



Cambio climático CO₂

Por **Rosa Compagnucci** (Investigadora en Cuestiones Climáticas, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Universidad de Buenos Aires)

Una visión que se suma al debate sobre el cambio climático y a las actividades de desarrollo que generan impacto.

El Calentamiento Global, también llamado Cambio Climático, ha generado un gran impacto en la opinión pública. Nos estamos volviendo conscientes que el accionar humano afecta el planeta en que vivimos. Indudablemente hay un sinnúmero de impactos producidos en el ecosistema tales como la tala de bosques, la pérdida de flora nativa y el efecto que esto tiene sobre la fauna, la caza indiscriminada, la contaminación del agua y el suelo, entre otros. Sin embargo, el periodismo y la opinión pública se han focalizado particularmente en el llamado

Calentamiento Antropogénico, o sea el aumento de la temperatura global producida desde mediados del siglo diecinueve y atribuida principalmente al incremento del CO₂ (dióxido de carbono) antropogénico, debido a la quema de combustibles fósiles.

Es importante conocer la historia que llevó a determinar en el siglo XXI, por el llamado “consenso científico”, que la vida sobre el planeta estaría en serio riesgo de extensión de seguir aumentando las emisiones de CO₂ ya que los modelos climáticos auguran para el 2100 un aumento de aproximadamente 5°C en la temperatura media global. Los últimos informes del IPCC (Panel Intergubernamental en Cambio Climático) 2023, dan perspectivas abso-

lutamente alarmantes: “Las emisiones continuas de gases de efecto invernadero conducirán a un aumento del calentamiento global, con la mejor estimación de alcanzar 1,5 °C en el corto plazo en los escenarios considerados. Cada incremento del calentamiento global intensificará peligros múltiples y concurrentes. Los resultados de los escenarios de respuesta climática evaluados para emisiones de GEI (Gas de Efecto Invernadero) muy bajas, arrojan una estimación del calentamiento para el período 2081-2100 de ~ 1,4 °C, para un escenario de emisiones intermedias de GEI de 2,7 °C y para un escenario de emisiones muy altas de GEI de 4,4 °C.” “Las emisiones ya deberían haber disminuido y será necesario reducirlas casi a la mitad de aquí a 2030, si se desea limitar el calentamiento a 1,5 °C.” “A medida que aumentan los niveles de calentamiento, también lo hacen los riesgos de extinción de especies o pérdida irreversible de biodiversidad en ecosistemas como los bosques, los arrecifes de coral y en las regiones árticas. Si se alcanzan y mantienen los niveles de calentamiento entre 2 °C y 3 °C, las capas de hielo de Groenlandia y la Antártida occidental se perderán casi por completo e irreversiblemente a lo largo de varios milenios, lo que provocará un aumento de varios metros en el nivel del mar.”

El objetivo de esta presentación es brindar primeramente la historia socio-política del Calentamiento Global. Luego las variaciones naturales que ha tenido la temperatura global en la historia del clima de la tierra, así como del CO2 principal gas de efecto invernadero, conjuntamente con una breve descripción de las fuentes de datos utilizadas en los estudios científicos sobre el período pre-instrumental. Seguidamente, las variaciones de temperatura observadas desde el período instrumental que comenzó en 1850.

Historia del proceso socio-político del Cambio Climático

La historia del proceso a partir del cual se llega a la idea actual del Cambio Climático, producto del Calentamiento Global Antropogénico, resulta sumamente importante para comprender las implicancias sociales involucradas.

Después de varias décadas de

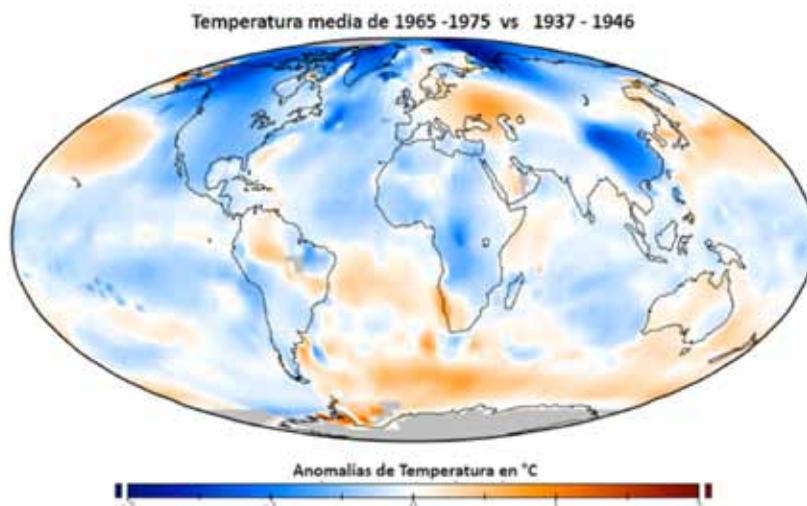


Figura 1. Diferencia de temperatura entre 1965 a 1975 respecto a 1937 a 1946 (fuente Saperaud wikimedia Commons).

calentamiento, un período de enfriamiento comenzó en 1945, y dos décadas de una tendencia de enfriamiento. Las anomalías de temperatura globales a mediados de los '70 (Figura 1) sugirieron a algunos científicos que el planeta podría estar entrando en el comienzo de una nueva edad de hielo. Las El dibujo-ficción de New York sepultada por un gigantesco alud que apareció en la tapa de la revista Science News de marzo de 1975 produjo alarma. El New York Times del 8 de abril de 1977 con un pinguino sobre montañas de hielo en la portada, anunciaba la nota “Como sobrevivir a la Edad de Hielo que viene” y proponía “51 cosas que usted puede hacer para marcar la diferencia” (Figura 2).

Esta preocupación rápidamente quedó reducida a una pequeña porción de la sociedad, ya que otros temas producirían inquietud tanto a los políticos como al ciudadano común. El periodismo se dedicaba a la fallida guerra de Vietnam que en esa época llegaba a su fin, la guerra fría, la amenaza de una posible guerra atómica y la crisis del petróleo.

Ya a fines de los '70 las temperaturas comenzaron a subir en la mayor parte del mundo y la amenaza de un futuro gélido fue rápidamente olvidada. El verano del '78 resultó uno de los más cálidos en décadas en el hemisferio norte. Entonces, la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos convenció al presidente Carter de reunir una co-



Figura 2. Tapas de las revistas “Science News” del 1º de Marzo de 1975 y “Time” de Abril de 1977

misión para el estudio del cambio en la temperatura. El informe decía que el aumento del CO₂ produciría apreciables cambios climáticos. La Central de Inteligencia Americana (CIA) también produjo sus propios informes y pidió que se incrementara la investigación del tema dado su influencia geopolítica. A su vez, Margaret Thatcher, química de profesión, conocía el efecto invernadero del CO₂ y encontró así la posibilidad de encausar su proyecto nuclear presionada por las huelgas de los mineros del carbón y el descomunal aumento del petróleo. Le encargó a Sir Crispin Tickell, embajador del Reino Unido en la Organización de las Naciones Unidas (ONU), que generara en la ONU una asesoría sobre la relación entre cambio climático, política y economía (Caparrós, 2010). Como respuesta se creó el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) que en 1990 produjo su primer informe.

