



¡CO₂ = calentamiento global = cambio climático! ¿Y qué pasaría si todo fuera más complejo? Los continuos cambios climáticos: aspectos geológicos, arqueológicos y astrofísicos

CO₂ = global warming = climate change! And what happens if everthing is more complex? Continuous climate changes: geological, archaeological, and astrophysical points of view

DR. STEFAN UHLIG, DIPL

Geol., Karlsruhe, Alemania, w-uhlig@gmx.de

<https://doi.org/10.17979/cadlaxe.2020.42.0.7306>

Recibido: 24/9/2020, Aceptado: 3/11/2020

Abstract:

The continuous natural climate changes of the last 2,56 million years are discussed presenting data from different scientific areas such as geology, archaeology, astronomy, etc.

Resumen:

Se discuten los continuous cambios climaticos naturales de los últimos 2,56 millones de años presentando hechos y datos de diferentes area científicas como es la geología, arqueología, astronomía, etc.

Key-words: solar cycles, ice ages, interglacials, sea level changes, greenhouse effect

Palabras clave: ciclos solares, epocas glaciales, épocas interglaciales, cambios del nivel del mar, efecto invernadero

ANTECEDENTES

El objeto de este trabajo es aportar algunos datos a la actual polémica sobre el cambio climático dado el carácter más emocional que racional de muchas discusiones, muy influidas por cuestiones ideológicas, a menudo con escasa base científica que además se mezclan con otros temas de medio ambiente. El origen del continuo cambio climático es muy complejo y no se puede explicar por un solo factor como es la concentración del dióxido de carbono en la atmósfera. Las temperaturas de la atmósfera terrestre están subiendo constantemente, si bien con interrupciones, desde el final de la última Época glacial hace unos 12.000 años, aumento compaginado con una subida del nivel del mar. Si el calentamiento llegara al nivel del último interglacial (Época cálida del Eem), hace unos 120.000 años, el nivel del mar subiría unos 5-6 m al menos en algunas costas de la Tierra. Fué la continua subida del nivel del mar, por ejemplo, en los Países Bajos, lo que obligó a elevar los diques y terraplenes, desde la Alta Edad Media, aunque no hay que olvidar el papel de la glacioeustasia en este acusado hundimiento de la costa en Países Bajos.

Ya nuestros antepasados prehistóricos se sintieron impresionados, y a la vez asustados, por los fenómenos meteorológicos violentos, entonces incomprensibles y en ocasiones mortales, como eran p.ej. rayos, truenos, granizos y fríos glaciales. Partiendo de estos hechos se desarrollaron las primeras religiones y las creencias en seres superiores, como p.ej. el dios del trueno, que persistió hasta los tiempos de las tribus nórdicas europeas como dios Thor, e incluso perdura hoy día en el nombre alemán del día de la semana de “Donnerstag”. Como dios del

trueno, Thor recorrió el cielo en su carro tronante tirado por dos machos cabríos lanzando relámpagos con su martillo (POHANKA 2018). Transcurridos más de 300 años desde la revolución científica de la Ilustración parece que aun se mantiene en nuestro “substrato Neanderthal” el temor arcaico a los fenómenos meteorológicos naturales catastróficos.

Esta aproximación al tema no sustituye a los numerosos trabajos científicos existentes, sino más bien quiere animar a tratar el tema profunda y críticamente. En las gráficas que se presentan, se demuestra entre otras la evolución de la radiación solar, del crecimiento vegetal, de la temperatura, del CO2 etc., basándonos en investigaciones científicas interdisciplinarias que utilizan elementos trazas, isótopos, pólenes, microfósiles y aun más en testigos de hielo, sedimentos lacustres y dendrocronología (p.ej. Figura 17), sólo por mencionar los tipos de datos más importantes. Como no se pueden determinar directamente las temperaturas y la insolación de tiempos pasados, la ciencia se sirve de los llamados “proxies”. Entre otras, las concentraciones de los isótopos del ^{14}C , ^{10}Be (para la insolación) y del ^{18}O (para la evolución de la temperatura) en suelos, sedimentos, testigos de hielo, organismos, etc. representan a los parámetros relevantes del clima. Además, hallazgos arqueológicos, por ejemplo, de los tiempos romanos, están demostrando que el nivel del mar subió imparablemente desde tiempos preindustriales. Las correspondientes informaciones detalladas y los resultados particulares, como también las explicaciones de los correspondientes métodos analíticos, se pueden encontrar en la bibliografía. Dignas de mención son las publicaciones de SIROCKO (2012) y BGR (2004).

Mientras redactaba esta sinopsis de hechos climáticos fueron apareciendo progresivamente datos nuevos cada vez más interesantes por lo que trabajo y bibliografía se ampliaron algo más de lo previsto. La intención de mi sinopsis no es convencer, sino llamar a examinar críticamente el actual pensamiento “main stream”. Cómo bien puntualizó el filósofo español José Ortega y Gasset (1883-1955) con respecto al ensayo: “Con mayor razón habrá de hacerse así en ensayos de este género, donde las doctrinas, bien que convicciones científicas para el autor, no pretenden ser recibidas por el lector como verdades. Yo sólo ofrezco modi res considerandi, posibles maneras nuevas de mirar las cosas. Invito al lector que las ensaye por sí mismo; que experimente sí, en efecto, proporcionan visiones fecundas; él, pues, en virtud de su íntima y leal experiencia, probará su verdad o su error.”

¿QUÉ ES EL CLIMA?

Nuestro planeta Tierra se divide en diferentes zonas climáticas, como son la zona polar, subpolar, templada, subtropical y tropical (desde los polos al ecuador), por lo cual la expresión “clima global” no es correcta. El clima tampoco se puede enfriar o calentar. El clima se puede cambiar en el sentido que las zonas climáticas se desplazan continuamente, o sea que cambian continuamente – a escala de tiempo geológico. Queremos decir que la expresión “calentamiento del clima” no es correcta. Y la de “calentamiento del clima global” menos aun. Se refiere más bien a cambios de temperatura por desplazamientos continuos de las zonas climáticas. Si en lo que sigue se habla de temperaturas sin más especificación, es que nos referimos a la temperatura de la atmósfera inferior de la

Tierra.

Como podremos ver en lo que sigue, el clima de nuestro planeta, y respectivamente las temperaturas, han variado mucho durante de la historia geológica. Pej. la parte septentrional de la Sahara no fue siempre tan seca como hoy día. Hace unos 8.000 años era verde a causa de períodos repetidamente húmedos. El arte rupestre prueba la existencia de grandes mamíferos en un Sahara verde. Pinturas y grabados en cuevas presentan los típicos animales de la sabana, como son antílopes, elefantes, hipopótamos etc. Se han encontrado fósiles de grandes mamíferos, cáscaras de huevos de avestruz, polen y semillas, como también fragmentos de cerámica – todos indicativos de un ambiente habitable en estos tiempos para una fauna, incluido el hombre, y flora correspondientes a un clima más húmedo que el actual. Fue hace unos 5.500 años cuando empezó repentinamente una fase muy árida en el norte de África provocando una rápida desaparición de la vegetación en el Sahara que se corresponde aproximadamente con el segundo máximo de temperatura del Óptimo Atlántico (ver Figuras 4 y 23). Probablemente fue también la razón de la concentración del desarrollo de la agricultura a lo largo del fértil y productivo valle del Nilo hace unos 5.000 a 3.000 años y del origen de la alta cultura de los faraones en Egipto. En los últimos años se observa aparentemente un ligero aumento de las precipitaciones en el norte de África.

Aunque los fenómenos meteorológicos dependen de las zonas climáticas no se pueden equiparar con el clima. El tiempo o la situación meteorológica describe los procesos físicos en la atmósfera para un lugar o terreno determinado y en un momento o período específico. Los fenómenos mete-

orológicos tienen lugar en la parte inferior de la atmósfera terrestre, principalmente en la troposfera (hasta 15 km de altura, ver Figura 45). Fenómenos meteorológicos locales antropógenos, como por ejemplo la formación de copos de nieve en invierno (en tiempos de heladas, se llama también “nieve industrial”) en la cercanía de fábricas (p.ej. papeleras) que emiten vapor de agua, no son cambios climáticos, sino hechos meteorológicos locales. Otro fenómeno meteorológico antropógeno común son las “focos de calor” de las ciudades modernas, en comparación con su entorno, provocadas por la interacción de varios diferentes efectos, como por ejemplo un fuerte calentamiento de día (de la masa de edificios de hormigón y el asfalto de las calles) y un limitado enfriamiento de noche, lo que se intensifica sobre todo en invierno por las calefacciones.

ÉPOCAS GLACIALES (PERÍODOS DE FRÍO) Y ÉPOCAS INTERGLACIALES (PERÍODOS DE CALOR)

Los cambios climáticos han existido desde hace millones de años, relacionados con cambios de temperatura, con épocas de tiempos fríos (períodos glaciales) y tiempos cálidos (períodos interglaciales), donde evidentemente la duración de los primeros fue siempre mucho más larga que la de los últimos. Durante el Cuaternario, es decir

durante los últimos 2,56 millones de años se pueden distinguir más de 20 cambios de períodos fríos y períodos cálidos. La mayoría (un 90%) de los últimos 420.000 años fueron más fríos que en la actualidad y períodos cálidos, como el que disfrutamos hoy día, son más bien la excepción en la historia de la Tierra (Figura 1). Sin embargo, también durante los últimos 12.000 años, es decir desde el fin de la última época glacial, hubo períodos mucho más cálidos que los de hoy en día. Así fue por ejemplo durante el llamado máximo del “Atlántico” hace 8.000 a 4.000 años (ver Tabla 1, como también el Capítulo 6 y la Figura 23).

Durante los últimos 12.000 años, después de la última Época glacial, también hubo períodos claramente más cálidos que hoy, p.ej. durante el Óptimo Atlántico desde hace unos 8.000 a 4.000 años (ver Capítulo 6 y Figura 4). A la última Época glacial los científicos la llamaban “Würm” (un afluente del río Isar, Baviera) en la región de los Alpes aunque ahora esa terminología ha caído en desuso. El avance glacial simultáneo que abarcó el norte de Alemania y de Polonia desde Escandinavia tiene el nombre “Weichsel” o “Vístula” (el río más largo de Polonia). En el norte del continente americano se aplica el nombre “Wisconsin” según el estado de los E.E.U.U. con el mismo nombre situado en la región de los Grandes Lagos.

| approx. ages before Present (based on MIS) | MIS - Marine Isotope Stages | classic nomenclature of Glacial (cold) and Interglacial (warm) Periods | Sea level below (-) / above (+) today's level (in meters) |
|---|-----------------------------|--|--|
| 1.400 - 1.700 AD | | Little Ice Age Climate Pessimum | |
| 950 - 1.200 AD | | Medieval Climatic Optimum | |
| 350 - 550 AD | | Migration Period Climate Pessimum | |
| 50 BC - 250 AD | | Roman Times Climate Optimum | - 3-4 |
| 8.000-3.100 before Present | | Atlantic Period | - 20-30 |
| 11.700 bis heute | 1 | Holocene Interglacial | |
| 115.000 - 11.700 | 2, 3a-c, 4, 5a-d | Würm/Weichsel/Wisconsin Glacial | - 130-140 |
| 126.000 - 115.000 | 5e | Eem Interglacial | + 5-6 |
| 320.000 - 126.000 | 6a-e, 7a-e, 8a-c, 9a-d | Riss/Saale Glacial | |
| 335.000 - 320.000 | 9e | Holstein Interglacial | |
| 475.000 - 335.000 | 10a-c, 11a-b, 12a-c | Mindel/Elster Glacial | |
| 505.000 - 475.000 | 13a | Mindel-Günz Interglacial | |
| 885.000 - 475.000 | 13 - 21 | Günz/Cromer Complex | |

Tabla 1. Resumen simplificado de los cambiantes períodos de Épocas frías y cálidas de los últimos 885.000 años basado en la nomenclatura clásica. Las Épocas cálidas son resaltadas en rojo, las Épocas frías en azulado. Ligeramente más pálidos se resaltan los períodos más cálidos (máximos) o más fríos (“pésimos” o mínimos) del actual Holoceno, la Época cálida que empezó hace unos 11.700 años después del final de la última Época fría.

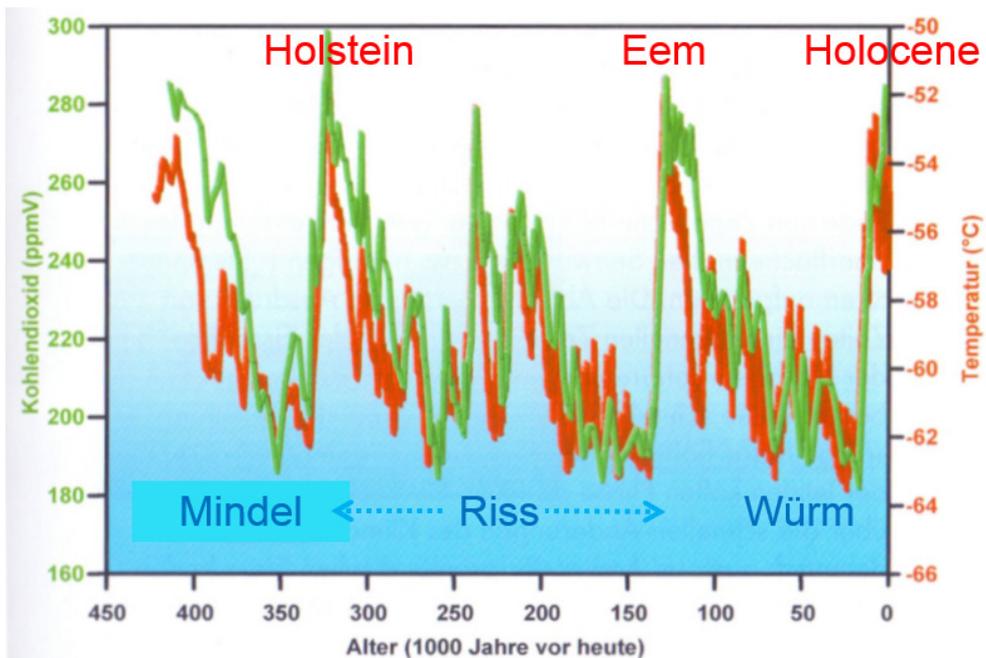


Figura 1. Cambios climáticos y evolución del CO2 (curva verde) y de la temperatura (curva roja) durante los últimos 420.000 años (eje X) documentados en el núcleo (testigo) de hielo de Vostok (Antártida). Los 4 períodos fríos (de temperaturas mínimas) corresponden a las 3 últimas clásicas Épocas glaciales (Mindel, Riss (en realidad abarcando dos períodos fríos) y Würm). Los muy cortos períodos cálidos (de temperaturas máximas) corresponden a las clásicas Épocas interglaciales (Holstein, Eem y el actual Holoceno); de BGR - Klimafakten (2004).

En la Tabla 1 se presenta un resumen de los cambiantes períodos de Épocas frías y cálidas durante los últimos 885.000 años, menos de la mitad de la duración del Cuaternario). Los períodos glaciales se subdividen por diferentes mínimos y máximos de temperatura, como se puede ver en las Figuras 1 y 2. La nomenclatura y asignación clásica de las diferentes Épocas glaciales e interglaciales se basaban en las investigaciones sistemáticas que los geólogos de campo iniciaron en el siglo XIX, pero en los últimos 50 años, la asignación de tiempo fue objeto de evidentes refinamientos y se diferencian de las primeras clasificaciones geocientíficas de hace 200 años.

Para evitar referirse a las muy variadas nomenclaturas regionales de las últimas Épocas frías y cálidas, hoy día se utilizan más a menudo los Estadios Isotópicos Marinos (= MIS Marine Isotope Stages, Tabla 1 y la Figura 2), es decir a datos isotópicos de muestras de sedimentos marinos que nos dan indicaciones sobre las condiciones

climáticas del pasado. La gran ventaja de los sedimentos de océanos y lagos (p.ej. el lago de Laacher See, Alemania) es que ellos presentan normalmente una secuencia de estratos completa inalterada. En cambio, depósitos en tierra pueden estar alterados y/o superpuestos por avances glaciares posteriores y procesos de erosión.

En la Figura 2 se presentan 21 de esos Estadios Isotópicos Marinos cubriendo los últimos 830.000 años. La presentación inversa de los datos de $\delta^{18}\text{O}$, representando (como „proxies“) la evolución de la temperatura, enseña los valores bajos correspondiendo a temperaturas (y niveles de los océanos) en la parte superior del eje de Y. Los isótopos de oxígeno $\delta^{18}\text{O}$ se determinaron en foraminíferos, que son protistas ameboides de unos pocos milímetros de diámetro, que se encuentran en los sondeos marinos. En esta figura se pueden observar también las oscilaciones de la temperatura durante la reciente historia de la Tierra.

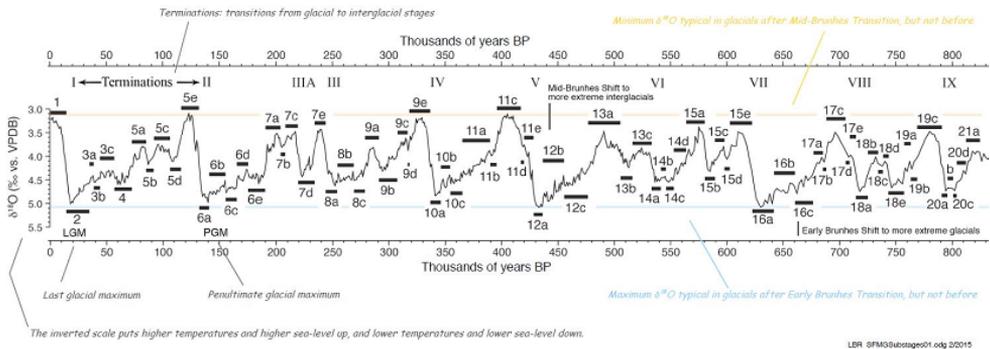


Figura 2. 21 Estadios, y subestadios, Isotópicos Marinos (MIS Marine Isotope Stages) ocurriendo durante los últimos 830.000 años. La presentación inversa de los datos de $\delta^{18}\text{O}$, representando (como „proxies“) la evolución de la temperatura, enseña los valores bajos correspondiendo a temperaturas (y niveles de los océanos) elevados en la parte superior del eje de Y; según RAILSBACK et al. (2015); ver también la Tabla 1.

La pregunta sobre la relación entre el CO₂ y la temperatura es similar a la de la discusión de ¿qué fue primero, el huevo o la gallina? Aquí hay acordarse de la vieja regla básica para la interpretación de datos estadísticos que dice que encontrar una correlación (aún) no es una causalidad. Como vamos a ver, la temperatura en la atmósfera terrestre depende de otros factores mucho más importantes que el CO₂. Lo que ya se puede percibir en la Figura 1, p.ej. en el período entre 420 y 400.000 de años, en que la

curva verde de CO₂ claramente va por detrás de la curva roja de la temperatura. Eso significa que cuando el cambio de temperatura ya está en curso, bajando o subiendo la temperatura, la concentración de CO₂ empieza a seguirlo con cierto retraso de tiempo (aparentemente de unos cientos de años, (p.ej. en LÜDECKE (2010)). Es decir que la concentración de CO₂ es más bien una función de la temperatura del aire y no al contrario. Este tema se discutirá en detalle en el apartado 8.

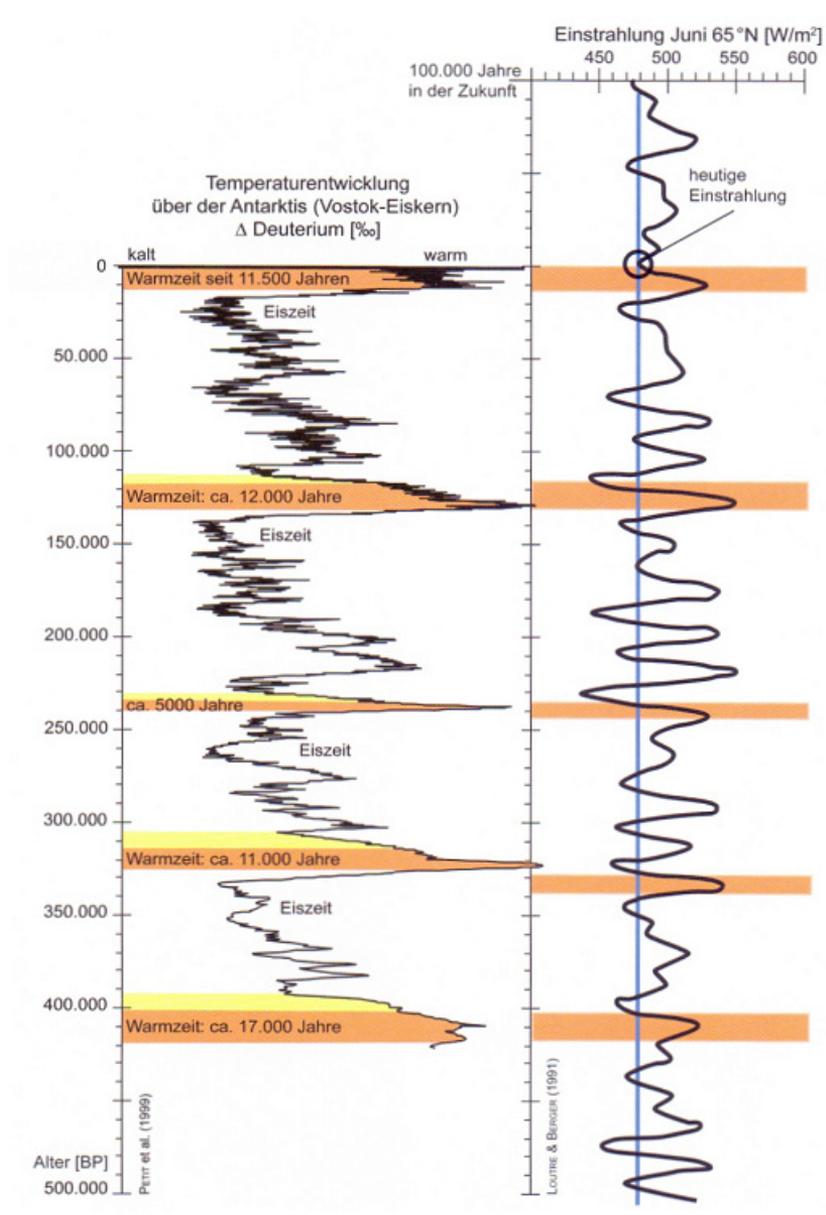


Figura 3. Evolución de temperatura durante las 4 últimas épocas glaciales. Curva izquierda: períodos fríos (“kalt”) hacia la izquierda, períodos cálidos (“warm”) hacia la derecha, referirse también a la Figura 1. Curva derecha: desarrollo de la insolación (en vatios por m2) en el mismo período, como también una predicción de los próximos 100.000 de años; de SIROCKO (2012).

Por eso es necesario recordar que nos encontramos en nuestro Sistema Solar y qué angosto y arriesgado es el sendero, o floja la cuerda, de la existencia humana. Por decirlo de otra manera, qué estrechamente relacionada está la vida vegetal y animal a la distancia de la Tierra al Sol. En la presentación tabular de SCHOENITZER (2019) de

la Figura 5 se nota que las temperaturas superficiales medias de los planetas de nuestro Sistema Solar disminuyen obviamente con el alejamiento del Sol. En el caso de la Tierra, la distancia Sol – Tierra no es constante, sino varía unos 5 millones de kilómetros en la actualidad, quiere decir, un 3 % de la distancia media del Sol.

| | Merkur | | | Venus | Erde | Mars | Jupiter | | | |
|--------------------------------------|-----------------|---------------|------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------|---------------|------------|
| Bekannte Monde | - | | | - | 1 | 2 | 63 | | | |
| Durchmesser | 4.878 km | | | 12.104 km | 12.756 km | 6.794 km | 142.984 km | | | |
| Masse | 0,055 Erdmassen | | | 0,82 Erdmassen | 1 Erdmasse | 0,11 Erdmassen | 317,8 Erdmassen | | | |
| Temperatur¹ | Min | Mittel | Max | Mittel | Min | Mittel | Max | Min | Mittel | Max |
| | -170° C | 170° C | 430° C | 460° C | -60° C | 15° C | 58° C | -120° C | -60° C | 24° C |
| Entfernung zur Sonne: Min/Max | 46 / 70 Mio. km | | | 108 / 109 Mio. km | 147 / 152 Mio. km | 207 / 249 Mio. km | 741 / 817 Mio. km | | | |
| Umlaufzeit | 88 d | | | 225 d | 365,256 d | 87 d | 12 a | | | |
| Tageslänge² | 59 d | | | 244 d | 24 h | 25 h | 10 h | | | |
| Neigung der Rotationsachse | 0,01° | | | 177° | 24° | 25° | 3° | | | |
| Neigung der Bahnebene | 7° | | | 3,4° | 0,0° | 1,9° | 1,3° | | | |
| Atmosphäre | - | | | + | + | (+) | + | | | |
| Magnetfeld | (+) | | | - | + | - | ++ | | | |
| Ringe | - | | | - | - | - | (+) (4) | | | |

+ja; ++stark; (+)schwach; --nein ¹: Bei Gesteinsplaneten an der Oberfläche; bei Gasplaneten bei 1 bar ²: Rotationsdauer - **nicht** die Sonnentageslänge

Figura 5. Presentación sinóptica de los planetas los más cercanos del Sol, sus distancias del Sol y sus temperaturas superficiales; de [www://schoenitzer.de/Planeten.html](http://www.schoenitzer.de/Planeten.html) (2019).

