Cambio climático. Una vision global

Antonio L. Doadrio

Académico de Número de la RANF.
Recibido el 3 de febrero de 2011.
e-mail: antoniov@farm.ucm.es

RESUMEN

Este artículo presenta una panorámica de la situación actual del calentamiento global en el Planeta, para después plantear su previsible consecuencia, que no es otra que la de un cambio climático. Todo ello, tratado como un artículo de divulgación científica, orientado a un público amplio. Se han ordenado los hechos y se ha pretendido transmitir un orden lógico. En este tema vamos a encontrar posturas contrapuestas y a veces irreconciliables. Sin embargo, veremos que hay pruebas de un calentamiento global, que puede producir un cambio climático cuyas consecuencias están por definir.

Palabras clave: Calentamiento global; cambio climático; medioambiente.

ABSTRACT

Climate change. A global overwiew

This article presents an overview of the current situation of global warming on the Planet, to later follow with its foreseeable consequences, a climate change. All this is treated as a scientific article, aimed at a wide audience. In this subject we find contradictory and, sometimes, irreconcilable positions. However, there are clear evidences of a global warming, which can produce a climate change whose consequences need to be defined.

Keywords: Global warming; climate change; environment.

1. POSTURAS Y TEORÍAS

James Lovelock, conocido ecologista y autor del libro "La venganza de Gaia", dice que la catástrofe es irreversible, que "la Humanidad se dirige a un desastre ecológico inevitable y casi inmediato; que ya no está en manos del hombre evitar la

desaparición de vida en el Planeta y que solo habrá vida en el Ártico, donde habitarán los 500 millones de humanos que sobrevivan al cambio climático". Para el Premio Nobel Al Gore, conocido político, autor de "Una verdad incómoda", aún hay tiempo para prevenir la catástrofe, manifestando que "el mundo avanza hacia su irremediable destrucción, pero que aún hay remedio. El ser humano dispone de un máximo de 20 años para frenar este proceso". Dice además, que "más de un millón de especies podrían extinguirse hasta el año 2050; ese mismo año no quedará hielo en el Ártico y en sólo 25 años se doblarán las muertes por el cambio climático, ascendiendo a 300.000 personas al año". Para Manuel Toharia, climatólogo, divulgador científico y autor del libro "El Clima, el calentamiento global y el futuro del Planeta": "existe un calentamiento del Planeta demostrable científicamente y provocado por el hombre, pero no tenemos datos suficientes para predecir las consecuencias del mismo en un sistema complejo como La Tierra". Dice también "que no conocemos las consecuencias finales de este proceso y critica a los que apoda como «fundamentalistas medioambientales» por hacer predicciones sin base científica".

Estas posiciones tienen sus seguidores y obedecen a tres tipos de actitudes, las más catastrofistas, las de urgencia en las medidas a tomar y las de prudencia, respectivamente. Pero en todas ellas el denominador común es que no ponen en duda que hay un cambio climático en marcha.

Sin embargo, también hay escépticos que no creen en el cambio climático -cada vez menos- entre ellos algunos científicos.

Si es cierto que en este tema se puede llegar a unas dimensiones catastrofistas, que ya han sido utilizadas por la prensa o en películas, también lo es que en el mundo científico puede resultar mas fácil obtener ayudas y proyectos científicos por este motivo, por lo que nos puede asaltar la duda de sino estaremos creando un problema que no es real.

Por ello, lo mejor es acudir a hechos científicos cuantificables, para poder entender la magnitud de un cambio climático, que de hecho no es novedad en nuestro Planeta. Adelantemos ya, que el actual cambio climático está asociado a un calentamiento global, por lo que empezaremos por establecer datos cuantitativos y observables de este fenómeno.

2. ALGUNOS DATOS DEL CALENTAMIENTO GLOBAL

Que La Tierra se está calentando en estos últimos años parece no ofrecer ninguna duda. Las olas de calor veraniegas son cada vez más frecuentes. En la última década, regiones de Italia, Portugal y España han llegado a superar los 47ºC. En la ola de calor de 2003 en Italia murieron más de 20.000 personas. En 2004 y

2005, la India sufrió olas de calor de 50 ºC, con graves sequías. (Fuentes: IPCC, ADENA). El año 2006 fue extremadamente cálido en España, con un incremento de +1,34 ºC respecto a la referencia (1961-1990) y superior a 2003 (+1,32 ºC), que fue el más alto registrado desde 1989, año en el que se comenzaron a medir las anomalías globales. En varios observatorios 2006 marcó un récord histórico, como en Madrid-Retiro, desde 1900. Estas, son temperaturas promedio y si bien el mes de febrero fue mas frío (-1,34º), el de mayo fue el más caluroso (+2,61º), superando los +2º de promedio hasta 6 meses del año (abril, mayo, junio, julio, octubre y noviembre). (Fuente: INM). En la Figura 1 se visualiza el mapa de desviaciones respecto a las temperaturas medias en 2006.

De esta cuestión, encontramos frecuentes noticias en periódicos y revistas de divulgación científica, como por ejemplo: "La temperatura del Mediterráneo sube cinco veces más que la media. La temperatura en superficie del Mediterráneo aumentó 0,75 grados entre 1993 y 2003, lo que supone cinco veces más que la media del resto de mares y océanos del planeta, según una investigación del Laboratorio de Geodesia Espacial de la Universidad de Alicante en colaboración con la NASA". (Fuente Madri+d).

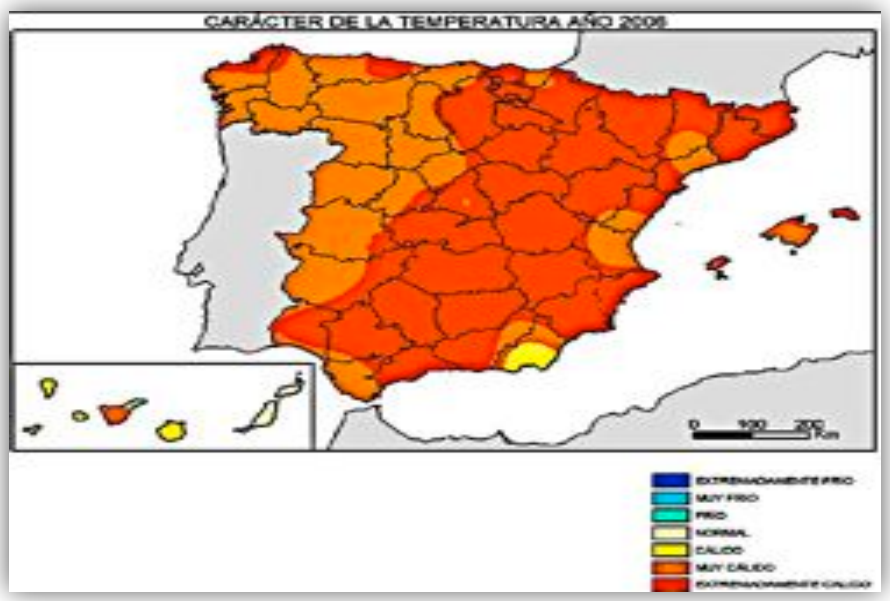

Figura 1.- Anomalías de temperaturas registradas en España en 2006. Fuente AEMET (antiguo Instituto Nacional de Meteorología o INM).

Sin embargo, este calentamiento puede resultar imperceptible para la gran mayoría de la población y lo relacionamos mas con cambios de tiempo que con climáticos. Además, solemos confundir el tiempo atmosférico con el clima. Hay que tener en cuenta que el tiempo atmosférico es el estado de la atmósfera en un lugar y un momento determinados y el clima, la sucesión periódica de tipos de tiempo.

Si no podemos apreciar el calentamiento en nosotros mismos, o si creemos que las variaciones son por causa temporal, seremos escépticos sobre el cambio climático. Pero, si que hay un fenómeno observable y es ver como se derrite el hielo en un vaso de agua, en donde el calor se transmite desde el cuerpo más caliente (agua líquida) al frío (agua sólida o hielo), siguiendo las leyes de la Termodinámica. A otro nivel lo podemos observar con el Planeta en el deshielo de glaciales y en los Polos, que obedece directamente a una subida de temperatura (calentamiento).

Por tanto, ahora la pregunta es: ¿Hay un deshielo global?

En el Ártico la temperatura ha subido el doble que la media global. Entre un 5-10% de los hielos perennes se fracturaron debido a las tormentas estivales de 2005 y 2006, porque eran menos espesos y más frágiles. El mayor retroceso en extensión se produjo en 2007; un récord histórico que dejó al Ártico con 4,28 millones de Km^2 a mediados de septiembre. En el verano de 2008 se batió el segundo récord, con 4,67 millones de Km^2 de superficie helada en el mismo mes. La fusión del hielo marino en el Ártico en el verano de 2008 no fue tan intensa y no llegó a superar el de 2007, aunque en volumen perdido fue el mayor desde que se tienen registros. (Fuente: Centro Nacional de Datos sobre Hielo y Nieve de USA, NSIDC). En la Figura 2 podemos ver esa superficie de hielo después del verano de 2008 y en la Figura 3, la comparativa entre septiembre de 2005 y 2007.

No hay un método único para medir el deshielo. Se deben de tener en cuenta los siguientes parámetros: la superficie de hielo, la velocidad y el volumen de pérdida (o grosor de hielo remanente). En agosto de 2008 se registró la mayor velocidad conocida de fusión y la extensión de hielo que quedó representa el menor volumen en la historia de la observación por satélite. Cuanto más hielo se funde, más se acelera el proceso y más volumen se pierde. El motivo es que la capa helada contiene cada vez más hielo joven (delgado y frágil), que con el calor se derrite con mayor facilidad. Esto es lo que lleva ocurriendo desde hace tres décadas (siendo los peores años 2007, 2008 y 2009) y es que el hielo recuperado está recién cuajado o joven, por lo que se funde a una gran velocidad.

Con estos datos, los científicos creen que el hielo del Polo Norte puede desaparecer a finales de este siglo o incluso antes (en los veranos de la década 2020 o de 2030), lo que será una realidad observable y medible. Esta pérdida de hielo acelerará el cambio climático.

Pero estamos hablando solo de una parte del Planeta, por lo que todavía no podemos considerar el proceso global. Entonces ¿hay deshielo en otras partes?

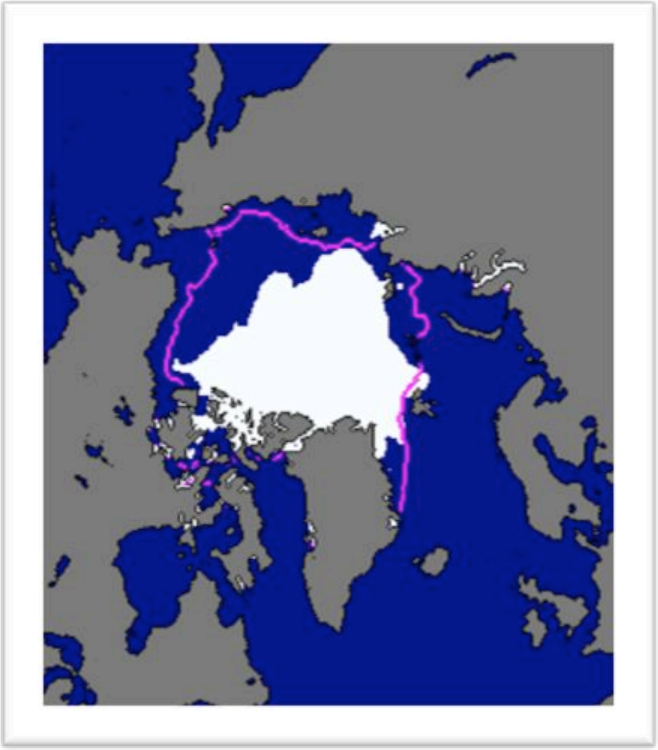

Figura 2.- Extensión del hielo ártico tras el verano de 2008. La línea rosada marca la media de los últimos 30 años. (Foto: NSIDC).

