

El cambio climático y el futuro de la tierra

Sergio R. Aragón San Juan¹, Professor Emeritus, Department of Chemistry & Biochemistry,
San Francisco State University EEUU
aragons@sfsu.edu



RESUMEN: El clima de la Tierra ha variado en formas extremas a lo largo de sus 4.5 billones de años de existencia, habiendo tenido 5 eras glaciales y varios ciclos de súper continentes. Al presente estamos en la última era glacial, el período Cuaternario, el cual empezó hace 2.6 millones de años. Durante su primera época, el Pleistoceno, ha habido varias alternaciones entre glaciaciones e intervalos interglaciares, en un ritmo de 100 mil años en el último medio millón de años. De la constitución isotópica de los gases atrapados en núcleos de hielo obtenido de Antártica podemos observar que el ritmo natural de calentamiento global, asociado a niveles crecientes de CO₂, es alrededor de 1 C/1000 años. Hoy en día, ya en la época interglacial del Holoceno, el ritmo de calentamiento es 10 veces más rápido, alrededor de 1 C/100 años. Las mediciones de la temperatura de la troposfera y de la estratosfera, la cantidad de radiación que regresa a la superficie de la tierra y la cantidad que se escapa al espacio, la preponderancia de noches más calientes que días, entre otras cantidades demuestran que el calentamiento ocurre por medio del efecto invernadero provocado por gases invernadero como el vapor de agua y el CO₂, principalmente. Observando la constitución isotópica del carbón encontrado en la atmósfera y en los corales, y pudiendo descartar el volcanismo como la fuente del exceso creciente de CO₂ en la atmósfera, concluimos que el cambio climático es de origen antropogénico por la quema de combustibles fósiles como el petróleo y el carbón mineral. Se discuten los efectos del cambio climático sobre la temperatura, la acidificación y el alza de nivel del mar, el derretimiento de los glaciares en las montañas y en los polos, la redistribución de las lluvias conllevando inundaciones en regiones al tanto otras entran en sequía, el aumento de

intensidad de los huracanes y tifones, y el problema del permafrost. Tenemos solamente 15 años para dejar de quemar combustibles fósiles para poder cumplir el límite de 2 C para calentamiento global acordado en París. A más largo plazo, la siguiente glaciación dentro de 50 mil años nos forzará a controlar el clima completamente de allí en adelante - para sobrevivir tendremos que evitar las glaciaciones elevando el nivel de CO₂ en la atmósfera. Asimismo, tratamos de visualizar los cambios del clima a tiempos muy grandes en el futuro, discutiendo principalmente el hecho que los océanos de la Tierra serán evaporados en un billón de años más o menos al aumentar la intensidad solar por la evolución del Sol a una estrella roja gigante. Entre las posibles soluciones a este dilema presentamos la posibilidad de mover la órbita de la Tierra hacia Marte, empezando en los siguientes 100 mil años, utilizando un asteroide que le da un empujón cada 6000 años en su órbita muy excéntrica alrededor de la Tierra. Logrando esta proeza de ingeniería astronómica podrá permitir a nuestros descendientes lejanos observar el espectáculo más impresionante en el universo - el choque y la unión de la galaxia de Andrómeda con la Vía Láctea, empezando en unos 4 billones de años. Termino con un epílogo describiendo brevemente la situación a corto y largo plazo para Guatemala.

PALABRAS CLAVE: Cambio climático, temperatura global, Milankovitch, Pleistoceno, Holoceno, dióxido de carbono, combustibles fósiles, control del clima, órbita terrestre, choque de galaxias.

¹ Sergio R. Aragón San Juan se educó en el Colegio Americano de Guatemala y cursó un año de estudios universitarios en la UVG antes de pasar a EUA para la obtención de su pregrado en Química y Física en Rice University, Texas y luego su doctorado en Química Física en Stanford University, California. Después de un año de postdoctorado en Stanford, regresó a Guatemala para dirigir el programa de Ciencias Químicas en UVG de 1977-85. Durante esta etapa dejó implementadas las carreras de Química, Química Física, Bioquímica, Ingeniería Química e Ingeniería y Ciencias de Alimentos en UVG. En 1985 emigró de vuelta a EUA para desarrollar el resto de su carrera en San Francisco State University, California, de donde se jubiló en 2015 habiendo llegado a Full Professor (Química Física). Ha publicado más de 40 artículos en revistas científicas internacionales.

Climate change and the future of earth

ABSTRACT: Terrestrial climate has changed dramatically across the last 4.5 billion years, having had 5 glacial eras and several cycles of super continents. At present we are in the last glacial era, the Quaternary, which began 2.6 million years ago. During the Pleistocene, its first epoch, there have been cyclic glaciations punctuated by interglacial periods every 100,000 years in the last half million years. From the isotopic constitution of gas trapped in bubbles of ice cores from Antarctica we can extract the natural rate of global warming at the end of a glacial period, associated with increases of atmospheric CO₂, and find about 1 C/1000 yrs. At present, during our Holocene interglacial, the warming rate is 10 times faster, about 1 C/100 yrs. Measurements of tropospheric and stratospheric temperatures, the amount of radiation that returns to Earth surface and the amount that escapes to space, the larger number of warm nights compared to warm days, among others, demonstrate that the warming we observe is mainly due to the greenhouse effect caused by water vapor and carbon dioxide. By measuring the isotopic constitution of carbon found in the atmosphere and carbonates in corals, and being able to discard volcanism as the cause of the rising amounts of CO₂ in the atmosphere, we conclude that climate change is of anthropogenic origin due to the combustion of fossil fuels. I discuss the effects of this climate change on the temperature, acidity and rise of the level of the oceans, the melting of glaciers in the mountains and polar regions, the redistribution of rain causing floods in some regions while others suffer draught, the increase in frequency and intensity of hurricanes and typhoons, and the problem of the melting of permafrost. We have only 15 years to stop burning fossil fuels in order to meet the 2 C limit of warming agreed to in Paris. Farther out in time, the next glacial period arriving sometime in the next 50,000 years will force us to learn to control our planetary climate for the foreseeable future -in order to survive we will need to inhibit the glacial periods controlling the amount of CO₂ in the atmosphere. In the far future of the Earth I consider the fact that our oceans will inevitably evaporate in about a billion years due to the increasing solar output as the Sun evolves to a red giant star. Among the possible solutions to this dilemma I consider the possibility of moving the orbit of the Earth towards Mars, starting in about 100,000 years, utilizing an asteroid which gives the Earth an impulse every six thousand years in a very eccentric orbit around our planet. A beautiful consequence of managing this piece of astronomical engineering is to allow our far descendants to witness one of the most amazing spectacles in the Universe - the collision and merger of Andromeda with the Milky Way in about 4 billion years. I conclude with an epilog describing the present situation and surprising long term prospects for Guatemala.

KEYWORDS: Climate change, global temperature, Milankovitch, Pleistocene, Holocene, carbon dioxide, fossil fuels, climate control, Earth orbit, colision of galaxies.

Introducción

El cambio climático en nuestro planeta es uno de los problemas fundamentales de nuestra civilización. Para entender el origen del cambio climático presente, es necesario revisar y entender

las fluctuaciones naturales del clima a lo largo de la evolución entera de nuestro planeta desde su formación en el sistema solar hace 4.5 billones (10⁹) de años. En particular, los últimos 3 millones de años son muy relevantes porque definen la quinta importante época glacial que ha ocurrido en nuestro planeta durante la época del Pleistoceno del período Cuaternario.

Durante el eón Hádico, una colisión de la Tierra con otro planeta (Hartmann y Davis, 1975) llegó a formar la Luna, la cual estabilizó el eje de rotación de la tierra y esto fijo las condiciones para un clima de estaciones climáticas regulares en la órbita alrededor del Sol (Laskar et al. 1993). Simulaciones más recientes (Lissauer et al. 2013) ponen en duda si la luna es absolutamente necesaria para esta estabilización, pero como veremos más adelante, la variación de la inclinación del eje es importante dentro de los determinantes orbitales del clima de la Tierra y también en el futuro lejano.

En la evolución de nuestro planeta, ha habido 4 períodos glaciales anteriores al Cuaternario, pero es notable que la mayor parte del tiempo no hay glaciación alguna en el planeta, como se nota en la Figura 1. Por glaciación entendemos una extensa cobertura de hielo bajando de los polos ocupando latitudes importantes sobre el planeta. Un factor determinante en la existencia de una era glacial es la configuración de los continentes en medio del océano. En el pasado ha habido varios súper continentes que típicamente han evitado tener a Antártica en el polo sur, y encerrado con masas continentales el área del polo norte como sucede al presente. Ambos casos disminuyen la circulación de las corrientes marinas hacia los polos e impiden la transferencia de calor de las latitudes ecuatoriales hacia los polos. Por ende, los polos se enfrían fácilmente. La configuración de los continentes, por el proceso del movimiento de las placas tectónicas, varía en escalas de centenares de millones de años. El próximo súper continente, Amasia, llegará a formarse en 260 millones de años y Antártica se chocará con América del Sur y abandonará el polo sur (Mitchel et al. 2012). Con esa configuración, el planeta será un poco más susceptible a una nueva época glacial, pero nos hace falta mucho para llegar allí. Nuestra sobrevivencia en el planeta en los siguientes 1000 años es el período crítico.

Una variable clave en nuestra discusión es la temperatura promedio sobre la superficie de la tierra. Esta temperatura está definida por el tipo de estrella que es nuestro Sol, la distancia entre la Tierra y el Sol, la presencia de continentes terrestres, océanos, la atmósfera en el planeta, y la composición de esta atmósfera. El hecho que la atmósfera ha existido desde la formación del planeta y existirá por varios billones de años en el futuro se debe a la protección que ofrece el campo magnético terrestre que impide su ablación por el viento solar. Comparando con Marte, la ausencia de un campo magnético permitió tal ablación y la pérdida de la atmósfera y la mayor parte de agua que antes existía en ese planeta en el transcurso de varios billones de años (Jakosy et al. 2015). La inestabilidad de su eje de rotación también contribuyó a fluctuaciones grandes en el clima que contribuyeron a la pérdida de la atmósfera en el débil campo gravitacional del planeta (Touma, Wisdom, 1993). La temperatura promedio de la superficie de la Tierra puede inferirse de mediciones isotópicas de oxígeno en hielo de Antártica y de estratos de

carbonatos en roca sedimentaria. El período de tiempo en que obtenemos datos de estas fuentes llega hasta 2.7 millones de años en el pasado para el hielo y 5 millones de años para las rocas de carbonatos. Estos son los datos más importantes que nos servirán para evaluar el cambio climático actual.

El hecho es que estamos en una era de hielo al presente y los ciclos de Milankovitch que discutimos posteriormente predicen una nueva época glacial en el futuro. Entonces, ¿por qué nos preocupa un poco de calentamiento global? En secciones subsiguientes se presentan los datos básicos sobre la secuencia de glaciaciones en los últimos 5 millones de años y extraemos la tasa natural de calentamiento natural al final de una época glacial para comparar con el cambio de temperatura actual. Los datos muestran que el cambio climático es real y que es causado por la acumulación de gases invernadero en la atmósfera. En seguida revisamos los datos que demuestran que ese calentamiento global es el resultado de las actividades humanas y que estamos ya a medio camino de la sexta extinción de la fauna y flora en el planeta. La medición de la sensibilidad del clima nos da 3 C, lo cual implica que ya hemos introducido suficiente dióxido de carbono en la atmósfera para sobrepasar el límite de los acuerdos de París aunque dejásemos de quemar más hidrocarburos mañana. Las consecuencias de este cambio climático son dramáticas. Sin embargo, para enfrentarnos a la siguiente época glacial, vamos a necesitar desarrollar la capacidad de controlar el clima de la Tierra con inyección y retiro de gases invernadero a escalas de miles de años. El control del clima y la restauración del balance en la biósfera es nuestra tarea en los siguientes 1000 años.

Con optimismo proyectamos a escalas de tiempo aún más lejanas. La cantidad de radiación que emite el Sol aumenta paulatinamente durante su evolución a una estrella roja gigante. Si la Tierra permanece en su órbita actual, irremediablemente perderá sus océanos dentro de un billón de años y toda vida desaparecerá del planeta convertido en un escombros. Para evitar esto se propone mover la órbita de la tierra hacia Marte, empezando dentro de los siguientes 100,000 años utilizando un asteroide. De esta manera se asegura la habitabilidad de nuestro planeta hasta por 6.5 billones de años en el futuro. La civilización humana podrá presenciar, entonces, el espectáculo cósmico más impresionante imaginable: el choque y fusión de la galaxia de Andrómeda con la Vía Láctea dentro de 4 billones de años. En las secciones II-IV desarrollamos estos temas más ampliamente.