Temperatura media global del período pre-instrumental

El período instrumental, se considera aquel para el cual existen registros instrumentales razonablemente confiables de la temperatura cercana a la superficie con una cobertura casi global y, comienza alrededor de 1850. Existen registros anteriores, pero con una cobertura más dispersa, confinada en gran medida al hemisferio norte, y con una instrumentación menos estandarizada.

El período previo de la historia del clima de la tierra, está cuantificado mediante proxi datos, que son datos indirectos para reconstruir las condiciones climáticas pasadas provenientes de registros naturales que conservan características físicas o biofísicas del pasado que sustituyen a las mediciones directas. Los paleoclimatólogos recopilan datos indirectos de los registradores naturales de la variabilidad climática, como los corales, el polen, los núcleos de hielo, los anillos de los árboles, las cuevas, los basureros de las ratas, los sedimentos oceánicos y lacustres y los datos históricos. Al analizar los registros tomados de estas y otras fuentes indirectas, los científicos pueden ampliar nuestra compren-

sión del clima mucho más allá del registro instrumental.

En escalas que van del reciente pasado de los últimos 2000 años, a millones de años se tienen los siguientes proxi datos más relevantes.

Datos históricos: Los documentos históricos, pueden brindar una gran cantidad de información sobre los climas del pasado. Se pueden encontrar observaciones de las condiciones meteorológicas y climáticas en los registros de barcos y agricultores, diarios de viajeros, relatos de periódicos y otros registros escritos. Cuando se evalúan adecuadamente, los documentos históricos pueden proporcionar información tanto cualitativa como cuantitativa sobre el clima del pasado. Por ejemplo, los científicos utilizaron fechas históricas de cosecha de uvas para reconstruir las temperaturas de verano, entre abril y septiembre, en París desde 1370 hasta 1879 (Ladurie, E. L. R. y Daux, V. , 2008).

Corales: los corales construyen sus esqueletos duros a partir de carbonato de calcio, un mineral extraído del agua de mar. La densidad de estos esqueletos de carbonato de calcio cambia a medida que cambian la temperatura del agua, la luz y las condiciones de nutrientes, lo que da a los esqueletos de coral formados en el verano una densidad diferente a la de los formados en el invierno. El carbonato también contiene isótopos de oxígeno, así como metales traza que se pueden utilizar para determinar la temperatura del agua en la que creció el coral. Puede utilizarse esta información para reconstruir el clima cuando vivió el coral, como Gagan y otros (2000) que analizaron la ocurrencia del fenómeno El Niño en los pasados 4000 años mediante la información de los corales.

Anillos de los árboles: Debido a que las condiciones climáticas influyen en el crecimiento de los árboles, los patrones en el ancho, la densidad y la composición isotópica de los anillos de los árboles reflejan variaciones en el clima. En las regiones templadas donde hay una estación de crecimiento definida, los árboles generalmente producen un anillo al año, que registra las condiciones climáticas cada año. Si dependen en gran medida de temperaturas cálidas o mucha humedad en la estación de

crecimiento, sus anillos serán más anchos cuando se dan esas condiciones y más estrechos cuando no las hay. Los árboles también pueden llegar a tener cientos o miles de años y pueden contener registros anuales del clima durante siglos o milenios.

Basureros de ratas: Los depósitos ricos en plantas llamados basureros de ratas son otro tipo de datos indirectos. Para producir estos basureros, las ratas recogen materiales vegetales a corta distancia y los acumulan en cuevas y grietas secas. Allí, esos materiales vegetales y otros desechos se cementan con grandes masas de orina cristalizada y pueden conservarse durante decenas de miles de años. Después de recoger, limpiar y clasificar muestras de basureros, se analiza su contenido, que representa el entorno local en el momento en que se recolectó el material.

Polen: Todas las plantas con flores producen granos de polen, que son otro tipo de datos indirectos. Se pueden utilizar las formas distintivas de los granos de polen para identificar el tipo de planta de la que proceden. Dado que los granos de polen se conservan bien en las capas de sedimentos del fondo de un estanque, lago u océano, un análisis de los granos de polen en cada capa indica qué tipos de plantas estaban creciendo en el momento en que se depositó el sedimento. Entonces es posible hacer inferencias sobre el clima de la zona basándose en los tipos de plantas que se encuentran en cada capa.

Cuevas: Estas cámaras subterráneas contienen los secretos del clima de la Tierra en espeleotemas, también conocidos como estalactitas, estalagmitas y otras formaciones. Los espeleotemas crecen con el tiempo a medida que el agua gotea desde el techo de una cueva o se acumula en su suelo y los depósitos minerales se acumulan en capas delgadas y brillantes. Debido a que la cantidad de agua que se abre paso hacia las cuevas determina la cantidad de crecimiento de los espeleotemas, sus capas pueden indicar épocas tanto de fuertes precipitaciones como de sequía.

Núcleos de hielo: Situado en lo alto de las montañas y cerca de los polos, el hielo (otro tipo de datos indirectos) se ha acumulado a partir de las nevadas durante muchos mi-

lenios. Perforando el hielo profundo para recoger núcleos de hielo, que a menudo tienen capas distintas, estas contienen polvo, burbujas de aire o isótopos de oxígeno, que difieren de un año a otro en función del entorno circundante. Pueden utilizarse para interpretar el clima pasado de una zona. Los núcleos de hielo pueden informar sobre la temperatura, las precipitaciones, la composición atmosférica, la actividad volcánica e incluso los patrones de viento.

Sedimentos de océanos y lagos: Miles de millones de toneladas de sedimentos se acumulan en las cuencas de los océanos y lagos cada año, lo que proporciona una gran cantidad de información sobre el medio ambiente. Perforando los sedimentos de los fondos de las cuencas y examinan su contenido, que incluye pequeños fósiles y sustancias químicas, es posible con ellos interpretar los climas pasados.

Cambios en los últimos 600 millones de años

En la Figura 3 puede observarse que el período comprendido entre el Carbonífero tardío y el Pérmico temprano (hace 315-270 millones de

años), es el único período de los últimos 600 millones de años en el que tanto el CO₂ atmosférico como las temperaturas fueron tan bajas como lo son hoy (Cuaternario).