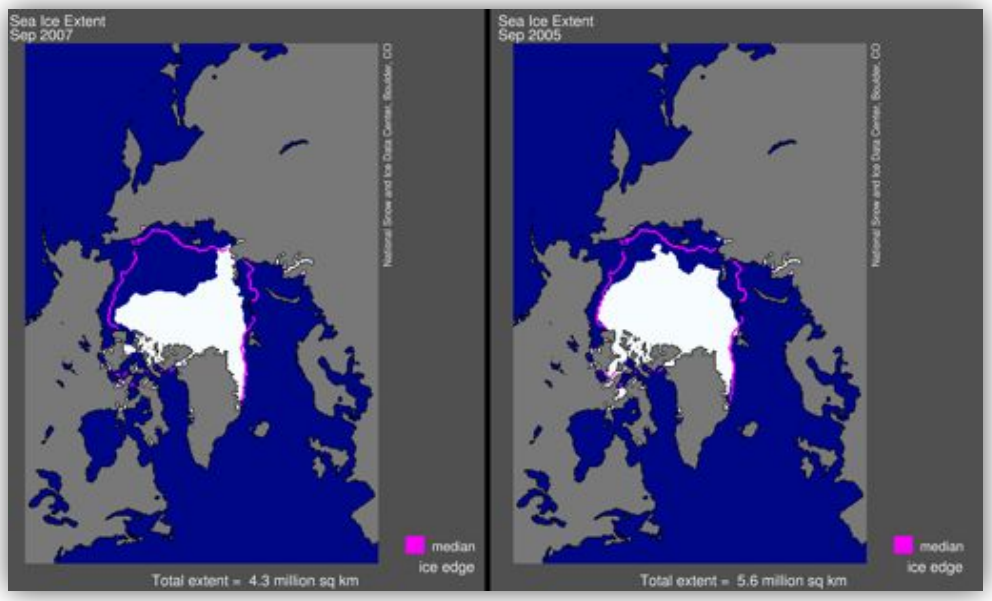

Figura 3.- Extensión del hielo ártico tras el verano de 2007 (izquierda) comparado con 2005 (derecha). La línea rosada marca la media de los últimos 30 años. (Foto: NSIDC).

Los glaciares están retrocediendo, tanto los continentales como los marinos. Como ejemplo, podemos apreciar en la Figura 4 el deshielo observado en el glaciar Yanamarey, que en los últimos 50 años ha perdido la cuarta parte del hielo.

En Colombia existen en la actualidad seis masas glaciares, que han perdido desde 1850 (Pequeña edad de hielo) un 80% de su área y, según esta tendencia, desaparecerían en un futuro próximo. Mediciones *in situ* en la última década indican una velocidad lineal de retroceso del hielo de 10 a 15 metros anuales en promedio, que puede variar de acuerdo con condiciones climáticas extremas, como el Fenómeno Cálido del Pacífico (El Niño). Este deshielo lo podemos observar en la Figura 5.

En América del Sur se da una situación global, aunque de menor proporción de lo que ocurre en Colombia (Ecuador ha perdido un 30% y Perú un 15% de hielo). En la Patagonia los registros son aún menores, entre un 3-4%; pero mientras que el 50 % de retroceso de glaciares en Colombia equivale a unos 55 Km^2 de hielo, en la Patagonia corresponde a unos 700 Km^2, lo que nos da una idea de la magnitud de este proceso (Informe del UNEP/PNUMA: "Perspectivas mundiales para los glaciares y la nieve").

Pero, ¿podemos globalizarlo al resto del Planeta?

Los glaciares alpinos de Suiza y Austria o los de Noruega también están retrocediendo (algunos de ellos de más de un millón de años de antigüedad), como vemos en la Figura 6.

Y lo mismo ocurre en otras partes, como en el caso del glaciar AX010 en Nepal, famoso por aparecer en el documental "Una verdad incómoda", como ejemplo de retroceso de un glaciar.

No hay duda de que existe una regresión de los glaciares a nivel mundial. Lo que todavía nos podemos plantear son las causas: ¿naturales, por acción del hombre, o por una acción conjunta de ambos factores?

Desde el fin de la Pequeña edad de hielo (1850-60) se han ido fundiendo progresivamente la mayor parte de los glaciares continentales. En las montañas de la Península Ibérica los glaciares que se formaron en la Pequeña edad de hielo (entre 1645-1710), a partir de 1750 y sobre todo en los primeros años del siglo XIX, sufrieron una recesión en los Pirineos, pero se recuperaron gracias a un nuevo periodo de bajada de temperaturas. Desde entonces, han entrado otra vez en regresión y desde 1880 al menos 110 glaciares se han extinguido, debido a que las temperaturas han ascendido entre 0,7-0,9 ºC en las montañas del norte de España, quedando solo 21 glaciares en los Pirineos (1).

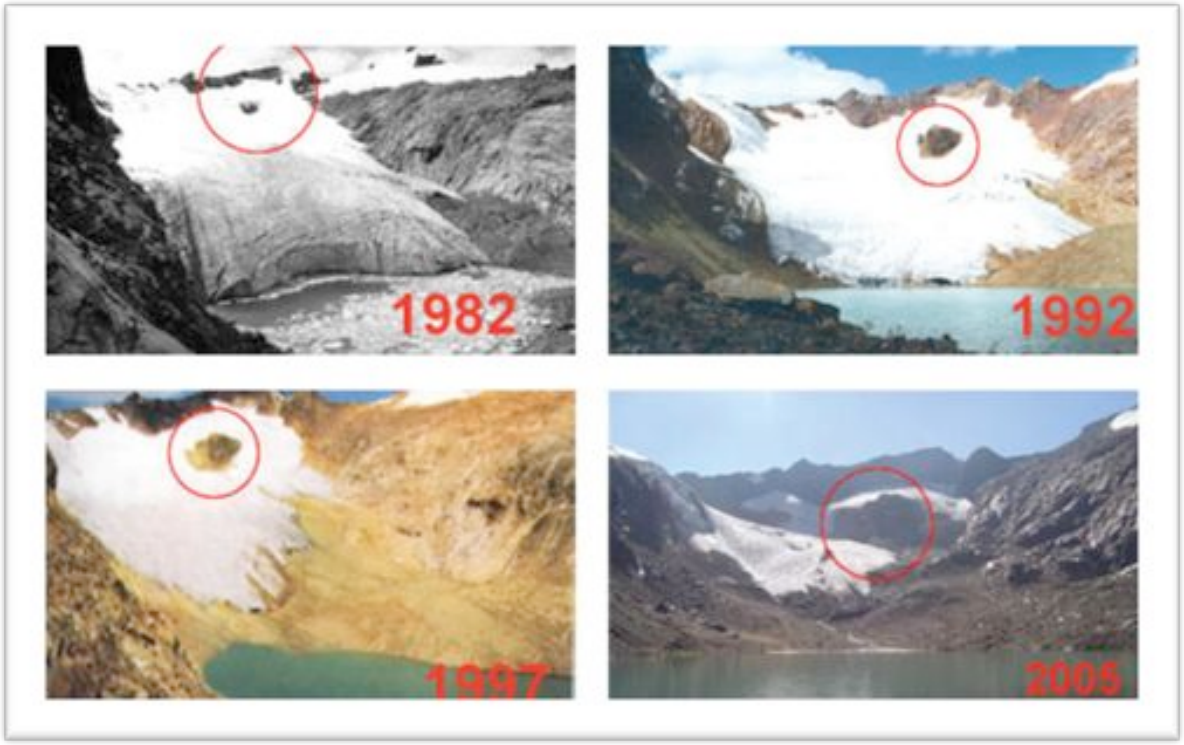

Figura 4.- Descenso de hielo en el glaciar Yanamarey (Cordillera Blanca-Perú- Altitud 4.786 msnm) en el periodo 1982-2005. Fuente: INRENA (Perú).

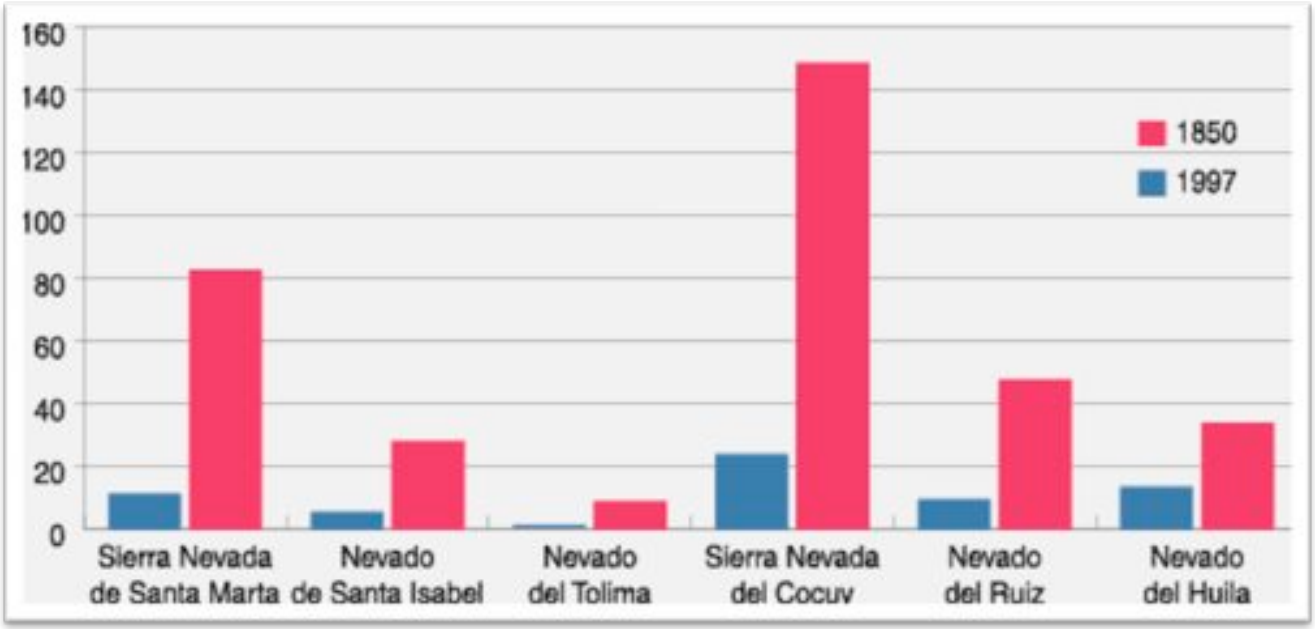

Figura 5.- Deshielo de las masas glaciares de Colombia desde 1850 hasta finales de la década de 1990. Fuente: http://www.ideam.gov.co.

Figura 6.- Evidencia del deshielo en el glaciar suizo de Trift. A la izquierda, una imagen de 1948; a la derecha, en 2003. Fuente: http://picasaweb.google.com.

Está claro pues, que el descenso de los niveles de hielo en los glaciares tiene relación directa con el calentamiento global actual. Según González Trueba del Servicio de Información y Noticias Científicas (SINC): "Las altas montañas son espacios especialmente sensibles a los cambios climáticos y ambientales, y dentro de ellas, la evolución de los glaciares en respuesta a los cambios climáticos es uno de los indicadores más eficientes que evidencia el calentamiento global".

La retirada de los glaciares es un hecho muy documentado y probado, que no tiene que ver con variaciones estacionales sino con el clima, ya que no hay signos de que se recuperen. En la Figura 7 podemos ver la relación directa que existe entre el aumento de temperatura global desde el final de la Pequeña edad de hielo y el retroceso de los glaciares.

El deshielo afecta pues, a la plataforma marítima y continental.

Tenemos que aclarar que los glaciares retroceden porque la fusión del hielo –que se produce con el aumento de temperatura- que alimenta al glaciar, crea canales de agua que van al lecho del mismo (aumentando la fragilidad), tal como vemos en la Figura 8.

Hemos dejado a propósito y solo de momento, la cuestión de lo que ocurre en otra parte del Planeta, en la Antártida, pero es que ese tema merece un aparte y lo trataremos mas adelante en el capítulo del *modelo antártico*.