Los ciclos de cambio climático durante el pleistoceno

Los geólogos han dividido la evolución de la tierra en intervalos temporales, y los intervalos más grandes, los eones, se observan en la Figura 1. La era Cenozoica, la última parte del eón Fanerozoico se observa en el Cuadro 1. El Pleistoceno es la primera época del período Cuaternario de esta era. El Pleistoceno es la época en que empezó la era glacial presente. Al momento nos encontramos en el Holoceno, una época interglacial, cuyo inicio coincide con el inicio del Paleolítico en arqueología hace unos 10 mil años. La evolución de los homínidos ocurrió en África en el Pleistoceno durante la secuencia de glaciaciones que ha ocurrido en los últimos 2.5 millones de años. Al finalizar

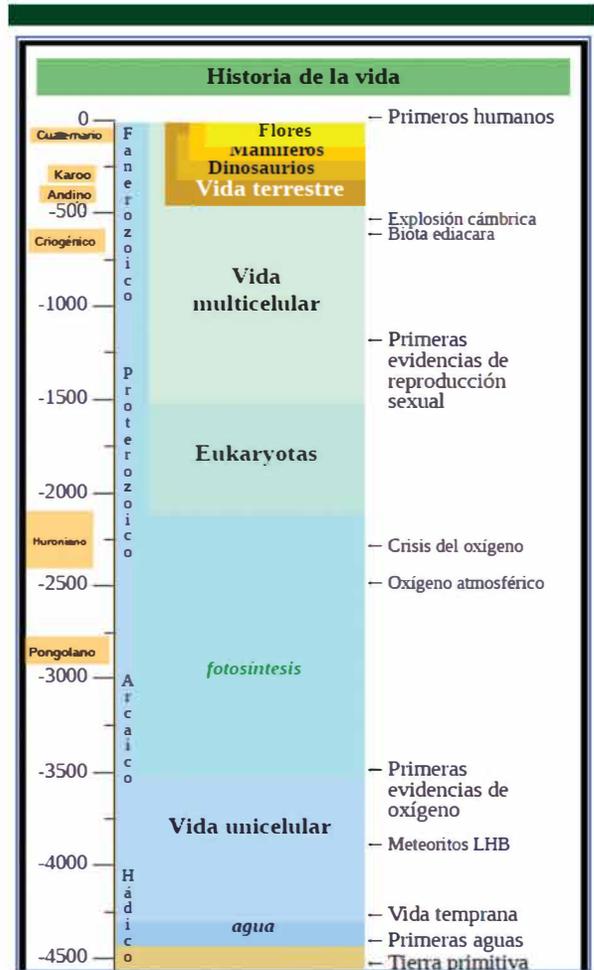


Figura 1. Desarrollo de la vida desde el origen de la tierra hace 4.54 billones de años. Escala vertical en millones de años. Las etiquetas de color naranja denotan las eras de hielo conocidas. Plantilla: Línea de tiempo de la vida, Wikipedia.

Cuadro 1. Era Cenozoica, sus períodos y épocas

Era	Período	Época	Millones años
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	0.01 (~10.000 AC)
		Pleistoceno	2.59
	Neógeno	Plioceno	5.33
		Mioceno	23.03
	Paleógeno	Oligoceno	33.9
		Eoceno	56.0
		Paleoceno	66.0

la última glaciación, lo cual demarca el inicio del Holoceno, los humanos estábamos en la edad de Piedra pero ya se había colonizado las latitudes inferiores de Europa y Asia y aun el continente americano para ese entonces. En la Introducción mencionamos que el factor más importante en determinar si el planeta está en una era glacial o no es la distribución de los continentes, los cuales se mueven por efectos de las placas tectónicas, con mucha lentitud. En los siguientes 150 millones

de años seguiremos con una configuración de continentes que nos asegura permanecer en ciclos de glaciaciones. Nos gustaría entender las causas de estas glaciaciones en forma regular durante el Pleistoceno.

La cantidad de energía que emite el Sol está sujeto a variaciones por las tormentas magnéticas en su superficie, generando las manchas oscuras, en ciclos de aproximadamente 11 años. Sin embargo, estas variaciones son minúsculas como se observa en la Figura 2 y no pueden explicar los ciclos de glaciaciones. Los ciclos de glaciaciones se entienden dentro del contexto de características específicas de la órbita de la tierra alrededor del Sol y sus perturbaciones por los otros planetas del sistema solar. Estos se denominan ciclos de Milankovitch (Milancovic, 1998), Cuadro 2, y tienen cuatro causas (Hays et al. 1976):

1. La órbita de la Tierra alrededor del Sol no es un perfecto círculo y su excentricidad varía entre 0-5% en un ciclo de 100,000 años.
2. La inclinación del eje de rotación varía entre 21.5 a 24.5 grados cada 41,000 años.
3. Precesión del eje de rotación en un ciclo de 23,000 años,
4. La precesión de la órbita misma en un ciclo de 112,000 años.

El efecto total de estos factores produce una variación bastante grande en las latitudes norte, como se observa en la Figura 3. La grafica roja de la Figura 3 nos muestra una variación hasta del 25% en la intensidad de la radiación sobre latitudes norte, lo cual es suficiente para enfriar y calentar el planeta y generar períodos glaciales. Sin embargo, los períodos glaciales no ocurren tan frecuentemente como las ondulaciones principales de la gráfica, las cuales tienen un período de unos 25,000 años. Dado que el calor solo lentamente fluye de y hacia los océanos, hay un retraso en la respuesta del planeta e influye también la insolación en el hemisferio sur (Lee et al. 2016). La traza verde en la gráfica es la contribución de la variación de la inclinación del eje de rotación. Lee nos dice que las contribuciones de este factor no tienen importancia a menos que la excentricidad de la órbita sea grande por lo que el ciclo de forzamiento en el clima se acopla a la periodicidad de 100 mil años de la excentricidad. Sin embargo, en la época temprana del Pleistoceno, las eras glaciales estaban acopladas al ciclo de 41 mil años de la inclinación del eje y por razones desconocidas hace un millón de años el ciclo cambió al período

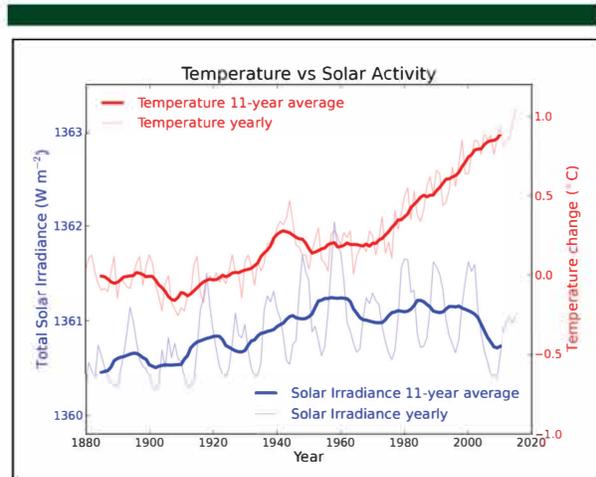
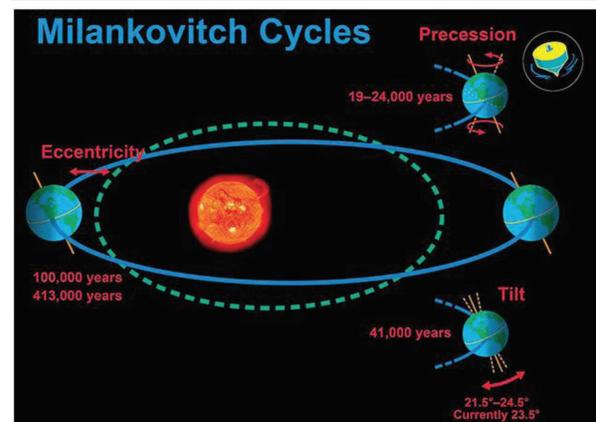


Figura 2. La irradiancia solar comparada con el cambio de temperatura de 1880 hasta el presente. La traza azul liviana muestra claramente los ciclos cada 11 años. Las trazas gruesas son promedios corridos por 11 años. Es evidente que las variaciones de intensidad del Sol son menos del 0.1% y su tendencia es opuesta a la variación de la temperatura reciente. Datos solares de Krivova et al, 2007 y el World Radiation Center. Temperatura de NASA GISS.

Cuadro 2. Cortesía de JC Villanueva, Universe Today 2009



más largo. Las mediciones basadas en los núcleos de hielo nos dan un ciclo de 100 mil años como podemos observar en la Figura 4 y en la época más reciente de la Figura 5. En la Figura 4 podemos observar claramente el inicio del Pleistoceno alrededor de 2.7 millones de años anteriores donde se observa un descenso gradual de la temperatura promedio de la Tierra, con fluctuaciones

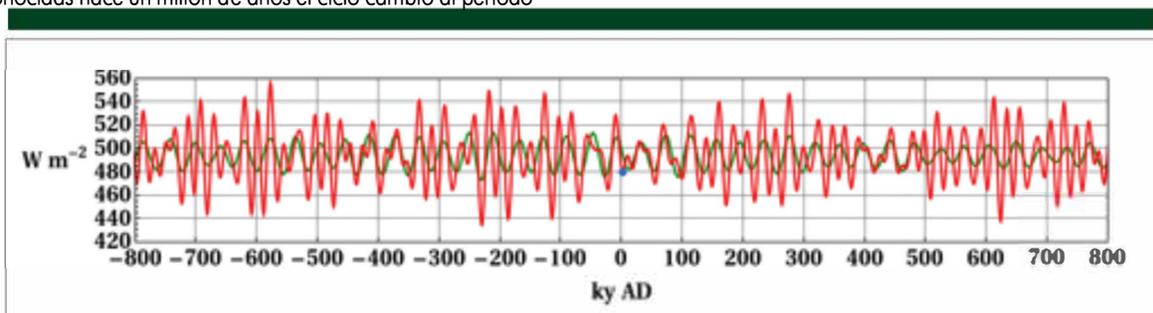


Figura 3. La insolación solar en $W m^{-2}$ durante el Solsticio de Verano a latitud 65 N. El eje x esta dado en kilo-años (ky) o miles de años. El "zero" es el presente. Podemos observar que estamos en una parte poco extrema en el ciclo por los siguientes 100 mil años. https://en.wikipedia.org/wiki/Milankovitch_cycles

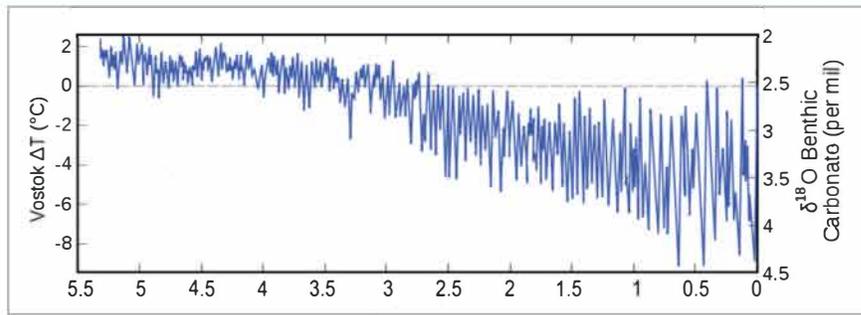


Figura 4. Cambio climático en los últimos 5 millones de años en función de millones de años en el pasado. El cambio de temperatura es equivalente a la definición de los núcleos de hielo de Vostok. La medición esta extraída de la fracción del isótopo pesado de oxígeno ^{18}O en depósitos de carbonatos. (Lisiecki and Raymo, 2005)