Los factores astronómicos son decisivos en los cambios periódicos del régimen de insolación, y consecuentemente para la evolución de las temperaturas en la superficie de la Tierra. Fueron descubiertos por el matemático y geofísico serbio Milutin Milankovitch (1879-1958) y por eso se conocen como los Ciclos de Milankovitch. Milankovitch investigó tres importantes ciclos seguidos por los parámetros de movimiento de la Tierra orbitando el Sol (p.ej. MILANKOVITCH 1930).

La órbita de la Tierra alrededor del Sol cambia su grado de achatamiento, lo que

se llama también “cambio de la Excentricidad” en ciclos de 100.000 – 110.000 años. La excentricidad es un parámetro numérico que determina el grado de desviación de una órbita de una circunferencia perfecta (quiere decir de un círculo perfecto), referirse a la Figura 7-A. Un círculo perfecto tiene el valor 0, mientras una elipse tiene valores mayores de 0 y menor de 1. Sólo cuando una elipse es tan alargada que termina siendo una línea recta, el valor es 1. La Figura 6 presenta los valores calculados de variación de la excentricidad de la Tierra (orbitando el Sol) desde

hace 1.000.000 de años hasta 1.000.000 años en el futuro. La causa de estos cambios orbitales se debe a la influencia de la atracción gravitatoria de los planetas Venus y Júpiter, principalmente, y en menor grado la de los otros planetas del Sistema Solar. Ya desde la Antigüedad los filósofos, matemáticos y

astrónomos griegos trataron de explicar el movimiento de los planetas y de las estrellas. Fue en el siglo XVII, en el contexto de la nueva revolución científica, cuando Johannes Kepler (1571-1630) reconoció la forma elíptica de la órbita terrestre y la describió en la primera de sus tres “Leyes Kepler”.

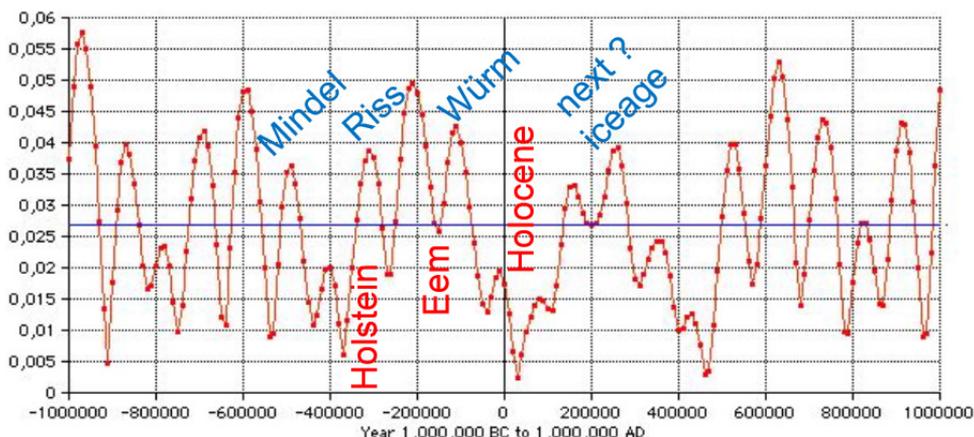


Figura 6. La variación de la excentricidad de la Tierra (orbitando el Sol) desde hace 1.000.000 de años y hasta 1.000.000 años en el futuro. En el actual período cálido del Holoceno, la excentricidad tiene un valor de 0,0167 que es claramente más pequeño que el valor medio de 0,02674 (recta azul) lo que significa que la órbita terrestre actual se aproxima casi a un círculo perfecto. Épocas frías y cálidas de la Tierra corresponden claramente con las máximas y mínimas de la excentricidad; de <http://www.geoastro.de/kepler/eccentricity1.html>.

Actualmente, en el actual período cálido del Holoceno o Postglacial, la órbita terrestre se aproxima casi a un círculo perfecto lo que significa que la excentricidad es muy pequeña y tiene el valor de 0,017. Cuando crece la excentricidad y la órbita terrestre toma una forma más elíptica, crece también la máxima distancia Sol – Tierra en el afelio. Durante las últimas Épocas glaciales, la excentricidad llegó a tener valores hasta 0,06 (ver la Figura 6). La distancia actual Sol – Tierra, con una órbita de una excentricidad pequeña de 0,017, varía entre 147,1 millones de kilómetros en la cercanía del Sol (en el perihelio) y

152,1 millones de kilómetros en la lejanía del Sol (en el afelio), (ver la Figura 5). Es importante constatar que en el hemisferio norte la Tierra llega en la actualidad a la posición más cercana (al Sol), es decir el perihelio, en invierno. En verano en el hemisferio norte estamos más lejos del Sol (en el afelio). Esta situación, más lejos del Sol en verano o invierno, varió a lo largo de la Historia de la Tierra y se va a discutir más adelante.

La diferencia de distancia entre 147,1 millones de kilómetros en la cercanía del Sol (en el perihelio) y 152,1 millones de kilómetros en la lejanía del Sol (en el afelio) es de

unos 5 millones de kilómetros o aproximadamente 3 % de la distancia media de 149,6 millones de kilómetros - sólo por concretar esta variable astronómica. Cuando aumenta el eje mayor de la elipse (aumentando la excentricidad) aumenta la lejanía (el afelio) de la Tierra al Sol y se reduce la intensidad de la radiación solar que llega a la Tierra. Aquí

hay que considerar la ley general del Inverso del Cuadrado, quiere decir que la intensidad de una radiación puntual (como la del Sol) se reduce al cuadrado de la distancia lo que significa que la intensidad de la radiación solar que llega a la Tierra disminuye con el cuadrado de la diferencia de distancia de la Tierra alejándose del Sol.



Figura 7. los 3 ciclos astrofísicos de Milankovitch; 7-A: Variación de la forma más o menos elíptica de la órbita terrestre (llamada Excentricidad) que presenta una ciclicidad de unos 100-110.000 años; 7-B: variación cíclica de la inclinación del eje rotatorio de la Tierra (llamada Oblicuidad). En el curso de unos 41.000 años, la inclinación varía entre 22,1° y 24,5°; 7-C: descripción del “bamboleo” del eje de rotación (llamado Precesión) durante ciclos de unos 19.000-23.000 años; de TARBUCK et al. (2005).

Cuando la lejanía en el afelio (la máxima distancia Sol – Tierra) es más pequeña es en épocas de pequeñas excentricidades, p.ej. 0,017 como ocurre en la actual Época cálida del Holoceno. Pero más que la diferencia de distancia influyen los valores absolutos al cuadrado de la intensidad de radiación solar, que, en épocas de elevadas excentricidades, con excentricidades con valores hasta 0,06, cuando la máxima distancia Sol – Tierra (en el afelio) es más grande. Así fue durante las últimas Épocas glaciales. Una excentricidad relativamente mayor lleva finalmente a mayores diferencias en las temperaturas entre las estaciones (de invierno y verano) en los dos hemisferios porque pasan unos 6 meses ($\frac{1}{2}$ año) cuando la Tierra, en su órbita, cambia la posición de mínima (en el perihelio) a la máxima (en el afelio)

distancia al Sol. Eso es muy relevante sobre todo en las altas latitudes de los hemisferios donde las diferencias de la radiación solar (y por lo tanto de las temperaturas) entre invierno y verano son más pronunciadas. Suponiendo que la distancia media Sol – Tierra (unos 149,6 millones de kilómetros) sigue siendo la misma, en el caso de una excentricidad de un valor de 0,06, la mínima distancia Sol – Tierra (en el perihelio) sería unos 140,6 millones de kilómetros y la máxima distancia Sol – Tierra (en el afelio) de unos 158,6 millones de kilómetros. En estos casos, la diferencia de distancia entre perihelio y afelio es 18 millones kilómetros o un 12 % de la distancia media.

La excentricidad no sólo varía en ciclos de unos 100.000-110.000 años como indentificó Milan Milankovitch. Recientes investi-

gaciones geocientíficas demostraron que existen también otros ciclos de unos 405.000-413.000 años que se observaron hace cientos de millones de años en la Historia de la Tierra (z.B. KENT et al. 2018). A continuación se superponen los efectos positivos y negativos en la evolución de la temperatura de la atmósfera y de los océanos para los dos próximos ciclos de Milankovitch.

Para ciclos de unos 410.000 años la inclinación del eje de rotación de la Tierra varía entre $22,1^\circ$ y $24,5^\circ$ (Figura 7-B), y el efecto se llama Oblicuidad. Recordemos de los atlas escolares que los trópicos se encuentran a $23,5^\circ$ (grados de latitud) al sur y al norte del ecuador. Actualmente el ángulo de inclinación es de $23,43684^\circ$ y disminuye unos $0,00001^\circ$ cada mes. Cuando la Oblicuidad llega a su máximo hacia los $24,5^\circ$, las diferencias de temperatura (o sea de insolación) entre verano e invierno en los hemisferios norte y sur son mayores que durante los períodos de pequeña oblicuidad (unos $22,1^\circ$ de inclinación del eje terrestre). Eso es muy relevante para la evolución de las zonas climáticas sobre todo en el hemisferio norte donde predominan las zonas continentales en comparación con lo que ocurre con el hemisferio sur.

Con una pequeña inclinación (Oblicuidad) los inviernos en las latitudes elevadas son menos acusados. Sin embargo, los glaciares pueden acumular mayores volúmenes de nieve porque la evaporación en los océanos es mayor, por lo que puede haber más precipitaciones en forma de nieve cuando las temperaturas están por debajo del punto máximo. En cambio, durante los veranos la ablación (es lo que causa la disminución de la nieve y del hielo) es inferior por la reducida insolación y en consecuencia por las bajas temperaturas. Resumiendo, cuanto

menos inclinado está el eje terrestre (hacia los $21,1^\circ$) tanto mejor son las condiciones para la formación de capas de hielo continentales, sobre todo en las latitudes elevadas del hemisferio norte donde abundan las tierras continentales. Lo contrario aparece con el eje de la tierra inclinada al máximo (hacia los $24,5^\circ$). En efecto, las épocas frías del Pleistoceno corresponden a fases para las que se evaluaron pequeños ángulos de inclinación, mientras fases con mayores inclinaciones corresponden a épocas cálidas.

En ciclos de 19.000-23.000 años varía la Precesión del eje terrestre, el tercer ciclo de Milankovitch. El eje rotatorio de la Tierra presenta un cierto “cabeceo” (como una peonza a punto de caer) alrededor de un eje perpendicular a la órbita terrestre lo que se llama en la astronomía también precesión de los equinoccios (Figura 7-C). La Precesión también influye en la intensidad de radiación solar que llega a nuestro planeta e intensifica la diferencia de temperatura (la disposición de temporada) en uno de los hemisferios, mientras la suaviza en el hemisferio opuesto. Con el movimiento de precesión se cambia lentamente la posición de temporada de la Tierra en su órbita alrededor del Sol, como ya se mencionó antes. Quiere decir, que cambian la fechas del afelio (máxima distancia del Sol, en la actualidad unos 152,1 millones de kilómetros) y del perihelio (mínima distancia del Sol), (en la actualidad hay unos 147,1 millones de kilómetros de distancia Sol – Tierra).

Recordemos que en la actualidad la máxima distancia Sol – Tierra (en el afelio) es a principios de julio (verano en el hemisferio norte e invierno en el hemisferio sur). Hace unos 11.500 años, como también ocurrirá dentro de unos 11.500 años, la máxima distancia Sol – Tierra (en el peri-

helio) fue / será a principios de Enero (invierno en el hemisferio norte respectivamente verano en el hemisferio sur). El adelantamiento cíclico de la posición veraniega o invernal en el perihelio, respectivamente afelio, se debe a que se mantiene el movimiento de precesión (el cabeceo de la Tierra mientras gira) causado por el hecho que la Tierra no es una esfera perfecta, sino que está ligeramente achatada en los polos. El diámetro de la Tierra es más grande en el ecuador (ca. 12.756 km) que en los polos (unos 12.713 km). A esto hay que añadir la influencia de las fuerzas gravitatorias del Sol, de la Luna y, en mucho menor escala, las de los planetas vecinos, sobre el movimiento giratorio inclinado de la Tierra.

Como se discutió antes, la fecha del afelio (la máxima distancia Sol – Tierra) cae actualmente a principios del mes de Julio, en el verano del hemisferio norte. Por esta razón la insolación en verano del hemisferio norte es algo inferior a la insolación en el verano del hemisferio sur (medio año más tarde, es decir a principios del mes de enero) lo que corresponde con el perihelio (a la mínima distancia Sol – Tierra). Esto fue diferente a finales de la última Época glacial hace

unos 11.700 años lo que corresponde más o menos a la mitad del ciclo de Precisión. En esta época la Tierra estaba en su punto más alejado del Sol (en el afelio) durante el invierno del hemisferio norte. Se entiende que este fenómeno es muy complejo para una persona no especialista en la materia. Por eso resumiremos diciendo que la Precesión también tiene una gran influencia en la insolación reforzando los contrastes de temperatura durante las épocas estacionales en un hemisferio mientras los reduce en el hemisferio opuesto. Resulta que actualmente (hablando en términos geológicos) tenemos inviernos más suaves y veranos más frescos en el hemisferio norte, mientras en el hemisferio sur los inviernos son más frescos y los veranos más cálidos. En la Figura 8 se presenta la relación entre la evolución de las temperaturas y la insolación correspondiente a los ciclos de Milankovitch durante los últimos 250.000 años abarcando a las últimas dos Épocas glaciales que coinciden claramente con los mínimos de insolación y las Épocas interglaciales cálidas situadas en el anterior y el actual Holoceno que se corresponden con los máximos de insolación de los ciclos de Milankovitch.

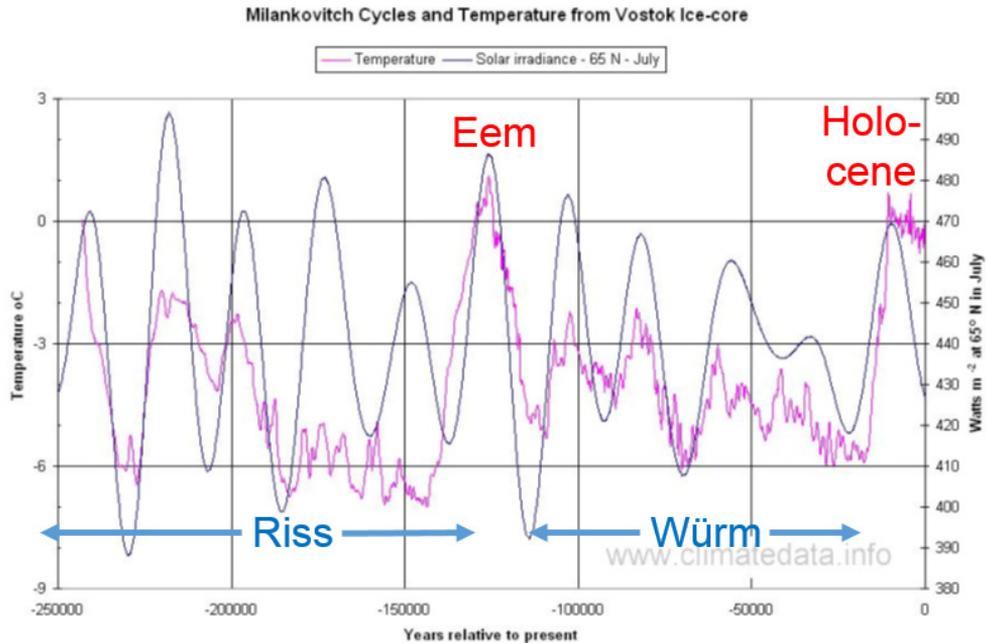


Figura 8. El desarrollo de las temperaturas (basado en los testigos de hielo de Vostok, línea de color malva) y de la insolación (línea negra) correspondiente a los ciclos de Milankovitch de los últimos 250.000 años. Las Épocas glaciales frías del Riss y del Würm coinciden claramente con los mínimos de insolación, las Épocas interglaciales cálidas del Eem y del actual Holoceno corresponden a los máximos de insolación de los ciclos de Milankovitch; de www.climatedata.info.

Como se puede observar en la Figura 6, la excentricidad tiene actualmente un valor de 0,0167 que es claramente menor que el valor medio de 0,02674 lo que significa que la órbita terrestre actual se aproxima casi a un círculo perfecto. Durante la última glaciación, (desde hace aproximadamente unos 110.000 hasta hace 20.000 años), la excentricidad alcanzó valores 2,5 veces más altos que en la actualidad lo que quiere decir que la órbita de la Tierra fue más elíptica y la

Tierra estuvo temporalmente más alejada del Sol. Siguiendo el cambio futuro de la excentricidad en la Figura 6, se nota que se puede contar con una continuación de la disminución de la excentricidad durante los próximos miles de años hacia un valor por debajo de 0,005, hasta que la excentricidad vuelva a subir, incluso por encima del valor medio, cuando la órbita de la Tierra alrededor del Sol vuelva a ser de nuevo más elíptica.

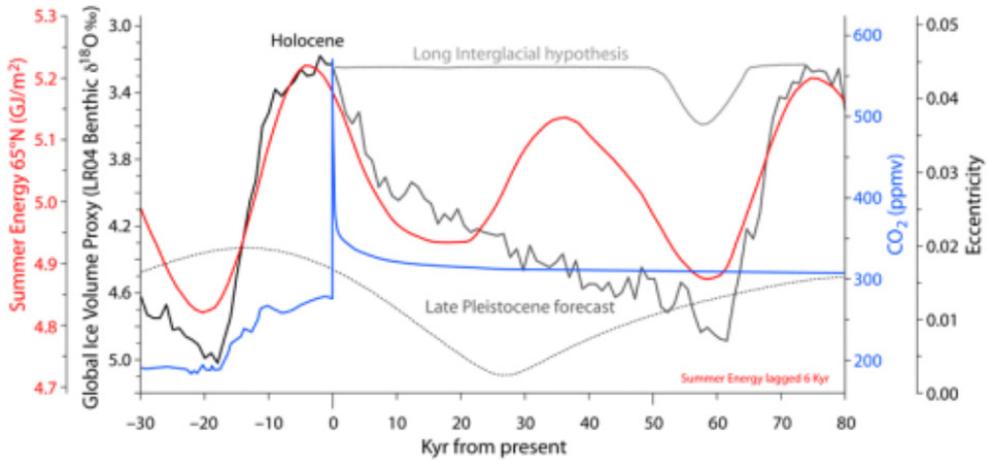


Figura 9. Intento de pronóstico de la evolución climática de la Tierra durante los próximos 80.000 años (eje de X); según VINÓ (2018). Línea roja: Insolación de verano en una latitud de 65°, hemisferio norte (según HUYBERS 2006). Línea azul: Evolución de la concentración de CO₂ (según ARCHER 2005). Línea negra: Volumen de hielo de los últimos 30.000 años (según LISIECKI & RAYMO, 2005), presentación inversa de los valores en el eje de Y izquierdo. Línea gris oscuro dentada: evolución futura del volumen de hielo basada en influencias orbitales (astrofísicas), presentación inversa de los valores en el eje de Y izquierdo. Línea gris claro, casi horizontal: presumido volumen de hielo basado en la hipótesis de un largo período cálido causado antropológicamente (según GANOPOLSKI et al., 2016). Línea punteada: evolución de la excentricidad (según LASKAR et al., 2004); ver también la Figura 6

En las gráficas de la Figura 9 se trata de pronosticar la evolución del régimen energético, del volumen de hielo y de la concentración de CO₂ para los próximos 80.000 años. Según la línea punteada, la excentricidad disminuye a un valor por debajo de 0,005 (valores correspondientes en negro en el eje de Y derecho). El régimen energético en el hemisferio norte varía aproximadamente en el ritmo de los diferentes ciclos astrofísicos sobrepuestos. Para la evolución del volumen de hielo (respectivamente de la temperatura) se ofrecen dos escenarios opuestos. En caso de que el actual período cálido siguiera, el volumen de hielo se mantendría más o menos en un nivel bajo (línea gris claro con valores inversos en el eje de Y izquierdo). Este es el

escenario preferido de los partidarios de un cambio climático antropógeno basado en altos valores de CO₂. El segundo escenario considera los efectos orbitales (variación de la Precesión, Oblicuidad, etc.) causando un nuevo enfriamiento de la Tierra con un nuevo crecimiento del volumen de hielo. En este caso la concentración de CO₂ se establecería en valores ligeramente por encima de unos 300 ppm.

Comparando la duración de los últimos periodos cálidos interglaciales, se manifiesta que la Época cálida del último Interglacial (desde hace unos 126.000 a 115.000 años) duró unos 11.000 años (ver Figura 1 y la Tabla 1). La época cálida anterior, el Interglacial del Holstein duró unos 15.000 años. Otras épocas cálidas interglaciales anteri-

ores, presentan duraciones de hasta 30.000 años. Sin embargo, hay que ser consciente de que durante estos largos períodos glaciales e interglaciales siempre existían episodios cortos de períodos más cálidos como también más fríos, como se pueden observar por ejemplo durante la última Época glacial (ver la Figura 2) o durante los últimos 12.000 años de la actual Época cálida del Interglacial Holoceno (ver Figura 2 o Figura 22).

Hace ya más de 100 años que los geocientíficos se dieron cuenta de una relación entre el clima terrestre y la variación de la distancia entre la Tierra y el Sol. En la Tabla 2 se detallan los mínimos y máximos de la excentricidad de la órbita de la Tierra calculados para miles de años antes de 1850 y la denominación de las cuatro últimas clásicas Épocas glaciales incluido el “avance glacial báltico” hace unos 14.000 años.

| Minima der Exzentrizität | | Maxima der Exzentrizität | | Eiszeiten |
|--------------------------|--------------|--------------------------|-------------|------------------|
| Stockwell | Mc Farland | Stockwell | Mc Farland | |
| —782 0,0022 | —791 0,0061? | —836 0,0655 | —842 0,0652 | |
| —693 0240 | —703 0230 | —737 0412 | —749 0410 | |
| —616 0134 | —623 0121 | —656 0364 | —665 0353 | |
| —515 0018 | —521 0022 | —566 0522 | —571 0535 | (Günz-Eiszeit) |
| —408 0103 | —412 0102 | —465 0433 | —472 0438 | (Mindel-Eiszeit) |
| —350 0199 | —356 0186 | —369 0221 | —372 0207 | — |
| —257 0097 | —260 0093 | —301 0361 | —305 0377 | — |
| —145 0254 | —148 0253 | —200 0462 | —205 0474 | (Riß-Eiszeit) |
| —45 0105 | —45 0104 | —98 0408 | —100 0408 | (Würm-Eiszeit) |
| —26 0044 | — | —13 0197 | —14 0197 | (Balt. Vorstoß) |

Tabla. 2. Mínimos y máximos de la excentricidad de la órbita de la Tierra (miles de años antes de 1850) calculados por STOCKWELL y McFARLAND en PILGRIM (1904) de KÖPPEN & WEGENER (1924), reimpresión de 2015) con denominación de las cuatro últimas clásicas épocas glaciales incl. del “avance glacial báltico” hace 14.000 años.

Según se superponen los extremos de los mencionados Ciclos de Milankovitch, quiere decir, que, debido a los mínimos y máximos de la distancia del Sol, a la inclinación del eje de la Tierra y su “cabecero”, se repiten periódicamente períodos de mínima

o máxima insolación resultando en épocas frías o cálidas en nuestro planeta, que no siempre tienen que desarrollarse idénticamente con respecto a duración e intensidad, aunque sí similarmente (Figuras 2 y 6). Por ejemplo, en el caso de coincidir una pequeña

excentricidad (con una órbita terrestre poco elíptica), una mayor inclinación del eje rotatorio (hacia unos 24,5°) y una posición cercana al Sol (en el perihelio) en verano del hemisferio norte, eso puede resultar en una particularmente fuerte insolación en verano en las latitudes altas del hemisferio norte donde las capas de nieve y de hielo de las grandes tierras continentales de Groen-

landia, Siberia, Alaska y Canadá puedan fundirse más intensamente. Una situación opuesta extrema, más fría, podría resultar, por ejemplo, durante un momento de gran excentricidad, una pequeña inclinación del eje rotatorio y una posición cercana al Sol (en el perihelio) en invierno del hemisferio norte resultando en inviernos más suaves y veranos más fríos en el hemisferio norte.