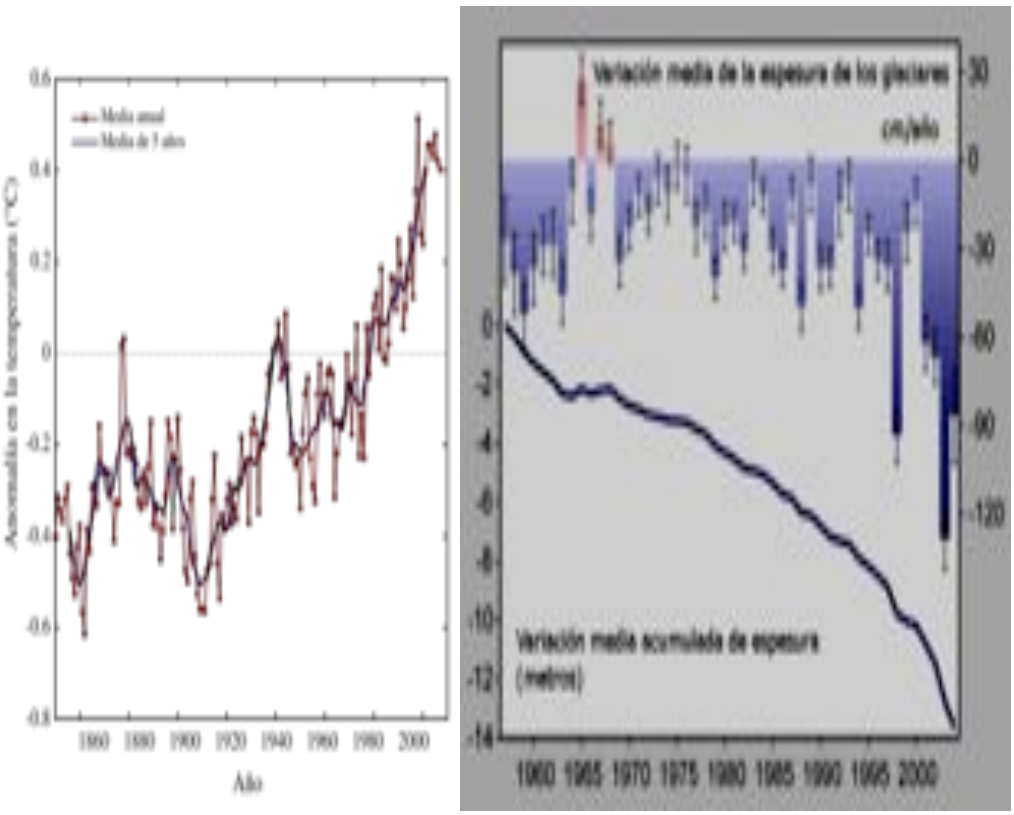

Figura 7.- *Izquierda*.- Mediciones de las anomalías en la temperatura global (fuente: Oficina Meteorológica de Reino Unido y Universidad de East Anglia). *Derecha*.- Variación del grosor medio de los glaciares (fuente: Servicio de Monitorización Mundial de Glaciares).

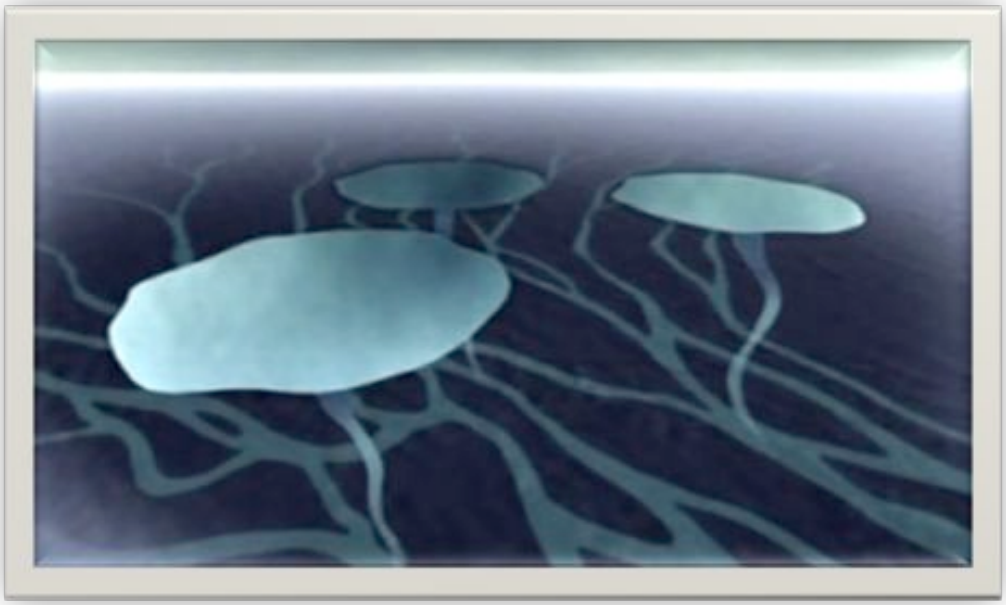

Figura 8.- Canales de agua que se originan por fusión del hielo en el glaciar. Tomado de Discovery Channel (Documental: Global Warming).

Lo que no vamos a dejar de abordar en este momento, es lo que ocurre en Groenlandia (deshielo acelerado), donde se han hecho investigaciones recientes con una pareja de satélites espaciales GRACE (acrónimo de Gravity Recovery and Climate Experiment o Recuperación de la Gravedad y Experimento Climático), calculando el deshielo por los cambios gravitacionales de La Tierra. Groenlandia es, después de la Antártida, la segunda reserva de hielo continental del Planeta, por lo que su fusión incrementaría el nivel de los océanos y puede modificar la corriente del Labrador (continuación de la del oeste de Groenlandia) y por tanto la corriente del Golfo (vital en el clima del Atlántico Norte) que viaja en sentido contrario para rellenar aquella.

Según los datos de GRACE, el hielo que pierde Groenlandia es responsable de una elevación de 0,5 mm/año del nivel de los océanos de todo el mundo. Parece poco, pero es suficiente para aumentar en unos 5 cm el nivel de los océanos en los próximos cien años. Claro que eso no es todo, ya que la velocidad de la fusión también se incrementará, aumentando aún más el nivel de los océanos (2). Un reciente estudio publicado por la Comisión Delta de Holanda, estimaba que el deshielo en Groenlandia provocaría un incremento del nivel del mar de entre 13 y 22 cm para 2100 (3). Estos estudios, están en consonancia con las medidas de los satélites. Efectivamente, la contribución de GRACE, permitió conocer, por primera vez desde que se tienen registros (unas tres décadas), que el calor también fundió en el verano de 2007 el hielo en altitudes de más de 2.000 m en Groenlandia.

Ya en informes anteriores de la NASA (4), se concluía que el hielo de Groenlandia se estaba derritiendo a un ritmo de 227.000 millones de L por año. Además, los límites de la isla (85% de hielo) disminuían en 1 metro al año. En la Figura 9 podemos ver un gráfico donde se muestra el grado de peligro de deshielo en la isla.

Konrad Steffen (director del Instituto Cooperativo para la Investigación en Ciencias Ambientales de la Universidad de Colorado en Boulder), mantiene una red de observación climática con 22 estaciones en el manto de hielo de Groenlandia que transmite datos cada hora mediante satélites a la Universidad de Colorado, para el estudio de los procesos en esa área y ha encontrado que el deshielo aumentó un 30 % en la parte occidental de Groenlandia entre 1979 y 2006, resultando que en ese último año el volumen de hielo perdido fue equivalente a dos veces todo el hielo de los Alpes (5,6). En la Figura 10 podemos apreciar la disminución de hielo (1992-2002).

No nos olvidemos de que el aumento de la temperatura global tiene sus consecuencias sobre las otras variables climáticas, principalmente en las precipitaciones, evaporación, circulación general de la atmósfera y en los climas regionales, que se verían seriamente alterados.

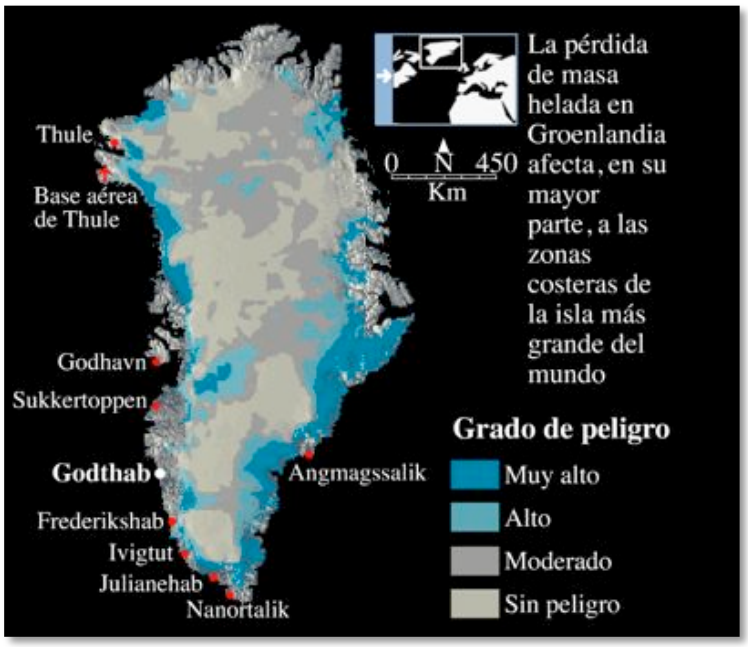

Figura 9.- Pérdida de masa helada en Groenlandia. Fuente NASA. Gráfico: Alberto Cairo en http://estaticos01.cache.el-mundo.net/noticias/2000/graficos/ julio/semana4/groenlandia.swf.

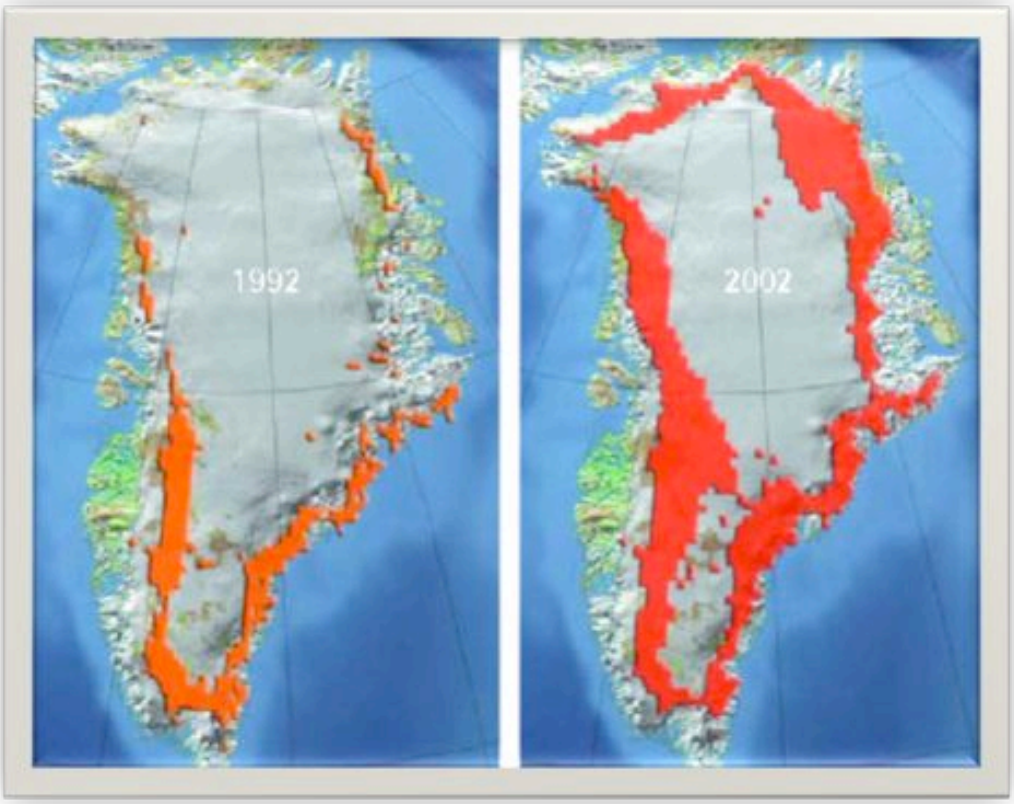

Figura 10.- La superficie de hielo derretida en Groenlandia (observada por satélite) desde 1979 es cada vez mayor. La zona derretida por el calor de verano ha estado ampliándose hacia el interior y registra altos valores en los últimos años. (Fuente: Arctic Impacts of Arctic Warming, Cambridge Press, 2004).