También el gráfico muestra que los niveles de dióxido de carbono tienen poca o casi nada de correlación con la temperatura durante este período de tiempo. Los niveles de CO₂ han caído de forma constante entre los 600 y 350 millones de años atrás. Mientras que la temperatura planetaria se mantuvo en 22 °C, con una abrupta y relativamente breve caída hasta 12°C hace 450 millones de años con posteriormente una rápida recuperación. Fue hace 30 millones de años que la temperatura del planeta comenzó a descender hacia las condiciones de la Edad de Hielo, más frías que cualquier otra en los últimos 300 millones de años. Nuestro planeta ahora es inusualmente frío según los estándares paleoclimáticos y los niveles de dióxido de carbono son inusualmente bajos.

También es de notar que en 600 millones de años la temperatura global no ha superado mucho los 22 °C, sin importar cuán altos hayan sido los niveles de CO₂.

El enfriamiento que comenzó en el Eoceno hace 55 millones de

años, fue debido los fenómenos tectónicos. Por ejemplo, la colisión de la placa india con la asiática creando las montañas del Himalaya, lo que aumentó las tasas de erosión y meteorización. Una mayor tasa de meteorización de los minerales de silicato, especialmente el feldespato, consume dióxido de carbono de la atmósfera y, por lo tanto, reduce el efecto invernadero, lo que da como resultado un enfriamiento a largo plazo. El enfriamiento llevó a las condiciones de la última edad de hielo y a las oscilaciones climáticas del Pleistoceno (Figura 4).

Los últimos 5 millones de años (figura 5) muestran que el último millón de años que se caracterizó por grandes oscilaciones cíclicas en la temperatura de más de 10 °C y conjuntamente con oscilaciones cíclicas similares en la concentración de CO₂, de aproximadamente 100 mil años de duración, entre períodos glaciares e interglaciares. Mayormente producto de los llamados ciclos de Milankovitch en la órbita terrestre que afectan el clima a largo plazo (Berger, A., 1988). Hay tres componentes clave: la variación de la excentricidad orbital (cambio de forma de la órbita cada 100.000 años), el cambio en la inclinación

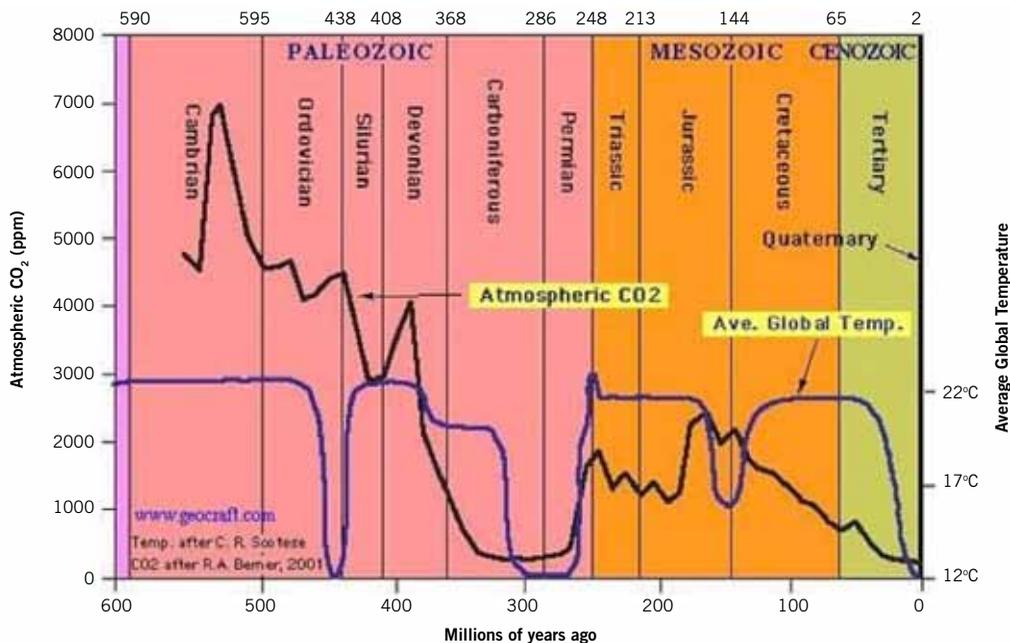


Figura 3. Temperatura Global y niveles de CO₂ sobre los últimos 600 millones de años realizado por MacRae P. (2008). Este gráfico es combinación de dos fuentes. La reconstrucción de la paleo temperatura de Scotese website <http://www.scotese.com/Default.htm>. La reconstrucción de los niveles de CO₂ de R.A. Berner y Z. Kothavala, "Geocarb III: A revised model of atmospheric CO₂ over Phanerozoic time." American Journal of Science, Vol. 301, Feb. 2001, pp. 182-204.

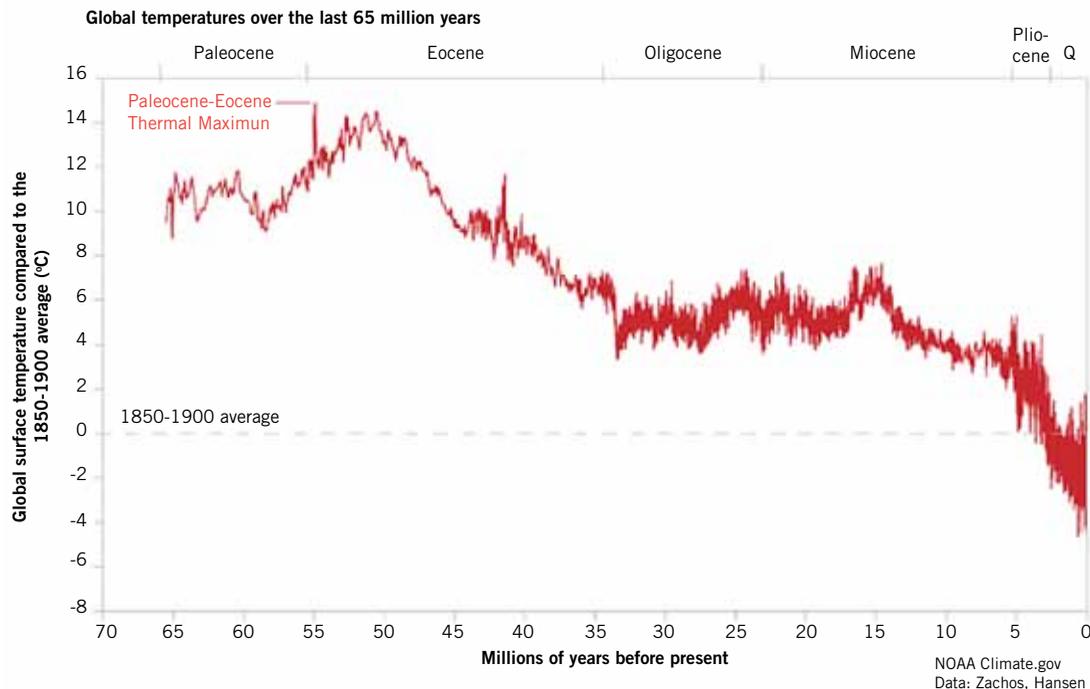


Figura 4. Temperatura de los últimos 65 millones de años (Fuente: Zachos et al., 2008).

axial (oscilación de la inclinación cada 41.000 años) y la precesión de los equinoccios (cambio en la orientación del eje cada 26.000 años). Reciente información de los testigos de hielo del continente Antártico cubre los últimos 800 mil años y permiten tener una mejor resolución de la información de temperatura.