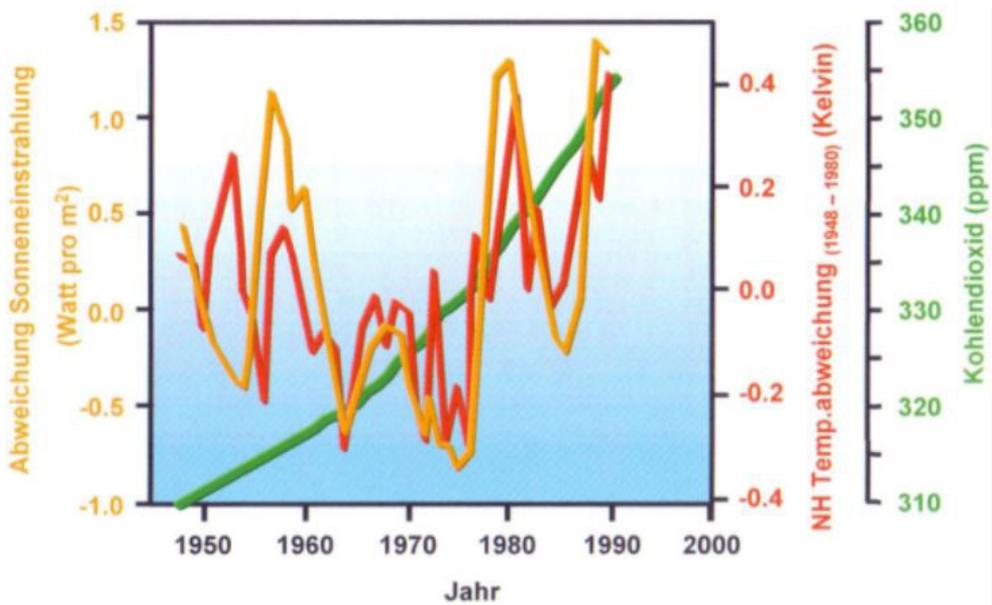


Figura 10. La temperatura en la Tierra (curva roja: divergencia de temperatura) está estrechamente relacionada con la actividad del Sol (curva ocre: divergencia de insolación) mientras el continuo aumento del CO₂ en la atmósfera (curva verde), aquí durante los últimos 50 años, no lo presenta tan claramente; de BGR - Klimafakten (2004).

Las Figuras 3, 8 y 10 presentan la evolución de la radiación solar, o sea de la actividad solar, junto con la evolución de las temperaturas. Sin entrar en más detalle en el tema metodológico, conviene recordar que las concentraciones de los isótopos de ¹⁴C, ¹⁰Be (para la insolación) y de ¹⁸O (para la

evolución de la temperatura) son representantes (“proxies”) de estos parámetros que no se pueden determinar directamente para tiempos pasados. Con respecto al comienzo y la duración de los ciclos naturales mencionados se debe tener en cuenta, por su complejidad y la influencia de muy vari-

ables factores, que estos ciclos no son tan uniformes como un cronómetro mecánico de alta precisión. Tal vez se puede comparar con el fenómeno de los ciclos de las mareas. El repetitivo cambio de pleamar y bajamar cada más o menos 6 horas es cierto, pero el inicio y la duración exacta de una marea, como también su altura e intensidad, varían fundamentalmente por la continuamente cambiante posición entre sí de la Luna, la Tierra y el Sol. En este ejemplo influye por supuesto también el tamaño y la forma del mar u océano. Llama la atención, por ejemplo, mirando el período de los 120.000 años de la última Época glacial (entre las dos Épocas cálidas interglaciales Eem y Holoceno), se nota que este período corresponde más o menos a 3 ciclos de unos 41.000 años de la Oblicuidad y a 5 ciclos de unos 23.000 años de la Precesión.

Además de las fuerzas cruciales a largo plazo, los factores astrofísicos que causan los cambios de la órbita terrestre alrededor del Sol, que determinan los cambios climáticos en nuestro planeta, existen también actividades solares a corto plazo que influyen la intensidad de la insolación y las temperaturas superficiales de la Tierra. Parte de ellas son las Manchas Solares que están sujetas a una periodicidad de 10-11 años y por lo cual se pueden apreciar en el curso de una vida humana. Los cambios de la polaridad del campo magnético solar causan estos ciclos de actividad solar.

Con respecto a la actividad solar de las manchas solares se observaron ciclos de unos 11 años (ver la Tabla 3 y la Figuras 11 y 12) alternándose máximos y mínimos de manchas solares. El ciclo de unos 11 años de duración se llama Ciclo de Schwabe por el astrónomo y botánico Samuel Heinrich Schwabe (1789-1875) que descubrió este ciclo. Además, existe otro ciclo de manchas solares, el Ciclo de Hale, de unos 22 años de duración consistiendo de dos Ciclos de Schwab con opuesta polaridad. Fue el astrónomo americano George Ellery Hale que lo descubrió en el año 1908. El actual ciclo de manchas solares, el „Solar Cycle 24“, llegó a su mínimo final en diciembre de 2019 durando de nuevo unos 11 años y dando comienzo al nuevo ciclo solar 25 (p.ej. <http://sidc.be/silso/>).

La ausencia o disminución de la actividad de manchas solares resulta en un descenso de la insolación y en un enfriamiento de la atmósfera terrestre. En años con pocas manchas solares la radiación solar en la Tierra se reduce aproximadamente un 1 %. Al contrario de la disminución de la insolación en períodos de mínima actividad de manchas solares, la radiación cósmica que llega a la Tierra aumenta. La radiación cósmica tiene una influencia en la formación de nubes en la atmósfera lo que influye por lo tanto también los fenómenos meteorológicos.

| Años | Números |
|------|------------|------|------------|------|------------|------|------------|------|------------|
| 1750 | 83,4 Máx. | 1800 | 14,5 | 1850 | 66,5 | 1900 | 9,5 | 1950 | 83,9 |
| 1751 | 47,7 | 1801 | 34,0 | 1851 | 64,5 | 1901 | 2,7 Mín. | 1951 | 69,4 |
| 1752 | 47,8 | 1802 | 45,0 | 1852 | 54,2 | 1902 | 5,0 | 1952 | 31,5 |
| 1753 | 30,7 | 1803 | 43,1 | 1853 | 39,0 | 1903 | 24,4 | 1953 | 13,7 |
| 1754 | 12,2 | 1804 | 47,5 Máx. | 1854 | 20,6 | 1904 | 42,0 | 1954 | 3,7 Mín. |
| 1755 | 9,6 Mín. | 1805 | 42,2 | 1855 | 6,7 | 1905 | 63,5 Máx. | 1955 | 40,5 |
| 1756 | 10,2 | 1806 | 21,1 | 1856 | 4,3 Mín. | 1906 | 53,8 | 1956 | 141,7 |
| 1757 | 32,4 | 1807 | 10,1 | 1857 | 22,8 | 1907 | 62,0 | 1957 | 190,2 Máx. |
| 1758 | 47,6 | 1808 | 8,1 | 1858 | 54,8 | 1908 | 48,5 | 1958 | 148,8 |
| 1759 | 54,0 | 1809 | 2,5 | 1859 | 93,8 | 1909 | 43,9 | 1959 | 159,0 |
| 1760 | 62,9 | 1810 | 0,0 Mín. | 1860 | 95,7 Máx. | 1910 | 18,6 | 1960 | 112,3 |
| 1761 | 85,9 Máx. | 1811 | 1,4 | 1861 | 77,2 | 1911 | 5,7 | 1961 | 53,9 |
| 1762 | 61,2 | 1812 | 5,0 | 1862 | 59,1 | 1912 | 3,6 | 1962 | 37,6 |
| 1763 | 45,1 | 1813 | 12,2 | 1863 | 44,0 | 1913 | 1,4 Mín. | 1963 | 27,9 |
| 1764 | 36,4 | 1814 | 13,9 | 1864 | 47,0 | 1914 | 9,6 | 1964 | 10,2 Mín. |
| 1765 | 20,9 | 1815 | 35,4 | 1865 | 30,5 | 1915 | 47,4 | 1965 | 15,0 |
| 1766 | 11,4 Mín. | 1816 | 45,8 Máx. | 1866 | 16,3 | 1916 | 57,1 | 1966 | 47,0 |
| 1767 | 37,8 | 1817 | 41,1 | 1867 | 7,3 Mín. | 1917 | 103,9 Máx. | 1967 | 93,6 |
| 1768 | 69,8 | 1818 | 30,4 | 1868 | 37,3 | 1918 | 80,6 | 1968 | 105,8 Máx. |
| 1769 | 106,1 Máx. | 1819 | 23,9 | 1869 | 73,9 | 1919 | 63,6 | 1969 | 105,5 |
| 1770 | 100,8 | 1820 | 15,7 | 1870 | 139,1 Máx. | 1920 | 37,7 | 1970 | 104,5 |
| 1771 | 81,6 | 1821 | 6,6 | 1871 | 111,2 | 1921 | 26,1 | 1971 | 66,7 |
| 1772 | 66,5 | 1822 | 4,0 | 1872 | 101,7 | 1922 | 14,2 | 1972 | 68,9 |
| 1773 | 34,8 | 1823 | 1,8 Mín. | 1873 | 66,3 | 1923 | 5,8 Mín. | 1973 | 38,0 |
| 1774 | 30,6 | 1824 | 8,5 | 1874 | 44,7 | 1924 | 16,7 | 1974 | 34,5 |
| 1775 | 7,0 Mín. | 1825 | 16,6 | 1875 | 17,1 | 1925 | 44,3 | 1975 | 15,5 |
| 1776 | 19,8 | 1826 | 36,3 | 1876 | 11,3 | 1926 | 63,9 | 1976 | 12,6 Mín. |
| 1777 | 92,5 | 1827 | 49,7 | 1877 | 12,2 | 1927 | 69,0 | 1977 | 27,5 |
| 1778 | 154,4 Máx. | 1828 | 62,5 | 1878 | 3,4 Mín. | 1928 | 77,8 Máx. | 1978 | 92,5 |
| 1779 | 125,9 | 1829 | 67,0 | 1879 | 6,0 | 1929 | 65,0 | 1979 | 155,4 |
| 1780 | 84,8 | 1830 | 71,0 Máx. | 1880 | 32,3 | 1930 | 35,7 | | |
| 1781 | 68,1 | 1831 | 47,8 | 1881 | 54,3 | 1931 | 21,2 | | |
| 1782 | 38,5 | 1832 | 27,5 | 1882 | 59,7 | 1932 | 11,1 | | |
| 1783 | 22,8 | 1833 | 8,5 Mín. | 1883 | 63,7 Máx. | 1933 | 5,6 Mín. | | |
| 1784 | 10,2 Mín. | 1834 | 13,2 | 1884 | 63,5 | 1934 | 8,7 | | |
| 1785 | 24,1 | 1835 | 56,9 | 1885 | 52,2 | 1935 | 36,0 | | |
| 1786 | 82,9 | 1836 | 121,5 | 1886 | 25,4 | 1936 | 79,7 | | |
| 1787 | 132,0 Máx. | 1837 | 138,3 Máx. | 1887 | 13,1 | 1937 | 114,4 Máx. | | |
| 1788 | 130,9 | 1838 | 103,2 | 1888 | 6,8 | 1938 | 109,5 | | |
| 1789 | 118,1 | 1839 | 85,8 | 1889 | 6,3 Mín. | 1939 | 90,4 | | |
| 1790 | 89,9 | 1840 | 63,2 | 1890 | 7,1 | 1940 | 67,5 | | |
| 1791 | 66,6 | 1841 | 36,8 | 1891 | 35,6 | 1941 | 49,1 | | |
| 1792 | 60,0 | 1842 | 24,2 | 1892 | 73,0 | 1942 | 30,6 | | |
| 1793 | 46,9 | 1843 | 10,7 Mín. | 1893 | 84,9 Máx. | 1943 | 15,2 | | |
| 1794 | 41,0 | 1844 | 15,0 | 1894 | 78,0 | 1944 | 9,6 Mín. | | |
| 1795 | 21,3 | 1845 | 40,1 | 1895 | 64,0 | 1945 | 33,1 | | |
| 1796 | 16,0 | 1846 | 61,5 | 1896 | 41,8 | 1946 | 92,4 | | |
| 1797 | 6,4 | 1847 | 98,5 | 1897 | 26,2 | 1947 | 151,5 Máx. | | |
| 1798 | 4,1 Mín. | 1848 | 124,3 Máx. | 1898 | 26,7 | 1948 | 136,2 | | |
| 1799 | 6,8 | 1849 | 95,9 | 1899 | 12,1 | 1949 | 135,1 | | |

Tabla 3. Número (medio anual) de manchas solares observadas entre 1750 y 1979. En los 221 años (desde el mínimo de 1755 hasta el mínimo de 1976) había 20 mínimos de la actividad de manchas solares lo que corresponde a una periodicidad de unos 11 años. Ver también la línea naranja en la Figura 12. Fuente: Calendario Meteorológico Fenológico (AEMET, Agencia Estatal de Meteorología, España 1981).

SVENSMARK et al. (2017) comprobaron que cuando la actividad solar baja, el viento solar (hacia la Tierra) se reduce también y deja pasar (a la Tierra) más radiación cósmica iónica sin ser perturbada por el viento solar. En consecuencia, se pueden formar más núcleos de condensación de aerosoles en la atmósfera terrestre que aumentan también en su diámetro (desde pocos nm hasta 50 nm (1 nanómetro (nm) = 1 milésima parte de 1 mm) lo que favorece finalmente la formación de núcleos de condensación de gotas de agua, es decir la formación de nubes. Este fenómeno es más pronunciado sobre los continentes que sobre de los océanos y explica por qué la distribución de los continentes y océanos es de importancia en la formación de nubes y en la precipitación. A la vez explica la importancia de las grandes masas continentales en el hemisferio norte para la generación

de grandes capas de hielo en el hemisferio norte durante las últimas épocas glaciales. Por otra parte, SHAVIV (2008) pudo demostrar remontándose hacia atrás (hacia el siglo XX) que el nivel del mar también está sujeto de cambios con periodicidades de unos 11 años siguiendo los ciclos de actividades solares porque la masa de agua de los océanos varía su volumen por el calentamiento, o respectivamente enfriamiento, asociado a la cambiante intensidad de la insolación.

Digno de atención es que, a comienzo de un nuevo ciclo de manchas solares, éstas aparecen primero en latitudes medianas ($\pm 35^\circ$) del Sol, luego empiezan a desplazarse hacia el ecuador solar y llegan a su mínimo de manchas solares a unos $\pm 15^\circ$. Los dibujos que produce esta distribución espacial y temporal se llaman “diagramas de mariposa” (Figura 11).

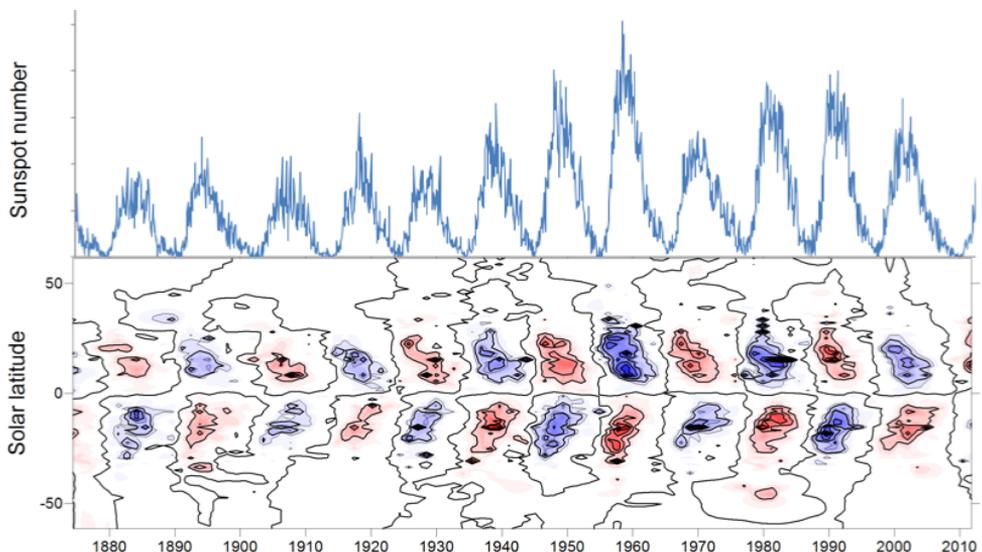


Figura 11. arriba: distribución periódica del número de manchas solares durante los últimos 130 años; abajo: “diagrama de mariposas” de la distribución espacial y temporal durante los ciclos de unos 11 años de periodicidad desde unas latitudes de unos $\pm 35^\circ$ hacia el ecuador solar; de www.climatedata.info.

Estos ciclos de unos 11 años de la actividad solar podrían ser muy importantes para la agricultura en caso de confirmarse su influencia en la intensidad de precipitaciones sobre los continentes, con respecto a la duración de períodos de sequía. Sobre todo, en regiones semidesérticas, p.ej. como Namibia, sería muy importante poder explicar o prever períodos de poca o nula precipitación. La figura 12 se considera sólo un intento de estudiar una posible relación entre los ciclos de manchas solares y la precipitación. Por lo menos llama la atención que se puede observar cierta relación entre las cantidades máximas de manchas solares

y los picos de precipitación, aunque con un cierto retraso de unos pocos años. Por supuesto hay que considerar en este ejemplo también las particularidades climáticas, como son la situación geográfica en el hemisferio sur, el clima semiárido y la corriente fría de Benguela del Atlántico sur. Seguramente merecería la pena de investigar este fenómeno más a fondo que nos enseña una vez mas lo complejas que son las relaciones entre la evolución de la temperatura, del clima, de fenómenos meteorológicos, actividades solares etc. ¡ Quién sabe, tal vez el efecto “El Niño” dependa también de la actividad solar” ¡.

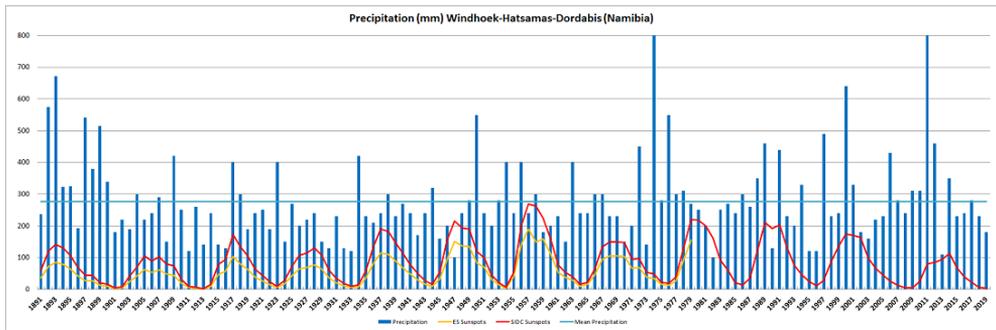


Figura 12. Precipitación anual media (en mm) de la zona Windhoek (1891-1907)-Hatsamas (1908-1957)-Dordabis (1958-2019) en Namibia (KRAFFT 2020): barras azules; línea azul horizontal: valor medio de todas las precipitaciones anuales medias: 277 mm . línea naranja: número de manchas solares anuales medias de la Tabla 3. línea roja: número de manchas solares anuales medias basado en los datos de WDC-SILSO, Royal Observatory of Belgium, Bruselas 2019, SIDC Solar Influences Data analysis Center.

Pero volviendo a la historia, el período histórico de 1645 hasta 1715, cuando no se observaron manchas solares, es lo que los paleoclimatólogos llaman también “Mínimo de Maunder”, cae en la Pequeña Edad de Hielo de la Edad Media, (p.ej. SIROCKO 2012, ver también la Figura 23). Se sabe que esta época se caracteriza de malas cosechas, subalimentación y epidemias, como es la peste. Con respecto a la actividad de man-

chas solares, se pueden observar ciclos de unos 11 años (Tabla 2 y las Figuras 11 y 12), entre otros, durante los cuales los máximos y mínimos de manchas solares se alternan (p.ej. GEOMAR PR del 04.09.2014, www.climatedata.info). Los años de 2008 y 2010 fueron años de poca actividad en manchas solares que fueron acompañados de crudos inviernos en el hemisferio norte, como de nuevo en el año de 1999 con su invierno

“caótico de nieve” – por lo menos en los Alpes europeos. Aquí hay que mencionar también el muy fuerte invierno de 1978/79 con la inolvidable situación catastrófica de nieve cuando hizo falta el apoyo del ejército alemán para dominar las grandes masas de nieve que cayeron en el norte de Alemania.

Según los medios de comunicación europeas el mes de enero de 2020 fue el enero más caluroso desde tiempos inmemoriales en Europa Central. Sin embargo, el frío llegó más fuerte después a finales del invierno, comienzos de la primavera, cuando los frentes meteorológicos del frío Atlántico septentrional y de Siberia tardaron en desplazar los frentes meteorológicos calurosos de las Azores. En el sudeste de Europa fue diferente. El año de 2020 empezó con mucho frío, pero no tan frío como durante la ola de frío de enero/febrero de 2012 que causó persistentes heladas y fuertes nevadas en los países del sureste del Mediterráneo y del Mar Negro. En Europa Central el comienzo del otoño de 2020 se caracterizó por frentes fríos del Atlántico septentrional resultando que el año de 2020 fue un año de un corto, pero caluroso verano y de prolongados meses fríos de otoño.

EL CLIMA Y NOSOTROS – ¡NO NOSOTROS Y EL CLIMA!

Durante la última Época glacial, que duró unos 100.000 años y terminó hace 11.700 años, los hombres de la edad de piedra llegaron a pie a Alaska desde el noreste de Eurasia continental para colonizar las Américas, lo que no excluye una colonización de Brasil hace unos 30.000 años “out of Africa“. Al mismo tiempo Inglaterra formaba parte del continente europeo (Figura 24). No existía el Canal de la Mancha porque el nivel del Mar del Norte estaba 100 metros más bajo que hoy. En la Figura 14 se presentan los niveles de temperatura durante la Época glacial de Würm (se llama también Weichsel en las regiones fuera de los Alpes). Épocas cálidas, como la que podemos disfrutar en la actualidad, son episodios relativamente cortos en la historia de la tierra. Quiere decir que la mayoría de últimos millones de años fueron más bien fríos que cálidos y el desarrollo de la cultura humana de los últimos 10-12.000 años se realizó gracias a el fin de la última Época glacial.

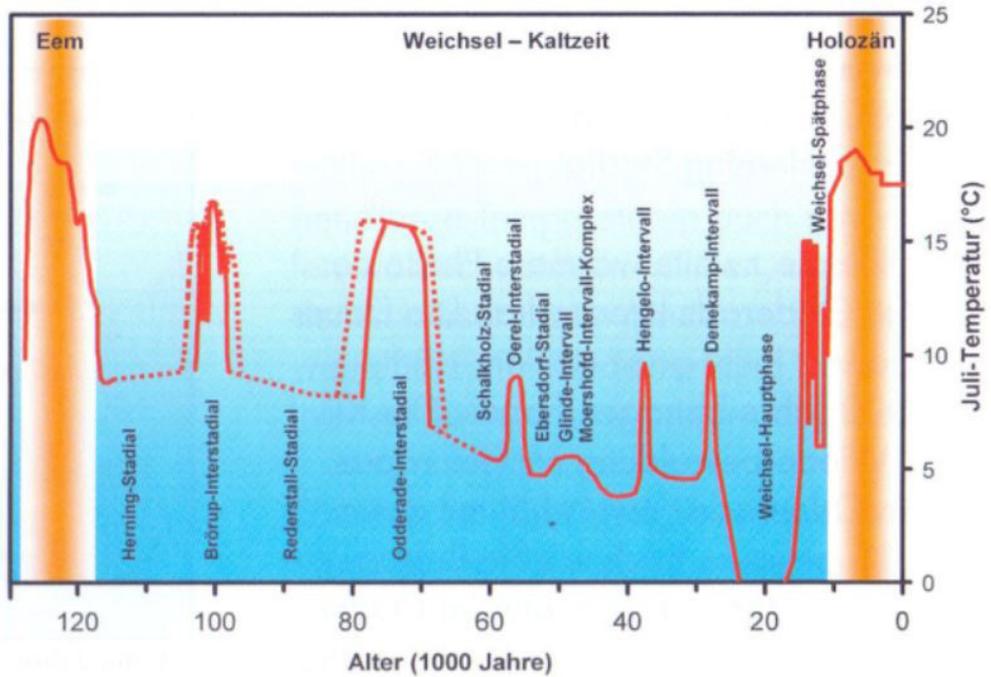


Figura 13. Niveles de temperatura durante la última Época glacial de Weichsel (o sea Würm) que duró unos 100.000 años y terminó hace 11.700 años, cuando empezó la actual Época cálida, llamada también “Holoceno”, la anterior se llama “Eem”. Durante las épocas glaciales hay también periodos más cálidos como se puede ver en la gráfica, p.ej. hace 75 y 100 mil años; de BGR – Klimafakten (2004).

En tiempos de períodos fríos, como fue la última Época glacial, el hombre prehistórico tenía que luchar continuamente para sobrevivir, sobre todo en nuestras latitudes geográficas, y pudo subsistir sólo en las regiones bajas y valles fluviales, fuera de las montañas medias y altas cubiertas con nieve. Esto último es también la razón de que la mayoría de las cuevas y cavernas habitadas de la Prehistoria, hoy conocidas por sus impresionantes pinturas y grabados rupestres y sus artefactos líticos, se encuen-

tran preferentemente en valles fluviales (p.ej. Lascaux, Chauvet (Francia Central), Vogelherdhöhle, Hohlefels (Jura de Suabia, Alemania), y otras más y en el litoral (Altamira (Norte de España), Cosquer (Sur de Francia), etc.). Durante las principales fases frías en la segunda mitad de la última Época glacial hace unos 60-30.000 años (referirse a la Figura 13), el hombre Neanderthal se retiró hacia el sur de la Península Ibérica donde desaparecieron finalmente en la región de Gibraltar y el sur de Portugal.