3. ANÁLISIS CIENTÍFICO

Hasta ahora, hemos visto fenómenos observables y observados, pero ya es hora que nos planteemos si hay base científica suficiente para considerar que estamos ante un cambio climático, consecuencia de un calentamiento global.

El IPCC, acrónimo en inglés de Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (www.ipcc.ch), es la organización científica de referencia a nivel mundial sobre este problema (para apoyarlo o criticarlo); se creó en el año 1988 por la Organización Meteorológica Mundial (WMO) y por el Programa Ambiental de las Naciones Unidas (UNEP). En el 2007 fue galardonado con el Premio Nobel de la Paz (compartido con Al Gore). El IPCC está constituido por científicos de todo el mundo (miembros de la WMO y la UNEP) que no llevan a cabo investigaciones ni hacen observaciones directas de los cambios climáticos, sino que hacen valoraciones basadas sobre todo en análisis de publicaciones científicas. Fruto de aquellas, es la elaboración de informes para aplicar medidas en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC).

En su informe (el cuarto) de síntesis de 2007, el IPCC concluye: "El calentamiento del sistema climático es inequívoco, como evidencian ya los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de nieves y hielos, y el aumento del promedio mundial del nivel del mar (ver Figura 11). De los doce últimos años (1995-2006), once figuran entre los doce más cálidos en los registros instrumentales de la temperatura de la superficie mundial (desde 1850). La tendencia lineal a 100 años (1906-2005), cifrada en 0,74°C (entre 0,56°C y 0,92°C) es superior a la tendencia correspondiente de 0,6°C (entre 0,4 y 0,8°C) (1901-2000) indicada en el Tercer Informe de Evaluación. Este aumento de temperatura está distribuido por todo el Planeta y es más acentuado en las latitudes septentrionales superiores. Las regiones terrestres se han calentado más deprisa que los océanos (ver Figura 12)".

Por tanto, según los expertos del IPCC, el promedio de calentamiento global es de 0,74°C, aumentando en 0,14°C lo comunicado en su tercer informe de evaluación de 2001.

Bien, entonces los hechos observados (muchos de ellos con satélites) son corroborados con los análisis científicos.

No hay duda de que los informes del IPCC tienen una base científica sólida, basada en rigurosos estudios de especialistas en el tema y de que se utilizan por la comunidad científica como referencia, pero aún así, hay científicos que dudan de los datos que aportan, mientras que otros denuncian que la realidad es peor. Y esa duda todavía subsiste, ¿el escenario es mejor o peor del descrito en esos informes? Lo representado ya es de por sí malo, en un contexto menos malo tampoco

mejoraría mucho, y si es peor puede ser que no queramos ni siquiera imaginarlo y es que no hay ni un solo modelo climático que haya obtenido resultados negativos de temperaturas (enfriamiento futuro) ni siquiera de que la situación actual se mantenga.

Con estas pruebas es difícil no creer que el cambio climático ya ha comenzado; sería peligroso negarlo. Así que establecido este hecho, el siguiente paso es entender su origen, para ver si conseguimos pararlo o mitigarlo. Si el origen es natural poco podemos hacer para detenerlo (salvo quizás con un desarrollo de la geoingeniería), incluso hay la posibilidad de que el proceso se invierta y la atmósfera se enfríe como ya ocurrió en épocas recientes. Si es antropogénico, podríamos tomar medidas para evitarlo. Por lo tanto, no es momento de ser catastrofista y si lo es el de profundizar en el análisis de la situación actual, mirando al pasado y al futuro.

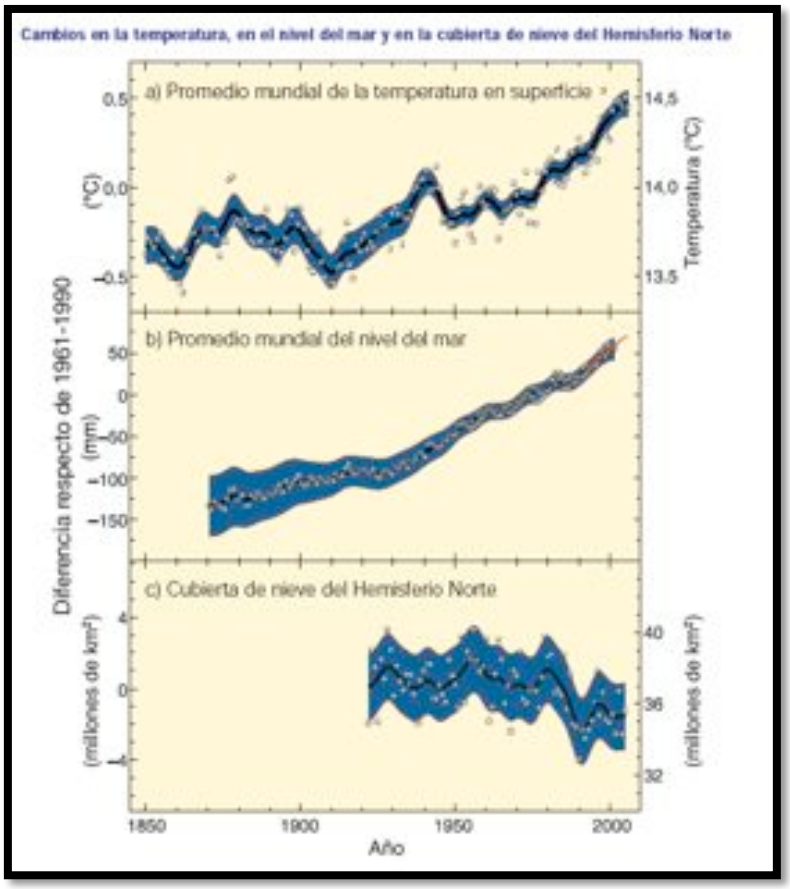

Figura 11.- Variación observada de: a) el promedio mundial de las temperaturas en superficie; b) el promedio mundial del nivel del mar a partir de datos mareométricos (azul) y satelitales (rojo); y c) la cubierta de nieve del Hemisferio Norte durante marzo-abril. Todas las diferencias han sido calculadas respecto de los promedios correspondientes durante el período 1961-1990. Las curvas alisadas representan los valores promediados decenalmente, mientras que los círculos denotan los valores anuales. Las áreas sombreadas representan los intervalos de incertidumbre estimados a partir de un análisis completo de las incertidumbres conocidas (a y b) y de la serie temporal c). Tomado del 4º Informe del IPCC.

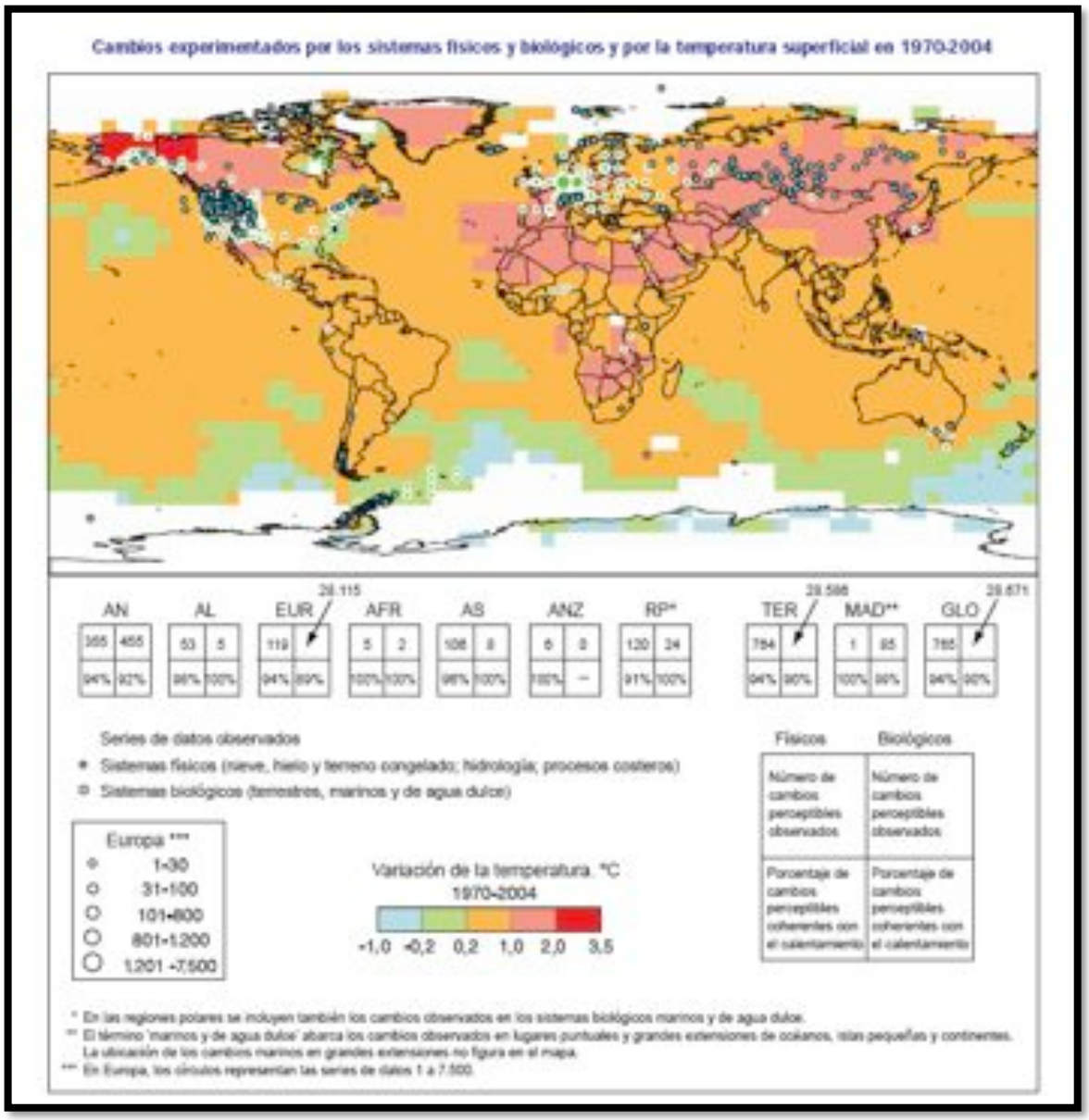

Figura 12.- Ubicación de los cambios significativos constatados en las series de datos de los sistemas físicos (nieve, hielo y terreno congelado; hidrología; y procesos costeros) y en los sistemas biológicos (sistemas biológicos terrenos, marinos y de agua dulce), y variación de la temperatura del aire en superficie durante el período 1970-2004. La selección responde a los criterios siguientes: 1) abarca hasta 1990 o más adelante; 2) abarca un período de 20 años como mínimo; y 3) exhibe un cambio apreciable en alguna dirección, según las evaluaciones de los distintos estudios. Las áreas en blanco no contienen datos climáticos observados suficientes para estimar la tendencia de la temperatura. Los recuadros de cuatro celdas indican el número total de series de datos que exhiben cambios significativos (hilera superior) y el porcentaje de ellas que concuerda con el calentamiento (hilera inferior) para: i) regiones continentales: América del Norte (AN), América Latina (LA), Europa (EUR), África (AFR), Asia (AS), Australia y Nueva Zelandia (ANZ), y regiones polares (RP), y ii) a escala mundial: extensiones terrenas (TER), marinas y de agua dulce (MAD), y globales (GLO). El número total de estudios de los siete recuadros regionales (AN, EUR, AFR, AS, ANZ, RP) no coincide con el total global (GLO) ya que, excepto las cifras correspondientes a la región polar, las de las restantes regiones no incluyen los sistemas marinos y de agua dulce (MAD). No se ha incluido en el mapa la ubicación de los cambios registrados en grandes extensiones marinas. Tomado del 4º Informe del IPCC.