De acuerdo con las estimaciones hechas utilizando los testigos de hielo los últimos 500.000 años (Figura 6) las temperaturas de los tres periodos interglaciares previos fueron superiores al del actual interglaciar, con lo cual las temperaturas actuales, del periodo Holoceno, serian propias de los periodos interglaciares. Mientras que los valores de CO2 actuales, de 425 ppm a Julio del 2024 (<https://www.co2.earth/>), son superiores a los registrados en los previos

500.000 años.

El CO2 y la temperatura parecen estar bien correlacionados en un sentido general, pero hay algunas desviaciones significativas. En las terminaciones de los periodos glaciares, la covarianza es tan buena como la observada para el metano (no mostrada). Pero al comienzo de las últimas 4 glaciaciones, el CO2 se retrasó con respecto a la temperatura en varios miles de años. Petit et al (1999) hacen la observación, pero no ofrecen una explicación y no toman en cuenta la importancia de este fenómeno.

Aparentemente, el cambio en la temperatura y la cubierta de hielo hace que el CO2 cambie.

En la Figura 6, puede verse que las variaciones de CO2 van a la zaga de las variaciones de temperatura,

especialmente al fin de los periodos cálidos. Los desfases de tiempo, de los periodos finales de la glaciación a comienzos de los cálidos, son de unos pocos cientos de años pueden explicarse mediante errores de datación y calibrando las edades de los gases con las edades de hielo. Parrenin et al (2013) analizaron el comienzo del Holoceno donde encontraron buena concordancia entre los desfases de temperatura y los de CO2. Sin embargo, se hubiesen analizado el comienzo del último periodo glacial hubiesen encontrado un desfase temporal de varios miles de años, tan grande que no es posible explicarlo por un error de calibración.

En particular, la terminación pre-Eemense y el inicio post-Eemense, muestran claramente que durante el pre-Eemense la temperatura y

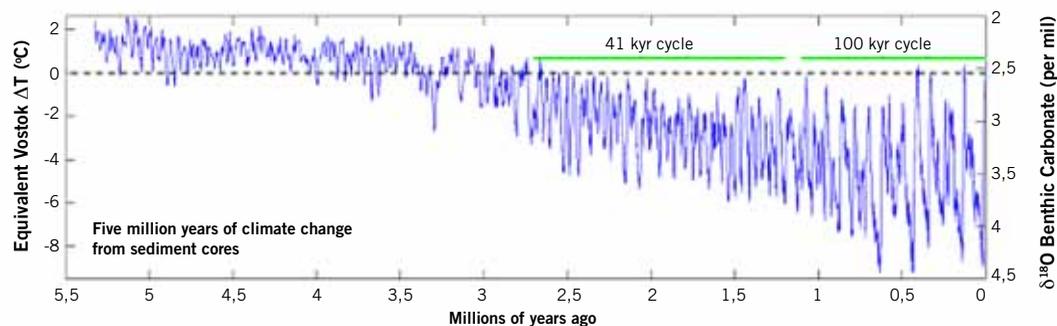
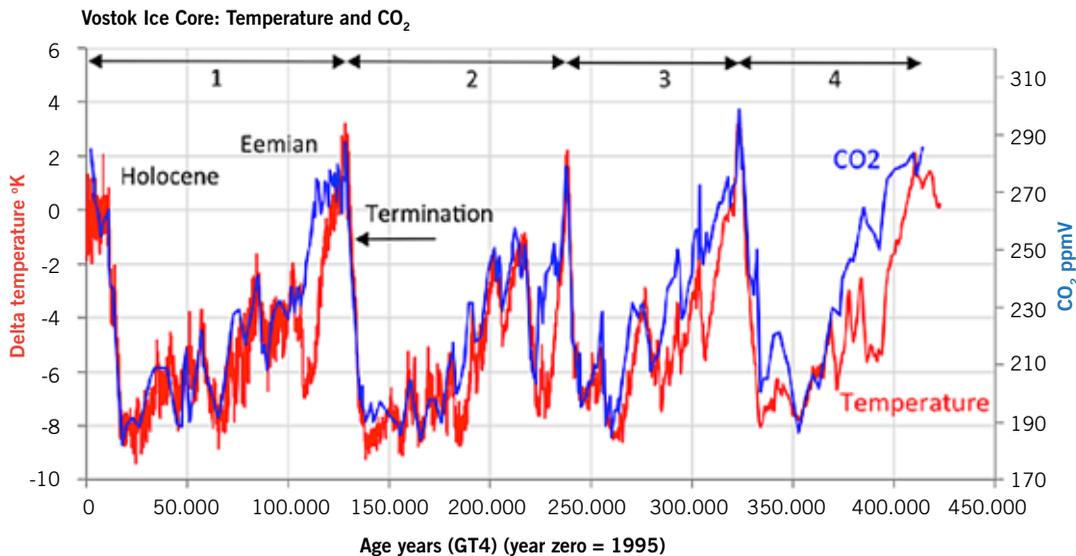


Figura 5. Reconstrucción de los pasados 5 millones de años de la historia del clima, basado en las fracciones de isotopos de O18 en los testigos de sedimentos marinos (como proxy de la masa total de hielo), filtrado por un modelo de forzante orbital (Lisiecki and Raymo 2005) y de escalas de temperatura derivadas de los testigos de hielo de Vostok (Petit et al., 1999).