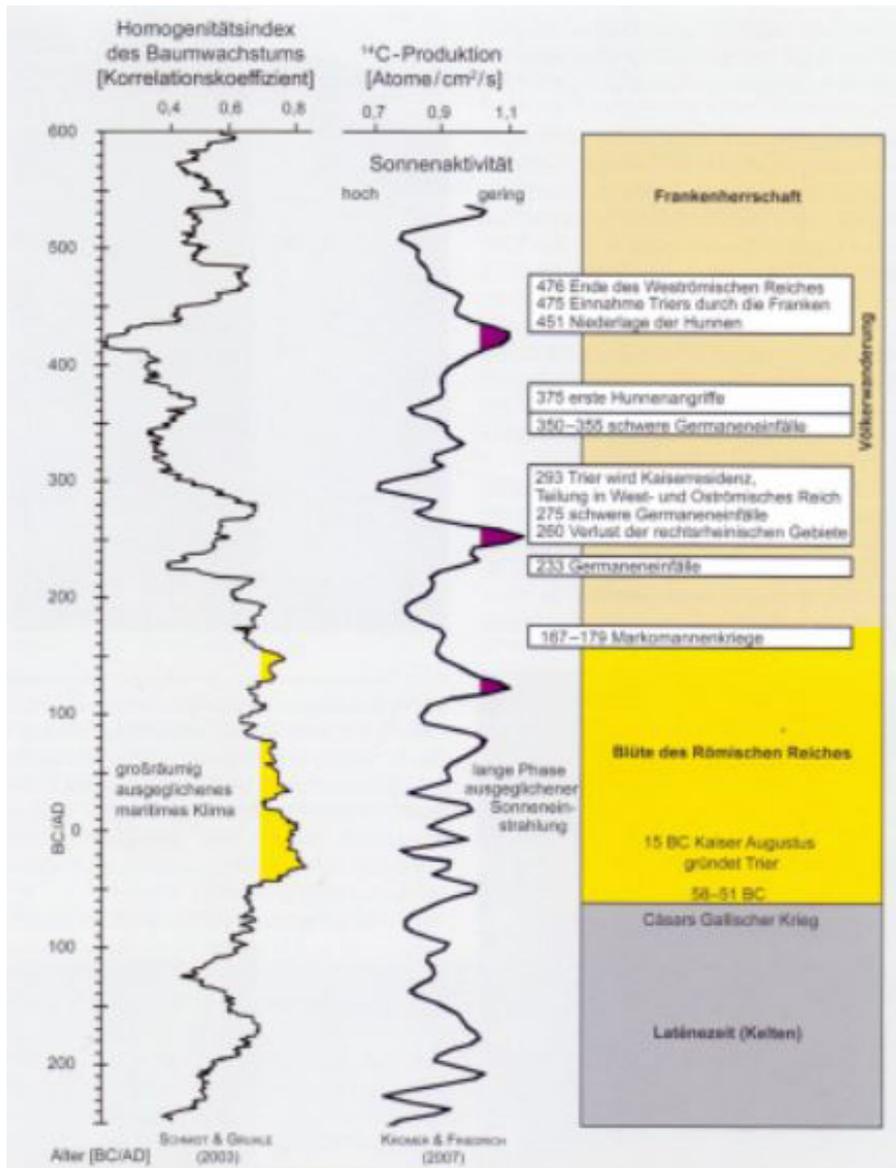


Figura 14. Niveles de temperatura entre los años 250 BC y 600 AD basados en homogeneidades de crecimiento de árboles en el centro de Europa (curva izquierda: oscilaciones hacia la derecha significan mayor homogeneidad de crecimiento, respectivamente temperaturas relativamente más elevadas) e intensidad de la radiación solar (curva derecha: producción de C14 (como representante o “proxy” para de la radiación solar); oscilaciones hacia la derecha aquí significan baja actividad de radiación solar, respectivamente temperaturas relativamente más bajas. En la columna derecha se alistan eventos históricos; de SIROCKO (2012).

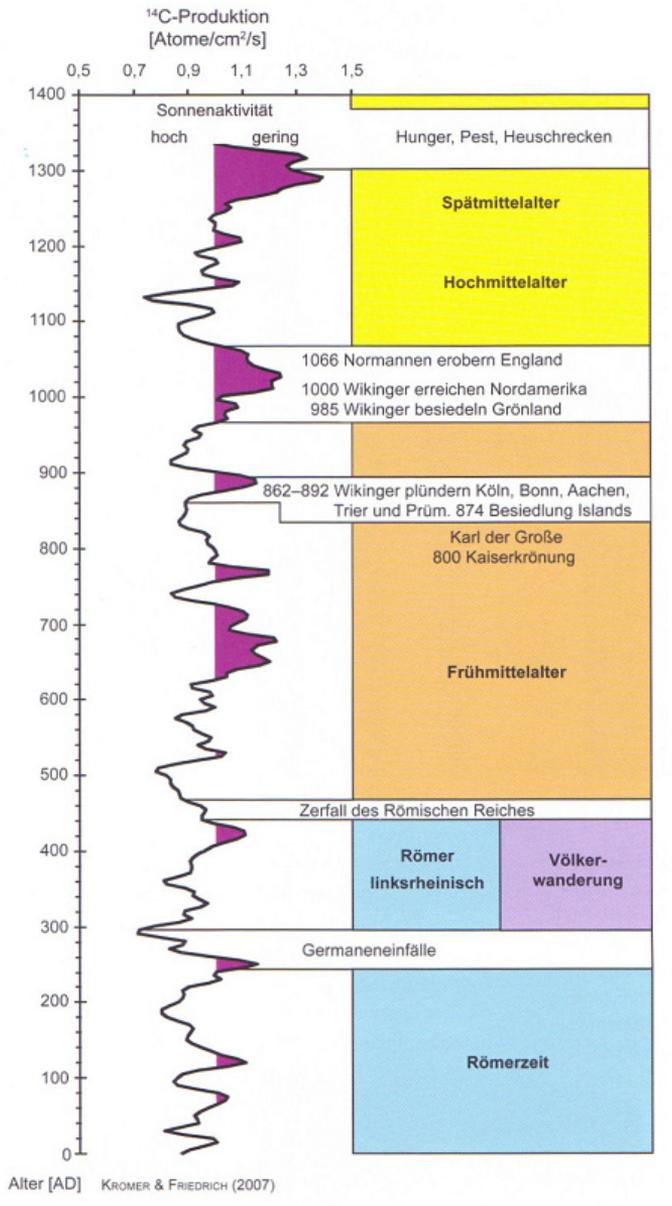


Figura 15. Niveles de temperatura desde la época de transición (BC/AD) hasta el año de 1400 AD a base de la intensidad de la radiación solar (producción de C14, oscilaciones hacia la derecha significan baja actividad de radiación solar, respectivamente temperaturas relativamente más bajas). En la columna derecha se alistan eventos históricos; de SIROCKO (2012).

La expansión del Imperio Romano hacia el norte de Europa (Britania, Germania) en la Época de Transición fue apoyado por un período cálido (Figuras 14, 15 y 23) que se llama también Óptimo de la Época Romana (desde hace 300 BC (BC = “before Christ” o “antes de Cristo” hasta hace 400 AD (AD = “anno domini” o “after date” o “después de Cristo”), cuando el Imperio Romano alcanzó su mayor extensión y cuando fue posible cultivar vides también en Britania. Recordamos que en el año de 218 BC el general cartaginés Aníbal y sus tropas (con más de 50 elefantes) cruzaron los Alpes hacia Italia en pocos días. En el siglo IV, la retirada de los romanos coincidió con un período de descenso de temperatura que causó, entre otras cosas, la invasión de los Bárbaros hacia el oeste y suroeste europeo, incluso de los hunos (Figuras 14 y 15). Fue en el año de 406 AD cuando las tribus germánicas (los suevos, vándalos, alanos, etc.) cruzaron el río Rin completamente helado por la zona de la actual ciudad de Maguncia iniciando su migración hacia Galia y Hispania. Este período se llama también Pésimo de la In-

vasión migratoria y duro más o menos de 400-700 AD. Estos pocos, pero llamativos ejemplos demuestran que también en la antigüedad el clima no era nada estable.

Ya hacia la Edad Media, después de tiempos relativamente cálidos en los siglos IX y X (Figura 15 y 16), los vikingos, bajo Erik el Rojo, colonizaron a Groenlandia (procediendo de la palabra “Grünland” = “tierra verde” a finales del siglo X. Durante el Óptimo de la Alta Edad Media (ca. 900-1300 AD) fue otra vez posible a cultivar vino en las regiones septentrionales de Europa, como por ejemplo en norte de Inglaterra y en Brandemburgo (norte de Alemania). Es interesante que casi simultáneamente en esta época colapsó en Centroamérica la alta civilización de los Mayas durante su así llamada época “Clásica terminal” lo que se atribuye principalmente a períodos de alta sequía a finales del siglo IX en la región de la península de Yucatán (p.ej. HAUG et al. 2003 y GRUBE 2016). Tampoco fue por pura casualidad que en el período cálido de la Alta Edad Media se intensificaron a construir diques y terraplenes en el litoral de los Países Bajos.

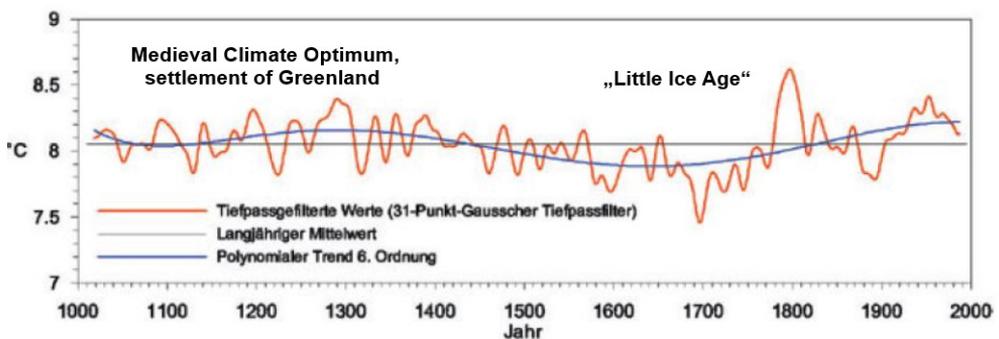


Figura 16. Temperatura anual media en Europa Central desde 1000 AD. Durante el óptimo climático de la Alta Edad Media las temperaturas fueron similares a las de la actualidad. Después, las temperaturas bajaron de nuevo iniciándose la Pequeña Edad de Hielo (de DWD Jahresstatusbericht 2003, p. 61).

Como ya se ha mencionado antes, la Pequeña Edad de Hielo de la Edad Media, más o menos entre 1450 y 1750 AD (Figuras 16 y 17), fue un período de enfriamiento que causó tiempos de malas cosechas seguidas por hambrunas y plagas en Europa. Este período frío medieval se caracterizó por largos y muy fríos inviernos y veranos cortos y fríos, ricos en precipitaciones. El período medio vegetativo en esta época fue claramente más corto que en la actualidad, bien probado por los estudios de anillos de árboles, por lo cual los granjeros de entonces tenían que tomar la decisión de sembrar muy tarde, lo que resultó en una cosecha reducida, o sembrar temprano con el peligro de que las heladas primaverales dañasen los

brotos jóvenes. Por tanto, todavía hoy en día los agricultores de Europa Central hablan de los días de los Santos del hielo (en mayo) y del Frio de la oveja (en junio). A mediados del siglo XVII, e incluso hasta principios del siglo XIX, los glaciares avanzaron en los valles de los Alpes en varios episodios, destrozando las granjas y aldeas a su paso (p.ej. RICHTER 1891 y HOLZHAUSER 1985). Con las temperaturas bajando de nuevo durante la Pequeña Edad de Hielo, las capas de nieve y hielo volvieron a extenderse en la “tierra verde” (Groenlandia) forzando a los vikingos a abandonar sus nuevas colonias a más tardar a finales del siglo XV, después de haberlas fundado sólo unos pocos siglos antes.

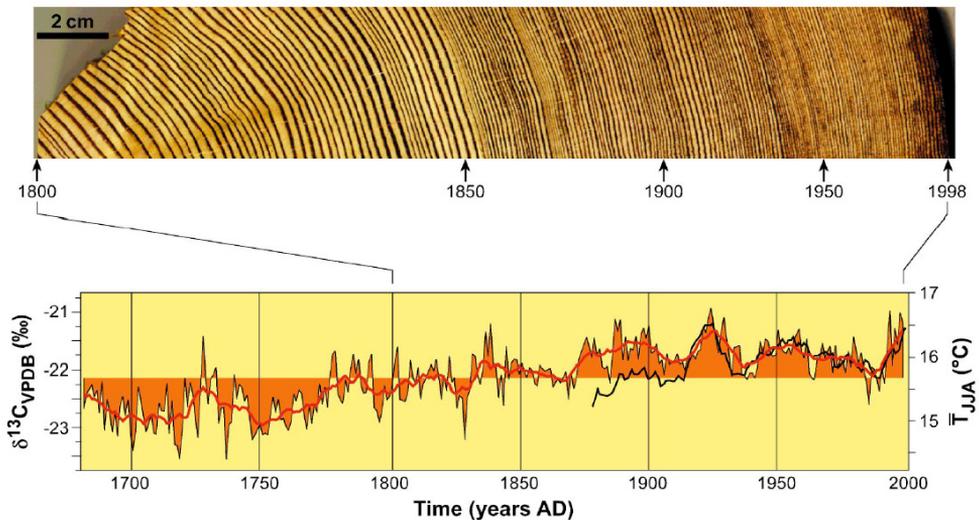


Figura 17. Los isótopos estables del hidrógeno, del carbono y del oxígeno que se determinan en los anillos de árboles pueden servir como representantes (“proxies” en inglés) para informarnos de la evolución de la temperatura y de la humedad en la atmósfera de tiempos pasados. Lo importante aquí es que se pueden atribuir a años individuales. En la gráfica se presenta el ejemplo de la curva de los isótopos $\delta^{13}\text{C}$ de anillos anuales de un alcega siberiano indicando los cambios de temperatura de los últimos 300 años; de SCHLESER & VOS (1993). Eje de Y izquierdo: valores anuales medios de los isótopos de $\delta^{13}\text{C}$. Línea roja: medio anual decenio de los valores isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ en anillos de árbol del Lago Baikal (Siberia). Línea negra: medio anual decenio de las temperaturas medidas en Irkutsk (con escala en el eje de Y derecho).

En Alemania, p.ej. el período de 1800-1810 fue tan cálido como hoy y coincide con un período de máxima actividad de manchas solares en el año de 1805 (referirse a la Tabla 2). Luego bajaron las temperaturas de nuevo. Durante la Segunda Guerra Mundial (años 40) y hasta los años 60 del siglo XX los inviernos fueron muy duros (Figura 18). A partir de los años 70 hasta la entrada al nuevo milenio las temperaturas subieron continuamente, de vez en cuando interrumpidas con fuertes inviernos, como el invierno de nevadas catastróficas de 1978/79 en el norte de Alemania. Entre 2000 y 2010 la subida de las temperaturas medias se paralizó un momento para continuar a subir lentamente después.

Desde los tiempos de la Pequeña Edad de Hielo y sobre todo a finales del siglo XX, los periodos vegetativos fueron otra vez más largos y las heladas en primavera menos frecuentes, más cortas y menos fuertes que durante la Pequeña Edad de Hielo, hace casi medio milenio. Deberíamos alegrarnos en vez de demonizar el actual periodo

caluroso, sobre todo ante el trasfondo del enorme crecimiento de la actual población mundial que necesita ser alimentada. Durante la próxima época glacial la superficie de uso agrario se verá muy reducida, aunque se compensará considerando que la superficie terrestre va a aumentar con la caída del nivel del mar por debajo de los 100 metros debido a la acumulación de agua helada en los casquetes polares y elevaciones montañosas por encima de los 1.000 m de altura (ver la Figura 42). También, hay que tener en cuenta que para ampliar las áreas de invernaderos agrícola calentados artificialmente, se necesitarían tremendas cantidades de energía adicional. Estas subidas y bajadas de temperatura son fragmentos instantáneos de muy corto plazo a los que hay que ver siempre en relación con la evolución geológica y climática de la Tierra de varios miles de años y no en espacios de tiempo cortos de pocos cientos de años – como a algunos conviene para hacer el juego a los partidarios de la teoría del Cambio Climático antrópico que defienden.

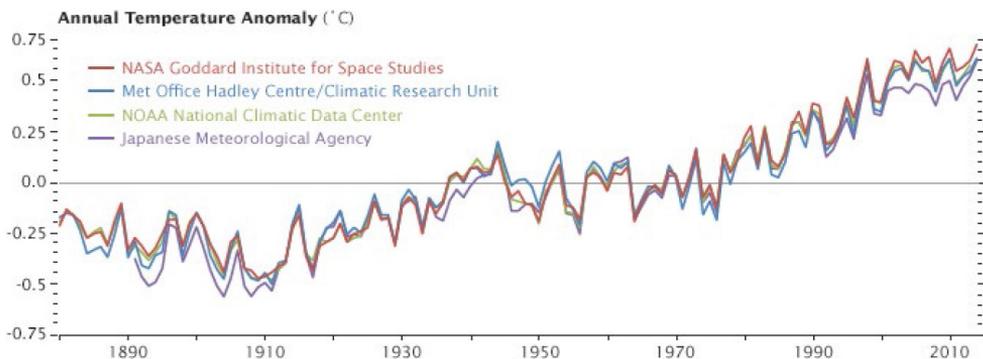


Figura 18. Evolución de la temperatura (desviación de la temperatura media??) de la superficie terrestre entre 1880 y 2014 basada en los datos del NASA Goddard Institute for Space Studies: [https:// earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/DecadalTemp](https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/DecadalTemp).

La subida y bajada de las temperaturas ya se repitió miles de veces, también en tiempos preindustriales, p.ej. en el siglo I BC (referirse a la Figura 14). En la actualidad se menciona muy a menudo como el período de los últimos 150 años (“desde el comienzo del registro de temperatura”). Aquí hay que considerar sin embargo que las condiciones de medición, como son la tecnología de instrumentación (mercurio versus digital), el lugar de medición (ubicación y altura), no siempre fueron o son comparables a las actuales. Por otra parte, hay que recordar que a principios del siglo 18 salimos de la Pequeña Edad de Hielo (ver las Figuras 17 y 18). La actual nueva subida de las temperaturas nos llevaría a alcanzar otro óptimo climático como lo fue durante la época de los Romanos y de la Alta Edad Media (referirse a la figura 24).

FENÓMENOS METEOROLÓGICOS EXTREMOS

En relación con el tema del clima se discuten frecuentemente fenómenos meteorológicos extremos lo que vamos a abordar a continuación. En la actualidad se declara muy a menudo que hay un aumento de fre-

cuencia y de intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos. Sin embargo, p.ej. con respecto a inundaciones, es evidente que fueron más frecuentes y más fuertes en el siglo XVII y XIX lo que se puede comprobar fácilmente en cualquier vecindad. En Heidelberg (suroeste de Alemania) se observa la marca de las avenidas del río Neckar (Figura 19-A) la más alta con +8 metros del año 1784. Otro ejemplo es la marca del río Alb (Ettlingen, cerca de Karlsruhe, suroeste de Alemania) del año 1824 (Figura 19-B). Hay que considerar que en estos tiempos del pasado la protección del suelo fue evidentemente menos pronunciada. Ejemplos similares de marcas de las avenidas históricas se pueden encontrar en muchas otras ciudades situadas a la orilla de ríos. Otros ejemplos son los de la Figura 20 que muestran las marcas de las avenidas desde el siglo XVI del río Meno en Eibelstadt (Alemania) y de la Figura 21 presentando un folleto de las “crecidas” del año 1651. Con este corto inciso queremos recordar que desde tiempos inmemoriales hubo períodos de fenómenos meteorológicos extremos que cada contemporáneo consideró como los más extremos de toda la Humanidad.



Figura 19-A. Marca de las avenidas del río Neckar de 1784 en el Viejo Puente de Heidelberg (Alemania); 19-B: Marca de las avenidas del río Alb de 1824, orilla derecha, cerca de la torre del ayuntamiento de Ettlingen (suroeste de Alemania).

Pero no hay que ir tan lejos en el pasado. También en el siglo pasado había numerosos eventos climáticos extremos con catástrofes causadas por las aguas, como por ejemplo los del año de 1978 en el sur de Alemania. El desborde del riachuelo Alb (afluente del Rin superior en el SO de Alemania) alcanzó un caudal por encima

de los 80 m³/s causando espantosas inundaciones en los terrenos entre Ettlingen y Karlsruhe (Baden-Württemberg). Durante muchos días la autopista federal A5 en la sección de la salida de Karlsruhe-Ettlingen quedó inundada permitiendo la singular oportunidad de ir en kayak por la autopista A5 (Figura 22).



Figura 20. Las marcas de las avenidas desde el siglo XVI del río Meno en Eibelstadt (Alemania); de DWD Klimastatusbericht 2003, p. 59.



Figura 21. Folleto de las “aguas altas” del año 1651. El original se encuentra en la Bayerische Staatsbibliothek München, Fl.-Nr. 03099; de DWD Jahresstatusbericht 2003, p. 58.



Figura 22. Espectacular crecida del riachuelo Alb en el mes de mayo de 1978 cuando se inundó la autopista federal A5 en la sección de la salida de Karlsruhe-Ettlingen (SO de Alemania).

EL ASCENSO Y DESCENSO DEL NIVEL DEL MAR

Los cambios del nivel del mar se atribuyen claramente a cambios climáticos. Desde la última Época glacial, desde su extensión máxima hace unos 18.000 de años, el nivel del mar ha subido unos 130 metros. El cambio del nivel del mar absoluto local puede depender también de efectos geológicos regionales de subida y bajada de terreno. Por ejemplo, Fennoscandia (que abarca la Península escandinava, la península de Kola, Carelia y Finlandia) sube hasta unos 10 mm por año debido a los movimientos de compensación glacioisostática después de haber perdido su cobertura de hielo de más de 3.000 m de espesor desde la última

glaciación hace unos 12.000 de años (ver también la Figura 33).

El generalizado postulado actual de una subida del nivel del mar de unos 1-2 mm por año es de origen natural, no es nada extraordinario y tampoco se debe calcular o proyectar linealmente hacia el futuro. Partiendo del fin de la máxima extensión del hielo hace unos 18.000 de años cuando el nivel del mar estaba cerca de 130 metros por debajo del nivel actual, uno puede simplificar (matemáticamente) que la subida media anual del mar corresponde a unos 7 mm. Este cálculo simplificado no es correcto porque estos últimos 18.000 años se caracterizan por un vaivén de episodios más fríos y más cálidos provocando continuas subidas y bajadas del nivel del mar (ver la Figura 24).

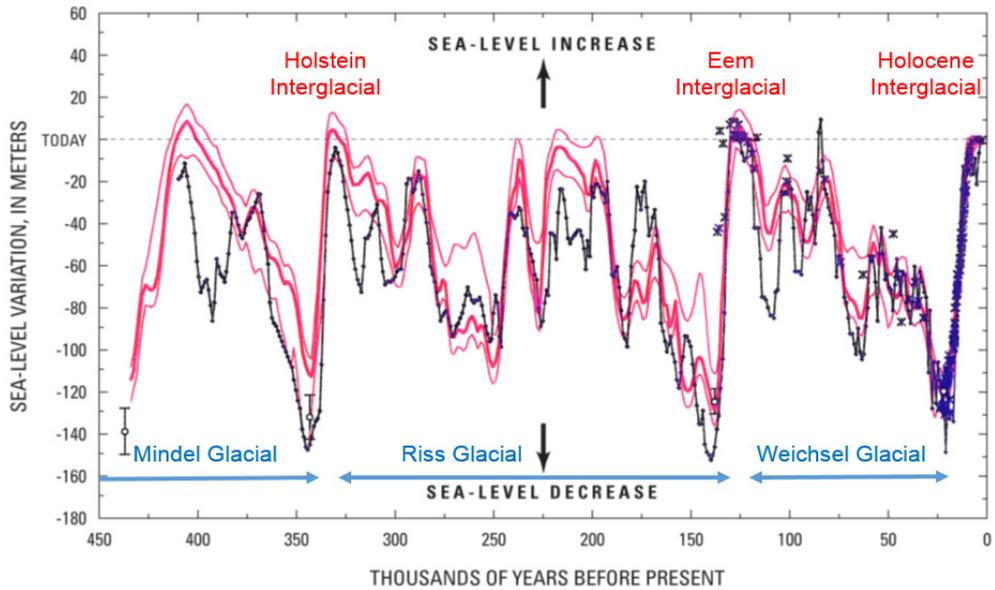


Figura 23. Gráfica de diferentes estimaciones de los cambios del nivel del mar en el curso de los últimos 440.000 años durante las 3 últimas grandes épocas glaciales; de WILLIAMS (2012) modificado según IGBP Science No. 3 (ALVERSON et al. 2001).