4. RELACIÓN ENTRE LA TEMPERATURA GLOBAL Y EL CO_2

El intento de relacionar el aumento de las temperaturas con el de la concentración atmosférica de CO_2, no es de ahora. Arrhenius en 1896 ya lanzó la teoría de que las emisiones de dióxido de carbono procedentes de la combustión de compuestos de carbono provocaban el efecto invernadero en la atmósfera. En 1924, el físico estadounidense Lotka predijo que la actividad industrial podría duplicar la cantidad de CO_2 atmosférico en 500 años; en 1954, Hutchingson, biólogo de Yale, sugirió que la deforestación haría aumentar el nivel de CO_2 atmosférico; en 1957, los científicos del Instituto Scripps de Oceanografía indicaban que los océanos no pueden absorber una buena parte del CO_2 emitido hacia la atmósfera. Además, en esa época se comienzan a realizar medidas fiables de CO_2 desde el Observatorio de Mauna Loa (Hawai); en 1967, una primera simulación realizada con ordenadores indicó que la temperatura media del Planeta aumentaría en 2°C cuando los niveles del CO_2 duplicasen a los de la época preindustrial (7).

Los datos actuales muestran una correlación directa entre temperatura y concentración de CO_2 en la atmósfera. En la Figura 13 podemos observar esa correspondencia en los últimos 1.000 años. En ella, alcanzamos a ver también la relación que existe con las emisiones de carbono a la atmósfera, incrementadas desde la última revolución industrial. Similares gráficas podemos encontrar en informes del IPCC o en el libro "Una verdad incómoda".

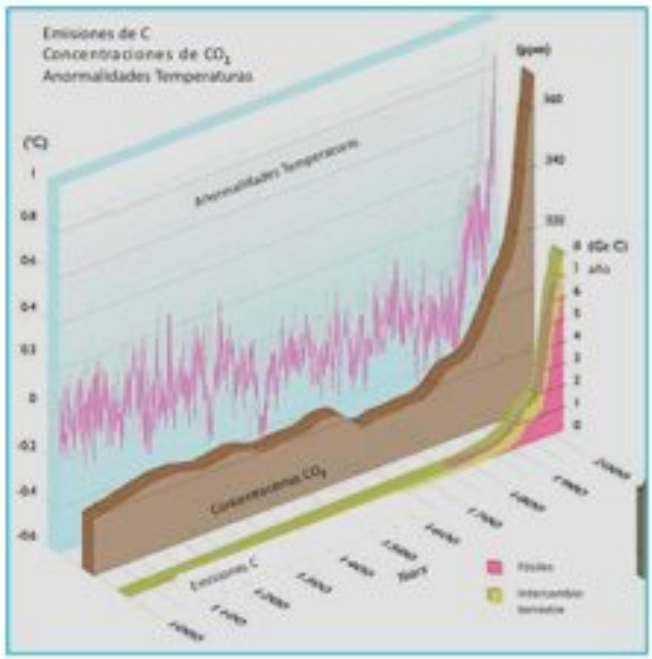

Figura 13.- Correlaciones entre anomalías en las temperaturas, concentración de CO_2 atmosférica y emisiones de Carbono entre los años 1000 y 2000. Fuente: http://whyfiles.org.

Al Gore, destaca el punto de inflexión que se produce a partir del año 2000 y que crece desde entonces de una manera muy preocupante. A esta gráfica la define como "palo de hockey" por su similitud.

Bien, pero esto no contesta a una pregunta importante: ¿El comportamiento del tiempo en los últimos años es anómalo o entra dentro de una variabilidad natural? Para responder a esta cuestión, tenemos que situarnos en un contexto histórico. En los últimos 2.000 años, ha habido pocas fluctuaciones en la temperatura y en el clima, a excepción de dos épocas, denominadas Periodo caliente medieval (óptimo climático medieval) y Pequeña edad de hielo (referenciada anteriormente), con máximos y mínimos en las temperaturas y con clima cálido y frío respectivamente, tal como podemos ver en la Figura 14.

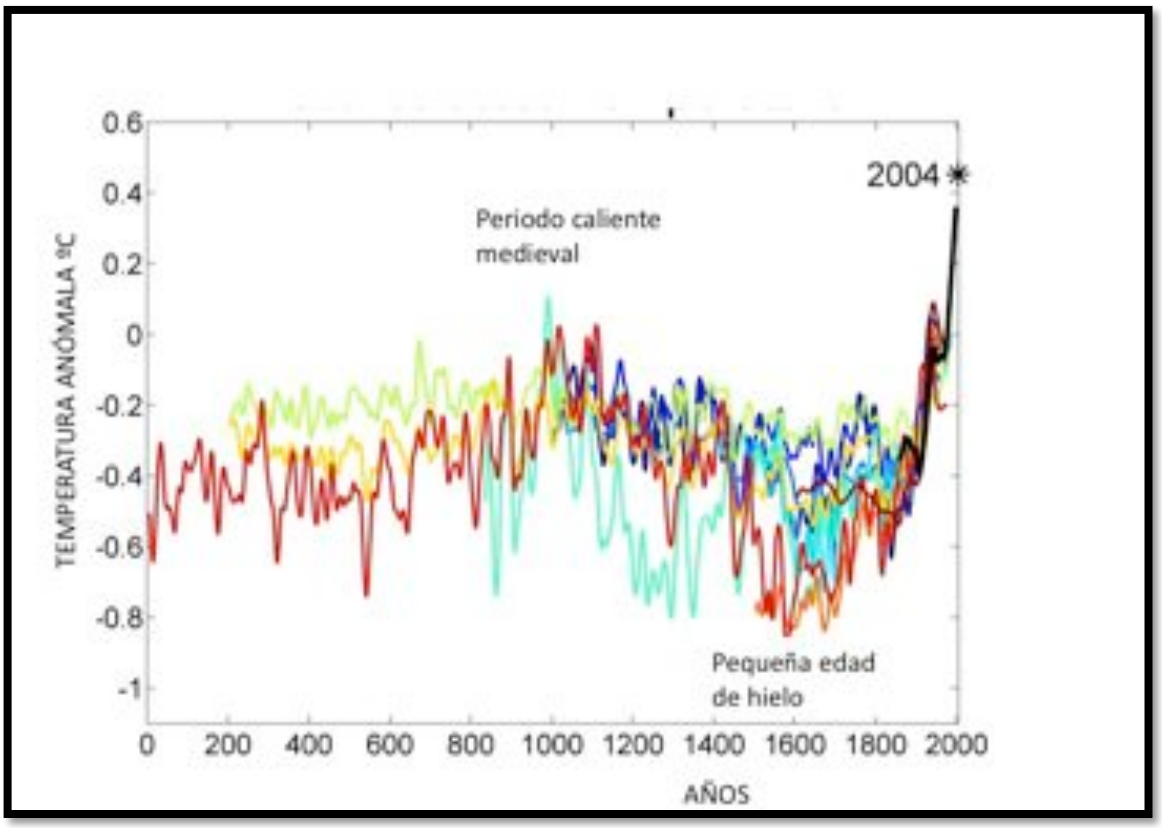

Figura 14.- Reconstrucción de temperaturas en los últimos 2000 años. Óptimo climático medieval (s. X a XIV) y Pequeña edad de hielo (mitades s. XIV a XIX). Las distintas gráficas de colores se corresponden con distintos tipos de medidas. Las temperaturas se reconstruyen por análisis de arqueobacterias, analizando formaciones de roca o midiendo los isótopos en fósiles, ya que de medidas directas disponemos solo desde hace pocos años. Fuente: Wikipedia.

Si superponemos a esta gráfica, o mejor a una con la variación de temperaturas globales de los últimos 1.000 años, otra con los datos (analizados por ordenador) de los principales factores que influyen en la variabilidad natural

del clima (cambios en la actividad solar y erupciones volcánicas), se puede observar los resultados que nos muestra Helen Wickstead del University College de Londres, en una entrevista para Discovery Channel y que se ven en la Figura 15. Las dos gráficas son similares hasta el año 2000, a partir de entonces las líneas son divergentes y existe una gran diferencia entre temperaturas globales y causas naturales. Sin embargo, al introducir los factores antropogénicos junto a los naturales, si que todo coincide (8), tal como vemos en la Figura 16.

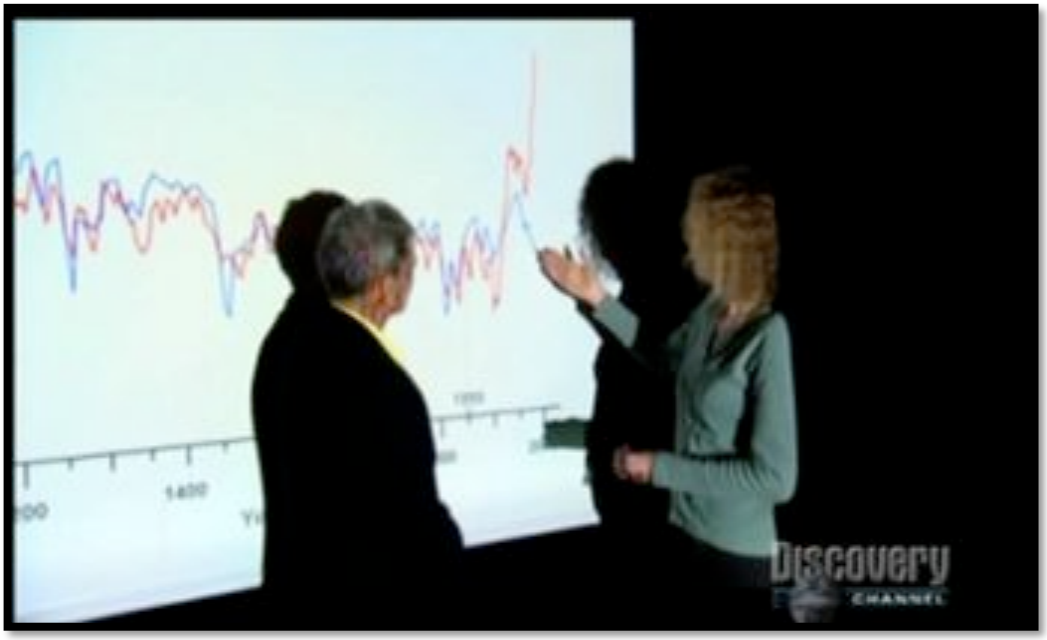

Figura 15.- Línea roja: Temperaturas globales en los últimos 1.000 años. Línea azul: Cálculos de temperaturas introduciendo los datos de cambios en el Sol y erupciones volcánicas. Fuente: Helen Wickstead (University College London) para Discovery Channel en "Global Warming".

La variabilidad climática natural tiene ciclos de plazo corto: manchas solares; fenómeno de El Niño; oscilación del Atlántico Norte; oscilación decadal del Pacífico (ODP)- fluctuación (variabilidad climática) de largo período en el Océano Pacífico, el cual afecta principalmente la cuenca del Pacífico y el clima de América del Norte- y el patrón del Pacífico de Norte América, junto a eventos causales catastróficos, principalmente, la erupción de volcanes. Estos son tipos de variabilidad climática, pero a largo plazo los factores que influyen en el clima de una forma natural son astronómicos (excentricidad de la órbita de traslación de la Tierra alrededor del Sol; inclinación del eje terrestre de rotación que varía con una periodicidad de unos 41.000 años y la precesión de los equinoccios) y terrestres, que vienen condicionados por las complejas interacciones de los diferentes componentes del sistema climático, como la que existe entre el océano y la atmósfera, erupciones volcánicas, campo magnético terrestre, deriva de los continentes y ciclo del carbono. Además, hay que tener en cuenta la circulación

termohalina (circulación convectiva que afecta de modo global al conjunto de las masas de agua oceánicas).