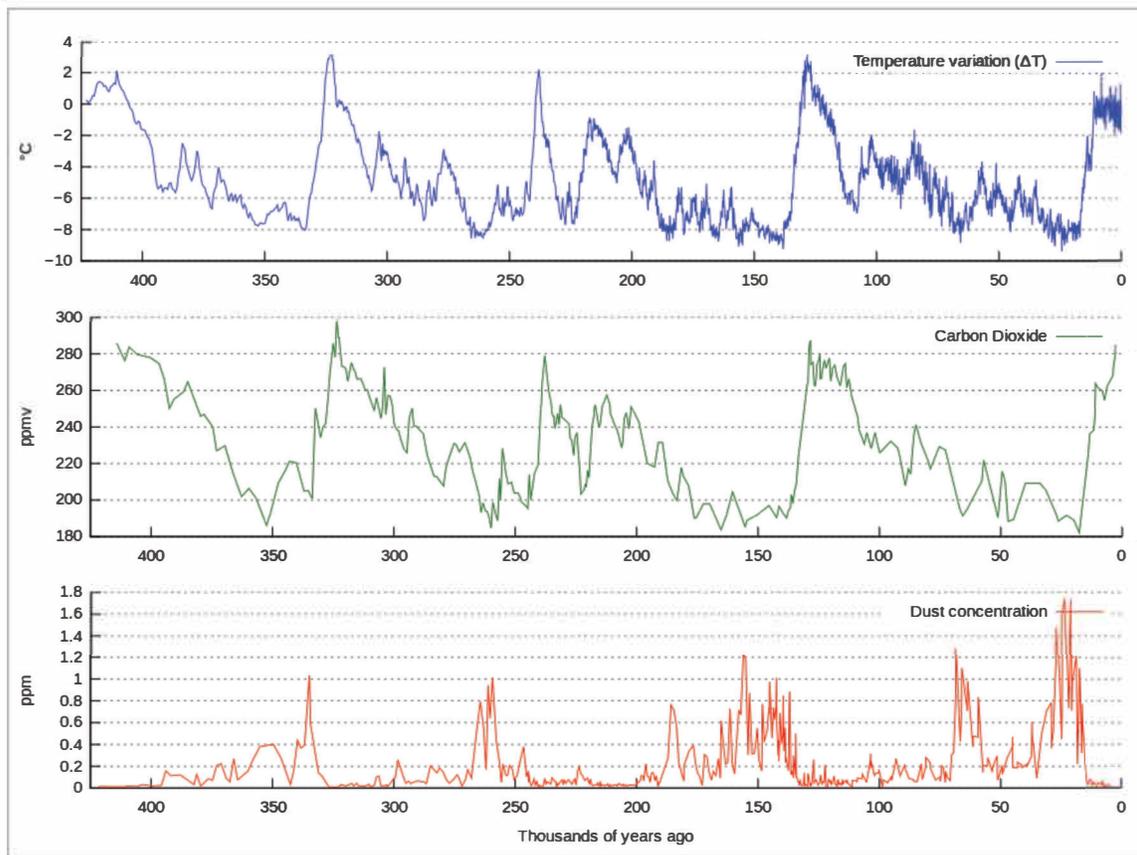


Figura 5. Variación de la temperatura (azul), el dióxido de carbono (verde) y la concentración de polvo (rojo) extraída de los núcleos de hielo de Vostok, Antártica en función de miles de años en el pasado. (Petit et al, 1999) La grafica no llega a mostrar el nivel actual de dióxido de carbono: 400 ppmv (partes por millón por volumen), lo cual se vería como una línea recta sobre el punto cero llegando a la mitad de la grafica superior.

muy grandes en los últimos 500 mil años. Estas fluctuaciones nos indican cual es el ritmo natural al que se calienta la Tierra después de un período glacial. Para poder medir esta tasa, vemos en la Figura 5 en detalle la época más reciente.

Los períodos de cambio de temperatura positiva en la gráfica azul en la Figura 5, son los períodos interglaciales que duran unos 4,000-10,000 años. Los períodos mucho más largos entre estos picos donde el cambio de temperatura es negativo son

los períodos glaciales - estos duran unos 90,000 años, dando en total un ciclo de 100,000 años. Podemos tomar los cuatro picos de los períodos de calentamiento al final de cada período glacial y obtener la tasa de calentamiento natural de la Tierra al salir de una época glacial. Para nuestros propósitos un valor aproximado basta: el calentamiento es de unos 10 C en 10,000 años, o **1 C/1000 años** - este es la tasa de calentamiento natural de la Tierra, sin influencia humana. Podemos observar que hay una correlación perfecta (aunque hay un pequeño

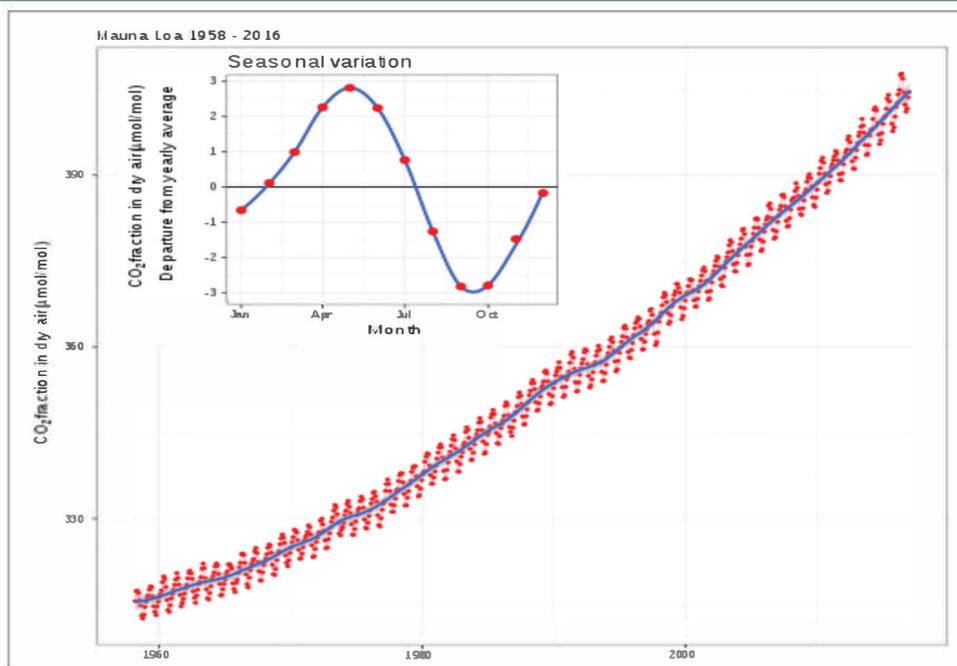


Figura 6. Concentración reciente de CO₂ en la atmósfera medida en Mauna Loa de 1958-2016. La línea negra representa el promedio mensual. La gráfica pequeña muestra la variación con las estaciones del año, denotando la gran precisión de las mediciones. Datos de Keeling et al, 1976, Thoning et al 1989, y el programa de NOAA en Mauna Loa.

desplazamiento hacia adelante en la gráfica del dióxido de carbono no visible dado la poca resolución). Este desplazamiento en el tiempo nos indica que primero cambia la temperatura y luego responde el nivel del dióxido de carbono (CO₂). La respuesta no lineal del sistema es compleja. Es importante notar que la gráfica del polvo en la atmósfera no tiene correlación alguna con la temperatura indicando que la acción volcánica durante estos períodos no es determinante en el clima a estas escalas de tiempo. En efecto, la mayoría del polvo observado parece haber sido llevado por el viento del área de Patagonia (Petit et al, 1999), la cual no es un área volcánica.

En los últimos 400,000 años, la concentración de CO₂ en la atmósfera no ha sobrepasado el nivel de 300 ppm, mientras que ahora ya ha llegado a 403 ppm y sigue subiendo². Este valor no tiene precedentes durante el Pleistoceno. Otro aspecto notable en la Figura 5 es que el período caliente durante el Holoceno es el de mayor duración en millones de años - ya ha durado 11 mil años mientras que los anteriores son típicamente de 4 mil años. Este aspecto puede explicarse observando que estamos en un período relativamente estable en los ciclos de Milankovitch como se observa en la Figura 3, inmediatamente después del cero de tiempo, indicando que va a durar aún mucho más.

El nivel de CO₂ en la atmósfera se ha medido con mucha precisión en épocas recientes como lo demuestra la Figura 6. El nivel de este gas va del valor pre-industrial de 286 ppm (Figura 5) al presente 403 ppm - una tasa de 120 ppm/100 años, 200 veces más rápida que el período interglaciar anterior.

La tasa está acelerando, pues Thoning y Komhyr (Thoning et al. 1989) midieron ya 142 ppm/100 años durante el período de 1974-1985 y concluyeron que la fracción de CO₂ en la atmósfera de origen fósil era ya del 59% en esa época. Es notorio que la gráfica de la Figura 6 es curva y no una línea recta, mostrando la aceleración de los valores promedio mensuales. La variación con la estación del año depende del ciclo de crecimiento de plantas durante la primavera, las cuales reducen el nivel de CO₂ por fotosíntesis y al llegar el otoño entrando a su período durmiente disminuye este metabolismo, dejando que el nivel de CO₂ se recupere. Vale la pena mencionar que los niveles de metano también han sido estudiados por los mismos autores anteriores, pero por ser un gas invernadero presente en concentraciones mucho más pequeñas que el CO₂ no las discutiremos en detalle en este artículo.

Una pequeña explicación sobre el uso de isótopos de oxígeno para la obtención de temperaturas es importante, pues el tema se repite después con los isótopos del carbón. El ¹⁸O es más pesado que el ¹⁶O y por ende el agua conteniendo estos isótopos tiene diferentes propiedades. El punto de ebullición del agua normal H₂¹⁶O a 1 atmósfera es 100.0 C, mientras que el de H₂¹⁸O es un poco más alto - 100.15 C. Esto permite que el agua más liviana se evapore de los océanos más fácilmente y la concentración de ¹⁸O en la atmósfera es menor. A su vez, el agua más pesada se condensa más fácilmente en los trópicos dando lugar a que el agua que forma los glaciares en Antártica está enriquecida en ¹⁶O. La proporción específica depende de la temperatura promedio del planeta y por ende se puede extraer el record de temperatura midiendo la composición isotópica del

² <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/monthly.html>

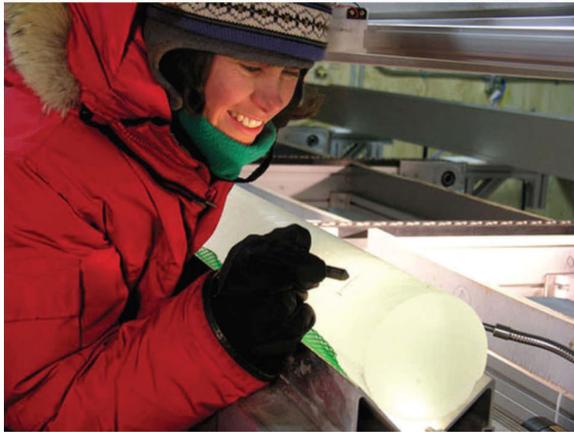


Figura 7. Un núcleo de hielo obtenido en la perforación de los glaciares en Antártica conteniendo información de los últimos 1.5 millones de años. US Antarctic Program, foto de Kendrick Taylor, *Climate of the Past*, 2013.



Figura 8. Cómo los gases invernadero aumentan la temperatura terrestre

agua en los núcleos de hielo, Figura 7. El nivel de CO_2 se extrae simplemente midiendo su concentración en las burbujas de gas atrapadas en el hielo.

En la siguiente sección demostraremos que el cambio climático reciente y los elevados niveles de CO_2 son causados por la actividad humana.

¿Cómo sabemos que el cambio climático reciente es causado por humanos?

En la sección anterior determinamos dos elementos críticos en la descripción del cambio natural del clima en el planeta: la tasa de aumento de temperatura promedio de la Tierra y la tasa de aumento del CO_2 en la atmósfera. Ya vimos que la tasa de aumento de CO_2 al presente es más de 100 veces la tasa observada durante los ciclos climáticos del Pleistoceno. En esta sección vamos a mostrar la evidencia que el CO_2 se origina por la combustión de combustibles fósiles y que el cambio de temperatura que observamos ahora también es mucho más rápido que lo natural y de origen humano. Para ello tendremos que entender el concepto básico del efecto invernadero y porque los gases como el vapor de agua, el CO_2 y el metano (CH_4) son gases invernadero.