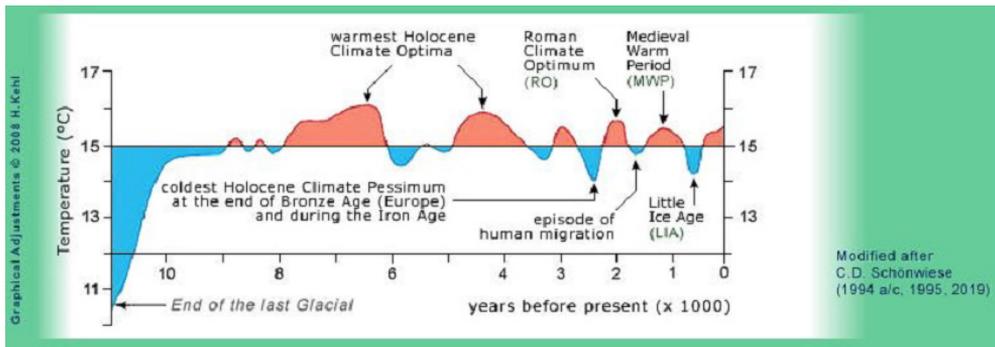


Figura 24. Cambios de las temperaturas medias cerca de la superficie en el hemisferio norte desde el final de la última Época glacial (de Würm) hace 11.000 años. Eje de X: miles de años antes de la actualidad. La gráfica presenta los períodos más cálidos (en rojo) y más fríos (en azul).

Los dos grandes máximos de calor hace 7.000 y 4.500 años, como el pequeño máximo hace 3.000 años en la Figura 23, corresponden al Óptimo del Atlántico. Hace

unos 2.000 años fue el Óptimo de la Época Romana y hace unos 1.000 años fue el Óptimo de la Alta Edad Media. Los mínimos de temperatura, hace unos 1.500 y unos 600

años, corresponden al Pésimo de la Invasión migratoria y a la Pequeña Edad de Hielo.

Hace 3.900 años p.ej., en las islas Maldivas el nivel del mar fue casi un metro más alto que en la actualidad. Por lo demás hay que decir que el crecimiento de corales se adapta adecuadamente al nivel del mar, o mejor dicho a la radiación solar, lo que significa que cuando sube el nivel del mar, los corales cre-

cen hacia arriba, hacia la luz. Cuando baja el nivel del mar los corales se mueren por encima de la superficie del mar, cuando caen secos, y se retiran a la profundidad. Este arriba y abajo del crecimiento de los corales se puede observar bien en regiones de islas volcánicas que suben y bajan frecuentemente por los movimientos tectónicos a causa de las actividades volcánicas.

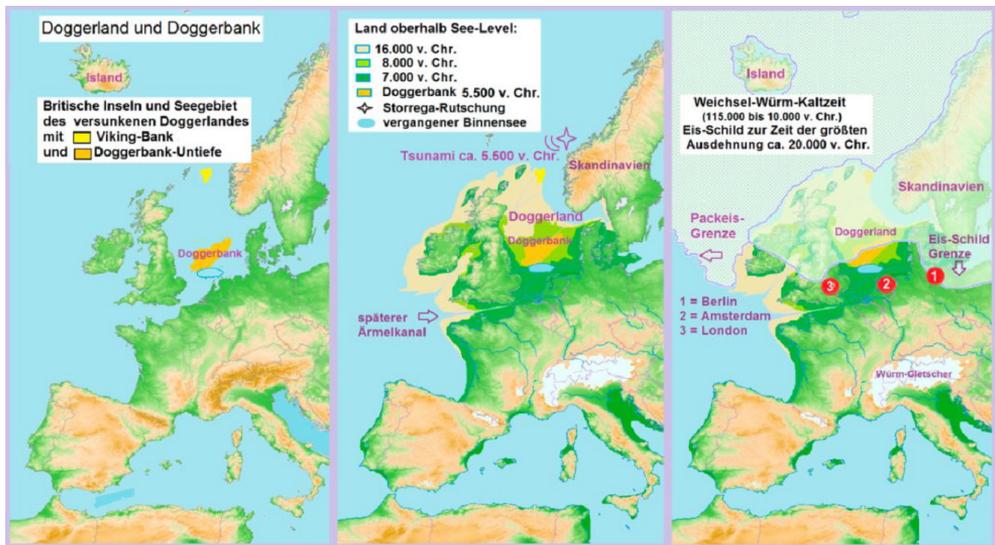


Figura 25. Inglaterra, incl. Escocia e Irlanda, eran parte del continente europea durante la última Época glacial. Imagen izquierda: situación actual con el Canal de la Mancha, la Bahía Alemana y el Banco de Dogger (hoy día a una profundidad de ca. 30 m); Imagen del medio: situación hasta hace 7.000 años: el continente europeo con Doggerland (hoy día hundido); Imagen derecho: El continente europeo durante la última Época glacial de Würm hace 115.000 – 12.000 años; de WIKIPEDIA.

Durante la última Época glacial las Islas Británicas fueron parte del continente europeo (Figura 25). El Canal de la Mancha no existía. Muchos hallazgos arqueológicos de asentamientos en la zona de las aguas bajas del Mar del Norte lo demuestran. Las civilizaciones altas (también por su agricultura) de Mesopotamia, en la región de los dos ríos Éufrates y Tigris, se desarrol-

laron en el actual mar continental del Golfo Pérsico (entre Arabia Saudita y el Irán) que hoy día cuenta con una profundidad de agua de entre 40 y 100 metros. Pero hace unos 18.000 años, hacia el final de la última Época glacial, el Golfo Pérsico se había secado porque el nivel del Mar Árabe estaba unos 120 metros más bajo que en la actualidad (Figura 26). Se presume que el famoso

diluvio mencionado en la biblia se refiere a tradiciones sobre la inundación de la región del actual Golfo Pérsico que también fueron documentadas en tablillas de escrituras cuneiformes sumerio-babilónicas describiendo unas inundaciones repentinas y catastróficas hace unos 8-9.000 años lo que corresponde al período cálido llamado “Óptimo Atlán-

tico” (Figura 24) durante el que las temperaturas fueron claramente más altas que hoy habiendo provocado un fuerte deshielo de las capas glaciales continentales y polares por el cambio climático de entonces. El Mar Báltico y el Mar Negro también fueron grandes lagos o mares interiores durante esta última Época glacial.



Figura 26. Territorio y lagos continentales de agua dulce de la superficie del actual Golfo Pérsico durante la última época glacial (hace unos 18.000 años); de BUNCHNER & BUCHNER (2011).

Otro ejemplo de la subida natural del nivel del mar es el yacimiento arqueológico singular de la Gruta de Cosquer con sus fascinantes grabados y pinturas (Figura 27) situada en la costa mediterránea al sureste de Marsella (Francia). Buceadores habían encontrado la entrada de la gruta en una profundidad de agua de 37 m en los me-

diados de los años 80 del siglo pasado. Las pinturas tienen una edad de unos 30.000 – 18.000 años, quiere decir finalizándose la última Época glacial (Würm), cuando la línea costera estaba a unos 11 km de distancia de la entrada de la entonces cueva y el nivel del mar estaba unos 80-90 metros más bajo (CLOTTE & COURTIN 1995).



Figura 27. Parte del gran panel de los caballos que se encuentra hoy justo por encima de la superficie del mar, Gruta de Cosquer (costa mediterránea francesa al sureste de Marsella). La entrada a la gruta se encuentra en la actualidad en una profundidad de agua del mar de unos 37 metros; de CLOTES & COURTIN (1995).

Una multitud de hallazgos arqueológicos de antiguos asentamientos romanos a lo largo y por debajo de los actuales litorales del Mediterráneo y del Atlántico demuestran que el nivel del mar subió varios

metros (hasta 3,5 m) desde sus fundaciones hace unos 2.000 años. Figuras 28 y 29 sólo representan dos ejemplos de Galicia (NO de España) y de Istria (Croacia).



Figura 28. Restos murales de una casa rústica romana (de Noville) del siglo 3 en la Ría de El Ferrol cerca de Mugardos (NO de España), pe.j. PADÍN ABAL (2017).

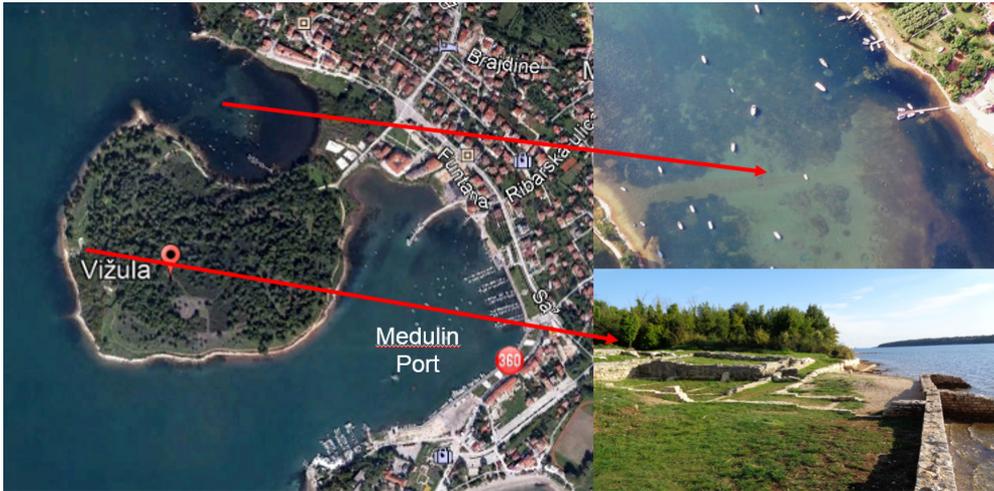


Figura 29. Península de Vizula (Medulin, Istria, Croatia) con numerosos restos de asentamientos romanos. En la pequeña aereofotografía de la derecha arriba se indica bien la antigua vía romana de acceso hoy hundida; p.ej. ÖAW (2019).

El vaivén de los glaciares

Desde el siglo XIX los Glaciares de los Alpes se retiran de nuevo, como lo hicieron ya muchas veces antes. Solo para dar dos ejemplos, el glaciar de la cima del monte Ortler (Trentino, Italia) de 3.905 m.s.n.m., tiene menos de 7.000 años (GABRIELLI et al. 2016) lo que significa que hace unos 7.000 años la cima del Ortler estaba libre de hielo. El deshielo de muchos glaciares de los Alpes, de los Pirineos y de los Picos de Europa en este período, que fue incluso más cálido que en la actualidad, corresponde al “Óptimo Atlántico” del Holoceno (ver también la Figura 24) que se mencionó antes y que duró desde hace

8.000 hasta hace 4.000 años (p.ej. BGR – Klimafakten 2004). No sería nada incomprendible si el “Óptimo Atlántico” hubiera sido el período de máxima temperatura entre la última y la siguiente Época glacial. Científicos suizos y austríacos observaron hasta 8 ciclos de vaivén de los glaciares alpinos durante los últimos 10.000 años. Otro ejemplo del múltiple vaivén de las glaciaciones en los Alpes es el glaciar de Aletsch (pendientes sur de los Alpes berneSES, Suiza); p.ej. HOLZHAUSER et al. (2005) y AUER et al. (2014). Este glaciar se retiró repetidamente durante los Óptimos de la Época Romana y de la Edad Media y avanzó de nuevo durante el Pésimo de la Pequeña Edad de Hielo.

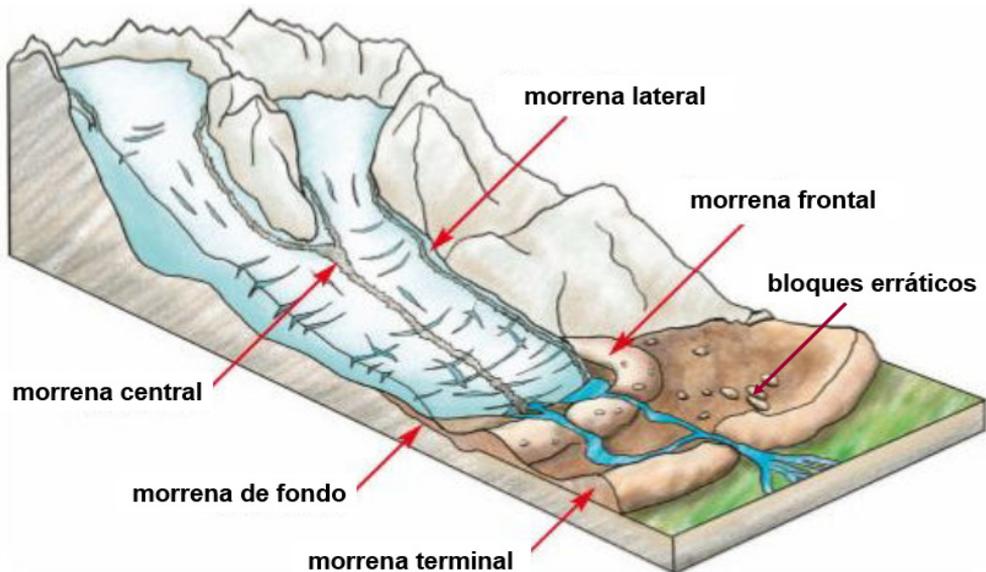


Figura 30. Los escombros arrancados y arrastrados por los glaciares se depositan durante las expansiones de los glaciares (avanzamiento) y sus retiradas (retroceso) en morrenas. En la glaciología se diferencian diferentes tipos de morrenas: las de fondo, las centrales, las laterales y las terminales, sólo para mencionar algunas de las diferentes formas (gráfica de <https://hohetauern.at/images/dateien/unterrichtsmaterialien/gletscher.pdf>).

Casi por todas partes en los actuales Alpes se pueden observar las pistas de los glaciares de las últimas épocas glaciales que modelaron las agujas, picos y crestas de montaña (ver la Figura 31). Los escombros arrancados y arrastrados por los glaciares, quedaron a la vista al deshacerse el hielo formando morrenas de muy variadas composiciones y formas (morrenas de fondo, morrenas laterales, morrenas centrales, morrenas frontales, etc.). La palabra morrena viene de

la palabra savoyarda „morêna“ y significa canto o rocalla. En la Figura 31 se reconoce el glaciar colgante en la pendiente norte de la cumbre de La Grande Motte (3.653 m de altura en Saboya, Francia) representando actualmente un deplorable resto lateral del inmenso glaciar del valle de Isère. Los afilados picos y crestas que se observan todavía en los Alpes fueron modelados por los inmensos glaciares que formaron una capa de hielo de más de 2.000 m de espesor.

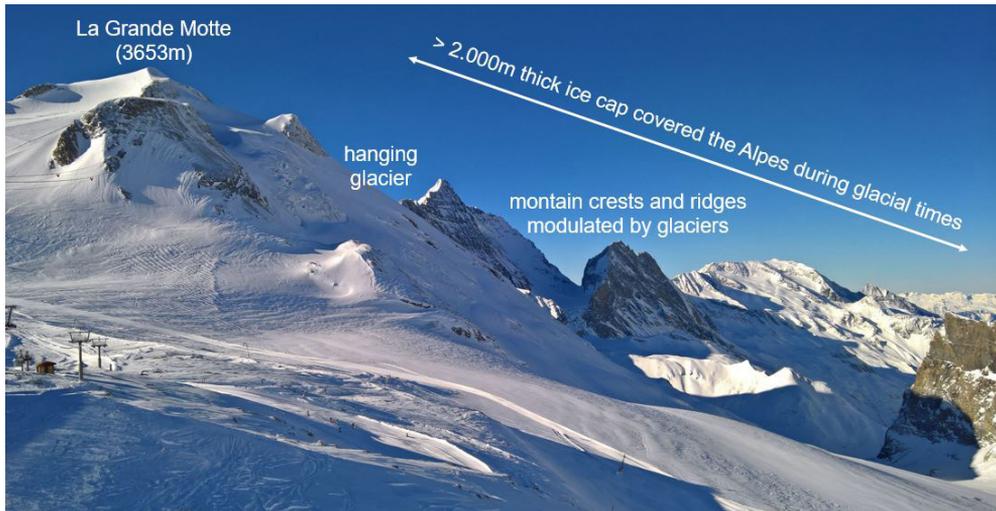


Figura 31. La cumbre de La Grande Motte (3.653 m de altura en Saboya, Francia) con su glaciar colgante en la pendiente norte de la cumbre, representando actualmente un deplorable resto lateral del inmenso glaciar del valle de Isère. Los afilados picos y crestas fueron modelados por los inmensos glaciares llegaron a tener espesores de más de 2.000 m.



Figura 32. El lago glaciar (o ibón) de Mummelsee se encuentra en una altura de 1.028, justo por debajo de la cumbre de Hornisgrinde (1.163 m) que es la más alta elevación en la parte norte de la Selva Negra. La foto del 22.01.2020 procede de la cámara web del refugio Grindehütte y enseña también el típico fenómeno meteorológico de inversión invernal regional: por encima de la capa de nubes brilla el sol es cálido (por encima del punto álgido), mientras en el valle (superior del Rin), debajo de la capa de nubes, es un día gris y frío (por debajo del punto de congelación).



Figura 33. Distribución del hielo continental durante la Época Würm/Weichsel en Europa (línea azul), de las zonas de vegetación y de permafrost hasta hace unos 12.000 años: (de <http://www.vinetowinecircle.com/en/genetics/the-presence-of-wild-vines-during-the-ice-age-in-iberia/>, referirse también a https://media.diercke.net/omeda/800/5277E_1.jpg). Los famosos asentamientos paleolíticos de la última Época glaciaria como por ejemplo Lascaux y Chauvet (FR) se encontraron justo afuera, y Willendorf (DE) y Predmost (PL) dentro de la zona de permafrost. Según LEVADOUX (1956) las cepas de vino silvestres se retiraron hacia la región mediterránea libres de hielo (línea roja) durante las épocas glaciales. La cobertura de hielo en el centro de la glaciación alcanzó más de 3.500 m de espesor donde la emersión posglacial por los movimientos isostáticos llegó hasta hoy por encima de 250 m de altura.

Durante los máximos de las épocas glaciales los glaciares de los Alpes avanzaron hasta las estribaciones de los Alpes. Quiere decir que durante los máximos de frío, los glaciares se extendieron varias docenas, incluso hasta cientos, de kilómetros más que en la actualidad y excavaron los valles y circos glaciares. Después de la retirada de los glaciares, los circos glaciares, muchos de ellos sin desagüe, se llenaron con agua

de deshielo y de lluvia formando los bien conocidos lagos de los Prealpes (Figura 34), como son los lagos de Zúrich, de Ginebra, de Constanza, y también el lago de Sanabria en la Provincia de Zamora. Estos lagos glaciares fueron sitios de asentamiento preferidos en el Neolítico (p.ej. POHANKA 2018).

También en las montañas de alturas medias de Alemania (p.ej. en el Harz, Bosque Bávaro, Selva Negra) se pueden observar

testigo de anteriores épocas glaciales en altitudes por encima de los 1.000 metros. Lo mismo ocurre en las altas montañas de España donde se desarrollaron paisajes glaciares durante las épocas glaciales en los Pirineos, en la Cordillera Cantábrica, en la Sierra de Gerês-Xurés (norte de Portugal) y en el Sistema Central. Situada en el sureste de España La Cordillera Bética (Sierra Nevada, Granada), es la región más meridional del Continente Europeo donde se pueden registrar testigos de anteriores épocas glaciales. Con sus 3.482 m de altura el Mulhacén (Sierra Nevada) es el monte más alto de España.

En la Selva Negra (sur de Alemania) las cumbres por encima de 1.000 metros estuvi-

eron cubiertas por delgadas capas de hielo durante las últimas épocas glaciales. Típicos testigos de su pasado glacial son numerosos pequeños lagos de origen glaciar que se llaman también “ibón” proviniendo de la antigua lengua prerromana aragonesa. Los ibones se forman donde han existido glaciares, que frecuentemente son capaces de excavar concavidades muy hondas por debajo del hielo. La figura 32 corresponde a un típico ejemplo de un ibón. El Mummelsee está situado en una altura de 1.028 m justo por debajo de la cumbre de la Hornisgrinde (1.163 m) que es la más alta elevación en la parte norte de la Selva Negra.



Figura 34. Durante las Épocas glaciales los glaciares de los Alpes avanzaron hacia los Prealpes. Quiere decir que los glaciares se extendieron varias docenas de kilómetros más que en la actualidad y excavaron los valles y ibones glaciares. Después de la retirada de los glaciares los ibones, mucho de ellos sin desagüe, se llenaron de agua formando los bien conocidos lagos de los Prealpes; foto satélite de Landsat / Copérnico, 2009 GeoBasis-DE/BKG, 2018 Google Earth.



Figura 35. El Lago de Sanabria (provincia de Zamora) tiene una extensión de unos 3,5 kilómetros cuadrados, es el lago natural más grande de España y es de origen glacial. Este lago de unos 53 metros de profundidad y una máxima longitud de 3 kilómetros, se sitúa en una altura de unos 1.000 metros sobre el actual nivel del mar, en una zona que fue cubierta de glaciares durante la última Época glacial.

Después de fundirse el hielo continental, por ejemplo, la última vez hace unos 12.000 años en el norte de Alemania (referirse a la Figura 33), los glaciares de hasta varios kilómetros de espesor depositaron su carga sedimentaria a cientos de kilómetros de los yacimientos originales de esos materiales. Estos materiales rocosos abrasionados, arrancados y arrastrados por los glaciares durante sus rutas se llaman morrenas y pueden depositarse en forma de largas bandas formando colinas y llanuras (ver la Figura 30). Los bloques que los forman difieren mucho por su tamaño y tipo de la roca de entorno y se llaman “bloques erráticos” que pueden alcanzar diámetros de varias decenas de metros y pesos de varios cientos (incluso miles) de toneladas (Figura

38-A). Estos bloques “alóctonos” pueden haber viajado encima del hielo cientos, incluso miles de kilómetros, son muy típicos y abundantes en paisajes adonde llegó el hielo continental durante las épocas glaciales. Es comprensible que los hombres de la Edad de Piedra pensaron que estos bloques erráticos gigantes fueron movidos por dioses y los adoraron como un sitio divino, tal vez parecido a Stonehenge. Probablemente estos bloques erráticos y sobre todo las mesetas de glaciar (bloques erráticos planos, ver Figura 38-B) sirvieron como modelo y materia prima para construcciones, como son por ejemplo los monumentos funerarios (dólmenes, etc., ejemplo en la Figura 39), de la cultura megalítica (4.000 – 2.000 años BC, p.ej. POHANKA (2018)).



Figura 36. Los restos de una morrena terminal semicircular, de casi 100 kilómetros de largo (marcadas en amarillo), delimitan la Cuenca de Rosenheim en los Prealpes bávaros (SE de Alemania) y confirman su posición periférica durante la última Época glacial; de “Lernort Geologie, Landschaftsentwicklung in Bayern”, página 187, Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit (StMUG), Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung (ISB).



Figura 37. Los típicos paisajes ondulados compuestos de morrenas de fondo y morrenas terminales forman las llanuras del norte de Alemania (aquí cerca de Liepe, concejo de Barnim, Uckermark meridional, foto de Norbert Schlaak) y son testigos de distintos avances de los glaciares desde Escandinavia durante las últimas épocas glaciales.

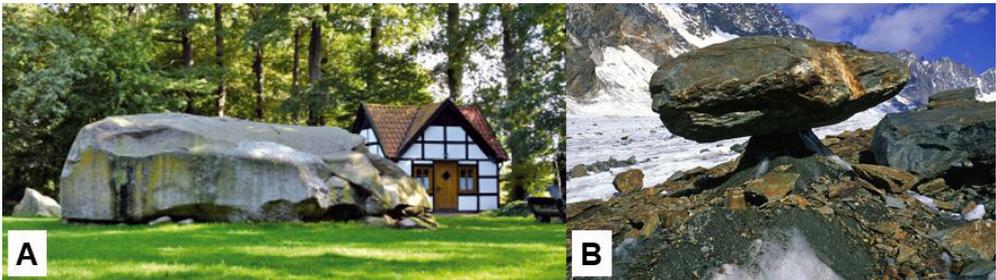


Figura 38-A. roca errática „Gran roca de Tonnenheide“ cerca de Rahden (Renania del Norte-Westfalia); 38-B: típica mesa glaciar del Glaciar de Aar en Los Alpes suizos, foto de <https://www.swisseduc.ch/glaciers/alps/unterargletscher/gletschertische-de.html> .



Figura 39. Probablemente bloques erráticos y sobre todo mesas de glaciación (bloques erráticos planos, referirse a la Figura 38-B) sirvieron como modelo para construcciones megalíticas, como son por ejemplo los monumentos funerarios (dólmenes, etc.). Ejemplo de un típico dolmen neolítico: dolmen Petra da Arca (Vimianzo, NO de España).



Figura 40. Estrías gravadas y espejos de pulidos por glaciares muy pronunciados se pueden observar acerca de las ruinas incas de Saqsaywaman (al norte de Cusco, Perú). Este yacimiento glacial llamativo se encuentra en una altura de ca. 3.500 metros sobre el nivel del mar y está distanciado unos 500 kilómetros (al noroeste) de las más próximas cumbres cubiertas de glaciares actuales en la cordillera andina de Bolivia.

Junto a los testigos geomorfológicos de morrenas e ibones (Figuras 30 y 32) están las estrías talladas y espejos de pulidos formados por antiguos glaciares (Figura 40) que prueban que las masas de hielo de grandes macizos glaciares han dejado su “graffiti tag” en las superficies de las rocas hace miles y millones de años. Fueron semejantes “huellas glaciares” de depósitos glaciares endurecidos de terrenos barrocos en bloques (“tillitas”) con rodados arañados y morrenas que se pueden observar dispersados por la tierra en regiones donde actualmente no hay una glaciación conti-

ental, que motivaron a Alfred Wegener, hace unos 100 años, argumentar su idea sobre los cambios climáticos en el pasado geológico. Basándose en estos estudios, él desarrolló un siglo atrás la teoría revolucionaria del movimiento de los continentes - la tectónica de placas (KÖPPEN & WEGENER 1924). En esta época la comunidad de geocientíficos consideraron a Alfred Wegener como “disidente” (que piensa de otro modo) menospreciando a su teoría novedosa. Sin embargo, las investigaciones científicas de los últimos 60 años le dieron la razón.