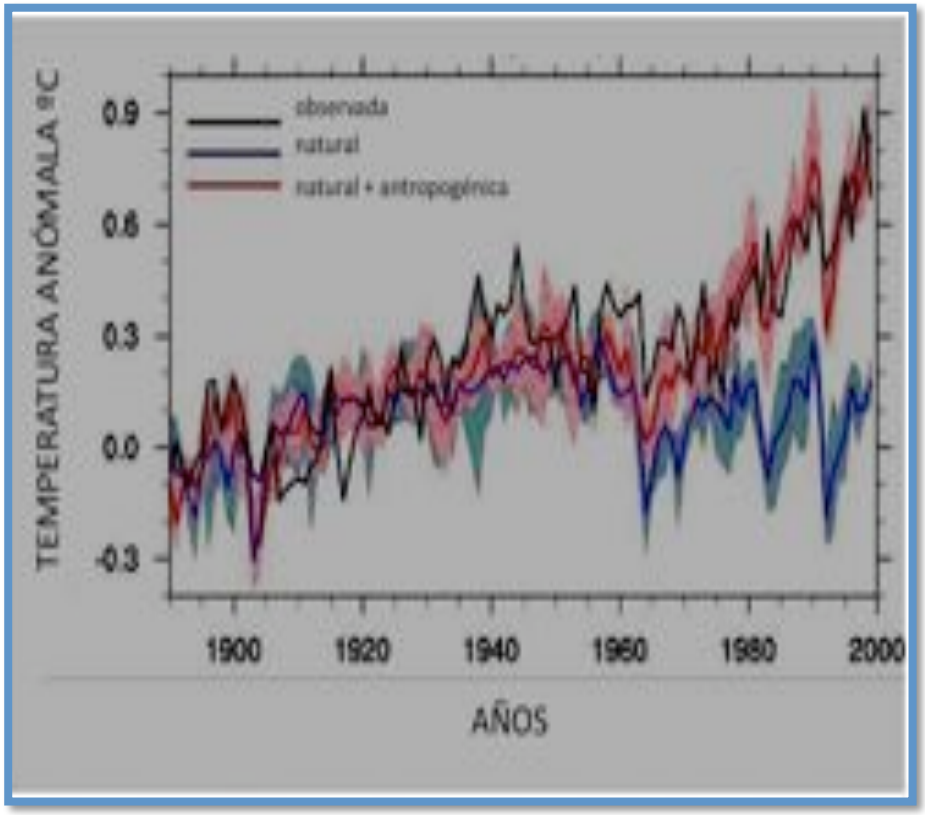

Figura 16.- Correlaciones obtenidas por ordenador al introducir los datos de temperaturas globales (negro), factores naturales (azul) y factores naturales y antropogénicos (rojo). Fuente: ref. 8.

La complejidad de todos estos factores hace difícil la propia introducción de datos en los ordenadores y el consiguiente cálculo mediante los algoritmos matemáticos, por lo que conforme en la medida que comprendamos mejor esas interacciones, los resultados obtenidos serán más exactos.

Sin embargo, no se pueden poner en duda los resultados de los modelos, que incluso coinciden en hechos, como en el enfriamiento de 1815 con la erupción del volcán Tambora y que permiten corroborar los datos obtenidos por ordenador; pero que se pueden mejorar, como veremos en el siguiente capítulo.

Los seres vivos interaccionan con el medio ambiente y por tanto siempre han tenido su influencia sobre el clima, pero es el ser humano el que ejerce la primacía sobre el Planeta y como no también en el sistema climático, lo que ha sido estudiado dentro de los modelos de cambio climático, encontrando un efecto más directo sobre los patrones de variabilidad. Sin embargo, no es posible aún, separar el factor antropogénico-que comprende urbanización, deforestación, agricultura,

transporte, contaminación e industria, entre otros-y desvincularlo de los factores naturales. Pero lo que si se puede aislar es el efecto de los GEI (gases de efecto invernadero)-producto del consumo energético humano-cuyos datos son los que se encuadran en los factores antropogénicos climáticos. En la Figura 16, podemos observar cuando los GEI empezaron a tener su importancia en el cambio climático, ya que las gráficas de factores naturales y naturales + antropogénicos empiezan a separarse en la década de 1960 y sobre todo a partir de los últimos 20 años. Si volvemos a la Figura 13, podemos apreciar que coincide con el incremento de emisiones de carbono a la atmófera y por tanto con el aumento en la concentración de CO_2 atmosférico y si tenemos dudas, veamos la evolución de las emisiones globales mundiales antrópicas de CO_2 en petagramos (equivalente a 1.000.000.000.000.000 o Mil billones) de carbono al año desde 1958 a 2003, que se muestran en la Figura 17. Resulta así, que la actual concentración de CO_2 atmosférica es la más elevada en los últimos 650.000 años (376 ppm en 2004), sin que en ese periodo se superasen los 300 ppm, lo que coincide con el hecho de que la temperatura global tampoco fue tan alta como lo es ahora. Esto nos lo muestra Al Gore en el documental "Una verdad incómoda", tal como podemos apreciar en la Figura 18. Estos datos coinciden con lo expresado por el IPCC en su informe de 2007 y con los obtenidos por el Science Museum of the National Academy of Sciences (Figura 19).

Es cierto que un aumento tan elevado de la concentración de CO_2, en tan corto periodo de tiempo (2000-2004) es difícil de justificar, pero si consideramos que en esos años se ha producido un enorme desarrollo de las economías asiáticas, en especial la china, con una ingente emisión de CO_2 y la propia saturación de los océanos y de los bosques en su captación de CO_2, podemos vislumbrar, aunque no demostrar, el porqué de ese aumento. Es evidente, que en la actualidad no se pueden descartar que existan causas naturales que estén también contribuyendo a este proceso, como la emisión de GEI que se producen en la erupción de los volcanes (aunque posteriormente las partículas emitidas producen el efecto contrario de enfriamiento, al actuar como reflectoras de la luz solar).

En los océanos se produce un importante intercambio de CO_2, cuyo fin último es la retirada de una importante concentración de aquel de la atmósfera. Este proceso, depende de muchos factores (pH, presiones parciales, temperatura, flujo laminar, oleaje, velocidad vientos y flujo turbulento) y tiene lugar mediante las siguientes reacciones químicas:

$$\mathbf{CO_2 + H_2O \Leftrightarrow H_2CO_3}$$

$$\mathbf{H_2CO_3 \Leftrightarrow HCO_3^- + H^+ \qquad K_1=4{,}47*10^{-4}\ mol/L}$$

$$\mathbf{HCO_3^- \Leftrightarrow CO_3^{2-} + H^+ \qquad K_2=5{,}62*10^{-11}\ mol/L}$$

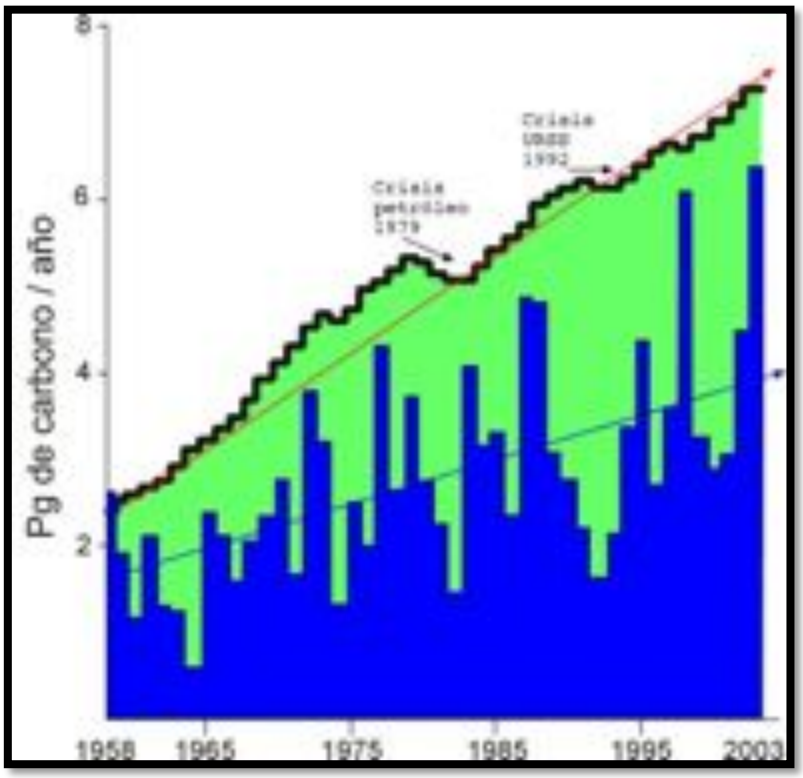

Figura 17.- Evolución de las emisiones globales antrópicas de CO_2 en petagramos de carbono al año desde 1958 a 2003. Lo que se emite (línea quebrada negra) y lo que queda en la atmósfera (en azul). Fuentes: http://homepage.mac.com/uriarte/emisiones.html. IPCC2001.

Figura 18.- Evolución de las concentraciones de CO_2 atmosféricas (línea roja) y temperaturas globales (datos aire Antártida, línea azul). Fuente: Documental "Una verdad incómoda".

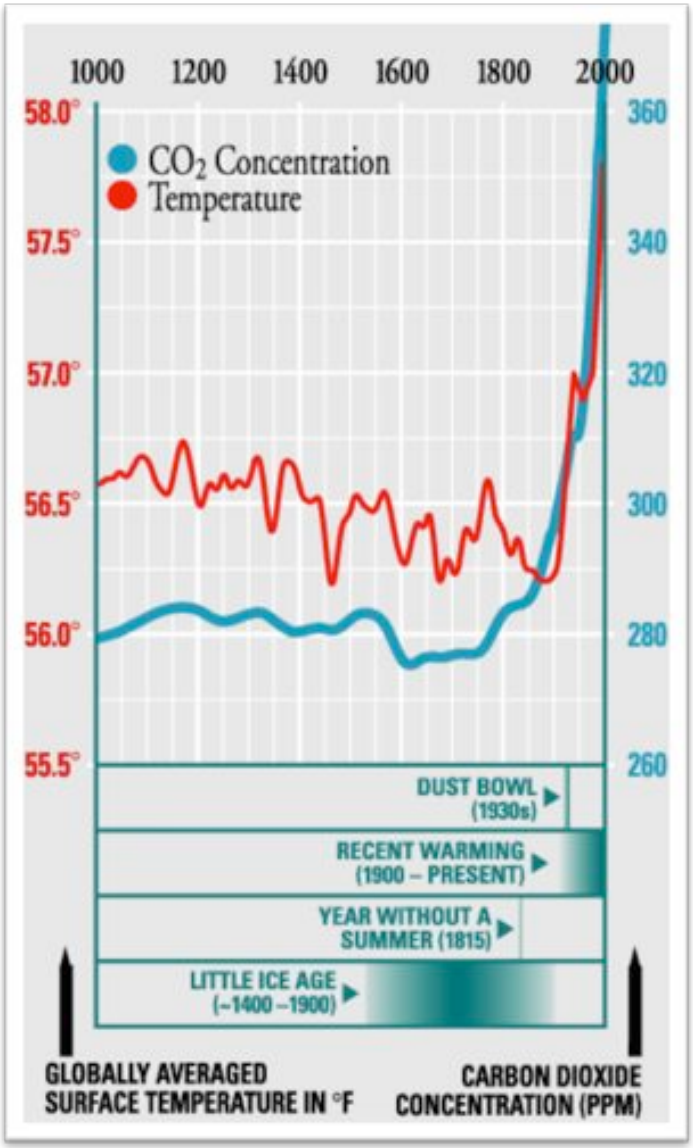

Figura 19.- Relación entre concentración atmosférica de CO_2 y temperaturas globales. Fuente: Science Museum of the National Academy of Sciences (USA).

Para retirar el CO_2 de la atmósfera en el océano, es necesario la formación de carbonato, que es insoluble y por tanto precipita para acumularse en los sedimentos marinos. Sin embargo, la primera reacción es la de formación de bicarbonato soluble, solo estable en la capa superficial de los océanos y que es transformado en parte en CO_2 gaseoso, el cual se intercambia con la atmósfera, por lo que esa porción no es retirada por los océanos. Además, la formación de carbonato es muy lenta, calculándose unos 100.000 años para que los océanos absorban el CO_2 atmosférico actual (J. Zachos en Science. Rapid Acidification of the Ocean During the Paleocene-Eocene Thermal Maximum. 2005. 308:1611).

Se calcula que los mares del Planeta reciben alrededor del 50% de todas las emisiones de dióxido de carbono producidas por el hombre (el 15% de ellas por el Océano Antártico) y que los océanos han absorbido una cuarta parte de aquellas, lo que pone en peligro su futura capacidad de retirada del CO_2. De hecho, los mares que rodean la Antártida la están perdiendo, según un estudio de un equipo internacional de investigadores que analizó las medidas de los niveles atmosféricos de CO_2 tomadas en el intervalo 1981-2004 en once estaciones del Océano Antártico y en otras cuarenta repartidas por todo el mundo (9). El resultado fue que, en los últimos 25 años, la absorción de CO_2 de ese océano ha descendido en un 15% cada década, lo que provoca, a su vez, que se emita más dióxido de carbono a la atmósfera, ya que el intercambio es desfavorable. Además, el CO_2 es ácido y comunica esa acidez a las profundidades marinas, lo que puede provocar grandes cambios en el intercambio atmósfera-océano.