Energy Matters euanmearns.com <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/icecore/antarctica/vostok/vostok.html>

Figura 6. El Core de Hielo de Vostok: Temperatura y CO₂ (Fuente: Euan Mearns (2014), Energy Matters 12 diciembre, 2014, The Vostok Ice Core: Temperature, CO₂ and CH₄), en el artículo también se plantea una discusión sobre los proxy datos. Los datos de Vostok pueden bajarse de <https://www.ncdc.noaa.gov/products/paleoclimatology/ice-core>

el CO₂ aumentan casi coordinadamente, mientras que durante el enfriamiento del post-Eemiense en desfase del orden de 10.000 años (<https://euanmearns.com/the-vostok-ice-core-and-the-14000-year-co2-time-lag/>).

Los últimos 2000 años

Hay una pregunta clave ¿el calentamiento del siglo XX es inusual o ya ocurrieron en el pasado episodios similares?, ¿es el hombre el causante del calentamiento reciente? Por ello es fundamental una evaluación lo más precisa posible de los últimos 2000 años, los cuales cuentan con un gran número de proxy datos de bastante resolución. Además, es un período en el cual pueden descartarse la tectónica, y los ciclos de Milankovitch como forzantes.

La primera serie cuantitativa de temperatura media global, reconstruida de proxy datos para los últimos 1000 años del hemisferio norte (HN), es conocida como “el palo de jockey” y fue presentada por Mann et al. (1999) y publicada por el IPCC (2001 figura 2.20) y presentada en la Figura 7. Esta reconstrucción produjo grandes controversias en el ambiente científico. La pregunta clave es: ¿el calentamiento del siglo XX es inusual o ya ocurrieron en el pasado episodios similares? Durante el llamado Perío-

do Cálido Medieval (PCM: 800-1300 d. C.) los Vikingos se expandieron a Islandia, Groenlandia y el norte de Norteamérica como lo indican los asentamientos arqueológicos. Determinar la magnitud y la extensión del PCM, pues aquí intervinieron forzantes naturales, principalmente la alta actividad solar. El IPCC (2001) propuso que este era un fenómeno local del HN imperceptible a nivel global. Esto fue refutado con investigaciones que localizan el PCM en diversos lugares del Hemisferio Sur (HS), cómo Japón (Adhikari, D.P. and Kumon, F. 2001), el Pasaje Drake (Domack, E.W. and Mayewski, P.A. 1999).

La mayoría científica produjeron otras reconstrucciones similares al “palo de hockey” y resultados afines, pero otro grupo comenzó a refutar estos resultados criticando los datos empleados y la metodología usada en esa reconstrucción generándose así una gran controversia (Esper et al, 2002; McIntyre y McKittrick, 2003 y 2005; von Storch y Zorita, 2005; McIntyre, 2005).

Después del informe de 2001 del IPCC, prestigiosas revistas especializadas empezaron a publicar otras reconstrucciones de temperatura de los últimos 1000 y hasta 2000 años que difieren notoriamente del “palo de jockey” (Esper et al, 2002; Soon y Baliunas, 2003; Cook et al, 2004; Moberg et al, 2005; Loehle y McCulloch 2008).

En el IPCC(2007) se publican las reconstrucciones disponibles que muestran mayor variabilidad que el “palo de jockey” (Figura 8)

La posteriormente reconstrucción producida por Ljungqvist (2010) ver figura 9, muestra temperaturas similares a las del calentamiento actual durante el PCM. La actividad solar parecería ser el principal forzante de estos cambios, ya que entre el 1300 y 1820 la temperatura decae en tres pulsos, correspondientes a los mínimos de manchas solares (Tobias y Weiss,2000), de Spörer (1450-1550), Maunder (1645-1715) y Dalton (1790-1815). Este largo período frío es conocido como la “Pequeña Edad de Hielo”, período en el que también hubo gran actividad volcánica que fue el otro forzante del enfriamiento.

Período instrumental

Existen diversos bancos mundiales de información con los datos registrados por las estaciones meteorológicas del período instrumental, que abarca desde 1850 hasta la actualidad. 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 con valores diarios que pueden bajarse de: <https://www.ncdc.noaa.gov/products/land-based-station/global-historical-climatolo>

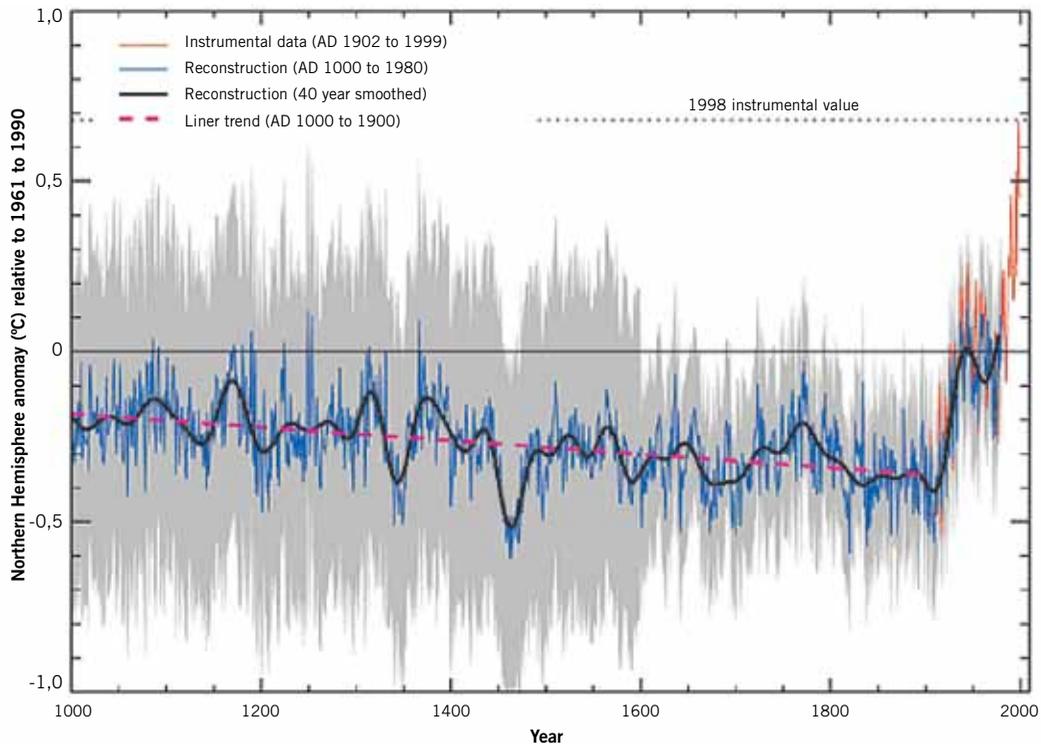


Figura 7. Del IPCC (2001, Figura 2.20) Desde el año 1000 d. C. hasta 1999 la temperatura del NH, reconstruidas (azul) y datos instrumentales (rojo), adaptados de Mann et al. (1999). Se muestran una versión más suave de la serie NH (negra), una tendencia lineal desde el año 1000 d. C. hasta 1850 (línea discontinua morada) y dos límites de error estándar (sombreados en gris).

gy-network-daily .