La energía que nos llega del Sol debe devolverse casi en su totalidad al espacio frío que rodea la Tierra durante la noche

para que la temperatura promedio de la superficie se mantenga constante. Esto es posible porque nuestra atmósfera es transparente a la luz visible y durante el día la energía solar atraviesa la atmósfera y calienta la superficie de la tierra. La circulación de la atmósfera distribuye este calor alrededor del planeta. Adicionalmente, como el calor implica movimiento atómico dentro de las moléculas de toda la materia, toda materia a una temperatura dada emite radiación electromagnética. A la temperatura promedio de la superficie, unos 15 C, esa radiación es infrarroja, rayos de luz no detectables con la vista, pero sí por la sensación de calor que sentimos en la piel. Cuando estamos cerca de una fogata el calor que percibimos es la radiación infrarroja que nos llega del fuego y no el aire caliente, por ejemplo. Esta radiación infrarroja es emitida por un cuerpo en todas direcciones y desde la superficie de la tierra, hacia la atmósfera y eventualmente va a parar al espacio. Es importante notar que los dos gases principales de la atmósfera, el nitrógeno (78.09%) y el oxígeno (20.95%) siendo moléculas diatómicas son transparentes a los rayos infrarrojos, y el Argón (0.93%) es monoatómico y también transparente. Si toda la radiación emitida por la superficie de la Tierra fuera a parar al espacio, la temperatura promedio del planeta sería mucho más baja, en efecto nos congelaríamos a una temperatura de -18 C (Ma, 1998). Afortunadamente hay otros componentes minoritarios de la atmósfera que si absorben los rayos infrarrojos - en orden de importancia, el vapor de agua (0.4%), el dióxido de carbono (0.04%) y el metano (0.0002%). El metano tiene una concentración pequeña pero ha aumentado recientemente casi por un factor de 4 a partir de su promedio en los últimos 500 mil años y es 28 veces más poderoso que el CO_2 (Edenhofer et al, 2014). Estos gases emiten de regreso la energía absorbida, pero en todas direcciones, por ende regresa la mitad de la energía a la superficie de la tierra elevando su temperatura. Como se ve en la Figura 8, este es el efecto invernadero, llamado así, porque el vidrio de un invernadero agrícola tiene la misma función - el vidrio es transparente a la luz visible, pero absorbe la radiación infrarroja. El agua (vapor y nubes) es responsable por un 75% del efecto invernadero, el CO_2 es responsable por el 20%, y el 5% restante lo contribuyen otros gases en concentraciones mucho menores como metano y los aerosoles (Schmidt et al, 2010). El efecto invernadero de estos gases puede entenderse como ponerle una manta a todo el planeta, ayudando a mantener su temperatura en forma cálida.

En la Figura 9 podemos observar las características del cambio climático que implican actividad humana. Algunas personas piensan que el cambio climático está ocurriendo pero que los humanos no son responsables siendo una propiedad natural. Otros piensan que el CO_2 no tiene nada que ver con el aumento de temperatura ya que está presente en cantidades muy pequeñas en la atmósfera, que no tiene nada que ver con efecto invernadero o que el CO_2 aumenta en la atmósfera por actividad volcánica o del Sol o los rayos Cósmicos y no por nuestra quema de combustibles fósiles. Todas estas ideas pueden demostrarse ser falsas.

Empecemos por demostrar que el efecto invernadero es real en la atmósfera. Si existe efecto invernadero en la tierra, entonces la estratosfera deberá enfriarse porque parte de la radiación



Figura 9. Los aspectos de la Tierra que demuestran la huella humana en el cambio climático. Tomado de Scientific Guide to Global Warming Skepticism, Cook J.

que hubiera llegado hasta allí, regresa a la superficie de la tierra por emisión de los gases invernadero y a la vez la troposfera debe aumentar de temperatura. En efecto esto es lo que se encuentra en mediciones (Sherwood et al, 2008; Jones et al, 2003), como se observa en la Figura 10.

Adicionalmente, estos efectos causan también que el grosor de la troposfera aumente (Lastovicka et al, 2006) y que el grosor de la estratosfera disminuya (Santer et al, 2003), otras dos señales del efecto invernadero. Otra propiedad que demuestra la existencia del efecto invernadero es el cambio de la energía emitida hacia el espacio extraterrestre por los gases invernadero que no son vapor de agua. Esta energía emitida puede detectarse directamente por satélite. Las mediciones por satélite han demostrado que hay menos energía emitida (Harries et al, 2001), como se observa en la Figura 11. En esta figura se muestran todos los gases invernadero presentes en la atmósfera e incluye, además del CO₂ y el metano (CH₄), gases menores como el ozono (O₃), y varios clorofluorocarburos (CFC) usados en refrigeración. En todos los casos, hay menos radiación emitida en 1970 comparado con 1997. ¿Por qué no se toma en cuenta el vapor de agua en este caso? Una propiedad muy importante del agua es que su vapor es condensable, y por tanto su concentración en la atmósfera depende de la temperatura promedio de la atmósfera. La lluvia se encarga de mantener una concentración constante. Su contribución cambia lentamente al ir subiendo la temperatura promedio de la superficie de la Tierra. Los otros gases, al contrario, no son condensables y sus valores pueden aumentar sin importar la temperatura como lo han hecho en el intervalo de tiempo referido.

El efecto invernadero también predice que debe aumentar la radiación infrarroja que desciende hacia la superficie de la tierra, proveniente de la atmósfera. Esto también se puede detectar directamente (Wang, Liang, 2009). En la Figura 12 podemos observar los datos del período de 1973-2008, estando ausente Norteamérica porque sorprendentemente no hay datos para el período completo en esta región. Todas las regiones de color

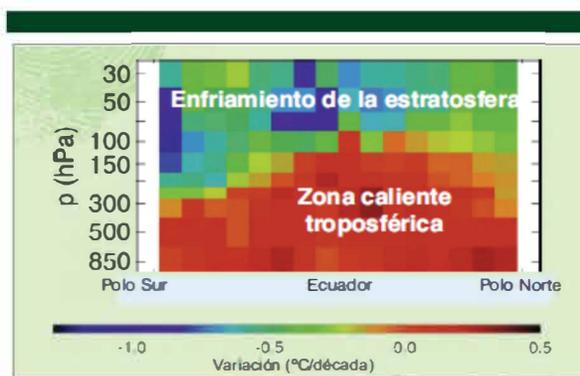


Figura 10. Enfriamiento de la estratosfera y calentamiento de la tropósfera. Sherwood et al, 2008.

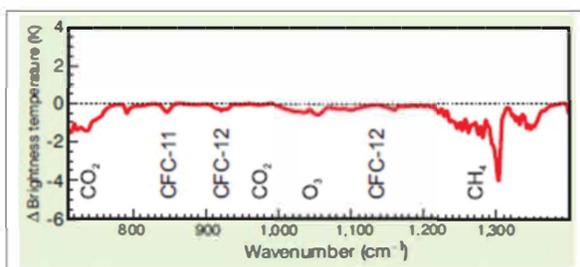


Figura 11. El cambio de radiación escapando al espacio. Se ha medido el cambio de 1970 a 1997 del la intensidad infrarroja, usando su temperatura efectiva, en función del espectro infrarrojo. Valores negativos muestran menos energía llegando al espacio

rojo muestran un incremento anual por metro cuadrado. Esta es la demostración más directa que se puede hacer que existe un efecto invernadero.

Pero no tenemos que parar allí, el efecto invernadero predice también que las noches deben calentarse más rápidamente que los días. Durante la noche, cuando el Sol no está calentando

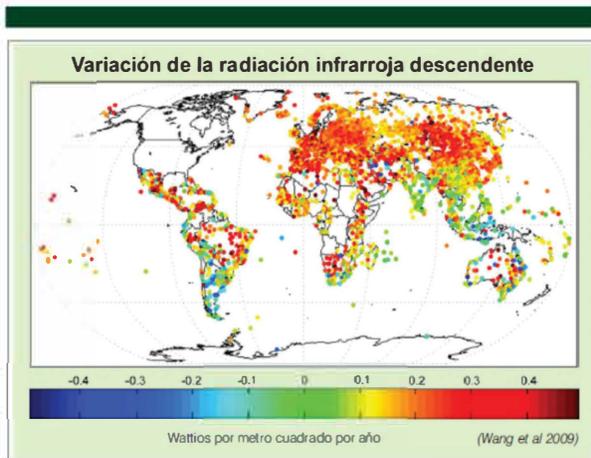


Figura 12. Hay más calor que desciende hacia la Tierra

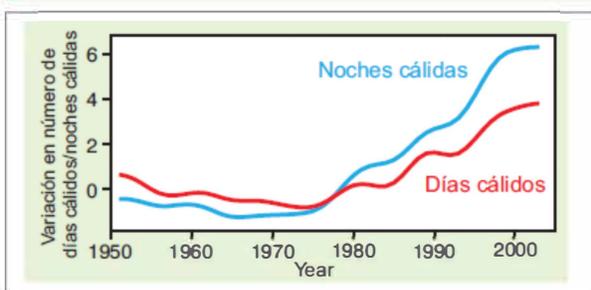


Figura 13. Las noches se calientan más rápidamente que los días. Días calientes (azul), noches calientes (rojo). Alexander et al, 2006.

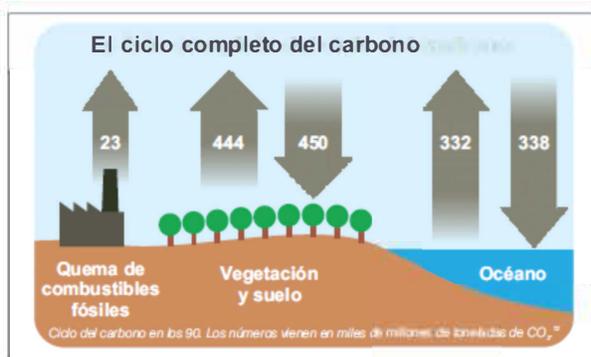


Figura 14. El balance global del ciclo de carbón. Cantidades en Gt. Cook J.

la superficie, el efecto invernadero inhibe su enfriamiento. Si el Sol fuera el responsable del calentamiento global, entonces esperaríamos que el efecto fuera más fuerte durante el día. Si los rayos cósmicos fuera la explicación, entonces no debería de haber diferencia alguna entre los días y las noches porque estos siempre están presentes y vienen de todas las direcciones en el espacio. Vemos que ni el Sol ni los rayos Cósmicos pueden explicar lo observado. En la Figura 13 podemos observar lo que predice el efecto invernadero: desde 1975, cuando empezó a haber una diferencia grande en el nivel del CO₂ atmosférico, el

número de noches es mayor que el número de días que están en el 10% superior en temperatura (Alexander et al, 2006). La influencia del CO₂ sobre la temperatura en la atmósfera es un ejemplo de retroalimentación positiva. Los estudios anteriores demuestran que el CO₂ causa calentamiento, pero como los líquidos disuelven menos los gases al aumentar la temperatura, al aumentar la temperatura de los océanos estos liberan CO₂ a la atmósfera. Al aumentar el nivel de CO₂ en la atmósfera, hay mayor calentamiento. La retroalimentación genera un cambio climático cada vez mayor.

¿Qué evidencia tenemos que el CO₂ que causa todos los efectos anteriores de origen antropocéntrico? Esta evidencia la obtenemos de las observaciones del ciclo de carbón y de los isotopos de carbón en los corales. El ciclo completo de carbón incluye su aumento por la descomposición vegetal y organismos en el suelo, su absorción por el crecimiento de la vegetación y la formación de carbonatos minerales, la emisión y absorción en los océanos y la quema de combustibles fósiles. Como se observa en la Figura 14, el balance entre los procesos de absorción de la vegetación y el suelo, y también para los océanos, es a favor de la reducción del CO₂ atmosférico por 12 Gt/año (Gt = 10⁹ toneladas) en total. Sin embargo, la producción por quema de combustibles genera un incremento mucho mayor, introduciendo una cantidad neta de 11 Gt al año en la atmósfera. Esto demuestra que es la actividad humana, empedernida aún en su era de carbón mineral y petróleo, que causa el incremento del CO₂ y por ende el cambio climático por el efecto invernadero.

Podemos ir más allá estudiando la proporción de uno de los isotopos pesados de carbón en los corales. Los corales hacen sus caparazones de iones de carbonato que provienen de la reacción química que ocurre al disolverse el CO₂ en el agua de los océanos: CO₂ + H₂O → H₂CO₃. El producto es el ácido carbónico, el cual se disocia espontáneamente en el agua para generar protones hidratados y el ión bicarbonato. Los protones hidratados acidifican el agua, como veremos más adelante. Otro hecho importante es que las plantas prefieren metabólicamente el isótopo predominante y liviano de carbón, el ¹²C. Dado que el petróleo y el carbón mineral son productos vegetales fósiles producidos hace millones de años, su contenido de carbón liviano debe ser mayor que el contenido de carbón pesado, ¹³C. Por ende, si la fuente del carbón que para en la atmósfera son los combustibles fósiles, las caparazones de los corales deben mostrar una disminución en la proporción de ¹³C en función del tiempo al compás que los humanos hemos introducido carbón fósil en la atmósfera. Esto ha sido demostrado de varias formas y en el caso de los arrecifes más grandes del mundo en la Gran Barrera de Australia como se observa en la Figura 15 (Wei et al, 2009). En esta figura se ilustra la fracción de la diferencia entre los dos tipos de carbon. Esta cantidad,

$\delta^{13}C = ((^{13}C/^{12}C)_{muestra} / (^{13}C/^{12}C)_{estándar} - 1)$ donde el estándar es una muestra de PD Belemnita, es siempre negativa porque hay más ¹²C que ¹³C. La observación crítica es que esta cantidad se vuelve cada vez más negativa. Efectos equivalentes a los de la Figura 5 se han podido obtener también estudiando los anillos de los árboles y los niveles directamente en la atmósfera atrapada en núcleos de hielo en función del tiempo.

