America: The excavation of a Norse settlement in L'Anse aux Meadows, Newfoundland*, 194p, Breakwater Books Ltd, St. John's, Newfoundland, Canada.

IPCC, 2007. Intergovernmental Panel on Climate, Fourth assessment report: Working Group I "The Physical Science Bases". (<http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>)

Jones, P.D., Briffa, K.R., Barnett, T.P. y Tett, S.F.B., 1998. "High-resolution palaeoclimatic records for the last millennium; interpretation, integration and comparison with general circulation model control-run temperatures", *The Holocene*, 8, 455-471.

Jones, P.D., Osborn, T.J. y Briffa, K.R., 2001. "The evolution of climate over the last millennium", *Science*, 292:5517, 662-667.

-
- Jones, P.D. y Moberg, A., 2003. "Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: an extensive revision and an update to 2001", *Journal of Climate*, 16, 206-223.
- Karl, T. R., Hassol, S. J., Miller, C. D. y Murray, W. L., 2006. *Temperatura trends in the lower atmosphere: Steps for understanding and reconciling differences*. A Report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Climatic Data Center: Asheville, NC; 164.
- Krivova, N.A. y Solanki, S.K., 2003. "Solar total and spectral irradiance: Modelling and a possible impact on climate", *ESA*, SP-535, 275-284
- Lamb, H.H., 1985. "The reconstruction of past climate during the historical period". *Ymer: Himmel och Jord* 105, 91-102
- Lamb, H.H., 1995. *Climate, History and the Modern World*, 433p, Routledge.
- Landscheidt, T., 2003. "New Little Ice Age instead of global warming", *Energy & Environment*, 14, 327-350.
- Livingston, W. y Penn, M., 2009. "Are Sunspots Different During This Solar Minimum?", *Eos Trans. AGU*, 90(30), doi:10.1029/2009EO300001.
- Loehle, C., 2007. "A 2000-year global temperature reconstruction based on non-treering proxies", *Energy & Environment* 18:7-8, 1049-1058
- Lorenz, E., 1964. "The problem of deducing the climate from the governing equations", *Tellus*, 16, 1-11
- Mann, M.E., Bradley, R.S. y Hughes, M.K., 1998. "Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries", *Nature* 392: 779-787
- Mann, M.E., Bradley, R.S. y Hughes, M.K., 1999. "Northern Hemisphere Temperatures During the Past Millennium: Inferences, Uncertainties, and Limitations", *Geophysical Research Letters*, 26, 759-762.
- Mann, M.E., Zhang, Z., Hughes, M.K., Bradley, R.S., Miller, S.K., Rutherford, S., 2008. "Proxy-Based Reconstructions of Hemispheric and Global Surface Temperature Variations over the Past Two Millennia", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 105, 13252-13257.
- Mann, M.E., Zhang, Z., Rutherford, S., Bradley, R.S., Hughes, M.K., Shindell, D., Ammann, C., Faluvegi, G. y Ni, F., 2009. "Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly", *Science* **326**: 1256-1260.
- Maue, R. N., 2009. "Northern Hemisphere tropical cyclone activity", *Geophysical Research Letters*, 36, L05805, doi:10.1029/2008GL035946.
- McGovern, T.H. y Perdikaris, S., 2000. "The Vikings' Silent Saga", *Natural History*, 109: 9, 50-57.
-