En 1850 el sistema climático está saliendo de la llamada “Pequeña Edad de Hielo”, el sol comienza a tener más actividad, la tierra tiende a calentarse respecto al período previo como puede verse en la Figura 8. El último año en que el Támesis se congeló fue 1895. A su vez en esta época comienza el período industrial y la inyección de CO₂ de quema fósil a

la atmósfera. Allí se entabla una gran controversia muy difícil de resolver fehacientemente. ¿Es el aumento antropogénico de los gases de efecto invernadero, o son causas naturales como las variaciones solares, el vulcanismo, los rayos cósmicos galácticos entre otras, las que provocaron el aumento de la temperatura y el cambio en otras variables climáticas?

Resolver esta pregunta y mostrar

todos los aportes a ella es imposible en este artículo. Sólo se indicarán algunas apreciaciones evidentes en la Figura 9. Entre 1850 y 1910 hay una tendencia negativa de la temperatura, salvo un calentamiento en 1877-1878, mientras que la tendencia del CO₂ es contraria, en aumento. De 1910 a 1944 las temperaturas aumentan mucho más rápido de lo que se puede explicar por los cambios en

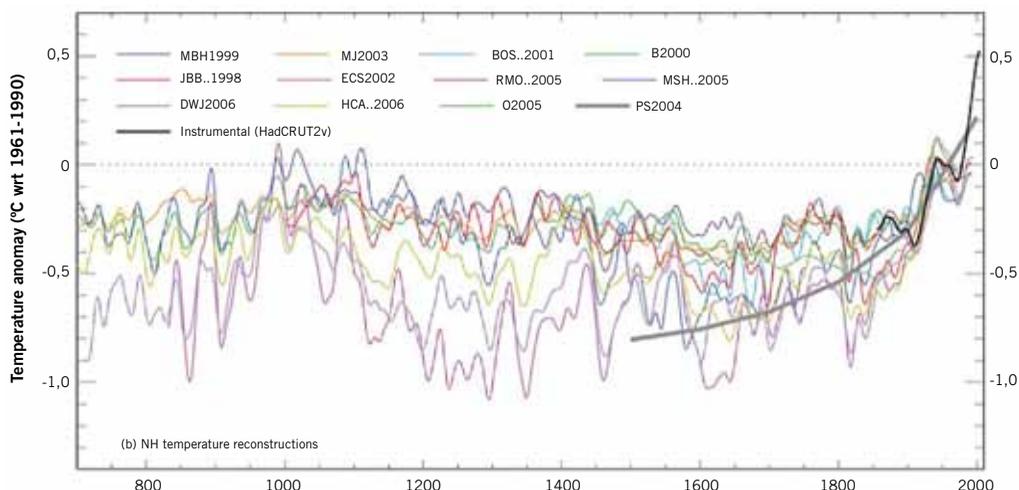


Figura 8. Registros de variación de temperatura del NH durante los últimos 1,3 mil años. Reconstrucciones utilizando múltiples registros de indicadores climáticos proxy, y el registro instrumental de temperatura HadCRUT2v en negro. Todas las series han sido suavizadas con un filtro ponderado gaussiano para eliminar fluctuaciones en escalas de tiempo menores a 30 años; los valores suavizados se obtienen hasta ambos extremos de cada registro extendiendo los registros con la media de los valores existentes adyacentes. Todas las temperaturas representan anomalías (°C) de la media de 1961 a 1990 (IPCC, 2007, figura 6.10.b).

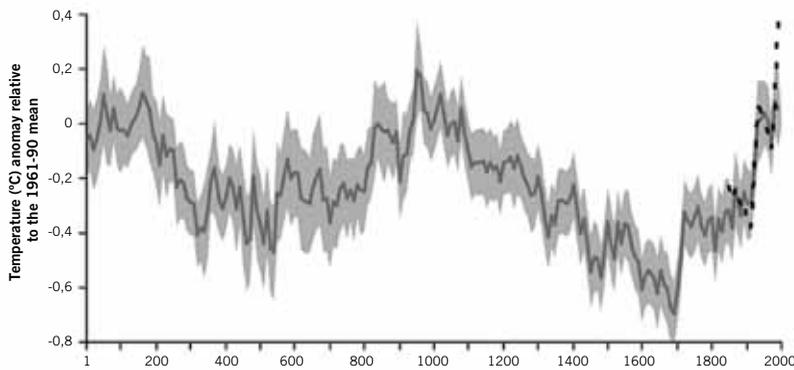


Figura 8. Estimaciones de las variaciones de temperatura media decenal en el HN extratropical (90–30°N) (línea gris oscura) 1–1999 d.C. en relación con la temperatura instrumental media de 1961–1990 a partir del registro CRUTEM3+HadSST2 90–30°N ajustado por varianza (línea de puntos negra que muestra los valores medios decenales 1850–1999 d.C.) con 2 barras de error de desviación estándar (sombreado gris claro) (Fuente: Ljungqvist ,2010).

la concentración de CO₂. De 1944 a 1976 las temperaturas caen, pero el CO₂ aumenta. Podemos ver que la relación entre el CO₂ y la temperatura es cercana a lo que esperamos de 1980 a 2000, de 2000 a hoy, el calentamiento es un poco más rápido de lo que predeciríamos a partir del cambio en el CO₂. Estas anomalías sugieren que hay otras fuerzas en juego que son tan fuertes como el calentamiento basado en el CO₂.

Al considerar la variabilidad de la irradiancia solar como uno de los principales forzantes de la variación de la temperatura vemos en la Figura 10, una buena correlación hasta 1980. Aunque posteriormente a 1980 la irradiancia solar se mantiene estable y hasta disminuye en la última década, mientras la temperatura

sigue subiendo. Es de tener en cuenta que además de la irradiancia solar total (TSI) hay otros factores que intervienen en el clima y que dependen de la variabilidad solar (Gray, et al., 2010). Entre ellos, uno muy importante son los rayos cósmicos galácticos que influyen en la formación de nubes y así en el balance energético de la tierra (Tsonis, et al., 2015).

La discrepancia entre la TSI y el CO₂, podría deberse al aumento del CO₂ antropogénico que tuvo un crecimiento mayor que en años anteriores. También podría deberse a la deforestación indiscriminada. Uno de los casos más graves es la destrucción de bosques húmedos tropicales para cultivar soja, destinada a alimentar a ganadería intensiva, y aceite de palma para agrocombustibles.