Estos datos (Francey et al, 1999) son dramáticos y vale la pena compararlos con los datos anteriores en la Figura 16. Los datos extraídos de los núcleos de hielo, a pesar de las cuidadosas calibraciones requeridas, tienen mucha precisión y muestran un déficit de ^{13}C mayor que en los corales. Es impresionante lo estable que ha sido el déficit a lo largo de 1700 años en el pasado, y que el record aun muestra la perturbación de la pequeña época de hielo alrededor de 1800. Al inicio de la época industrial a mediados del siglo XIX, es notoria la aceleración de la dilución del ^{13}C en la atmósfera que aunque tiene una magnitud diferente, sigue el patrón encontrado en los corales.

La acción volcánica como posible factor merece atención. El hecho es que las emisiones de CO_2 volcánicas también tienen un déficit en ^{13}C (-2 a -6%) (Faure, 1986), pero mucho menos que las plantas (-10 a -34%) (O'Leary, 1988) y el carbón de combustibles fósiles (-15 a -31%) (Stahl, 1979). Por tanto es posible que la dilución que se observa en la atmósfera sea causada por CO_2 de origen volcánico, sin embargo la contribución de los volcanes tendría que ser 2 a 3 veces mayor que la de quema de combustibles fósiles para causar la disminución observada en ^{13}C . De hecho, la emisión de CO_2 por los volcanes en época reciente es un factor de 60 veces más pequeña que la contribución antropogénica (Burton et al, 2013). Erupciones masivas como la de Mt. St. Helens en 1980 o Pinatubo en 1991 emitieron cantidades grandes de CO_2 pero equivalentes solamente a 9 horas de la contribución humana (Gerlach, 2011). Adicionalmente, hay tres aspectos de la Figura 15 que los volcanes no pueden explicar, la fecha de inicio del cambio, la escala del cambio (un siglo), y el hecho que el cambio está acelerando. El CO_2 emitido por los volcanes no ha cambiado en forma dramática desde 1800 para acá con un patrón correlacionado con el que se observa en la Figura 15. Estas tres características son consistentes con una emisión de CO_2 al inicio de la época industrial por 1850, y su aceleración en época reciente con el crecimiento de la población y su uso de la combustión de petróleo y carbón y por ende se puede descartar el vulcanismo como la explicación del aumento del CO_2 en la atmósfera en épocas recientes. Al contrario, el efecto neto de los volcanes hoy en día es enfriamiento temporal por su emisión de aerosoles que reflejan la luz solar. Los volcanes en épocas geológicas anteriores sí tuvieron efectos dramáticos en el clima de la Tierra.

Los datos presentados en esta sección demuestran fehacientemente que la actividad humana es la que produce el exceso de CO_2 en la atmósfera y que esto está causando el cambio climático.

Consecuencias del cambio climático en la tierra

Las consecuencias inmediatas de la inyección de CO_2 en la atmósfera son:

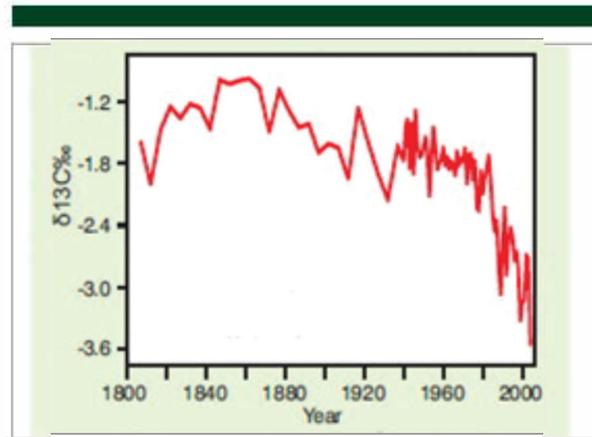


Figura 15. Cambio fracción de $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ en corales Wei et al, 2009

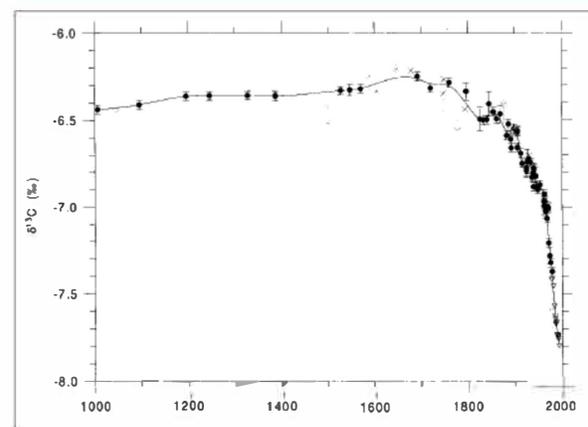


Figura 16. $\delta^{13}\text{C}$ a partir de los núcleos de hielo de Law Dome en Antártica (Francey et al, 1999)

1. el aumento de la temperatura promedio sobre la superficie de la tierra,
2. la acidificación de los océanos,
3. la acumulación de calor en los océanos,
4. el derretimiento de los glaciares de montaña y en los polos,
5. el alza en el nivel del mar,
6. el aumento en la intensidad de los huracanes y tifones,
7. el cambio en la distribución de las lluvias conllevando aumento severo de sequía en las franjas de latitud media,
8. la migración de especies biológicas a mayores alturas y una tasa alarmante de extinción de especies en la biósfera.

En esta sección vamos a presentar evidencia de muchas de estas consecuencias, diagramadas en la Figura 17. Empecemos por cuantificar las emisiones de CO_2 y su efecto en la temperatura terrestre.



Figura 17. Impactos globales del cambio climático en la Tierra. (Parmesan, Yohe, 2003) Cook J.

La temperatura promedio de la superficie de la tierra y el CO₂: el palo de hockey

En la Figura 18 podemos observar el aumento dramático de las emisiones a partir de la combustión de petróleo y carbón al inicio de la época industrial y en la Figura 19 vemos el consecuente aumento en la concentración de CO₂ en la atmósfera, combinando los datos de los núcleos de hielo de Law Dome en Antártica Oriental (Etheridge et al, 1998) y las mediciones en Mauna Loa, Hawaii (Tans, 2008, traza morada). Los incrementos están perfectamente correlacionados. Estos datos son fáciles de obtener en comparación con la determinación de la temperatura promedio de la superficie terrestre.

En la Figura 20 podemos observar la reconstrucción de la diferencia de la temperatura promedio del hemisferio norte contra un estándar desde hace 1800 años por diferentes métodos. Entre ellos está la famosa dendrocronología de Michael Mann (traza azul oscura), la que originó la nomenclatura de "palos de hockey" para este tipo de gráficas (Mann et al, 2008). La primera publicación de Mann generó mucha controversia entre los que se oponen a la idea de cambio climático antropogénico por la detallada estadística requerida en el análisis de los anillos de crecimiento de los árboles. Los ataques personales que sufrió en defender su honestidad científica los relata en su libro (Mann, 2012). La reconstrucción de Moberg (traza corinta) (Moberg et al, 2008) para el hemisferio norte no usa los anillos de árboles y se considera más precisa. Además, están los datos medidos por termómetros en época reciente como la traza roja. Es evidente que el clima es un sistema caótico porque es el resultado de las interacciones no lineales de muchos factores y por ende las fluctuaciones grandes que observamos (las variaciones diurnas han sido promediadas). Sin embargo, el resultado queda perfectamente claro. La temperatura ha estado relativamente estable desde hace mil años, mostrando un descenso en el conocido enfriamiento Medieval, pero a partir de 1850, la

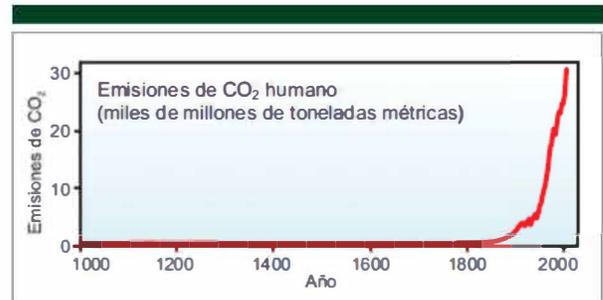


Figura 18. Emisiones de CO₂ de combustibles fósiles. Baden et al, 2009

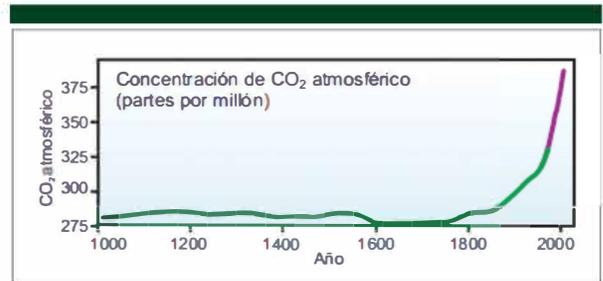


Figura 19. CO₂ atmosférico en ppm de Law Dome, Antártica y de Mauna Loa, Hawai.

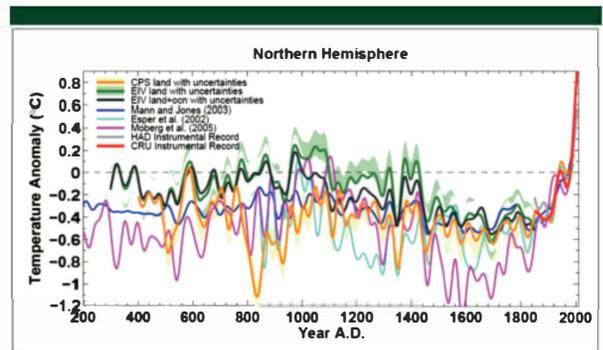


Figura 20. Reconstrucciones de la temperatura promedio terrestre por varios métodos, del año 200 a 2000 de nuestra era. Mann et al, 2008.

temperatura tiene una elevación marcada de 1.5 C en 150 años, dando una **tasa de aumento de 1 C/100 años**. Este valor es 10 veces más grande que el que encontramos que caracteriza el calentamiento global después de una época glacial durante el Pleistoceno y en especial en el último 1 millón de años y por tanto no es natural y otra demostración que el cambio es de origen antropogénico.

Efectos en los Océanos

El calentamiento de la superficie aumenta también la temperatura de los océanos. Los océanos en realidad ponen un freno al aumento de la temperatura promedio ya que tienen la capacidad de almacenar mucha energía en forma de calor al ir aumentando su temperatura en sus capas de diferente profundidad. La cantidad de calor almacenada en los océanos en los últimos tiempos es casi astronómica y ha sido comparada con la energía dada por una bomba atómica al estilo de Hiroshima (10 kilotones) por cada segundo desde 1970. En la Figura 21 podemos observar que la gran mayoría de la energía adicional esta almacenada en los océanos y poca sobre la superficie de la tierra y la atmósfera (Murphy et al, 2009).

El aumento de la temperatura sobre la superficie del mar causa un aumento en la intensidad y energía capturada por los huracanes en el Caribe. Este año ha habido ya dos huracanes de categoría 5 (vientos de más de 252 km/h), Irma y María, en el Caribe que hicieron destrozos espantosos en Houston, las islas del Caribe y Florida. La década de 2000-2009 con 8 huracanes es la que más huracanes de categoría 5 ha tenido hasta el presente.

Uno de los espectáculos marinos más hermosos son los arrecifes de coral en las aguas tropicales. Muy conocidos son los arrecifes de la Gran Barrera de Australia, en el Caribe, y las islas del Pacífico. Los corales son formados por pólipos animales que depositan carbonato de calcio para formar el hábitat donde viven, el cual es un organismo simbiótico con un alga que le ayuda a digerir su alimento y le da sus vivos colores. El aumento de la temperatura del océano desafortunadamente causa que el pólipo expele a su alga y entonces se blanquea como se observa en las fotos de la Figura 22 - ya en ese estado solamente puede sobrevivir varios meses más. Los arrecifes en los mares tropicales están muriendo a gran escala debido al aumento de temperatura. La Gran Barrera de Australia reporta más del 66% de blanqueamiento y el 22% de mortalidad en los últimos 2 años. Tasas de mortalidad similares se reportan también para el Caribe. Se ha estimado que la destrucción del hábitat pesquero de las costas va a costar al mundo más de un trillón de dólares (Hughes, 2017). La industria de turismo en esa área esta tan alarmada que pelean contra los científicos negando que la situación sea tan precaria...