-
- McIntyre, S. y McKittrick, R., 2003. "Corrections to the Mann *et al.* (1998) proxy data base and Northern Hemispheric average temperature series". *Energy & Environment*, 14, 751-771.
- McIntyre, S. y McKittrick, R., 2005. "Hockey sticks, principal components, and spurious significance", *Geophysical Research Letters*, 32: L03710, doi:10.1029/2004GL021750
- McKittrick, R.R. y Michaels, P.J., 2007. "Quantifying the influence of anthropogenic surface processes and inhomogeneities on gridded global climate data", *Journal of Geophysical Research*, 112, D24S09.
- McIntyre, S. y McKittrick, R., 2009." Proxy inconsistency and other problems in millennial paleoclimate reconstructions", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 106:E10; published online before print February 2, 2009, doi:10.1073/pnas.0812509106.
- Moberg, A., Sonechkin, D.M., Holmgren, K., Datsenko, N.M. y Karlen, W., 2005. "Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data", *Nature*, 433, 613-617.
- Montford, A.W., 2010. *The Hockey Stick Illusion; Climategate and the Corruption of Science (Independent Minds)*, 482p., Stacey International.
- Nesje, A., 2005. "Briksdalsbreen in western Norway: AD 1900-2004 frontal fluctuations as a combined effect of variations in winter precipitation and summer temperature", *The Holocene*, 15, 1245-1252
- Oerlemans, J., 2005. "Extracting a climate signal from 169 glacier records", *Science*, 308, 675-677.
- Pielke, R. A., Davey, Ch. A., Niyogi, D., Fall, S., Steinweg-Woods, J., Hubbard, K., Lin, X., Cai, M., Lim, Y., Li, H., Nielsen-Gammon, J., Gallo, K., Hale, R., Mahmood, R., Foster, S., McNider, R. T. y Blanken, P., 2007b. "Unresolved issues with the assessment of multidecadal global land surface temperature trends", *Journal of Geophysical Research*, 112: D24S08, doi:10.1029/2006JD008229.
- Pielke, R., Nielsen-Gammon, J., Davey, C., Angel, J., Bliss, O., Doesken, N., Cai, M., Fall, S., Niyogi, D., Gallo, K., Hale, R., Hubbard, K. G., Lin, X., Li, H. y Raman, S., 2007a.: "Documentation of uncertainties and biases associated with surface temperature measurement sites for climate change assessment", *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88, 913-928.
- Reifen, C., y Toumi, R., 2009. "Climate projections: Past performance no guarantee of future skill?", *Geophysical Research Letters*., 36, L13704, doi:10.1029/2009GL038082.
- Robeson, S.M., 1995. "Resampling of network-induced variability in estimates of terrestrial air temperature change", *Climatic Change*, 29, 213-229.
- Robinson, A.B., Robison, N.E. y Soon, W., 2007. "Environmental effects of increased atmospheric carbon dioxide", *J. American Physician and Surgeon*, 12, 79-90.
-

-
- Roulstone, I., y Norbury, J., 2002. *Large-Scale Atmosphere-Ocean Dynamics. Volume 1 Analytical Methods and Numerical Models*, 400p., Cambridge University Press.
- Rutherford, S., Mann, M.E., Wahl, E. y Ammann, C., 2009. "Reply to: Comment on 'Robustness of proxy-based climate field reconstruction methods', by Mann et al.", *Journal of Geophysical Research*, 113, D18107,
- Schaefer J.M., Denton, G.H., Kaplan, M., Putnam, A., Finkel, R.C., Barrell, D.J.A., Andersen, B.G., Schwartz, R., Mackintosh, A., Chinn, T. y Schlüchter, Ch., 2009. "High-Frequency Holocene Glacier Fluctuations in New Zealand Differ from the Northern Signature", *Science*, 324, 622-625.
- Smith, T.M., y Reynolds, R.W., 2005. "A Global Merged Land–Air–Sea Surface Temperature Reconstruction Based on Historical Observations (1880–1997)", *Journal of Climate*, **18**, 2021–2036.
(<http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/research/anomalies/anomalies.html#anomalies/>)
- Solanki, S.K., Usoskin, I.G., Kromer, B., Schüssler, M. y Beer, J., 2004. "An unusually active Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years", *Nature*, 431: 7012, 1084-1087.
- Soon, W., y Baliunas, S., 2003. "Proxy climatic and environmental changes of the past 1000 years", *Climatic Research*, 23, 89–110.
- Stockwell, D., 2006. "Reconstruction of past climate using series with red noise", *AIG News*, 83, 14.
- Svensmark, H., 2007. "Cosmoclimatology: a new theory emerges", *Astronomy & Geophysics*, 48: 1, 1.18-1.24(1.06).
- von Storch, H., Zorita, E., Jones, J. M., Dimitriev, Y., González-Rouco, F., y Tett, S.F.B., 2004. "Reconstructing Past Climate from Noisy Data", *Science*, 306: 5696, 679–682
- Willmott, C.J. y Matsuura, K., 2006. "On the use of dimensioned measures of error to evaluate the performance of spatial interpolators", *International Journal of Geographical Information Science*, 20:1, 89-102
- Willmott, C.J., Robeson, S.M., y Feddema, J.J., 1991. "Influence of spatially variable instrument networks on climatic averages", *Geophysical Research Letters*, 18:12, 2249–2251.
- Winkler, S., Elvehøy, H. y Nesje, A., 2009. "Glacier fluctuations of Jostedalbreen, western Norway, during the past 20 years: the sensitive response of maritime mountain glaciers", *The Holocene*, 19, 395 - 414.
-