Otro de los impactos de la producción agrícola es la tala de bosques para crear nuevas tierras tanto para cultivos como para pasto (Longobardi, Petal., 2016). El óxido nitroso (N₂O) es un potente gas de efecto invernadero cuyas estimaciones de emisiones globales, impulsadas en gran medida por el uso de fertilizantes, son muy inciertas. Un enfoque basado en mediciones atmosféricas arroja aumentos globales más del doble de los que establece el IPCC por defecto (Makowski, D., 2019). El N₂O, tiene un potencial de producción de calentamiento global 296 veces mayor que el CO₂. Entre 1970 y 2018, las emisiones antropogénicas anuales globales de N₂O aumentaron un 64% (aproximadamente 3,6 teragramos (Tg)); las fuentes agrícolas representaron principalmente el 78% de este incremento. (Feng, R., y Li, Z., 2023).

Conclusiones

Vimos, tanto para la etapa pre instrumental como el instrumental, en diversas escalas temporales, que sólo para algunos períodos la temperatura y el CO₂ parecen tener correlación positiva. Mientras que en otros se hallan fuera de fase.

Teniendo en cuenta la información instrumental posterior a 1850, podemos concluir que muy proba-

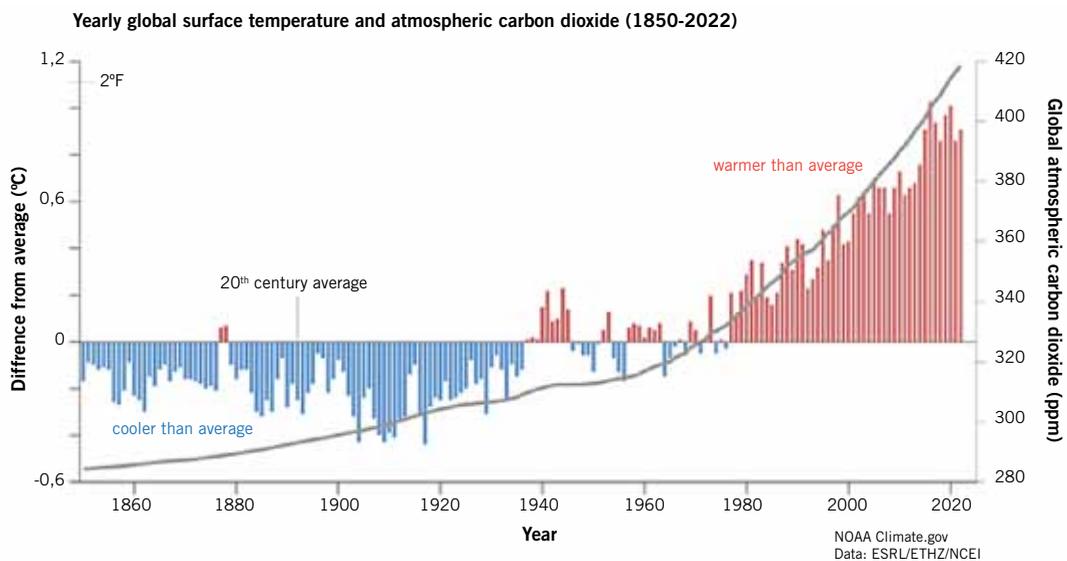


Figura 9. Temperatura anual comparada con el promedio del siglo XX (1901-2000) de 1850 a 2023. Las barras rojas indican años más cálidos que el promedio; las barras azules, años más fríos que el promedio. (gráfico de líneas) Cantidades de dióxido de carbono atmosférico: 1850-1958 del IAC, 1959-2023 del Laboratorio de Monitoreo Global de la NOAA. Gráfico de NOAA Climate.gov, adaptado del original del Dr. Howard Diamond (NOAA ARL).

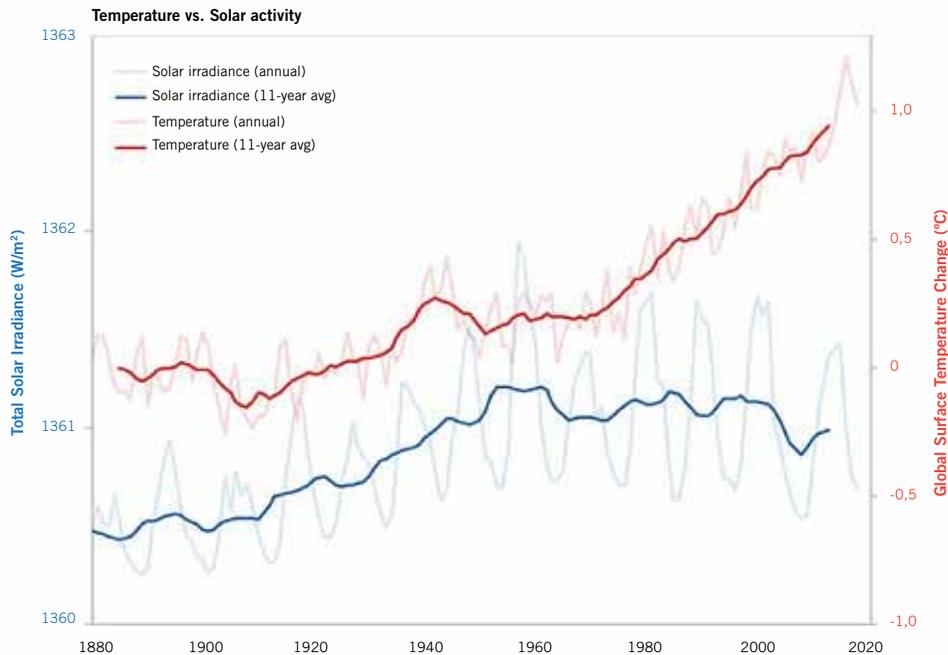


Figura 10. Temperatura global anual (rojo claro fino) con promedio móvil de 11 años de temperatura (rojo oscuro grueso), la temperatura de NASA GISS (<https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>). Irradiancia solar total anual (azul claro fino) con promedio móvil de 11 años de TSI (azul oscuro grueso). TSI de 1880 a 1978 de Krivova et al 2007 (datos). TSI de 1979 a 2009 de PMOD (<https://www.pmodwrc.ch/en/research-development/solar-physics/tsi-composite/>)

blemente el ser humano está afectando la temperatura global, sobre todo desde 1980. Pero además de las emisiones fósiles de CO₂, otros factores como deforestación, y el uso de agroquímicos y pesticidas estarían causando aún mayores estragos que el CO₂ antropogénico.

Referencias

IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001

Makowski, D. (2019). N₂O increasing faster than expected. *Nature Climate*

Change, 9(12), 909-910.