Otro de los efectos del aumento de CO₂ en la atmósfera es la acidificación de los océanos. La disolución del CO₂ en el agua de mar depende de dos factores: la temperatura del agua y la presión parcial de CO₂ en la atmósfera (una forma alternativa de medir su concentración). El factor más importante es la cantidad de CO₂ en la atmósfera, y al aumentar esta, más aumenta el CO₂ disuelto. La temperatura tiene un efecto opuesto

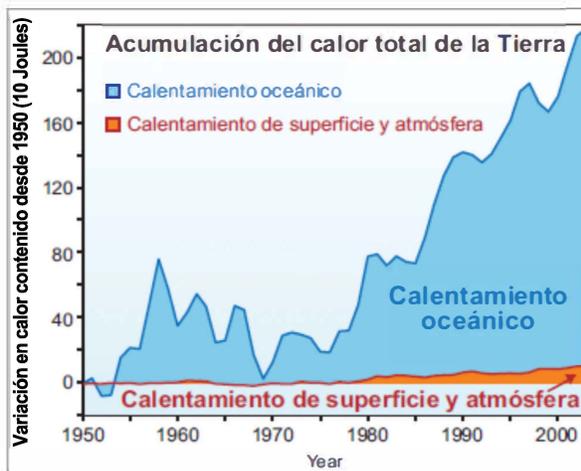


Figura 21. Almacenamiento de calor en la Tierra. Cook J, basado en Murphy et al, 2009.



Figura 22. El blanqueamiento de los corales en los arrecifes en Australia. Fotos de Bette Willis y Ed Roberts, Arc Centre of Coral Reef Studies.

- mientras más se calienta el agua, menos se disuelve el gas, pero es un efecto pequeño comparado con el efecto de la concentración de CO₂ en la atmósfera. Sin embargo, si implica que la acidificación sucede más rápidamente en el agua fría de las latitudes nortes, comparada con el agua tibia tropical. La acidez del agua se mide por la cantidad conocida como pH, que representa el logaritmo de la actividad de iones de hidrógeno disueltos en el agua. Dada la presencia del logaritmo, cada vez que cambia la concentración de iones por un factor de 10, el pH cambia por solo una unidad. En la Figura 23 podemos observar la correlación entre el pH promedio del agua en Aloha,

el CO₂ en la atmósfera en Mauna Loa y el CO₂ disuelto en el agua en Aloha (Dore et al, 2009).

Observamos de inmediato que el aumento del CO₂ disuelto (en forma de ácido carbónico como vimos anteriormente) correlaciona perfectamente con el incremento de CO₂ en la atmósfera, y por ende causa una disminución en el pH del agua del mar en la estación de Aloha, Hawaii. Es importante notar que el mar no es ácido, sino básico - su pH es mayor que 7.0, el pH neutro. Esto contrasta con el pH del agua de lluvia, de los lagos y los ríos, alimentadas por esa lluvia. Dada que el agua de lluvia es relativamente pura, solo disuelve los gases presentes en la atmósfera al caer, y solo uno de ellos puede causar acidez, el CO₂. Por tanto el pH del agua dulce es alrededor de 5.0 y es ácida. El agua de los océanos es alcalina porque al recorrer el agua de lluvia en su trayecto hacia el océano, pasa disolviendo los óxidos metálicos de la corteza terrestre que la convierten en alcalina y la llenan de sales minerales como el NaCl, la sal de mesa. La consecuencia de la acidificación del océano es grave pues la cadena alimenticia de los peces empieza con los foraminíferos y diatomeas, animalitos marinos que se recubren de una conchita de carbonato de calcio. El carbonato de calcio es estable solamente en agua alcalina y se disuelve aun a pH neutro y mucho más rápidamente en ácido. El pH marino ya ha bajado como un décimo de unidad, poniendo en peligro el plancton de latitudes norte.

Por si faltara más, al calentarse el océano, su volumen se expande - agregando a eso el derretimiento de glaciares terrestres y del polo sur tenemos una continua alza en el nivel del mar como se observa en la Figura 24. El nivel del mar ha sido estable en los últimos 3000 años del Holoceno hasta aproximadamente 1850-1900 cuando empezó a subir paulatinamente. La Figura 24 muestra varios datos reportados por el IPCC en su resumen general (Pachauri, Meyer, 2014) en que se muestra que el nivel subió 6 cm durante el siglo XIX y 19 cm durante el siglo XX. El aumento del nivel del mar causa significativa erosión y pérdidas económicas en las costas de todo el mundo, a la vez que aumenta la destrucción por tormentas por el mayor oleaje en las costas.

Varios estudios han tratado de estimar el cambio de nivel esperado para el siglo XXI con resultados que varían entre 1-4 metros. En el reporte del IPCC (Edenford et al, 2014), se proyecta un aumento de 1 m bajo el escenario pesimista de continuar como estamos. Dado que el calor se almacena en el océano, el hielo seguirá deritiéndose y el nivel del mar seguirá aumentando aun que cesen las emisiones de CO₂. Se ha proyectado que para el 2500, si se llega a la pérdida del hielo en Antártica que el nivel del mar subirá más de 15 metros y todo el estado de Delaware en EUA, la parte sur de Florida, el aeropuerto de San Francisco y las ciudades alrededor de la Bahía de San Francisco, y Sacramento, la capital de California desaparecerán bajo el agua (DeConto y Pollard, 2016). Aun para 2100, las costas de todo el planeta serán dramáticamente transformadas con pérdidas catastróficas para la humanidad.

Una consecuencia asociada al mar es el cambio de salinidad al derretirse el hielo del Polo Norte y Groenlandia - aunque esto no causa inmediata elevación del nivel del mar, si causa cambios importantes en la circulación marina. La corriente tibia del *Gulf*

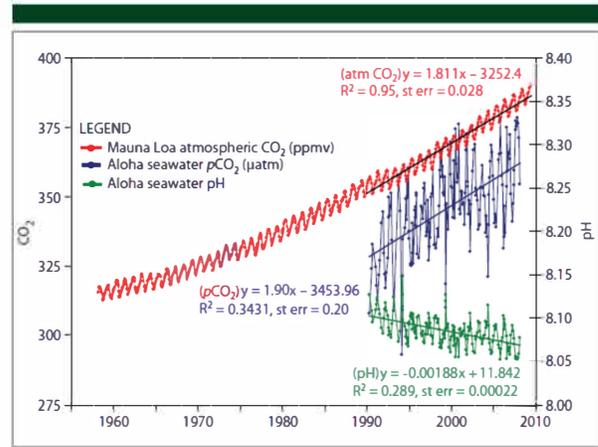


Figura 23. El efecto de la disolución de CO₂ en el océano

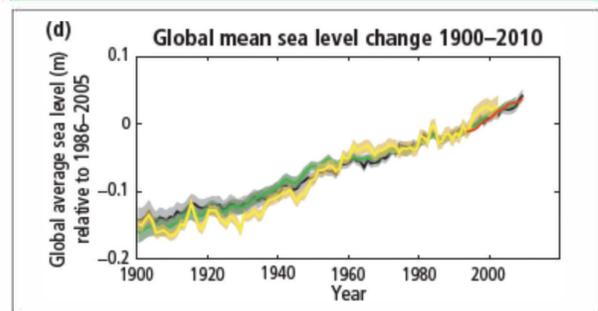


Figura 24. Cambio global del nivel del mar

Stream que sube hacia el norte a partir del Caribe y Florida, baja hacia Europa en un arco porque su densidad es menor que la del agua fría polar en las cercanías de Groenlandia y flota sobre estas. Sin embargo, al derretirse el hielo del Polo Norte, el agua dulce diluye la sal del océano en esas regiones y esto a su vez disminuye su densidad. El agua tibia de la corriente del *Gulf Stream* ya no podrá mantenerse sobre la superficie y se hundirá y con esto cesa su viaje hacia Europa. La consecuencia para Europa es un enfriamiento del clima que puede ser muy problemático para la agricultura en sus latitudes norte. El sistema de circulación global en los océanos se denomina *Atlantic meridional overturning circulation* (AMOC) - este efecto todavía no se detecta con suficiente confianza (Böning et al, 2016).

La redistribución de la precipitación, la sequía y el permafrost

El cambio de temperatura en la atmósfera cambiara el patrón de la circulación y con ello, la distribución de la lluvia sobre la corteza terrestre. En la Figura 24 podemos observar la comparación de la extensión de áreas húmedas y secas en las décadas del 1950-2099 tanto medidas como proyectadas por simulaciones climáticas (Dai, 2011). Períodos secos duraderos, generalmente causados por temperaturas anómalas de la superficie del océano como la Niña han llevado a sequía en Norte América, mientras que el Niño lleva sequía a China

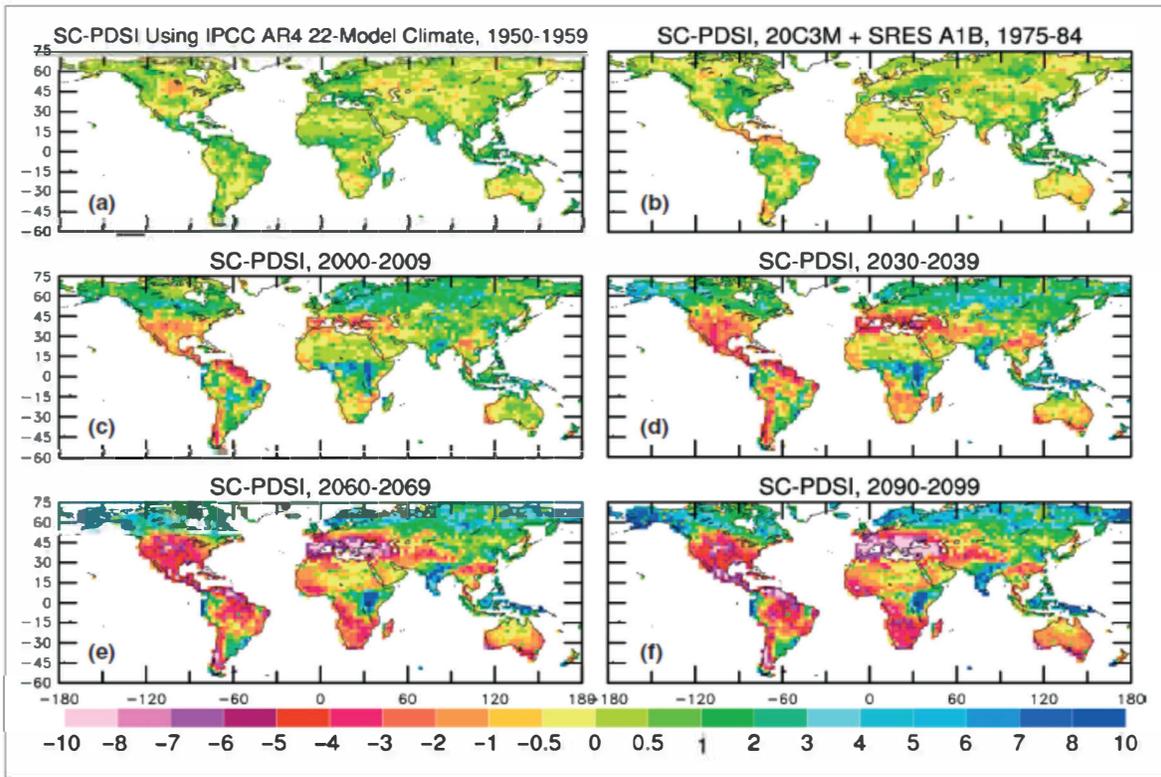


Figura 25. El avance de las zonas áridas por el calentamiento global. La escala inferior está basada en el Índice de Severidad de Sequía de Palmer. Sequía extrema es un índice de -4 para abajo. Cada cuadro se refiere a una década distinta, indicada sobre el mapa. Tomada de Dai, WIREs Climate Change, 2011.

oriental. La aridez global ha aumentado significativamente desde 1970 por las sequías sobre África, el sur de Europa, Asia Oriental y Sur, y el oriente de Australia en las que han contribuido *El Niño Southern Oscillation* (ENSO), elevadas temperaturas de las aguas en el Atlántico y los monzones de Asia. Al subir la temperatura de la atmósfera, el aire puede cargar más humedad sin formar nubes y en eso aumenta la demanda de agua. Así mismo, los patrones de circulación atmosférica se ven afectados y esto altera el patrón de las lluvias en muchas regiones. Los modelos climáticos proyectan incremento de la aridez en el siglo 21 sobre la mayor parte de África, el sur de Europa, el Medio Oriente y la mayor parte de América, Australia y Asia Suroriental. El aumento de la sequía por todo el globo se ve en la secuencia de los mapas en la Figura 25. El sur de EUA, México y Centroamérica estarán en sequía extrema dentro poco más de cuarenta años.