Figura 41. En el litoral poniente de Noruega los numerosos glaciares de las Épocas glaciares llegaron hasta el mar formando los valles glaciares de típica forma de U que hoy día caracterizan el litoral noruego con sus pintorescos fiordos de acantilados muy marcados y altos.

En la costa poniente de Noruega, los numerosos glaciares de las épocas de máximo frío se arrastraron hacia el mar escarpando los valles glaciares de típica forma de U que hoy día caracterizan el litoral noruego con sus pintorescos fiordos de muy marcados y altos acantilados (Figura 41). Los ejemplos de las Figuras 31-32 y 34-41 son sólo unos pocos de los numerosos testigos y formas glaciares probando la gran extensión

del hielo continental durante las últimas épocas glaciales (Figura 33). Son inconcebibles volúmenes de miles de kilómetros cúbicos de hielo y miles de kilómetros de distancias recorridos desde la última Época glacial hasta hace unos 12.000 años lo que hace casi diminuta la retirada actual de los glaciares tan históricamente discutida. Por supuesto no se pueden negar las consecuencias catastróficas para los asentamientos lito-

rales modernos. Los cazadores y recolectores paleolítico, como también más tarde los agricultores y pastores neolíticos y de la Edad de Bronce, lo tenían más fácil para huir del mar en alza subiendo hacia el interior continental, como por ejemplo del inundado Doggerland antes mencionado (ver la Figura 25). Pero desde el comienzo del asentamiento de los humanos en poblaciones fijas con puertos y ciudades ya es casi imposible cambiarlos a otro lado. Así lo pasó también ya a las Altas Culturas en el sureste de Mesopotamia (entre dos ríos) que tenían que abandonar a sus metrópolis que se encuentran hoy día a hasta 60 metros sumergidas en el fondo del Golfo Pérsico (Figura 26, p.ej. BUCHNER & BUCHNER, 2011). También a los habitantes del legendario Atlantis, sea donde sea, les tocó el mismo cruel destino.

En otras regiones de la Tierra, p.ej. en el Cáucaso, los glaciares son actualmente más o menos estables e incluso se extienden nuevamente. Según un reporte de la NASA Earth Observatory del 6 de junio de 2019, el glaciar de Jakobshavn en Groenlandia está creciendo continuamente desde 2016. El glaciar del monte Kilimanjaro (Kenia, 5.895 m.s.n.m.) se está renovando continuamente dependiendo en primer lugar de las precipitaciones tropicales. El hielo que cubre actualmente la cima del Kilimanjaro tiene una edad máxima de 800 años (UGLIETTI et al. 2015) lo que indica que antes, hace 800 años, las temperaturas debieron haber sido más altas que hoy. Estos tiempos más cálidos coinciden con el corto período de mayor actividad solar durante la Alta Edad Media (Figura 16) que provocó también el deshielo a corto plazo de los glaciares en los Alpes. Aparentemente la capa de hielo de la Antártida está creciendo ligeramente desde el nuevo milenio. Es un tema muy complejo y

a veces contradictorio considerando la masa de hielo continental o marítima. Sea como sea, y como se dijo más arriba, las tendencias de los cambios climáticos no se manifiestan en decenas o cientos de años sino en miles o decenas de miles de años.

Para discutir sobre el cambio climático conviene tener en cuenta que las áreas glaciales de alta montaña, de Groenlandia, de la Antártida y del Ártico representan sólo un resto de las grandes masas de hielo de la pasada Época glacial. Calculando estos volúmenes de hielo (Hielo glaciar continental: ca. 170.000 km³ (DAVIS 2019), Groenlandia: ca. 2.900.000 km³ (POLARPOR-TAL 2019), Ártico: ca. 28.000 km³ (PIOMAS 2019), y Antártida: ca. 27.000.000 km³ (AMOS 2013)), se llega a un total de volúmenes de hielo actuales de unos 30 millones de km³. Para tener un valor de referencia, WILLIAMS & HALL (1993) determinaron el volumen de hielo actual de la Tierra con unos 33 millones de km³.

La Figura 42 presentan las proporciones cambiantes de las superficies continentales y oceánicas de la Tierra durante un máximo glacial, el actual período cálido interglacial del Holoceno, y una situación hipotética de la Tierra sin ninguna cobertura de hielo. La superficie de la Tierra es de unos 510 millones de km², de los cuales un 70,7 %, quiere decir unos 361 millones de km², corresponde a los océanos. Como demuestra la Figura 42, en tiempos de máxima glaciación las superficies oceánicas correspondían a sólo un 36 % de la superficie terrestre, quiere decir a unos 321 millones de km². Partiendo de una subida de unos 130 m del nivel del mar desde la última Época glacial y aplicando el valor medio de las superficies oceánicas de la última glaciación y de la actualidad $((321+361)/2=341$ millones de

km²), eso significa la pérdida de un volumen de agua de unos 44 millones de km³ de los océanos durante el máximo frío de la última Época glacial. Por otra parte, eso resulta en

un volumen de hielo de unos 49 millones de km³ teniendo en cuenta que el volumen del agua aumenta ca. 1/11 en el momento de congelarse.

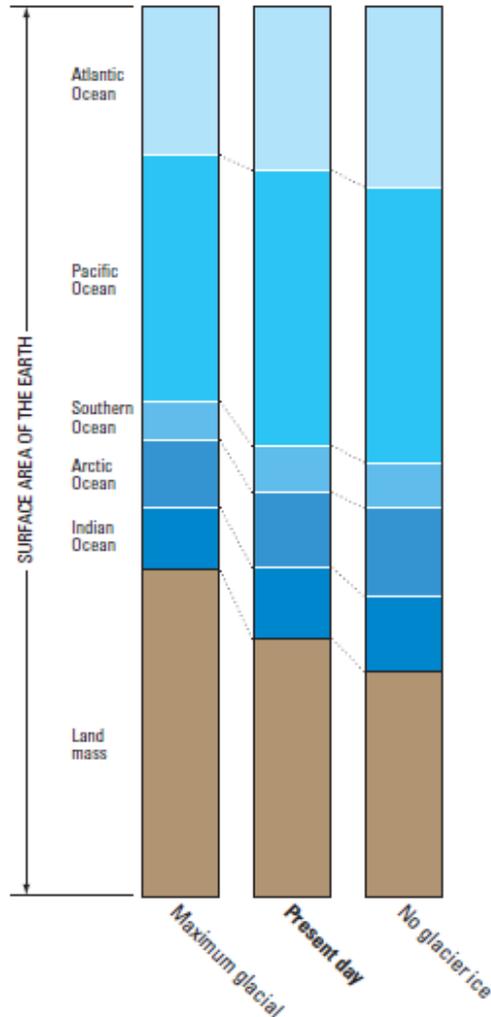


Figura 42. Croquis de las cambiantes proporciones de las superficies continentales y oceánicas durante un máximo glacial, en la actualidad de un período cálido y en una situación hipotética de una Tierra sin cobertura de hielo. Conforme a eso, la superficie continental corresponde a un 37 % de la superficie entera de la Tierra durante un máximo glacial, en la actualidad a un 29,1 % y sólo un 25 % en una Tierra sin hielo (WILLIAMS 1993).

Sin considerar que todavía hubieran quedado algunos restos de hielo de la penúltima Época glacial, a finales de la última Época interglacial cálida del Eem (Interglacial Riss-Würm) hace unos 115.000 de años, se manifiesta comparando los volúmenes de hielo de la actualidad y de un pasado glacial, que los volúmenes de hielo de la última Época glacial fueron más de una vez y media de los volúmenes de hielo actuales. Quiere decir que durante los últimos 18.000 años desaparecieron casi la mitad de los volúmenes de hielo de la última gran Época glacial. Las masas de hielo continental del hemisferio norte que se encontraron al sur del círculo polar (más abajo del grado de latitud de 66,5°, fueron afectadas al máximo desapareciendo casi por completo (referirse p.ej. a la Figura 42)

Sólo este número o relación hace entender que un invisible gas como el CO₂, tan esencial para la fotosíntesis del mundo vegetal, no puede considerarse como causa del ascenso y descenso de las temperaturas de la atmósfera terrestre. Deben ser fuerzas mucho más fuertes las que provocan estos cambios climáticos, como son una elevada intensidad de la radiación solar en épocas de mínima distancia Sol – Tierra sobrepuestos con otros parámetros astrofísicos como las variaciones en la inclinación del eje rotatorio y su “cabeceo”.

EL EFECTO INVERNADERO Y GASES DE INVERNADERO

Otro tema en el largo plazo con respecto al curso de la temperatura en la atmósfera terrestre es la comparación con los procesos de calentamiento de efecto invernadero. Con sus paredes y el techo de vidrio un invernadero es un sistema bien cerrado a

diferencia de la atmósfera que es un sistema abierto, por lo cual es una comparación muy simplificada y en el fondo físicamente incorrecta. Por otra parte, el gas de efecto invernadero (si se quiere seguir esta comparación simplificada) más abundante y crucial para el desarrollo de la temperatura es el Vapor de agua (referirse también a las Figuras 43 y 44) que puede llegar a concentraciones de hasta varios % en la atmósfera. Sin embargo, el CO₂ en la atmósfera es un gas de concentración traza. Su concentración actual está en el rango de unos 405 ppm (= 0,04 %) y su gran importancia postulada para el aumento de temperatura es claramente muy inferior a la del vapor de agua. ¿En realidad qué son 405 ppm? Imaginándose un cubo grande de un volumen de 1 m³, quiere decir de 100 cm de largo, que consiste de un millón de cm³. Podrían ser también un millón de dados de un centímetro de largo cada uno. En este ejemplo unos 780.000 dados consistirían de Nitrógeno (N₂), unos 21.000 dados de Oxígeno (O₂), unos 1.000 dados del gas noble de Argón (Ar) y sólo 405 dados del gas transparente de CO₂. También se podría decir que, en nuestro ejemplo del cubo grande de 100 cm de largo, el contenido CO₂ corresponde a un dado de 7,4 cm de largo, quiere decir un dado un poco más grande que el famoso cubo mágico. Eso quiere expresar que unos 405 ppm corresponden a una muy baja, despreciable, concentración de un gas traza inofensivo como es el CO₂. Otro caso sería si se tratase de unos 405 ppm de aerosoles opacos emitidos por las erupciones de volcanes hacia la atmósfera, que reducen considerablemente el paso de los rayos del sol.

El modelo atmosférico de un invernadero no es muy exacto climatológicamente hablando, porque la estructura de la at-

mósfera de la Tierra es muy compleja. La atmósfera consiste, entre otras unidades, de la troposfera y la estratosfera y no es un sistema cerrado (como un invernadero) sino abierto hacia arriba, hacia la ionosfera (referirse a la Figura 45). En caso de aplicar un modelo muy simplificado de un invernadero, son las capas de nubes que juegan un papel importante en el desarrollo de la temperatura en la atmósfera y no un gas traza de unos 405 ppm (= 0,04 %) como es el CO₂.

Los fenómenos climatológicos que observamos en la atmósfera suceden principalmente en los primeros 15 km de altura, en la llamada troposfera. Si existe algo parecido a un efecto invernadero en esta zona de la atmósfera que tiene influencia en el desarrollo de la temperatura, entonces son las capas de nubes de vapor de agua y de cristallitos de hielo que pueden formar cierto cierre por encima de las capas atmosféricas superficiales.



Figura 43. Fotografía del planeta de Tierra de Harrison H. Schmitt durante la misión de Apollo-17 en el año 1972 (Foto no. 72-HC-928 NASA). Son las capas de nubes sólo que empañan nuestra vista a la Tierra.

Un buen ejemplo para explicarlo se puede observar en el invierno. Cuando el cielo está cubierto de nubes, por debajo de la capa de nubes se mantiene el aire calentado durante el día, mientras cuando el cielo invernal brilla de las estrellas, se siente bien el frío nocturno. Otro ejemplo es la situación meteorológica de inversión, típica para las épocas frías en invierno, cuando un mar de nubes sella el valle, por ejemplo, el valle del Miño o del Rin, y durante el día soleado hace más calor encima del mar de nubes que por debajo, en el valle (referirse a la Figura 31). Como hemos visto anteriormente, también la radiación cósmica y los aerosoles muy finos de las erupciones volcánicas (referirse a la Figura 48) tienen cierta influencia en la formación de nubes y por lo tanto tienen un efecto en las temperaturas de las capas atmosféricas superficiales.

Es importante mencionar que continuamente se presenta en documentales, referido al clima y para demostrar la emisión del CO₂ “malo”, torres de enfriamiento de diversas centrales emitiendo realmente vapor de agua blanco inofensivo. Según la posición del fotógrafo, sobre todo con respecto al contraluz del sol vespertino, lo presentan sugestivamente como una venenosa nube amenazante de color gris oscuro a negro. El aumento antropógeno de la concentración del CO₂ en la atmósfera se estima de un 3 % (de la concentración mencionado de unos 405 ppm) lo que en realidad es una porción despreciablemente pequeña. Semejante situación se observa con respecto al Metano y su emisión por parte del ganado vacuno rumiante y otros animales domésticos o salvajes que se menciona repetidamente en el contexto del supuesto efecto invernadero. ¡También el ser humano emite metano! El período de semidesintegración del metano

son unos 10 años lo que significa que este gas no se concentra para siempre en la atmósfera, sino se descompone en relativamente poco tiempo.

Así como las nubes (de vapor de agua o de cristalitas de hielo) dificultan la vista a la Tierra desde el espacio (ver la Figura 43), de la misma manera perjudican la incidencia de la radiación cálida solar a la Tierra. Las capas de nubes facilitan la reflexión de la radiación solar en las superficies de las nubes, y también reducen la reflexión de la radiación cálida solar en la superficie terrestre, así como también reducen el reflujó de calor desde la superficie terrestre de vuelta hacia el espacio cósmico, como se describió antes con el ejemplo de una noche invernal. Algo parecido provocan las bandas de aerosoles (compuestas de muy finas cenizas y de gases) que dan la vuelta al mundo en estratos altos de la atmósfera después de fuertes erupciones de volcanes (ver la Figura 48). La vista a la Tierra, y desde la Tierra hacia el Espacio, no se perjudica con buena visibilidad sin nubes, y no importa cuan alta sea la concentración del invisible gas de CO₂ en la atmósfera. Lo mismo es válido para la insolación y la re-irradiación térmica.

Según las leyes termodinámicas, un gas (en nuestro caso el aire de la atmósfera) caliente sube. Buenos ejemplos para eso son las grandes aves rapaces y los buitres que aprovechan la térmica del aire para subir dando vueltas hacia las alturas. Quiere decir que el aire caliente sube hacia las esferas más altas de la atmósfera, mientras un aire frío pesado se mantiene en el fondo de los valles, sobre todo en valles hondos. Este último fenómeno meteorológico se hace notar sobre todo en invierno como arriba mencionado. También el transparente gas CO₂, u otros gases de la atmósfera terres-

tre, están sujetos a las leyes termodinámicas y nada puede impedir que un aire caliente suba. Sólo una superficie límite (o separadora) puede impedir mecánicamente el aire cálido a continuar a subir o devolverla por reflexión (como un espejo). Una superficie límite o separadora puede resultar de un cambio de materia, es decir un material con otra composición química o densidad óptica, como es el techo de vidrio en el caso de un invernadero, o una variación de fase,

otra vez con diferentes densidades ópticas, como es el agua y el hielo. En la atmósfera terrestre son las capas de nubes formadas por muy pequeñas gotas de agua o cristali- tos de hielo, las que forman una superficie límite o separadora con respecto al aire y que puedan impedir al aire caliente con- tinúe subiendo como ocurre en una noche de invierno cuando la capa de nubes impide la subida y la pérdida del aire calentado du- rante el día.

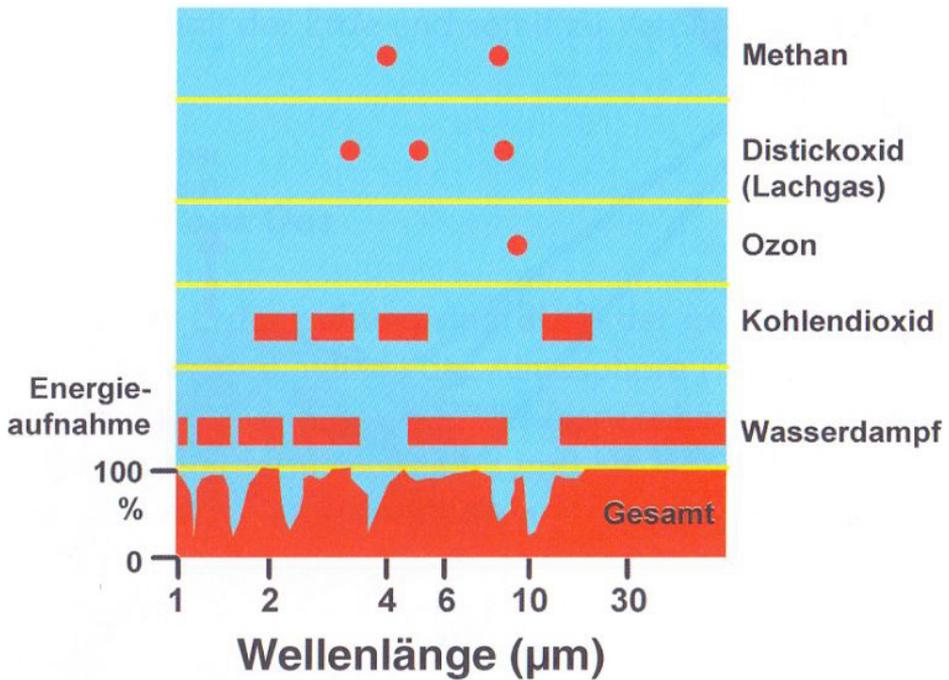


Figura 44. El CO₂ desempeña un muy inferior papel en el postulado efecto invernadero comparado con la importancia del vapor de agua (nubes, nieblas, bruma, etc.) por su baja concentración traza y su inferior absorción de energía en la atmósfera terrestre – todavía menos el metano. La gráfica presenta la absorción de energía entre un 0 y un 100 % de los más abundantes gases invernadero con los valores de las zonas espectrales en μm en el eje de X y la absorción de energía en % en el eje de Y izquierdo; de BGR – Klimafakten (2004).

La concentración del CO₂ en la atmósfera terrestre ha estado sujeta de marcados cambios durante la historia geológica. Por ejemplo hace 70 millones de años (durante el Cretácico) la concentración del CO₂ fue 8 veces más alta que hoy. A finales del Triásico hace unos 230-200 millones de años, la concentración del CO₂ de la atmósfera terrestre cayó durante unos 30 millones de años de 4.500 ppm a unos 2.000 ppm. Después, a principios del Jurásico hace unos 200 millones de años subió de nuevo a unos 4.000 ppm lo que se relaciona con las actividades volcánicas submarinas durante la apertura del océano Atlántico (SCHALLER et al. 2015). Durante la última Época interglacial del Eem, la temperatura de la atmósfera próxima a la superficie fue unos 2°C más elevado y el nivel del mar estuvo unos 5-6 metros más alto que en la actualidad (ver también el Capítulo 11). En estos tiempos las concentraciones del CO₂ fueron sólo unos 270-290 ppm (ver la Figura 1).

No existen pruebas de que la temperatura media global suba con el aumento de la concentración del CO₂, tampoco porque el CO₂ pueda absorber radiación térmica (infrarroja) de una zona espectral de unos 15 μm como también, con interrupciones, de la zona espectral de 2-5 μm (ver la Figura 44), pero no de la zona espectral de unos 7 a 13 μm . Es más bien el vapor de agua que cierra esta ventana, como la mayoría de las otras zonas espectrales. Al contrario, es correcto fisicoquímicamente, que la solubilidad del CO₂ en la atmósfera terrestre depende de la temperatura y en primer lugar de la radiación solar que llega a la Tierra. Como antes se dijo (ver las Figuras 1 y 46), la evolución del CO₂ corre claramente detrás de la de la temperatura: el cambio de temperatura ya está en curso, bajando o subiendo la temperatura, cuando la concentración de CO₂ empieza a seguirlo con cierto retraso de tiempo – y no al revés.

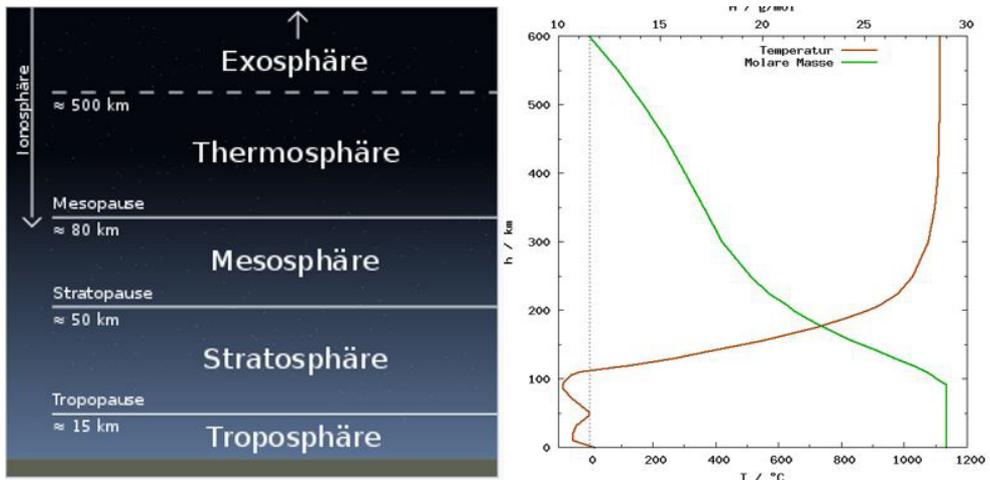


Figura 45. Estructura de la atmósfera terrestre (izquierda), temperaturas medias y masa molar del aire en dependencia de la altura (derecha); de <https://www.wikipedia.org/wiki/Erdatmosph>.

Las emisiones antropogénicas de CO₂ subieron desde la Revolución Industrial, sin embargo, influyen apenas en la evolución de la temperatura de la atmósfera pues su efecto se diluye en el de las variaciones naturales de temperatura debidas al mismo gas. Además, como dice el meteorólogo holandés y premio Nobel de Química (especialmente de química de la atmósfera) del año 1995: “Ya hay tanto CO₂ en la atmósfera que en muchas zonas espectrales la absorción de CO₂ está completa, y cualquier CO₂ adicional ya no importa”. Esta afirmación se basa en que la capacidad de absorción en la zona espectral del infrarrojo donde puede influir el CO₂, ya está tan saturada, y eso ya desde la época de transición del nuevo milenio, que un aumento adicional de CO₂ ya da igual. Para decirlo mas coloquialmente, este triunfo de la jugada de cartas climática ya estaba cantado desde hace mucho.

CAILLON et al. (2003) demuestran con los datos de testigos de hielo de Vostock (Antártida) que durante un período de calentamiento durante la penúltima Época glacial, hace unos 237.500 años, la concentración del CO₂ iba por detrás de la evolu-

ción de la temperatura, en una cifra como de unos 800 años (Figura 46). La evolución de la temperatura se basa en la presentación de los valores medidos del isótopo $\delta^{40}\text{Ar}$ como representante o “proxy” de la temperatura. HANNON (2020) compara los datos de temperaturas y de concentraciones de CO₂ de testigos de hielo de Groenlandia con los de la Antártida (Figura 47). Su conclusión es que las concentraciones de CO₂ de Groenlandia presentan variaciones a corto plazo, en el curso de unos cientos de años, mientras que en los testigos de hielo de la Antártida se pueden observar evoluciones a plazos más largos de unos miles de años. Este hecho puede ser influido por la diferencia en la posición geográfica (diferentes latitudes) y en el volumen de océanos que rodean a ambos continentes. Además, las concentraciones de CO₂ en Groenlandia varían con las estaciones del año. En verano la fotosíntesis de las plantas es más activa consumiendo más CO₂ que durante el resto del año. También se puede observar en los testigos de hielo de Groenlandia que las concentraciones de CO₂ corren ligeramente detrás de la temperatura (referirse a la Figura 46).