Tsonis, A. A., Deyle, E. R., May, R. M., Sugihara, G., Swanson, K., Verbeten, J. D., & Wang, G. (2015). Dynamical evidence for causality between galactic cosmic rays and interannual variation in global temperature. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(11), 3253-3256.

Gray, L. J., Beer, J., Geller, M., Haigh, J. D., Lockwood, M., Matthes, K., ... & White, W. (2010). Solar Influences on Climate. *Reviews of Geophysics*, 48(4), RG4001.

Zharkova V. Modern Grand Solar Minimum will lead to terrestrial cooling. *Temperature (Austin)*. 2020 Aug 4;7(3):217-222. doi: 0.1080/23328940.2020.1796243.

Zharkova, Valentina V., and Irina Vasiliieva. "Terrestrial temperature, sea levels and ice area links with solar activity and solar orbital motion." *Natural Science* 15.9 (2023): 233-255.

Caparrós M. (2010). Contra el cambio: un hiperviaje al apocalipsis climático, Anagrama, 278 p

Longobardi, P., Montenegro, A., Beltrami, H., & Eby, M. (2016). Deforestation induced climate change: Effects of spatial scale. *PloS one*, 11(4), e0153357.

Feng, R., & Li, Z. (2023). Current investigations on global N₂O emissions and

reductions: Prospect and outlook. *Environmental Pollution*, 122664.

Ladurie, E. L. R., and Dauv, V. (2008). The climate in Burgundy and elsewhere, from the fourteenth to the twentieth century. *Interdisciplinary Science Reviews*, 33(1), 10-24.

Gagan, M. K., Ayliffe, L. K., Beck, J. W., Cole, J. E., Druffel, E. R. M., Dunbar, R. B., and Schrag, D. P. (2000). New views of tropical paleoclimates from corals. *Quaternary Science Reviews*, 19(1-5), 45-64.

MacRae, P., (2008), <https://www.paulmacrae.com/were-a-long-way-from-global-warming-oblivion/>

Euan Mearns (2014), The Vostok Ice Core: Temperature, CO₂ and CH₄, *Energy Matters*, 12 Diciembre, 2014. <https://euanmearns.com/the-vostok-ice-core-temperature-co2-and-ch4/>

Zachos, J. C., Dickens, G. R., and Zeebe, R. E. (2008). An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics. *nature*, 451(7176), 279-283.

Lisiecki, L. E., & Raymo, M. E. (2005). A Pliocene Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic 18O records. *Paleoceanography*, 20(1).

Petit, J. R.; Jouzel, J.; Raynaud, D.; Barkov, N. I.; Barnola, J. M.; Basile, I.; Bender, M.; Chappellaz, J.; Davis, J.; Delaygue, G.; Delmotte, M.; Kotlyakov, V.

- M.; Legrand, M.; Lipenkov, V.; Lorius, C.; Pépin, L.; Ritz, C.; Saltzman, E.; Stievenard, M. (1999). "Climate and Atmospheric History of the Past 420,000 years from the Vostok Ice Core, Antarctica". *Nature* 399: 429-436. DOI:10.1038/20859.
- Berger, A. (1988). Milankovitch theory and climate. *Reviews of geophysics*, 26(4), 624-657.
- Parrenin, F., Masson-Delmotte, V., Köhler, P., Raynaud, D., Paillard, D., Schwander, J., ... & Jouzel, J. (2013). Synchronous change of atmospheric CO₂ and Antarctic temperature during the last deglacial warming. *Science*, 339(6123), 1060-1063.
- IPCC (2001) Intergovernmental Panel on Climate, Third assessment report: Working Group I "The Physical Science Bases", Cambridge University Press (<https://www.ipcc.ch/report/ar3/wg1/>)
- Adhikari, D.P. and Kumon, F. 2001. Climatic changes during the past 1300 years as deduced from the sediments of Lake Nakatsuna, central Japan. *Limnology* 2: 157-168.
- Domack, E.W. and Mayewski, P.A. 1999. Bi-polar ocean linkages: evidence from late-Holocene Antarctic marine and Greenland ice-core records. *The Holocene* 9: 247-251.
- Esper, J., Cook, E. R., Schweingruber, F. H., (2002). Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. *Science*, 295: 2250-2253.
- McIntyre, S., McKittrick, R., (2005). Hockey sticks, principal components, and spurious significance, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L03710, doi:10.1029/2004GL021750.
- McIntyre, S., McKittrick, R. (2003). Corrections to the Mann et al. (1998). Proxy data base and Northern Hemispheric average temperature series. *Energy and Environment*, 14: 751-771.
- von Storch, H. y Zorita E. (2005). Comment on "Hockey sticks, principal components, and spurious significance" by S. McIntyre and R. McKittrick, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L20701, doi:10.1029/2005GL022753.
- Ljungqvist, F. C. (2010). A new reconstruction of temperature variability in the extratropical Northern Hemisphere during the last two millennia. *Geogr. Ann.*, 92A, 339-351.
- Loehle, C. y McCulloch, J. H. (2008). Correction to: A 2000-year global temperature reconstruction based on non-tree ring proxies. *Energy and Environment*, 19, 93-100.
- Soon, W., Baliunas, S., (2003). Proxy climatic and environmental changes of the past 1000 years, *Clim. Res.*, 23, 89-110.
- Tobias, S. M. y Weiss, N. O. (2000). Resonant interactions between solar activity and climate. *Journal of Climate* 13: 3745-3759
- Moberg, A.; Sonechkin, D. M.; Holmgren, K.; Datsenko, N. M. y Karlén, W. (2005). Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. *Nature*, 433: 613-617.
- Loehle, C. y McCulloch, J. H. (2008). Correction to: A 2000-year global temperature reconstruction based on non-tree ring proxies. *Energy and Environment*, 19, 93-100.
- Krivova, N. A., Balmaceda, L., & Solanki, S. K. (2007). Reconstruction of solar total irradiance since 1700 from the surface magnetic flux. *Astronomy & Astrophysics*, 467(1), 335-346.

Pronóstico futuro

Solar

Valentina Zharkova(2020) encuentra que el campo magnético proxy de actividad solar recientemente descubierto que el Sol ha entrado en el Gran Mínimo Solar moderno (2020-2053) que conducirá a una reducción significativa del campo magnético solar y la actividad como durante el mínimo de Maunder que conduce a notable reducción de la temperatura terrestre.

Posteriormente, Zharkova (2023) demuestra que el campo magnético de fondo del Sol (o actividad solar) y la posición del Sol con respecto al baricentro (foco de la elipse) del sistema solar causada por la gravitación de los grandes planetas del sistema solar (Júpiter, Saturno, Neptuno y Urano) definen las variaciones de la temperatura terrestre y del nivel del mar, así como la superficie cubierta por el hielo en el Ártico.