Mientras que en las latitudes medianas el problema fundamental es la sequía, en las latitudes norte tenemos otro problema. El permafrost (tundra congelada, Figura 26) del ártico almacena 1,800 Gtoneladas de carbón, el doble de lo que contiene la atmósfera al presente (Schädel et al, 2016). Cada grado centígrado de calentamiento libera el 25% de este carbón en forma de CO₂ y metano (34 veces más potente que el CO₂ como gas invernadero) al descomponerse la materia orgánica previamente congelada. Escondido en el permafrost se encuentra un potencial de 1 C adicional de aumento de temperatura global durante este siglo. Esta fuente de aumento de temperatura



Figura 26. El descongelamiento del permafrost contribuye al cambio climático.

no está tomada en cuenta por el IPCC en su último reporte. Científicos del Permafrost Carbon Network (Schurr, Abbott, 2011) predicen que de aquí al 2100, el efecto de agregar 300 Gtoneladas de carbón a la atmósfera aumentará la tasa de calentamiento de un 20 a 30% comparado con la quema de combustibles fósiles por sí solos. Normalmente, cada verano, se descongelan unos 10 cm del permafrost, pero ahora se espera que se descongele hasta 3 metros de profundidad. Esta circunstancia explica también porque el Ártico se ha calentado dos veces más rápidamente que el resto del planeta desde 1970. El descongelamiento del permafrost es un elemento de retroalimentación positiva en el sistema y por lo tanto también debe afectar la estimación de la sensibilidad del clima, aumentando su valor.

Adicionalmente a su efecto directo sobre el clima, el descongelamiento del permafrost contiene otras sorpresas. El permafrost también es un reservorio de patógenos extremos como Antrax (ya hubo las primeras víctimas en la península de Yamal, 2016), la viruela y la plaga bubónica. Los virus del tétano y *Clostridium botulinum* también pueden estar almacenados en el permafrost (Fox-Skelly, 2017). El problema es que ya no tenemos resistencia inmune a todas estas enfermedades.

¿Cuánto de las reservas de combustibles fósiles podríamos quemar en el futuro?

En el reporte IPCC -AR5 (Pachauri, Meyer, 2014) encontramos los números básicos que nos responden a esta pregunta. Varios modelos de cambio climático han demostrado que para tener una probabilidad de al menos 66% de producir no más de 2 C de calentamiento global antropogénico, las emisiones TOTALES de CO₂ desde 1870 no deben sobrepasar 2,900 Gt. De forma preocupante, encontramos que al 2011 ya se han emitido 1,900 Gt de esta cantidad, dejando solamente 1,000 Gt para ser emitidas en el futuro próximo. Esta cantidad equivale a 270 Gt de carbón. Nuestro problema es que en 2010 ya estábamos emitiendo 49 Gt de CO₂/año, con el 78% proveniente de la combustión de combustibles fósiles y procesos industriales. Esto equivale a 13.4 Gt de carbón, por lo que **solamente tenemos 15 años para dejar de producir CO₂**. Y esto es sin contar el carbón liberado por el permafrost, como discutimos anteriormente. Las reservas equivalentes de carbón todavía explotables en la Tierra son al menos 3,670 Gt, lo cual implica que tendremos que dejar en la tierra la gran mayoría de las reservas fósiles que quedan para evitar elevar la temperatura del planeta más de 2 C para el año 2100. Tendremos que aceptar las consecuencias globales de la quiebra de las compañías petroleras en el futuro próximo y estas lo van a pelear duro.

El clima y el futuro de la tierra

Las secciones anteriores han sido basadas en hechos científicos sólidos. En esta sección, aunque no abandonamos la ciencia, el tratamiento es mucho más especulativo por las escalas de tiempo tan largas que vamos a considerar.

Los siguientes mil años

Es evidente que la civilización humana sobre el planeta Tierra está enfrentando una de las mayores crisis en su existencia. La sensibilidad del clima al aumento del CO₂ es una cantidad que nos indica lo que nos espera en el futuro próximo. Si duplicamos la cantidad de CO₂ en la atmósfera, la sensibilidad nos dice cuántos grados centígrados aumenta la temperatura global. El valor ha sido determinado de varias formas con un resultado entre 1.5 - 4 C (Cook, 2010). Si tomamos el nivel intermedio más probable, 3 C, entonces tomando en cuenta que el CO₂ ha aumentado de 286 ppm a 400 ppm desde el inicio de la era industrial, vemos que el resultado es ya 2 C de cambio de temperatura global promedio. Es decir, los acuerdos de París no van a lograr evitar llegar a ese límite esperado y muchas de las predicciones de la sección anterior van a realizarse. Esperamos un período futuro de varios siglos de miseria humana con disminución de la población, migración masiva y guerras mientras el sistema terrestre se logra equilibrar en menores niveles de CO₂ en la atmósfera. Ya sea antes de la catástrofe o como resultado de ella, para sobrevivir en este planeta la humanidad tendrá que desarrollar una conciencia planetaria que permita organizarse para el beneficio de la biósfera entera y no solamente de los intereses a corto plazo de una sola de sus especies. Este período de tiempo será los próximos mil años. Durante este período de tiempo la humanidad va a implementar un sistema energético global dependiente exclusivamente de fuentes renovables de energía, y el sistema eléctrico será global, con captación de energía solar del hemisferio iluminado para darle potencia al hemisferio que está de noche, por ejemplo. Todos los países tendrán que colaborar y habrá un verdadero gobierno mundial. Quienes estamos vivos ahora, nuestros hijos y nuestros nietos, somos quienes iniciaremos todo este proceso.

Los siguientes 100 mil años y la habitabilidad máxima del planeta en el futuro lejano

Con optimismo, proyectamos a tiempos más adelante en el futuro porque la fase anterior de mil años tendrá éxito. Para el futuro lejano de la Tierra debemos observar de nuevo la Figura 3 de los ciclos de Milankovitch. Desde el principio de la presente era interglacial la órbita de la Tierra es casi un círculo perfecto - estamos en un período de baja excentricidad que va a durar por unos 50 mil años más. Durante este período es improbable que se nos venga una nueva época glacial, pero eventualmente vendrá una nueva, dentro de los siguientes 90 mil años cuando la excentricidad de la órbita terrestre llegue a su máximo de nuevo. La configuración de los continentes sobre la superficie de la tierra no cambiará significativamente por los siguientes 150 millones de años, permitiendo aun las épocas glaciales. Durante una época glacial, los océanos pueden bajar de nivel hasta por 300 metros al depositarse capas de hielo de varios km de grosor en los polos y latitudes norte del planeta. Esto también sería catastrófico para nuestra civilización. Irónicamente, para enfrentar ese nuevo reto vamos a tener que modificar el clima del planeta probablemente por la inyección de gases invernadero en la atmósfera. Lo irónico es que necesitamos dejar de quemar el petróleo y el carbón ahora, para que dentro

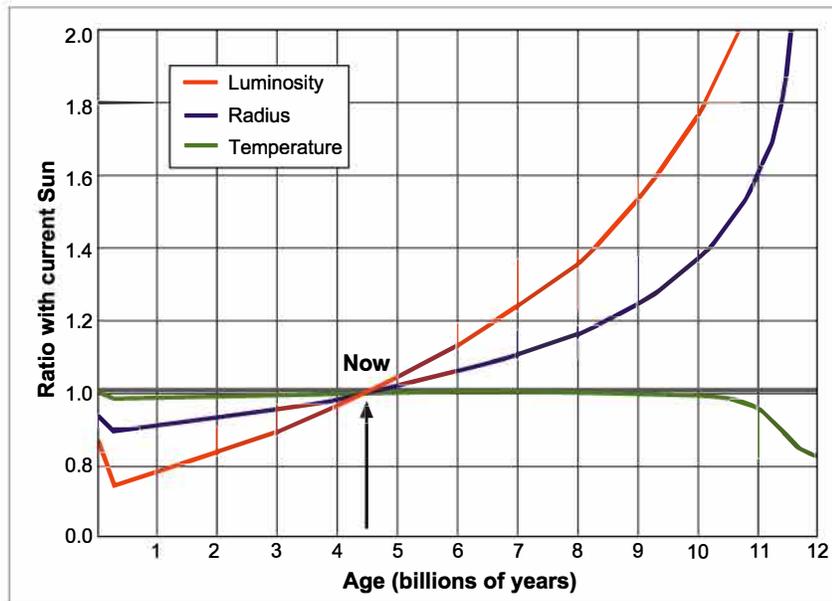


Figura 27. La luminosidad, el radio y la temperatura del Sol en función de edad del Sol, como la fracción de los valores presentes. Ribas, 2009.

de miles de años tengamos fuentes de carbón para generar CO_2 en la atmósfera y evitar el próximo ciclo glacial. Además de CO_2 , también tendremos a nuestra disposición la gran cantidad de metano que está almacenada en el fondo de los océanos en forma de clatratos de metano. La ventaja de usar metano es que su permanencia en la atmósfera es mucho más corta que el CO_2 , pero es un gas invernadero más potente. A su vez, tendremos que desarrollar la capacidad de eliminar y almacenar subterráneamente los gases introducidos en escalas de tiempo medidas en miles de años. Durante este período del desarrollo de nuestra civilización no tendremos alternativa que llevar a cabo ingeniería del clima planetario por el resto de la existencia de la Tierra dentro del sistema Solar. Es una transición parecida a la que hace un adolescente a su madurez adulta donde se vuelve responsable por completo de su futuro. A escalas de tiempo tan largas, tenemos que lidiar con el hecho que los cambios naturales del clima son dramáticos y no podemos sentarnos a esperar que sencillamente nos ocurran las consecuencias. Tendremos que ser los amos de nuestro planeta, pero en equilibrio son su biósfera entera.

El reto de las futuras épocas glaciales palidece con otro aspecto que eventualmente hará nuestro planeta inhabitable - la evolución del Sol hacia una estrella roja gigante y su eventual conversión a un enano blanco dentro de 7.6 billones de años. En ese punto la Tierra y los planetas interiores del sistema solar serán incinerados y destruidos por la nébula solar que expulsa la estrella al achicarse a un enano blanco. Sin embargo, mucho antes que esto suceda, el planeta va a perder todos los océanos por evaporación y la biosfera será aniquilada. Veamos por qué. El proceso de evolución de una estrella de la masa de nuestro Sol está bien descrito por la ciencia de las reacciones nucleares. En la Figura 27 se observan varios parámetros que

describen la evolución del sol a partir de este momento hasta la etapa de estrella gigante roja del Sol (Ribas, 2009).

De esta grafica podemos obtener un valor crítico: la intensidad de iluminación del sol aumenta paulatinamente por 1% cada 110 millones de años. Dentro de un billón de años habrá aumentado por 10% y esto es suficiente para generar un efecto invernadero imparable, lo cual conlleva a la evaporación de todos los océanos eventualmente dejando el planeta como Venus, rodeado de un envoltorio de nubes densas. En la Figura 28 podemos observar cómo se ve Venus al presente, mientras que en la Figura 29 podemos observar cómo se verá la Tierra, según la imaginación de un artista, cuando sea un escombros sin océanos ni atmósfera durante la etapa de estrella roja gigante del Sol. La evaporación de los océanos es inevitable a eso de un billón de años porque al aumentar la temperatura de la superficie terrestre por el efecto invernadero, se evapora cada vez más agua hacia la atmósfera. Esto hace crecer el efecto invernadero hasta que la atmósfera se vuelve opaca a la radiación infrarroja y el nivel de CO_2 tiene contribuciones insignificantes. En ese entonces, la temperatura de la capa de nubes altas ya es independiente de la temperatura sobre la superficie, poniendo un máximo a la pérdida de energía hacia el espacio. De allí en adelante aumenta la temperatura de la superficie hasta que ya no haya más agua que evaporar. Toda la vida habría cesado en el planeta mucho antes que esto empiece, por supuesto. Tres grupos de investigación han modelado el futuro de la Tierra al ir aumentando la iluminación del Sol. El primero de ellos (Kopparapu et al, 2013) usó un modelo unidimensional sin tomar en cuenta las nubes y predijo que los océanos se evaporarían de aquí a unos 700 millones de años a lo más. Luego otros dos estudios posteriores que usaron modelos tridimensionales, con presencia de nubes,



Figura 28. Venus tiene un efecto invernadero máximo y es un horno infernal en su superficie, 462 C.