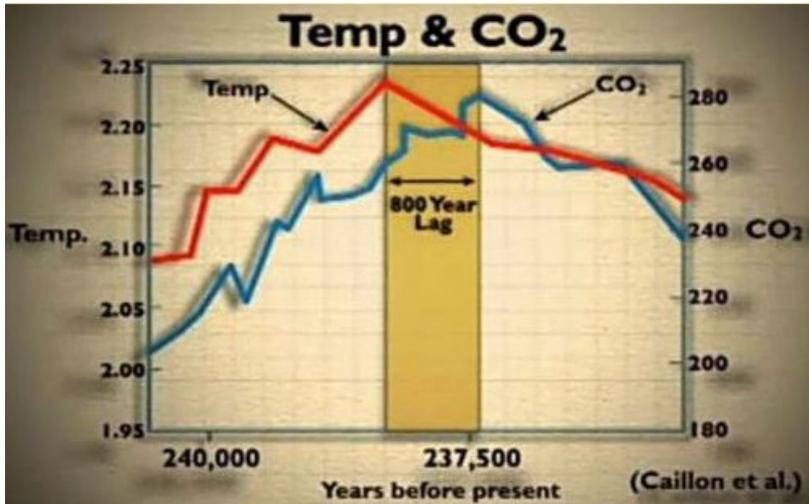


Figura 46. Durante un período de calentamiento durante la penúltima Época glacial del Riss, hace unos 237.500 años, la concentración del CO₂ corre por detrás de la evolución de la temperatura por unos 800 años. La evolución de la temperatura se basa en la presentación de los valores medidos del isótopo $\delta^{40}\text{Ar}$ como representante o “proxy” de la temperatura; datos de testigos de hielo de Vostock (Antártida); según CAILLON et al. (2003).

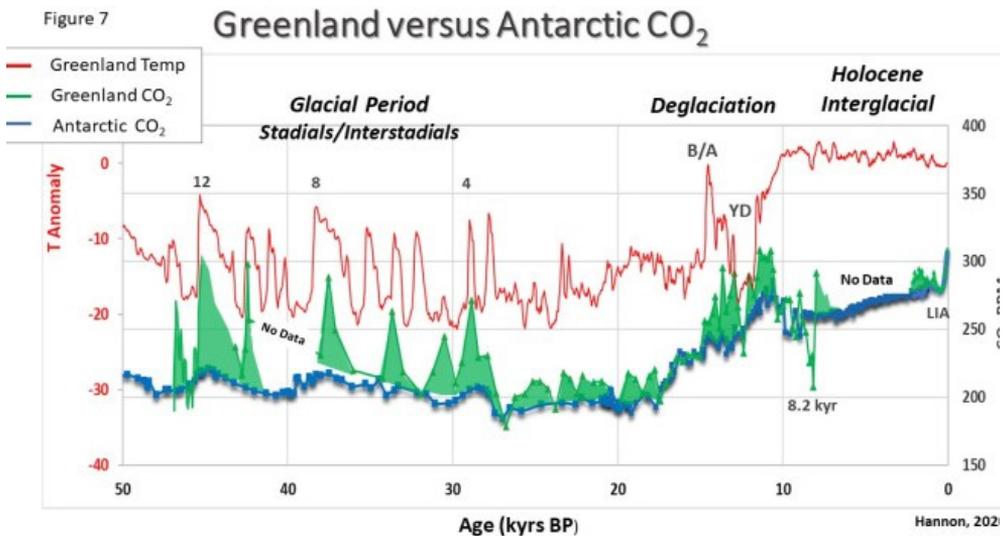
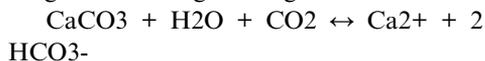


Figura 47. Comparación de concentraciones de CO₂ en testigos de hielo de la Antártida y de Groenlandia de los últimos 50.000 años (HANNON 2020). Las concentraciones de CO₂ de Groenlandia varían a plazos más cortos que las de la Antártida. En los testigos de hielo de Groenlandia se puede observar que las concentraciones de CO₂ corren ligeramente detrás de la temperatura.

Durante períodos fríos, en el agua mas fría agua de los océanos, se observa que la solubilidad del CO₂ es más elevada que en épocas cálidas durante las que se puede disolver menos CO₂ en el agua más caliente de los océanos, es decir se puede mantener menos CO₂ en solución en los océanos. Eso significa que cuando el agua de los océanos se calienta lentamente después de un período de frío, el agua libera CO₂ que se acumula en la atmósfera. En las latitudes altas este intercambio de CO₂ entre los océanos y la atmósfera sucede también como consecuencia de los cambios de temperatura estacionales.

Para explicar la gran complejidad del régimen de CO₂ de la Tierra hay que presentar también el tema de la Profundidad de Compensación del Carbonato (CCD Carbonate Compensation Depth) de los océanos que cubren casi un 71 % de la superficie terrestre. Los carbonatos (calcio, rocas ricas en CaCO₃) llegan a los océanos por la meteorización de rocas ricas minerales del calcio, como también por los restos calcáreos de organismos muertos en los propios océanos (foraminíferos, moluscos, etc.). La solubilidad del CO₂ en el agua de los océanos aumenta con la profundidad, es decir con el descenso de la temperatura y el aumento de la presión hidrostática. Eso resulta en que a grandes profundidades (4.000 – 5.000 m, dependiendo de la región) todo el calcio contenido en los sedimentos se disuelve debido a las elevadas concentraciones de CO₂ formándose bicarbonato de calcio porque ha incorporado CO₂ y que esta disuelto en el agua de mar según la siguiente fórmula:



De esta manera los océanos pueden almacenar grandes cantidades de CO₂. Sin

embargo, los océanos devuelven este CO₂ almacenado otra vez a la atmósfera cuando se calienta el agua de los océanos a consecuencia de un aumento de temperatura. Desde el punto de vista geológico este fenómeno de la Profundidad de Compensación del Carbonato tiene un gran significado diagenético, porque explica por qué no se pueden formar sedimentos calcáreos por debajo de esa profundidad límite, tan sólo arcillas abisales.

También en la atmósfera existe un acoplamiento de los cambios de concentración entre el H₂O (vapor de agua) y el CO₂, cuya intensidad es diferente en el ecuador y en las altas latitudes, algo probablemente del mismo estilo que el ozono (ver más abajo en el Capítulo 10). Como antes se ha mencionado en la discusión de los cambios cíclicos de la inclinación del eje rotatorio de la Tierra (la Oblicuidad) y su “cabeceo” (la Precesión), estas variaciones periódicas de los parámetros astrofísicos tienen una gran influencia en la acentuación de las estaciones, en consecuencia, en los cambios de temperatura de la atmósfera y de los océanos, y a fin de cuentas en las concentraciones del vapor de agua y del CO₂, del ozono y de otros gases en la atmósfera terrestre incluido el oxígeno. Todo demuestra lo complejo que es el sistema agua-aire de la Tierra.

Los modelos de simulación del clima asistidos por computadores no consiguieron hasta ahora reproducir correctamente el pasado geológico del clima terrestre, por lo que con menos razón todavía pueden predecir la futura evolución del clima a largo plazo. No es por lo tanto de extrañar que las actuales extrapolaciones para sólo los próximos 100 años varíen entre 0,5 y 10°C para un futuro aumento de la temperatura media global. KASPAR & CUBASCH (2007), por

ejemplo, presentan un punto de partida interesante incluyendo también los parámetros astronómicos en sus modelos de simulación climática. WILSON (2019) discute detalladamente la relación entre la temperatura y el contenido de CO₂ en la atmósfera y advierte de la influencia de una subida de temperatura en la troposfera de la estratosfera suprayacente relacionado con una pérdida de energía por reducción de radiación, lo que puede conducir por otra parte a una retroacción refrigerante de la troposfera. Él, como la predominante mayoría de los especialistas en ciencias naturales, llega a la conclusión de que el cambio climático no se puede atribuir en primer lugar a un aumento de las concentraciones de CO₂.

Terminando este capítulo, me permito plantear las siguientes preguntas. ¿Por qué periódicamente, más o menos en las mismas fechas del año, hay una penetración de frío en primavera cuando ya despedimos el invierno: los llamados Santos del frío (San Evelio, San Pancracio, etc.) en mayo, y el Frío de la oveja en junio en Centroeuropa? ¿Por qué los postulados y actualmente “extremadamente” altos contenidos de CO₂ en la atmósfera causando el “calentamiento global del clima” no están desactivando o suavizando estas penetraciones de frío? ¿O es que los procesos climáticos y meteorológicos son más complejos que la simple fórmula “CO₂ = calentamiento global = cambio climático”?

En Centroeuropa en mayo ya predominan generalmente temperaturas relativamente elevadas (>20°C) en el continente (tierra firme). Sin embargo, el Atlántico Norte todavía es claramente más frío (<15°C). Esta diferencia de temperatura, entre el continente y el océano, facilita la formación de frentes de bajas presiones

cuando corrientes de aire fríos bajan desde las regiones polares hacia en sur. Eso puede causar heladas tardías superficiales en los campos en noches despejadas y estrelladas. El postulado “efecto invernadero” por la capa de CO₂, antes mencionado, no protege de esta situación.

La única constante periódica de relevancia meteorológica en esta época del año, a mediados de mayo, en el hemisferio norte, es la altura del Sol en la transición entre los días equinoccio (duración igual del día y de la noche) al inicio de la primavera sobre el 20 de marzo, cuando la posición del Sol al medio día está exactamente recta (perpendicular) justamente por encima del ecuador (latitud 0°), y la máxima altura del Sol al inicio de verano sobre el 20 de junio, cuando el Sol está en el cenit (perpendicular) justamente por encima del trópico septentrional (del Cáncer, latitud de 23,4°). De acuerdo con la ecuación del tiempo como función de la declinación del Sol, a mediados de mayo se llega al 80% de la máxima altura del Sol. Eso significa que las masas continentales de Centroeuropa ya están muy calientes, mientras las masas de agua del Atlántico Norte todavía están demasiado frías como para que haya tan altas diferencias de temperatura como las mencionadas anteriormente.

LA PARTE FRÍA DE LAS ERUPCIONES DE VOLCANES

Hace unos 200 años (en 1815) el volcán Tambora, en Indonesia, entró en erupción y lanzó a la atmósfera enormes cantidades de partículas finas de ceniza, muchas más que el volcán Mount St. Helens 1980 (y ya antes en 1800) en los E.E.U.U., o el volcán Eyjafjallajökull en 2010 en Islandia. Durante este tipo de erupciones volcánicas ex-

plosivas las partículas de ceniza ultrafinas (los llamados aerosoles) suben por encima de tropopausa, que es la zona de transición entre la troposfera (donde tienen lugar los sucesos meteorológicos, ver también la Figura 45), y la estratosfera, situada entre unos 9 km de altura en la región de los polos y unos 17 km en el ecuador, se extienden por todo el planeta, oscurecen la atmósfera terrestre y sirven sobre todo como base para la nucleación de gotas de agua alrededor de cada partícula. Después de la erupción del Tambora, en 1816, en el hemisferio norte, p.ej. en Europa, se hizo famoso el “verano sin sol”, acompañado de malas cosechas, elevada mortalidad de animales domésticos y serias hambrunas. Un efecto secundario fueron las impresionantes puestas de sol de la época Biedermeier en Centro Europa con sus matices sombreados de rojo, naranja y violeta documentados por varios pintores famosos de la época.

La Figura 42 presenta la nube de ceniza de forma de seta del, relativamente pequeño, volcán Raikoke que forma parte de la cadena de islotes entre Japón y Rusia que subió hasta la estratosfera por encima de la capa de nubes, por encima de los 13 km. Los

fenómenos de muy intensivas erupciones volcánicas que afectan la atmósfera globalmente pueden durar hasta 3 años después de la erupción. Aparte de los grandes volúmenes de aerosoles, que afectan negativamente a la temperatura terrestre, llegan a la atmósfera también muy grandes volúmenes (cientos de millones de toneladas) de CO₂, gases sulfurosos y vapor de agua, lo que muchas veces tampoco se tiene en cuenta en la discusión climática. El cambio de la temperatura y de la emisión de CO₂ por actividades volcánicas entra muy raras veces en la actual discusión del clima y en los modelos climáticos matemáticos. Sobre todo, las enormes actividades volcánicas submarinas, p.ej. en la zona de las dorsales atlánticas con miles de kilómetros de longitud, a la que pertenece también Islandia, emiten grandes cantidades de CO₂. Las actividades volcánicas e hidrotermales submarinas de la corteza oceánica están relacionadas, sobre todo, con los límites de activas placas tectónicas y por encima de anomalías térmicas de tipo “hotspot”. El lanzamiento de lava (Figura 49-A) y de humo en los llamados “black smokers” (Figura 49-B) son impresionantes ejemplos.



Figura 48. Nube de cenizas del relativamente pequeño volcán Raikoke (parte de la cadena de islotos entre Jao y Rusia) que subió hasta la estratosfera por encima de la capa de nubes, encima de los 13 km; fotografía del 22 de Juni de 2019 por parte del ISS (NASA Earth Observatory).

Figura 49: Ejemplos de actividades volcánicas e hidrotermales submarinas: lanzamiento de lava en las dorsales mediooceánicas (A) y de suspensiones de partículas en los llamados “black smokers” (B); Fotos: Wikipedia.

¿QUÉ PASÓ CON EL AGUJERO DEL OZONO?

El Ozono O₃ es una modificación de alta energía del Oxígeno (O₂). La molécula está compuesta de 3 átomos de Oxígeno y se forma en la estratosfera (referirse a la Figura 39) en una altura de 20 a 50 km (sobre el nivel del mar) por la acción de la radiación ultravioleta del Sol. El Ozono atmosférico está distribuido por la estratosfera en la llamada capa de ozono que es donde alcanza su máxima concentración. A bajas latitudes (hacia el ecuador) la capa de ozono se encuentra a una altura de unos 26 km. En altas latitudes (hacia los polos) la capa de ozono baja por debajo de 20 km. La capa de ozono es extremadamente importante porque re-

tiene (absorbe) gran parte de la radiación ultravioleta y así sólo una pequeña parte penetra la capa de ozono hasta llegar a la superficie de la Tierra. Durante el proceso de absorción una parte de la energía de radiación se convierte en calor por lo cual el ozono hace un papel importante en el balance térmico de la atmósfera, o sea el ozono produce también un efecto climático.

Los fuertes y estables ciclones polares de la Antártida (Polo Sur) son causa de muy bajas temperaturas (hasta unos -80°C) en el centro de estos ciclones antárticos. Sin embargo los ciclones polares (del Polo Norte) no alcanzan temperaturas tan bajas por lo cual no se presenta una reducción de la capa de ozono tan fuerte como en la Antártida. El “agujero” de ozono no es un agujero en

el sentido estricto, sino se define como una reducción a más de la mitad del espesor de la capa de ozono. La palabra agujero en este

contexto es por lo tanto en realidad no muy correcto o más bien engañoso.

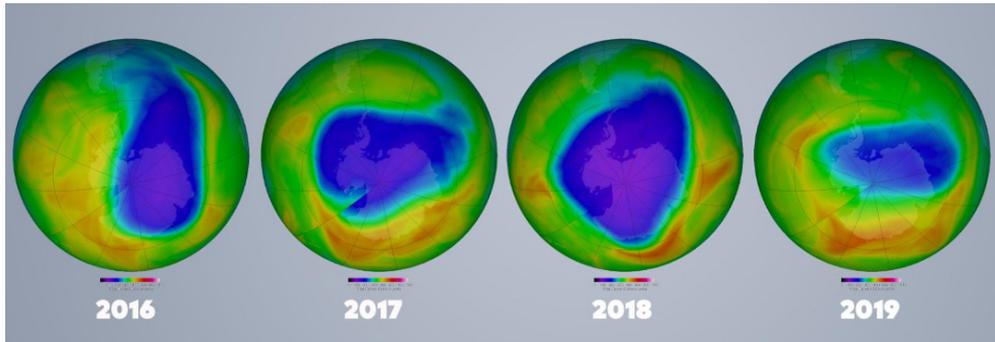


Figura 50. Evolución (durante los últimos 4 años) del “agujero” de ozono, o sea de una capa de ozono de espesor reducido, encima de la Antártida. La capa de reducido espesor encima de la Antártida es la más pequeña de los últimos 30 años; datos de la NASA (https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/monthly/monthly_2019-11_SH.html).

La posición como también el espesor de la capa de ozono cambia mucho según la época del año. En primavera es más estable y en otoño más débil. Además, se observa una fuerte influencia por procesos de transporte horizontales y verticales en la atmósfera que se relacionan con corrientes cambiantes que son determinantes para el tiempo. A finales del invierno del hemisferio Sur sucede una fuerte reducción de la concentración de ozono en la estratosfera antártica que es mucho más pronunciada que en el Ártico (Polo Norte). Después, terminándose las noches antárticas, cuando la atmósfera polar empieza a calentarse de nuevo, es cuando entran corrientes atmosféricas ricas en ozono de las bajas latitudes (desde el ecuador) y acaban con la reducción de la capa de ozono estratosférico de la Antártida.

El invierno ártico de 2019/2020, por ejemplo, del hemisferio norte fue extrema-

mente frío lo que causó una disminución del espesor de la capa de ozono encima de la región ártica. La razón para la disminución de ozono fueron los fuertes y continuos ciclones (remolinos) polares en la región ártica. El fenómeno meteorológico de muy bajas temperaturas y fuertes vientos se llama también “vórtice polar”. Durante las noches polares de principios de 2020 las temperaturas bajaron hasta -80°C a una altura de 20 km, lo que quiere decir en la estratosfera (ver la Figura 45), lo que causó con mayor frecuencia la formación de llamadas nubes nacaradas. Este tipo de nubes contienen altos contenidos en ácidos sulfúrico y nítrico liberados, que sirven como núcleos de condensación para el crecimiento de cristaltos de hielo a partir de vapor de agua. En las superficies de los cristaltos de hielo ocurren reacciones químicas que destruyen el ozono.

Cuando el Sol cogió fuerza a principios de mayo de 2020, se acabó este proceso de la disminución extrema del espesor de la capa de ozono en la región ártica. Recordar lo que se dijo un poco más atrás respecto a la altura del Sol con respecto a las heladas tardías de los Santos del frío. La reducción de la capa de ozono en la región polar se está repitiendo también en el invierno del 2020/2021, es decir ocurre, aparentemente, durante todos los inviernos polares. Fluctuaciones estacionales de este tipo en el espesor de la capa de ozono demuestran claramente la influencia de los relativamente cortos episodios meteorológicos extraordinarios en el desarrollo de la capa de ozono. Quiere decir, a pesar de que la concentración de los gases refrigerantes clorofluorocarbonos (CFC) en la atmósfera ha disminuido más del 20% durante los últimos 20 años, el espesor de la capa de ozono en la región ártica se ha reducido también considerablemente por circunstancias de extremo frío en el invierno ártico del año 2020. Este fenómeno de nuevo cuestiona la tan propagada influencia, extremadamente negativa, de los gases CFC en el desarrollo de la capa de ozono.

La distribución y los cambios de la concentración de ozono resultan de procesos atmosféricos muy complejos, en parte todavía no completamente entendidos, y por supuesto de la insolación y actividad del Sol, a la que corresponde también la actividad periódica de las manchas solares antes mencionada. De todas formas, es un hecho actual que el agujero de ozono de la Antártida es hoy día tan pequeño como nunca lo fue durante los últimos 30 años (ver la Figura 50). Los científicos en el tema in-

cluso opinan que el “agujero” de ozono va a continuar a cerrándose, o sea que el espesor de la capa de ozono de la Antártida va a crecer más todavía en el futuro. El crecer y disminuir de la capa de ozono de la Antártida probablemente también está sujeto de periódicos cambios naturales. Como la observación de la distribución global del ozono en la atmósfera sólo empezó con los primeros satélites a principios de los años 70 del siglo pasado, sólo el futuro va a sacarlo a la luz, como también los datos y resultados científicos del Parker Solar Probe, que salió de la Tierra hacia el Sol en 2018 y que debe acercarse al Sol hasta unos 6 millones de kilómetros en los próximos años.

HABLANDO DE OSOS POLARES E HIPOPÓTAMOS

Un solitario oso polar encima de un pequeño témpano de hielo es el símbolo o icono para la catástrofe climática causado por el hombre. Los huesos más viejos encontrados de un oso polar tienen una edad de 130.000 años lo que quiere decir que su especie ya existe desde el comienzo de la última Época glacial. Como el oso polar y el oso pardo son híbridos, se pueden cruzar entre ellos sin problemas. Fundándose en investigaciones de ADN, el oso polar tiene su origen en el oso pardo como evolución adaptándose al cambio climático a principios de la última gran Época glacial. Aquí también hay que relativizar este tema tan emocional y fijar la atención en el vaivén de especies al largo de la historia de la Tierra. No hay que ir muy lejos en el pasado.



Figura 51. La foto izquierda presenta una antigua playa de cantos de la anterior Época cálida Eem (hace 126.000 – 115.000 años), que hoy día se encuentra a 5-6 m por encima del actual nivel del mar (Isla de Ons, NO de España); gráfica derecha: diferentes estados del nivel del mar durante la Época cálida Eem (a), durante la Época glacial Würm (b) y desde el comienzo de la actual Época cálida del Holoceno hasta hoy (c, d, e); de VIDAL ROMANÍ et al. (2018).

Entre las últimas dos Épocas glaciales hubo un período cálido (la Época cálida del Eem) que duró unos 11.000 años (referirse a la Tabla 1 y la Figura 8). Las temperaturas globales medias fueron unos grados más alto que hoy día, los casquetes polares se deshelaron más que hoy y en consecuencia el nivel de los océanos subió varios metros por encima del actual nivel del mar. Se pueden observar en muchas costas formando terrazas o playas marinas (hoy en día secas) testigos de un nivel del mar por encima del nivel actual. Por ejemplo, en las costas atlán-

ticas del noroeste de España (en Galicia) se pueden observar muchas de estas antiguas playas de cantos correspondientes a la anterior Época cálida del Eem (Figura 51). La figura 52 presenta los restos de un bosque fósil del Holoceno de una edad de unos 7.000 años, que se formó sobre una terraza de cantos de la Época cálida interglacial del Eem hace unos 126-115.000 años. En la actualidad estos restos de bosque se encuentran en la zona de pleamar (Playa de Cobas, Ferrol (NO de España), según VIDAL ROMANÍ y GRANDAL d'ANGLADE (2018)).



Figura 52. Restos de un bosque fósil del Pleistoceno final - Holoceno de una edad de unos 7.000 años, que se formó en una terraza de cantos de la Época cálida interglacial del Eem (entre las últimas épocas glaciales del Riss y del Würm hace unos 126-115.000 años) y que se encuentra en la actualidad en la zona de pleamar (Playa de Cobas, Ferrol (NO de España), según VIDAL ROMANÍ (2018)).

Durante el anterior período cálido Eem, varios grandes mamíferos vivieron en Europa Central, como p.ej. en el valle del Alto Rin, pero también en Dinamarca, aunque hoy en día ya no pueblan Europa y sólo se pueden observar en África al sur del desierto Sahara (p.ej. FREY et al. 2018). Se trata de los pequeños elefantes de bosque, rinocerontes de bosque, hipopótamos de bosque y búfalos de agua entre muchos otros (ver

la Figura 53). Al comienzo de la última Época glacial, hace unos 115.000 años, estos grandes mamíferos de ambientes cálidos y húmedos desaparecieron de Europa Central, y probablemente se retiraron hacia Asia, siendo reemplazados por sus parientes lanudos que sobrevivieron mejor el nuevo ambiente helado. Pero también a ellos les sorprendió el mismo destino trágico al final de la última Época glacial.

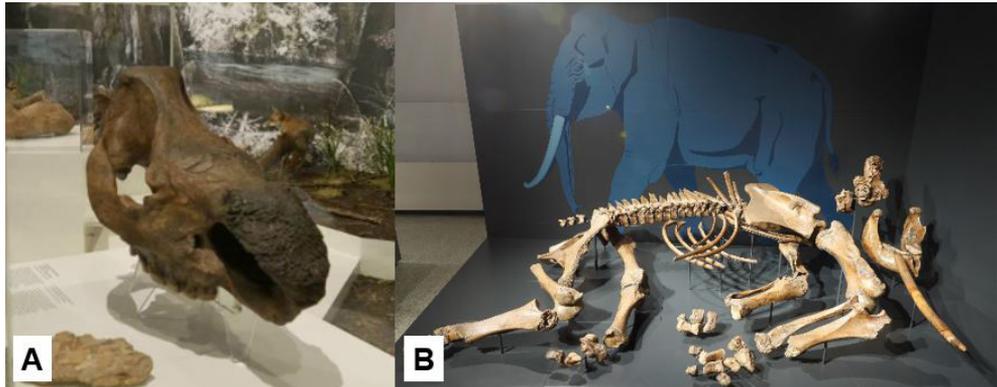


Figura 53-A. Cráneo de rinoceronte de bosque de la Época cálida Eem encontrado en 1802 en Daxlanden (Karlsruhe, Alemania); 53-B: esqueleto de un elefante de bosque de la Época cálida del Eem encontrado en el valle del Alto Rin (Museo del estado federal de Hesse, Darmstadt, Alemania).

Pensemos en el mamut lanudo, el rinoceronte lanudo, el ciervo gigante, el oso de las cuevas, los tigres de dientes de sables, etc. ¿Dónde están hoy? Todos ellos desaparecieron en pocos miles de años al final de la última Época glacial, cuando subieron las temperaturas por el último gran cambio climático natural hace unos 12.000 años. De los mamíferos de estos tiempos glaciales hoy en día todavía quedan algunos, p.ej. los renos en el norte de Escandinavia y de Rusia, como también los osos polares. En particular, el oso polar parece que es un genio de la supervivencia porque sobrevivió aparentemente el Máximo de calor, el “Óptimo Atlántico”, de hace unos 8-9.000 años, cuando las temperaturas eran más altas que hoy. También sobrevivió la época más cálida (comparado con hoy) de los tiempos romanos hace 2.000 años y la de la Alta Edad Media hace unos 800 años. Seguramente va a aguantar también los próximos cientos o miles de años hasta la siguiente Época glacial – aunque sea nuevamente como emi-

grante ehacia las regiones ocupadas ahora por los osos pardos.