Todas estas cuestiones, son consecuentes con la existencia de una relación directa entre la concentración atmosférica de CO_2 y el aumento (más concentración de CO_2) o disminución (menos concentración de CO_2) en las temperaturas globales y que la acción del hombre empieza a ser importante, pudiendo superar a la variabilidad climática natural, lo que es un hecho nuevo.

Si existe sobre un cambio climático inducido por el hombre, no hay precedentes en la historia del planeta y no sabemos a lo que nos enfrentamos. ¿Pueden originarse graves problemas de sostenibilidad social y económica, con falta de recursos hídricos, daños en la agricultura y otras catástrofes? Todo ello causa preocupación e incertidumbre.

Es cierto, que estos fenómenos han ocurrido, incluso sin la presencia del hombre, pero este cambio climático puede ser distinto por la rapidez con el que se puede producir. La variabilidad natural no suele llevar a cambios bruscos del clima, aunque si que hay pruebas en el hielo de Groenlandia de un acontecimiento que ocurrió hace unos 15.000 años en donde la temperatura subió bruscamente (unos 10°C) en menos de 100 años, pero no se ha podido averiguar su causa.

Pero ¿y si retrocedemos en el tiempo y nos remontamos a millones de años atrás? Esto lo podemos hacer con la paleoclimatología y obtendremos el gráfico de la Figura 20. Pues bien, podemos apreciar que hay un periodo-el Cretáceo-dominado por los dinosaurios, donde no parece haber mucha coincidencia, sino mas bien lo contrario, entre una temperatura media global elevada (de unos 20°C) y bajas concentraciones de CO_2 atmosféricas.

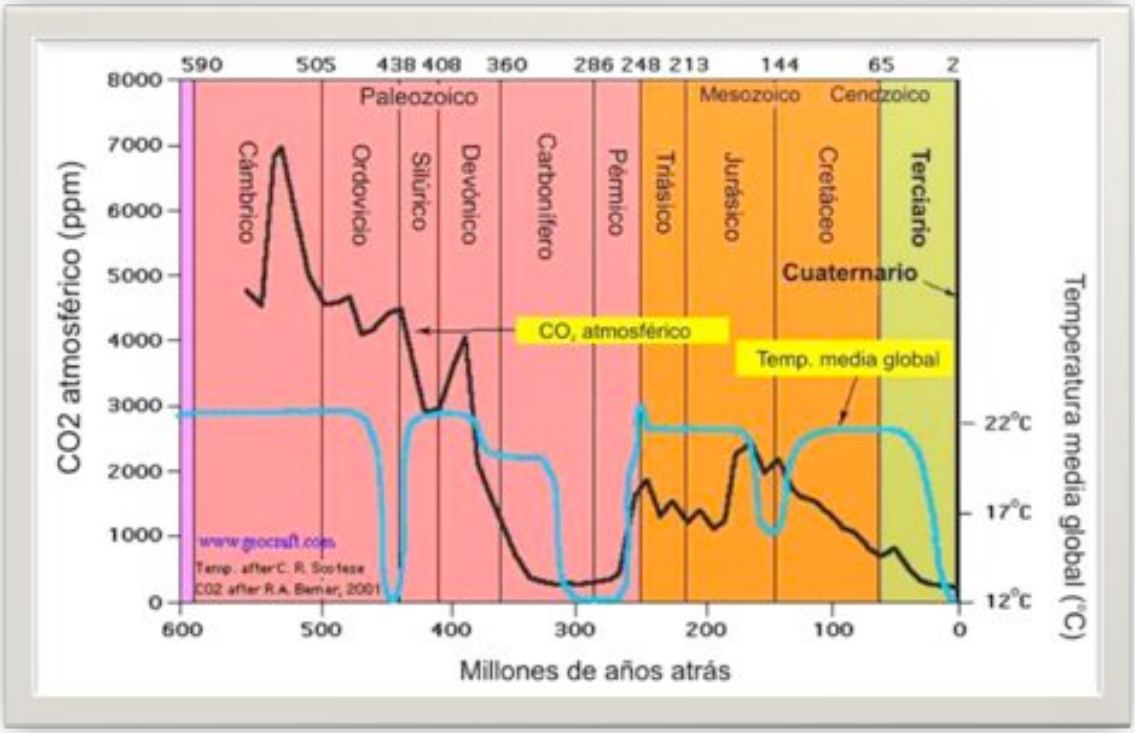

Figura 20.- Relaciones entre concentraciones atmosféricas de CO_2 y temperatura global desde el período Cámbrico. Fuente: Chistopher R. Scotese y R. A. Berner (paleogeográfos y paleoclimátologos) de la Universidad de Chicago y de Yale, respectivamente. Modificado por www.geocraft.com.

Aún así, la concentración de CO_2 era de varias veces superior a la actual, pero es que además en ese periodo existían unas grandes cantidades de otro GEI, el vapor de agua, mucho más potente que el CO_2. Por tanto, en esa época el efecto invernadero era producido por el propio CO_2 y el vapor de agua. "Hoy, el efecto invernadero del vapor de agua está casi confinado a las latitudes tropicales y medias y apenas tiene incidencia en las latitudes altas, ya que allí la humedad absoluta del aire, debido al frío, es muy baja. Así, el vapor de agua alcanza una concentración de hasta el 4% del aire en algunas regiones húmedas ecuatoriales, pero tan sólo del 0,00001% en el Polo Sur en invierno. Sin embargo, durante el Cretácico, al tener las masas de aire de latitudes polares temperaturas muy superiores, su capacidad higrométrica sería también mayor y su efecto invernadero considerable"(10).

También hay datos de episodios climáticos catastróficos, desde el final del Jurásico con la ruptura de Pangea, que pudieron resultar de la emisión masiva hacia la atmósfera de metano (GEI 13 veces mas potente que el CO_2) procedente del subsuelo marino. Estos procesos son considerados forzamientos del clima. Los

forzamientos externos son capaces de cambiar el balance radiativo (equilibrio térmico entre la radiación que entra por la parte superior de la atmósfera y la que sale) del Sistema Climático y producir un "cambio" desde un estado de equilibrio inicial que se refleja en una variación de la temperatura global. En la actualidad, se puede considerar un forzamiento del clima la emisión de GEI a la atmósfera.

Bien, pues si existía vida en el Jurásico y Cretácico con concentraciones de CO_2 muy superiores a las actuales (que no vamos a alcanzar con el actual calentamiento) y con temperaturas medias globales que tampoco parece vamos a tener, entonces ¿de qué preocuparnos? La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, destaca la necesidad, cada vez más apremiante, de estabilizar las concentraciones de los gases de efecto invernadero a un nivel que no interfiera adversamente en:

· la adaptación natural de los ecosistemas

· la seguridad de la producción de alimentos y

· el desarrollo económico sostenible.

Un cambio climático acelerado por el hombre puede ser muy rápido, por lo que puede provocar una catástrofe climática, que no sería novedad (son cíclicas), pero quizás sería mejor no llegar a esa situación extrema que no sabemos lo que nos deparará, porque además podemos evitarla, reduciendo las combustiones de combustibles fósiles. Pero también, cuando disminuimos ésas combustiones, estamos mejorando el problema de la contaminación, en especial de las grandes ciudades, con lo que nuestra salud y expectativa de vida, se verá sin duda beneficiada y el coste económico sanitario disminuiría.

Tengamos muy presente, que el hombre ha nacido y ha evolucionado en el sistema climático actual, de tiempo atemperado, pero no lo hizo en otras épocas mas extremas. Si es cierto, que el nivel tecnológico alcanzado actualmente nos puede proporcionar una relativa tranquilidad, pero ¿hasta que punto? ¿Y sino es suficiente o no tenemos tiempo para adaptar nuestra tecnología? No hay duda de que merece la pena investigar en nuevas tecnologías que puedan paliar un posible cambio climático (mas frío o mas calor).

5. EL MODELO ANTÁRTICO

La Antártida se ha utilizado desde hace años como modelo para estudiar el estado de salud del Planeta y los procesos climáticos ocurridos en su historia. Cabe recordar que la voz de alarma sobre la destrucción de la capa de ozono estratosférica se dio desde las bases científicas antárticas.

La Antártida tiene aproximadamente el 85% en superficie de los hielos permanentes del Planeta, por lo que su deshielo probablemente haría aumentar el nivel del mar en unos 60 m.

El principal argumento usado por los que no creen en el cambio climático es que la temperatura en la Antártida no ha aumentado, lo que contradice lo esperado por los modelos climáticos. Pero esto, es según se mire. Si miramos al Oeste, el glaciar Sheldon de la isla de Adelaida, ha retrocedido 5 Km desde 1947, tal como vemos en la Figura 21 y el 80% de los glaciares antárticos, aunque en menor medida, también lo están haciendo (todos ellos situados en la Península antártica).

Desde hace 50 años, la Península, en especial en una zona situada a los 65 ºS ha experimentado un calentamiento de más de 2,5 °C, uno de los mayores aumentos medidos en la superficie del Planeta. Desde los años setenta, el aumento de temperatura ha provocado la desaparición de una superficie de 13.500 Km^2 en las zonas Larsen A y Larsen B. La primera desapareció en 1995 y la plataforma Larsen B (de 3.250 Km^2 y 720.000 millones de T de hielo), en febrero de 2002 (en sólo 35 días). Éstas, se habían formado hace 12.000 años, por lo que el clima en esa zona, no ha sido tan cálido desde entonces.

Dos científicos de la Universidad de Salamanca, Adolfo Eraso y Carmen Domínguez, están «monitorizando» el glaciar Collins desde 1991 y "los resultados parciales muestran que en 13 años se ha duplicado el nivel de deshielo". El glaciar Collins, de 10.000 años de antigüedad, 25 kilómetros de largo por cinco de ancho y uno de profundidad, se encuentra en la Isla Rey Jorge, a 150 kilómetros del Círculo Polar Antártico, en la latitud 62º Sur. Estas conclusiones son corroboradas con los estudios cartográficos del Instituto Geográfico Militar, que demuestran que el glaciar ha disminuido 100 metros desde 1987. Los científicos disponen de un sensor que mide el caudal de un arroyo que nace en el glaciar y que va a dar al mar. El sensor hace una medición cada hora, por lo que produce 8.760 datos anuales.

En febrero de 2009, unos 14.000 Km^2 se desprendieron de la plataforma de hielo Wilkins en la península antártica. Asimismo, el equipo científico, que trabaja en el marco del proyecto ATOS, contribución de España al Año Polar Internacional, presenció durante esos días cómo el frente de hielo del Mar de Belinghausen retrocedía-fundía-550 Km en dos semanas. Los científicos señalan que las temperaturas del agua son extraordinariamente cálidas en esta zona.

Sin embargo, si miramos hacia el Este, parece que no se aprecian variaciones significativas en los cambios de temperaturas en los últimos 50 años.

Pero es que el sistema climático antártico no tiene similitud alguna con los restantes del Planeta, con un vórtice polar más intenso que el del Ártico (que aísla al continente durante el invierno), y con unas nubes polares estratosféricas (NEP),

que son únicas y que son el ingrediente necesario para inducir a la destrucción masiva de ozono, que tiene un forzamiento negativo del clima (produce enfriamiento).