UN TEMA RELACIONADO – LAS PARTÍCULAS FINAS

Para terminar, me permito hacer una digresión sobre el tema de las partículas finas que encaja sólo indirectamente en la discusión del clima, pero está relacionado con factores y efectos meteorológicos, como son el viento, la presión atmosférica, la temperatura, etc. Especialmente en relación con las mediciones de las partículas finas en las ciudades (p.ej. Figura 54), llama la atención que apenas hay datos disponibles sobre la composición mineralógica de las partículas finas, quiere decir el análisis de los tipos de fases minerales (análisis cualitativo) y de la concentración de cada fase mineral (análisis cuantitativo). Este análisis podría inequívocamente indicar el origen de las partículas finas y su contribución cuantitativa al cambio climático. ¿Qué parte

de estas partículas finas es de origen antropógeno (“tecnogeno”), qué parte es de origen natural (“geogeno” o “biogeno”)? Cada obra pública o privada (arenas finas), campos, prados, parques y bosques cercanos (partículas de suelo y pólenes), arenales, canteras de arena, yacimientos

de loess (arenas finas), montañas y formaciones rocosas (de areniscas, granitos, etc.), arenas del Sahara (traídas por los vientos del sur), cenizas volcánicas (traídas desde miles de kilómetros), etc. pueden contribuir a las partículas finas medidas en nuestras ciudades.

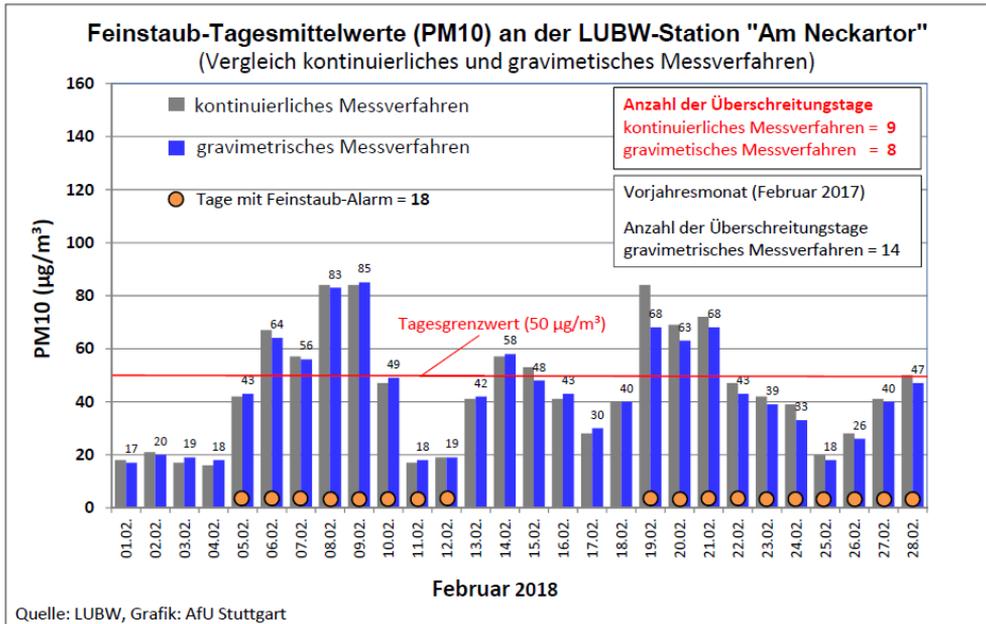


Figura 54. Típica presentación de los valores medios diarios de las partículas finas, aquí en el mes de febrero del año de 2018 en un punto de medición en Stuttgart (Alemania). PM10 significa que el tamaño de las partículas no es mayor a 10 µm (0,01 mm). La línea roja marca el límite diario (“Tagesgrenzwert”) de 50 µg/m³ de partículas de PM10 por día sin diferenciar el origen de las partículas finas; de www.stadtklima-stuttgart.de.

La influencia de las partículas finas de las ciudades en el cambio del clima se enfoca generalmente diciendo que se deben a la actividad de los automóviles, aunque en realidad sólo contribuyen en parte a las partículas finas que existen en las ciudades. Según las diferentes fuentes de información la circulación de los automóviles es responsable entre una quinta y una ¼ parte de las

partículas finas que existen en las ciudades. La mitad de esta parte, quiere decir un 10-12,5 % del total, se atribuye a partículas de hollín procedentes de los coches de diesel. Tenemos que decir que en las ciudades hay también otras fuentes para el hollín, como es el uso doméstico e industrial de diferentes combustibles. La otra mitad del polvo relacionada con los automóviles tiene su

origen en el desgaste de los neumáticos, de los frenos y de los embragues, entre otros, algo común también con los coches eléctricos. Sería deseable y necesario determinar la composición de las partículas finas cualitativa- y cuantitativamente, p.ej. cómo se realizó en la ciudad austriaca de Graz (Trimbacher y Neinavaie, 2000). En base a los estudios mineralógicos, se comprobó que cerca del 60 % era de origen “geogénico”, y un 30 % de origen “tecnogénico” y el resto de origen “biogénico”. En regiones donde se aplica sal y la gravilla en las carreteras en invierno, estos dos componentes también pueden añadirse a las partículas finas en las ciudades.

El loess es una partícula fina „geogena“ muy especial y nos lleva de nuevo a

los cambios climáticos en épocas pasadas. Se formó en épocas glaciales por meteorización física (abrasión mecánica) y térmica de rocas. Los vientos glaciales llevaron las partículas más finas a las regiones libres de hielo alrededor de los glaciares continentales donde formaron depósitos sedimentarios de hasta docenas de metros de espesor. El loess es un sedimento eólico y se caracteriza por su específica granulometría selectiva, principalmente granitos de pocas micras ($1 \mu\text{m} = 1 \text{ micra} = \text{milésima parte de } 1 \text{ mm}$) hasta varias docenas de micras de diámetro, y la forma preferentemente angulosa de sus granos que facilita la muy buena estabilidad de declives y desfiladeros escarpados, típicos para los paisajes del loess (Figura 55-A).



Figura 55-A. Declives y desfiladeros escarpados son típicos para los paisajes del loess; foto: WIKIPEDIA: declive de loess en la cercanía de Vicksburg (Mississippi, EEUU); 55-B: ejército de guerreros de terracota del emperador de Qin Shi Huangd en China Central que se encuentran en fosas excavadas en sedimentos de loess; foto: mauritius images / CuboImages / Carlo Borlenghi de <https://www.geo.de/magazine/geo-epoche/19753-rtkl-terrakotta-armee-chinas-erster-kaiser-und-sein-monumentales-erbe>.

Típicos paisajes del loess se encuentran por ejemplo en el suroeste de Alemania (en las zonas del Kaiserstuhl y del Kraichgau), en los alrededores de Albacete (sureste de España) o en China. En China se forman todavía depósitos del loess en la actualidad, sobre todo cuando los fuertes vientos del Desierto de Gobi soplan los polvos de

partículas muy finas hacia el sur. En lugares donde se mezclan con las aguas de escorrentía (arroyos, ríos, lagos, etc.), éstas presentan un color turbio amarillo como por ejemplo el famoso Río Amarillo Huang He. En el norte de China, en la provincia de Mongolia Interna, la meseta del loess pasa gradualmente a las arenas del Desierto de

Gobi. La cobertura del loess llega a tener espesores generalmente por encima de los 100 metros. Un hallazgo muy espectacular de loess ese relaciona con el famoso ejército de guerreros de terracota del emperador de Qin Shi Huangd en China Central, que se remontan al siglo II BC (antes de Cristo). Las fosas donde se sitúan en fila los guerreros de terracota fueron excavadas en sedimentos de loess. El loess sirvió también como materia prima para los muros de barro compactados entre las filas de los guerreros de terracota (Figura 55-B).

Los suelos desarrollados sobre loess y suelos con altos contenidos en loess, son muy importantes para la agricultura porque son muy ricos en minerales y garantizan un alto rendimiento de las cosechas. Los depósitos de loess son normalmente muy calcáreos, sobre todo cuando predominan calizas en la región de origen. Por otro lado, en regiones de abundantes paisajes del loess, las partículas muy finas del loess meteorizado pueden ser transportadas por el viento a gran distancia alcanzando poblaciones y ciudades incrementando considerablemente en el aire la fracción de partículas finas. De esta manera los vientos del norte traen las partículas finas de loess desde el desierto de Gobi hasta la capital china de Pekín agravando la ya de por sí crítica situación de esta urbe. También en Europa hay numerosos ejemplos donde las partículas finas de loess llegan a las ciudades. Por ejemplo, en el altiplano al sur de Stuttgart se depositaron hasta 4 metros de loess durante el último período glacial que hoy día puede ser excavado por grandes obras y labores de campo y ser llevado por los vientos hacia la ciudad formando parte de las partículas finas “geogénicas”. Por otra parte estos fenómenos, no son nada extraordinario en Europa, pues

incluso a Europa Central, llegan las arenas muy finas desde el desierto del Sahara.

EPÍLOGO:

Como hemos visto estamos rodeados de innumerables testigos de cambios climáticos del pasado que inicialmente se debieron a la cambiante posición de la Tierra con respecto al Sol, a las variaciones en la intensidad de insolación y a los cambios en la actividad de nuestro Sol. Resumiendo lo arriba dicho, pensar que la especie humana pueda decidir o atribuir a su actividad que la temperatura media global pueda o no subir un máximo de 2°C durante los próximos 20-25 años es irreal, absurdo e incluso raya en megalomanía. Mientras dura el actual y corto (en tiempo geológico) período cálido, antes de sumir a la humanidad otra vez en una Época glacial por unos cien mil años, debemos estar agradecidos por poder disfrutar tiempos cálidos ahorrando una gran cantidad de energía en la calefacción. En vez de focalizarse en un activismo de clima exagerado y contraproducente, sería más fructífero preocuparse como la humanidad podría sobrevivir a la siguiente época glacial, que puede durar de nuevo unos 100.000 años, y reflexionar de dónde habrá que sacar las enormes energías de calefacción necesarias que probablemente no puedan ser cubiertas por las actualmente conocidas como energías renovables.

Suponiendo que las temperaturas (y en consecuencia el nivel de los océanos) siguen subiendo durante los próximos cientos o miles de años alcanzando los niveles de anteriores épocas cálidas, como por ejemplo el último período interglacial Eem hace 126.000 –115.000 años, habría que concienciarse de la necesidad de hacer importantes inversiones en el apartado de traslados de

poblaciones y de construcción de diques de protección litoral como los que se realizan por ejemplo en Holanda desde la Alta Edad Media. El actual activismo contra el CO₂ no es solución sino desenfoca totalmente las razones reales, incluso es contraproducente porque devora miles de millones de dólares que habría que invertir en lo antes dicho. Con la subida de la temperatura de la atmósfera, la concentración del CO₂ en la atmósfera puede continuar a subir, lo que en primer lugar depende de la cambiante intensidad de radiación solar que llega a la Tierra que está sometida a cambios periódicos de los parámetros astrofísicos del movimiento de la Tierra alrededor del Sol como también de cambios cíclicos de la propia actividad solar.

Si la distancia de la Tierra al Sol es de unos 141 o unos 159 millones de kilómetros, las posiciones extremas durante una excentricidad máxima, son cruciales para la evolución de la temperatura en la Tierra. Sobre todo, para la formación de nuevas capas de hielo en el hemisferio norte, con mayor presencia de continentes, lo que tendrá una gran influencia si la máxima distancia Sol – Tierra (en el afelio) disminuye durante los meses de invierno o de verano del hemisferio norte. En una palabra, la evolución de la temperatura, respectivamente el régimen de calor, de la atmósfera terrestre y de los océanos depende en primer lugar del nivel de la energía solar que llega a la Tierra y no de la cantidad de CO₂ en la atmósfera terrestre.

Lo más pernicioso en la actual discusión dogmática e ideológica sobre el clima y del tema de las partículas finas es que se imponen unas medidas y disposiciones que no están íntegramente fundamentadas en las verdaderas causas naturales por lo que no pueden proporcionar los efectos deseados y

necesarios. Peor todavía, como no dan los resultados deseados, se aprueban cada vez más restricciones que tampoco dan resultados, desembocando en una espiral sin fin. Aparentemente varios políticos europeos y grupos de interés internacionales consideran y aprovechan la actual crisis del coronavirus como una muy buena oportunidad para reducir las emisiones de CO₂ en la Tierra para parar el cambio climático. Eso se realiza mediante restricciones en la libertad de viajar y la reducción de sectores industriales completos, como es la industria del automóvil, el turismo, etc., aceptando la destrucción de propiedades individuales y empresariales.

En vez de focalizarse en un activismo climático exagerado y contraproducente, sería más racional y metódico reflexionar sobre los desafíos que suponen para la humanidad los permanentes cambios climáticos naturales y como solucionar sus efectos negativos. Habría que pensar como trasladar a poblaciones enteras y como intensificar las medidas de defensa de las costas por la continua subida del nivel del mar durante los próximos siglos. Además, habría que prepararse para el siguiente período de frío o Época glacial marcada de una muy alta demanda de energía calorífica que no podrá ser cubierta sólo con las energías alternativas actuales. Hay que recordar que los volúmenes de hielo de la siguiente gran Época glacial, que pueda durar nuevamente más de cien mil años, podría alcanzar más del doble de volumen de los restos glaciares de la actualidad lo que significaría también una masiva evacuación de poblaciones en el hemisferio septentrional, sobre todo en el hemisferio norte.

Para prevenir cualquier prejuicio o malentendido, hay que acentuar que lo antes explicado con respecto a los cambios

climáticos naturales no debe interpretarse como algo que nos pueda eximir de la responsabilidad de cuidar los recursos naturales o el medio ambiente – al contrario – pero habría que actuar con razonable y proporcionada moderación, sin una moralización dogmática o una histeria exaltada. Por lo cual me permito terminar con las palabras de José Ortega y Gasset: „Yo soy yo y mi circunstancia (STU: en el sentido del entorno regional, temporal y mental), y si no la salvo a ella no me salvo yo“.

BIBLIOGRAFÍA:

- AEMET, 1980. Calendario Meteoro-Fenológico. Tabla de “Números relativos de manchas solares”. pp. 127. Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Madrid.
- Amos, J. 2013. Antarctic ice volume measured. <https://www.bbc.com/news/science-environment-21692423>
- Archer, D. 2006. Fate of fossil fuel CO₂ in geologic time. *Journal of Geophysical Research of Oceans* 110, C09S05, <https://doi.org/10.1029/2004JC002625>.
- Auer, I., Foelsche, U. 2014. Vergangene Klimaänderungen in Österreich. *Austrian Assessment Report 2014, Volume 1, 3*, 228-299.
- Buchner, N., Buchner, E. 2011. *Klima & Kulturen*, Greiner Verlag, Basel.
- Berner, U., Streif, H. 2004. *Klimafakten*. Monographien von BGR und LBEG. Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart.
- Caillon, N., Severinghaus, J.P., Jouzel, J., Barnola, J.-M., Kang, J., Lipenkov, V.Y. 2003. Timing of atmospheric CO₂ and Antarctic temperature changes across Termination III. *Science* 299, 1728-1731. <https://doi.org/10.1126/science.1078758>
- Clottes, J., Courtin, J. 1995. *Grotte Cosquer bei Marseille – Eine im Meer versunkene Bilderhöhle*. Jan Thorbecke Verlag, Stuttgart.
- Crutzen, P.J., Graedel, T.E. 1994. *Chemie der Atmosphäre: Bedeutung für Klima und globale Umwelt*. Spektrum Akademischer Verlag Berlin.
- Davies, B. 2019. What is the global volume of land ice and how is it changing? <https://www.Antarcticglaciers.org/glaciers-and-climate/>
- Deutscher Wetterdienst (DWD) Jahresstatusbericht. 2003. <https://www.ksb.dwd.de>.
- Frey, E., Gebhardt, U. 2018. Flusspferde am Oberrhein – Wie war die Eiszeit wirklich? *Karlsruher Naturhefte* 6, 160 pp. Staatliches Museum für Naturkunde, Karlsruhe.
- Gabrielli, P. et al. 2016. Age of the Mt. Ortles ice cores, the Tyrolean Iceman and glaciation of the highest summit of South Tyrol since the Northern Hemisphere Climatic Optimum. *The Cryosphere*, 10, 2779- 2797. <https://doi.org/10.5194/tc-10-2779-2016>
- Ganopolski, A., Winkelmann, R. & Schellnhuber, H.-J. 2016. Critical insolation-CO₂ relation for diagnosing past and future glacial inception. *Nature* 534, 19-20. <https://doi.org/10.1038/nature16494>
- GEOMAR (PR vom 04.09.2014). Die Sonne steuerte das Klima in der Eiszeit. <https://www.geomar.de>.
- Grube, N. 2016. *Maya – Das Rätsel der Königsstädte*. Historisches Museum der Pfalz Speyer. Hirmer Verlag, Munich.
- Hannon, R. 2020. Greenland Ice Core CO₂ Concentrations Deserve Reconsideration. *Watts Up With That?* January 7, 2020.

- Haug, G.H., Günther, D., Peterson, L.C., Sigman, D.M., Hughen, K.A., Aeschlimann, B. 2003. Climate and the Collapse of Maya Civilization. *Science* 299, 1731-1735. <https://doi.org/10.1126/science.1080444>
- Holzhauser, H.P. 1985. Neue Ergebnisse zur Gletscher- und Klimageschichte des Spätmittelalters und der Neuzeit. *Geographica Helvetica* 40, 168-185.
- Holzhauser, H.P., Magny, M. & Zumbühl, H.J. 2005. Glacier and lake-level variations in west-central Europe over the last 3500 years. *The Holocene* 15 (6), 789-801. <https://doi.org/10.1191/0959683605hl853ra>
- Huybers, P. 2006. Early Pleistocene glacial cycles and the integrated summer insolation forcing. *Science* 313, 508-511. <https://doi.org/10.1126/science.1125249>
- Kaspar, F. & Cubasch, F. 2007. Das Klima am Ende einer Warmzeit. Der belebte Planet II, Fachbereich Geowissenschaften der Freien Universität, Berlin.
- Kent, D.V., Olsen, P.E., Rasmussen, C., Lepre, Ch., Mundil, R., Irmis, R.B., Gehrels, G.E., Giesler, D., Geissman, J.E., Parker, W.G. 2018. Empirical evidence for stability of the 405-kiloyear Jupiter-Venus eccentricity cycle over hundreds of millions of years. *PNAS* 115 (24), 6153-6158. <https://doi.org/10.1073/pnas.1800891115>
- Klostermann, J. 2009. Das Klima im Eiszeitalter. Schweizerbart'sche, Stuttgart.
- Köppen, W., Wegener, A. 1924 (2015 reprint). Die Klimate der geologischen Vorzeit – The Climates of the Geological Past. Faksimile-Nachdruck incl. Übersetzung in Englische, 657 pp. Borntraeger, Stuttgart.
- Krafft, M. 2020. private local information by email of 29.02.2020.
- Laskar, J., Robutel, P., Joutel, F., Gastineau, M., Correia, A.C.M., Levrard, B. 2004. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth. *Astronomy and Astrophysics* 428, 261-285. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041335>
- Lauer, T., Weiss, M. 2018. Timing of the Saalian and Elsterian glacial cycles and the implications for Middle Pleistocene hominin presence in central Europe. *Scientific Reports* 8, 5111. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23541-w>
- Levandoux, L. 1956. Les populations sauvages et cultivées de *Vitis vinifera*. *Annales de l'amélioration des plantes*, pp. 59-118. Presses Universitaires de France.
- Lisiecki, M.L., Raymo, M.E. 2005. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Palaeoceanography* 20, PA1003. <https://doi.org/10.1029/2004PA001071>
- Lüdeke, H.-J. 2010. CO₂ und Klimaschutz. Bouvier Verlag, Bonn.
- Marcott, S. A., Shakun, J.D., Clark, P.U., Mix, A.C. 2013. A Reconstruction of Regional and Global Temperature for the Past 11,300 Years. *Science* 339, 1198-1201. <https://doi.org/10.1126/science.1228026>
- Milankovitch, M. 1930. Mathematische Klimalehre und astronomische Theorie der Klimaschwankungen. In: KÖPPEN, W. & GEIGER, R. (Hrsg.): *Handbuch der Klimatologie*. Band 1: Allgemeine Klimalehre. Borntraeger, Berlin 1930.
- Milankovitch, M. 1938. Astronomische Mittel zur Erforschung der erdgeschichtlichen Klimate.- *Handbuch der Geophysik* 9, Berlin.

- Müller-Karpe, H. 1998. *Geschichte der Steinzeit*. Bechtermünz Verlag, Augsburg.
- ÖAW (Österreichische Akademie der Wissenschaften) 2019. <https://www.oeaw.ac.at/oeai/forschung/siedlungsarchaeologie-und-urbanistik/istrien-vizula/>.
- Padín Abal, M. 2017. *Las Villae marítimas en la costa de la Galicia romana*. Universidad de Santiago de Compostela. Tesis de Master, 82 pp.
- PIOMAS, 2019. Arctic Sea Ice Volume Reanalysis. <http://psc.apl.uw.edu/research/projects/arctic-sea-ice-volume-anomaly/>, 3 pp.
- Pohanka, R. 2018. *Die Urgeschichte Europas*. Marixverlag, Wiesbaden.
- POLARPORTAL 2019. Understanding the Greenland Ice Sheet.- <http://polarportal.dk/en/groenlands-indlandsis/nbsp/viden-om-groenlands-indlandsis/>.
- Railsback, L.B., Gibbard, P.L., Head, M.J., Voarintsoa, N.R.G., Toucanne, S. 2015. An optimized scheme of lettered marine isotope substages for the last 1.0 million years, and the climatostratigraphic nature of isotope stages and substages. *Quaternary Science Reviews* 111, 94-106. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.01.012>
- Richter, E. 1891. *Geschichte der Schwankungen der Alpengletscher*.- Z. Deutsch. Österreich. Alpenverein 22, Wien.
- Schaller, M.F., Wright, J.D. & Kent, D.V. 2015. A 30 Myr record of Late Triassic atmospheric pCO₂ variation reflects a fundamental control of the carbon cycle by changes in continental weathering. *GSA Bulletin* 127, 661-671. <https://doi.org/10.1130/B31107.1>
- Schleser, G. & Vos, H. 1993. *Larix sibirica*, ein Archiv der Klimaforschung. *Jber. Kernforschungsanlage Jülich GmbH*, 29-37.
- Schoenitzer, M. & Schoenitzer, K. 2019. Die Planeten (und Zwergplaneten) unseres Sonnensystems. <https://www.schoenitzer.de/Planeten.html>
- Shaviv, J. 2008. Using the Oceans as a Calorimeter to Quantify the Solar Radiative Forcing. *J. of Geophysical Research* 113, A11101. <https://doi.org/10.1029/2007JA012989>
- Sirocko, F. 2012. *Wetter, Klima, Menschheitsentwicklung. Von der Eiszeit bis ins 21. Jahrhundert*. WBG Theiss, Darmstadt.
- Svensmark, H., Enghoff, M.B., Shaviv, N.J., Svensmark, J. 2017. Increased ionization supports growth of aerosols into cloud condensation nuclei. *Nature Communications* 8, 2199. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02082-2>.
- Tarback, E.J., Lutgens, F.K., Tasa, D., 2005. *Ciencias de la Tierra*. Pearson Educación, S.A., Madrid.
- Trimbacher, C., Neinavaie, H. 2002. *Studie zur Ermittlung der Herkunft von Stäben an sechs ausgewählten Messpunkten in Graz*. *Berichte, Band 210*. Umweltbundesamt GmbH, Viena.
- Uglietti, C. et al, 2015. The controversial Age of Kilimandscharo Ice Cap.- In: *Annual Report 2014 of Paul-Scherer-Institut, Laboratory of Radiochemistry and Environmental Chemistry*, page 33.
- Vidal Romani, J.R. 2006. *Calentamiento Global.- Lección Inaugural Curso Académico 2005-2006*, Universidad de La Coruña, 53 pages.
- Vidal Romani, J.R., Grandal d'Anglade, A. 2018. *Nota sobre la última transgresión marina en la costa de Galicia*. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe* 40,

- 229-246. <https://doi.org/10.17979/cad-laxe.2018.40.0.4921>
- Vinós, J. 2018. Nature Unbound X -The next glaciation- <https://judithcurry.com/2018/08/14/nature-unbound-x-the-next-glaciation/>.
- Vinós, J. 2019. Holocene global temperature reconstruction. https://figshare.com/articles/Holocene_global_temperature_reconstruction/9637022.
- Williams, R.S., Ferrigno, J.G., 2012. State of the Earth's cryosphere at the beginning of the 21st century—Glaciers, global snow cover, floating ice, and permafrost and periglacial environments: U.S. Geological Survey Professional Paper 1386–A, 546 pp.
- Williams, R.S., Hall, D.K. 1993. Glaciers, in part VII of Cryosphere of Gurney, In: R.J., Foster, J.L., Parkinson, C.L., eds. Atlas of satellite observations related to global change, pp. 401–422. Cambridge University Press.
- Wilson, I.H. 2019. Does carbon dioxide drive climate change? Australian Institute of Geoscientists News 135, 22-32.