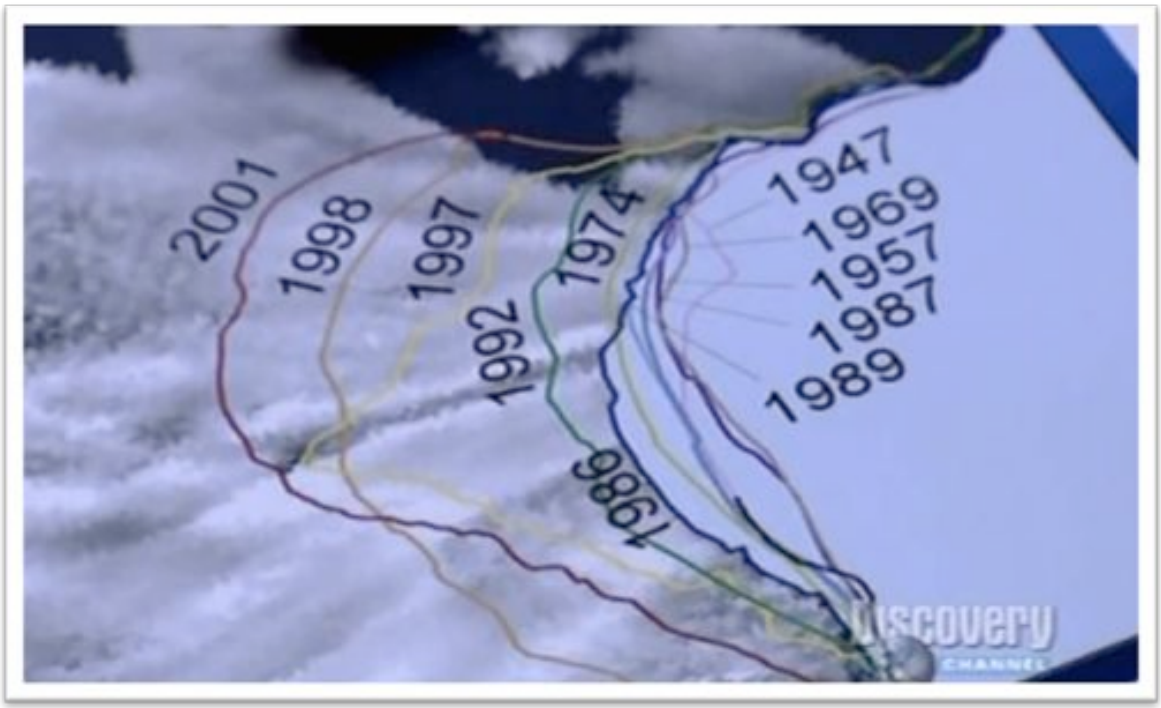

Figura 21.- Retroceso del glaciar Sheldon en la Antártida. Fuente: Discovery Channel.

Se puede además, relacionar la pérdida de ozono con el SAM (acrónimo de South Antartic Oscillation Mode, indicador que caracteriza la variabilidad de la circulación extratropical de ese hemisferio) (11). "La atmósfera en las zonas polares del hemisferio sur experimentó profundos cambios durante el último cuarto del siglo XX. Así, la disminución del ozono durante el mes de octubre en los años 90 ha sido superior al 50%, y la extensión de la superficie del «agujero» ha ido incrementándose regularmente. La baja estratosfera polar ha disminuido 10 ºC su temperatura y la rotura del vórtice polar, característica de los meses de verano, cada vez se retarda más" (12).

Por otra parte, en la superficie, la temperatura del aire en la Península antártica aumenta, provocando el retroceso de los hielos, mientras que en la zona este de la Antártida y el mar de Ross disminuye, aumentando el grosor y la superficie cubierta por hielo.

Todas estas variaciones que aparecen como contradictorias, tienen su origen en la variabilidad del vórtice polar antártico. Los valores altos del índice

SAM se relacionan con temperaturas frías y flujo circumpolar intenso, mientras que los bajos lo son con las características inversas (11).

Por ello, debido a la destrucción de la capa de ozono antártica, al vórtice polar y a la propia circulación atmosférica del hemisferio sur, no se puede extrapolar el cambio climático en la Antártida a otras partes del Planeta, como sucedió con la destrucción de la capa de ozono. Puede ser que no se llegue a producirse un cambio climático semejante al del resto.

Entonces, ¿quién es el responsable de las tendencias en la Antártida: la disminución del ozono o los GEI? Tanto el aumento de la concentración de gases de efecto invernadero como la disminución del ozono parecen provocar tendencias positivas en SAM, aunque esto todavía es cuestionable, lo que crea incertidumbres en la aplicación de los modelos climáticos (13).

Además, según nuevos datos de los últimos modelos de circulación general atmósfera-océano demuestran que la Antártida está muy relacionada con las corrientes oceánicas. La Corriente Circumpolar Antártica, que es cuatro veces mayor que la Corriente del Golfo, inhibe el flujo de calor hacia el polo por medio del océano y juega así un importante papel para mantener frío el continente (14).

Puede ser que las variaciones observadas del SAM en los últimos 100 años (Figura 22) se deban solo a causas naturales -a la propia variabilidad natural- y que el forzamiento antropogénico no tenga nada que ver (15).

Sin embargo, estudios recientes por satélite y publicados en Nature, aportan datos en el sentido de que el continente antártico se está calentando al igual que los otros seis, aunque no puede demostrar que sea por fuentes antropogénicas, pero si que es considerable la influencia de los GEI (Drew Shindell, NASA). Esta investigación demuestra que desde 1957, la temperatura anual del continente antártico aumentó en 0,1°C por década y la parte occidental se está calentando al doble de velocidad (16).

La era interglaciar actual lleva unos 12.000 años de duración y algunos científicos pronostican otra época de hielo ya que parece que los ciclos son entre 10.000-15.000 años. Pero una perforación de hielo en la Antártida realizada en 2004, ha permitido pronosticar que las actuales condiciones climáticas pueden prolongarse otros 15.000 años mas. Este estudio demuestra que la era interglaciar denominada Termination V, la mas parecida a la actual fue insólitamente larga, durando 28.000 años (Erci Wolff, British Antarctic Survey, Cambridge).

Sin embargo, aún hay muchas dudas. Consecuente, el SCAR (Scientific Committe on Antartic Research), organismo científico internacional responsable de la investigación en la Antártida, ha reorganizado su programa de investigación científica y se va a centrar en los efectos del cambio climático en ese continente.

Por tanto, habrá que esperar al resultado de esas nuevas investigaciones en los próximos años. La última palabra no está todavía dicha, como ocurre en otros temas del cambio climático. Y en la ciencia en general.

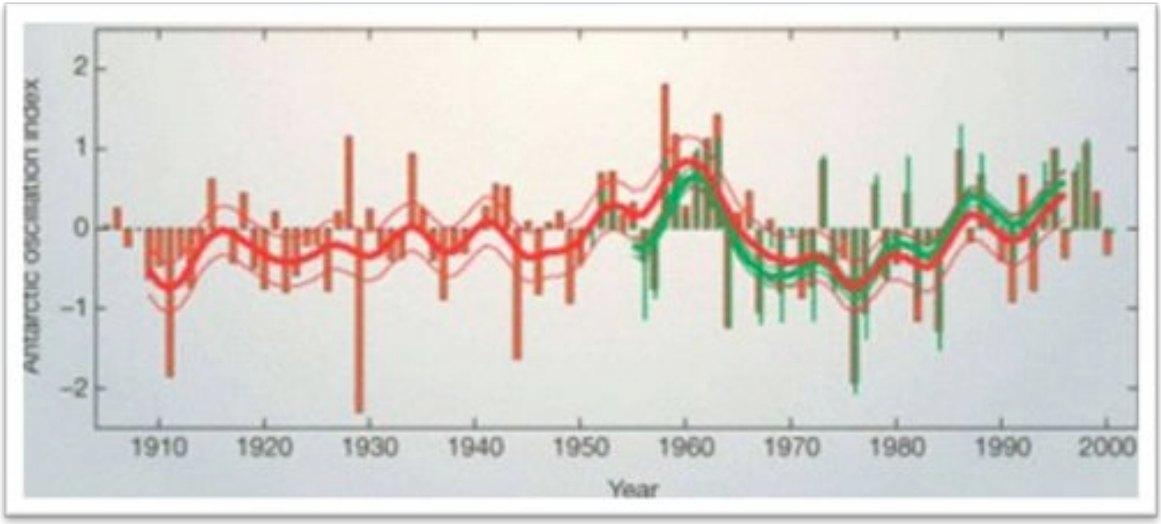

Figura 22.- Reconstrucción de la Variabilidad de SAM (Oscilación Antártica). Las barras y curvas rojas corresponden a la reconstrucción de largo plazo 1905-2000, y las barras/líneas verdes a la reconstrucción 1951-2000. Fuente: ref. 14.

6. CONCLUSIONES

Con todo lo aportado anteriormente, no cabe duda de que hay pruebas observables y científicas suficientes para afirmar que hay un calentamiento global (salvo la incertidumbre de la Antártida Este), que si bien se inició por causas naturales desde la Pequeña edad de hielo, después ha sido acelerado por la acción humana, a través de la combustión masiva de combustibles fósiles; lo que nos lleva a un cambio climático cuyas consecuencias reales aún se desconocen (aunque se puedan predecir por medio de unos cada vez más potentes modelos climáticos) y que todavía no ha alcanzado su cénit, que solo ha comenzado.

No se pueden ignorar las señales de un calentamiento global, evidentes en el deshielo del Planeta, ni tampoco las predicciones de los modelos climáticos que prevén un calentamiento acelerado en este siglo, ni a los eminentes científicos que nos advierten de un cambio climático que no tiene precedentes en la historia mas reciente de La Tierra. Si se cumplen los pronósticos, el ser humano moderno no se habrá enfrentado nunca con un cambio climático semejante.

7. REFERENCIAS

1. González-Trueba, J.J. (2008) `Little Ice Age' glaciation and current glaciers in the Iberian Peninsula. The Holocene, 18:551-568.

2. Oshima, T. (2008) http://www.elmundo.es/elmundo/2008/10/01/ciencia/ 1222847248.html.

3. Deltawork.org.

4. Krabill, W., Abdalati, W., Frederick, E., Manizade, S., Martin, C., Sonntag, J., Swift, R., Thomas, R., Wright, W., & Yungel J. (2000) Greenland Ice Sheet: High-Elevation Balance and Peripheral Thinning. Science, 289:428-30.

5. Abdalati, W., & Steffen, K. (2001) Greenland ice sheet melt extent: 1979–1999. J. Geophys. Res., 106(D24), 33:983–988.

6. Hanna, E., Huybrechts, P., Steffen, K., Cappelen, J., Huff, R., Shuman, Ch., Irvine-Fynn, T., Wise, S., & Griffiths, M. (2008) Increased runoff from melt from the Greenland Ice Sheet: a response to global warming. J. Climate, 21:331-41.

7. http://www.avizora.com/publicaciones/biografias.

8. Meehl, G.A., Washington, W.M., Ammann, C.M., Arblaster, J.M., Wigley, T.M.L., & Tebaldi, C. (2004) Combinations of Natural and Anthropogenic Forcings in Twentieth-Century Climate. J. Climate, 17: 3721-3727.

9. Le Quéré, C., Rödenbeck, C., Buitenhuis, E.T., Conway, T.J., Langenfelds, R., Gomez, A., Labuschagne, C., Ramonet, M., Nakazawa, T., Nicolas Metzl, Gillett, N., & Heimann, M.(2007) Saturation of the Southern Ocean CO_2 Sink Due to Recent Climate Change. Science, 316:1735-1738.

10. http://homepage.mac.com/uriarte/climacretacico.html.

11. Thompson, D., & Salomon, S. (2002) Interpretation of Recent Southern Hemisphere Climate Change. Science, 296:895-899.

12. www.ecotropia.com/n1040702.htm.

13. http://www.medio-ambiente.info/print.php?sid=306.

14. www.scar.org

15. Jones, J., & Widmann, M. (2004) Atmospheric science: Early peak in Antarctic oscillation index. Nature, 432:290-91.

16. Steig, E. J., Schneider, D. P., Rutherford, S. D., Mann, M. E., Comiso, J. C., & Shindell, D. T. (2009) Warming of the Antarctic ice sheet surface since the 1957 International Geophysical Year. Nature, 457: 459-462.

Bibliografía Modelo antártico

1. Research eu. http://ec.europa.eu.

2. Blanchard E. (2002) Antarctic Warming?, Weather, 56:453-454

3. Cook, A.J., Fox, A.J., Vaughan, D.G., & Ferrigno, J. G. (2005) Retreating glacier fronts on the Antarctic Peninsula over the past half-century. Science, 308:541-544 .

4. Joughin, I., Bindschadler, R.A., King, M.A., Voigt, D., Alley, R.B., Anandakrishnan, S., Horgan, H., Peters, L., Winberry, P., Das,S.B., & Catania, G. (2005) Continued deceleration of Whillans Ice Stream, West Antarctica, Geophysical Research Letters, 32, L22501.