Figura 29. La Tierra convertida en un escombros sin atmósfera ni océanos. Tomada: Science 2014.

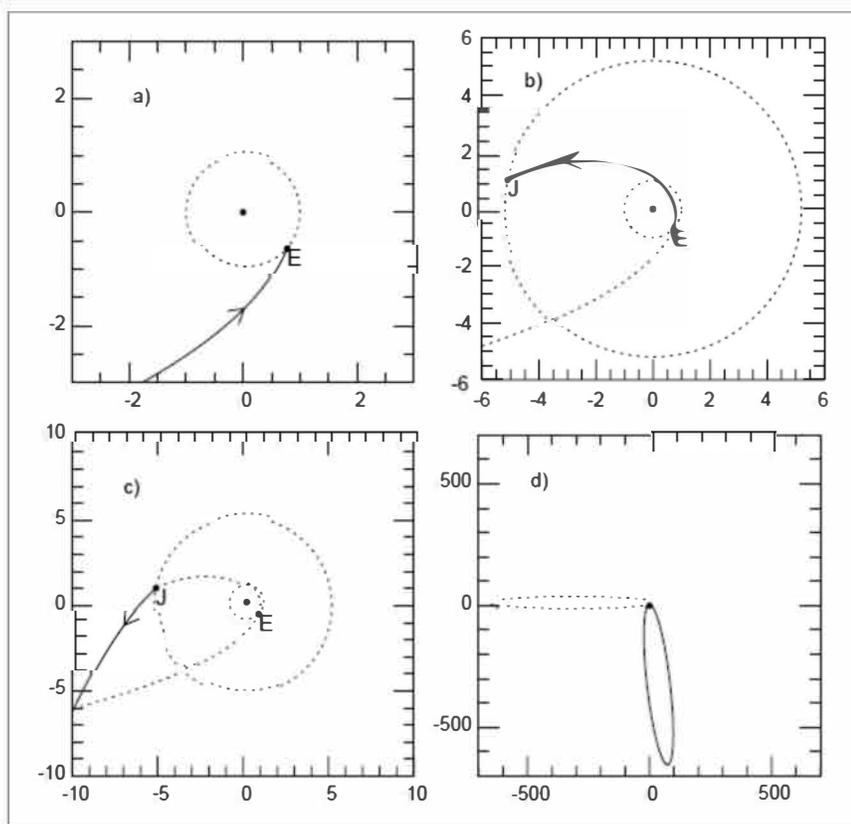
humedad y CO₂ fijo a 500 ppm, indicaron que la catástrofe ocurre a 1.5 billones de años o más (Wolf, Toon, 2014; Wolf, Toon, 2015) o dentro de un billón de años (Leconte et al, 2013).

En resumen, alrededor de un billón de años en el futuro, la Tierra se vuelve el infierno mismo, y en los billones de años en que el Sol llega a su estado máximo de estrella gigante, la radiación solar le elimina toda su atmósfera, dejando solamente un escombros rocoso. Entonces, mucho antes de llegar a la pérdida de los océanos, para sobrevivir, la humanidad tendrá que dirigirse a otros planetas o lunas del sistema Solar, emigrar a otros sistemas planetarios de otras estrellas y/o mover la órbita de la Tierra!

Mover la órbita de la Tierra

Imaginémonos que alejamos la Tierra del Sol al mismo ritmo que el Sol aumenta en intensidad para quedarnos con la misma cantidad de energía recibida que ahora. Si lográsemos esto, entonces podríamos dirigir la órbita de la Tierra hacia Marte y evitar la catastrófica evaporación de los océanos y poder sobrevivir en este planeta hasta 6.5 billones de años en el futuro. Esa es la tesis de tres astrónomos (Korycansky et al, 2001) utilizando un asteroide que los humanos ponemos en movimiento en una órbita alrededor de la Tierra para darle un empujón aproximadamente cada 6000 años. Korycansky, Laughlin y Adams hicieron cálculos con aproximaciones sencillas (cero excentricidades de la órbita de la Tierra, por ejemplo), para investigar qué tan factible es tal propuesta. En la Figura 30 se observan características de la órbita del asteroide según fueron calculadas por estos astrónomos. La órbita sería extremadamente excéntrica, una elipse cuyo foco estaría unas 650 veces más lejana del Sol que la Tierra, pasando más allá de la región de asteroides de Kuiper, después de Neptuno. Después de cada interacción con la Tierra, el asteroide pasa por Júpiter, recuperando la energía perdida al jalar la Tierra.

El asteroide en cuestión tendría que ser cosechado ya sea del área de Kuiper misma, o del área de asteroides entre Marte y Júpiter. Obviamente esto requiere de la exploración espacial de estas regiones de nuestro sistema solar para poder identificar un asteroide apropiado e instalar sistemas de propulsión, probablemente basados en agua extraíble de otros asteroides y cometas, y dirigirlo en órbita hacia la Tierra. Para llevar a cabo todo esto necesitamos desarrollar una base Lunar internacional para el almacenamiento de meteoritos de alto contenido metálico, de trozos de cometas para obtener agua de la cual se extrae hidrogeno para propulsión, y la manufactura de naves espaciales para llevar a cabo todo el proceso. NASA ya está diseñando los inicios de tal base Lunar para sus proyectos de investigación del sistema Solar. La tecnología necesaria ya está a mano, aunque conviene desarrollar metodología más avanzada de propulsión para sobrepasar lo que podemos lograr utilizando solamente pilas atómicas al momento. La ventaja es que tenemos los siguientes 100 mil años para dar inicio a este proyecto y lanzar el asteroide que daría vida a nuestra civilización por 6 billones de años más en este planeta. Las características del asteroide pueden calcularse en base a los requisitos: debe pesar unos 10^{19} kg, tener un diámetro de unos 180 km, pasar por la Tierra cada 5859 años un millón de veces para ir a dejarnos a 1.4 AU de distancia del Sol (AU es el radio presente de nuestra órbita). Cada paso del asteroide le da 10^8 J/kg de impulso a la Tierra lo cual la aleja unos 56 km del Sol. Hay mucho que investigar para hacer esta propuesta mucho más detallada y realista. Por ejemplo, un método de evitar que la Luna se escape de la Tierra durante este proceso es necesario ya que la Luna nos sirve para estabilizar la dirección del eje de rotación de la Tierra a escalas de tiempo de billones de años. Así mismo, es necesario estudiar cómo se modifican los ciclos de Milankovitch durante la ingeniería de la órbita de la Tierra y estudiar las perturbaciones causadas por la órbita de Marte al acercamos cada vez más a ese planeta.



- a) Órbita inicial para el encuentro con la Tierra.
- b) Órbita hacia Júpiter después de la Tierra.
- c) Órbita después de Júpiter
- d) Comparación de órbitas inicial y de regreso (línea sólida).

Figura 30. Órbitas de encuentros sucesivos para el esquema asteroide Tierra-Júpiter. Las unidades de las escalas horizontales están en AU, distancia entre la Tierra y el Sol, la unidad astronómica. Tomada de Korycansky, 2001.



Figura 31. Andrómeda empezando a chocar con la Vía Láctea dentro de 3.75 billones de años. *Credito: NASA; ESA; Z. Levay and R. van der Marel, STScI; T. Hallas; and A. Mellinger*
https://www.nasa.gov/mission_pages/hubble/science/milky-way-collide.html

Sin embargo, lograr este proyecto tan grandioso daría la oportunidad a nuestros descendientes lejanos de poder observar el proceso más espectacular imaginable en el Universo: presenciar el choque de la galaxia de Andrómeda con la Vía Láctea dentro de 4 billones de años.

La galaxia de Andrómeda, la más cercana, se encuentra a unos 2.54 años luz de distancia de la nuestra. Andrómeda tiene el doble de tamaño que la Vía Láctea y se nos acerca a una velocidad de 396,000 km/h. El choque de las dos galaxias espirales va a generar una nueva galaxia unificada de geometría probablemente elíptica, con una reorganización dramática de las áreas centrales de ambas galaxias a lo largo de un billón de años (van der Marel, 2012). Dado que nuestro sistema solar se encuentra en la punta de uno de los brazos espirales de nuestra galaxia, es muy probable que el sistema Solar sobreviva intacto a esta reorganización tan dramática. En tal caso, cuando empiece este choque nuestros descendientes lejanos, por todas las noches de sus vidas, verán a puro ojo algo tan maravilloso como se observa en la Figura 31. Una simulación del choque puede observarse en el video³. Las galaxias tienen tanto espacio entre sus estrellas que no habrá choques significativos entre estrellas. En este proceso se espera que el sistema solar sea lanzado a una distancia mucho mayor del nuevo centro de lo que ahora se encuentra.

Conclusiones

Del análisis del clima durante las glaciaciones en los últimos 500 mil años observamos que la tasa de calentamiento global es de 1 C/1000 años lo cual es 10 veces más lento que la tasa actual 1 C/100 años. Los cambios de temperaturas en la estratósfera y la troposfera, el mayor número de noches calientes que días, el aumento de la radiación infrarroja llegando a la superficie terrestre y su disminución escapando hacia el espacio comprueban que el efecto invernadero del CO₂ es la causa de la elevación de la temperatura. De la constitución isotópica del carbón en la atmósfera y su correlación con las emisiones de CO₂ antropogénicas, concluimos que el calentamiento global es de origen antropogénico por la quema de combustibles fósiles. Concluimos a su vez, que la actividad volcánica no puede explicar el incremento de CO₂ en la atmósfera a partir de 1800. Por tanto, el cambio climático es de origen antropogénico. Hemos observado muchas de las formas en que el cambio climático está impactando la atmósfera, los océanos, y la fauna y flora en el planeta, estando en el umbral de la Sexta Gran Extinción de especies. Para sobrevivir en la Tierra más allá de los siguientes mil años, la política terrestre tendrá que cambiar para conservar la biósfera al mismo tiempo que nuestra civilización.

En los siguientes 100 mil años tendremos que aprender a controlar el clima de la Tierra para evitar los ciclos glaciales. A mucho más largo plazo, vimos que el proceso de evolución del Sol a convertirse en estrella roja gigante hará inhabitable la Tierra en un billón de años por lo que conviene mover su órbita hacia Marte. La órbita de la Tierra se puede mover con la ayuda de un asteroide con una órbita muy excéntrica alrededor de la Tierra cada 6000 años, extendiendo la habitabilidad del planeta hasta 6.5 billones de años en el futuro. Tal proyecto de ingeniería astronómica permitirá a nuestros descendientes lejanos observar la colisión y unión de la gran galaxia de Andrómeda y la Vía Láctea empezando en unos 3.75 billones de años.

Epílogo: la situación de Guatemala

Guatemala tiene una población de unos 16 millones de habitantes y su contribución al CO₂ mundial en la atmósfera es relativamente pequeña. Mientras que en los países desarrollados hay un esfuerzo grande por la introducción de tecnología de transporte eléctrica y el cierre de plantas a base de carbón, esto todavía no sucede en Guatemala porque no hay incentivos gubernamentales que ayuden a tecnologías renovables a competir con los motores de combustión interna o la quema del carbón para producir electricidad. La utilización de paneles solares en los techos está completamente fuera del alcance económico de la gran mayoría de la población. Hace unos 5 años empezaron a difundirse pequeñas hidroeléctricas y sistemas fotovoltaicos en el país, pero con el inicio de operaciones de la carbonera Jaguar en la Costa Sur en 2015, bajó significativamente el costo del kWh en el país y con ello se desincentivó la inversión en proyectos fotovoltaicos privados. La planta de 300 MW de Jaguar Energy produjo 294 ktoneladas de CO₂ en 2015 y 562 ktoneladas de CO₂ en 2016⁴. En 2014, la utilización de combustibles líquidos (gasolina y diésel) en Guatemala produjo 14,700 ktoneladas, y el total de sus emisiones fueron de 18,300 ktoneladas de CO₂ al año⁵ - Jaguar produce el 3% de las emisiones totales de Guatemala. En 2014, la producción de CO₂ per cápita en Guatemala era de 1.15 toneladas, mientras que el promedio del mundo era 4.59 toneladas y en EUA era de 16.5 toneladas. Jaguar tiene un buen programa de reforestación, el cual ayudará con respecto a la sequía del futuro, pero los árboles que siembra no fijan todo el CO₂ que produce la planta. Europa continental va a cerrar todas sus carboneras para el 2030, mientras que Inglaterra lo logrará para el 2025, y en el 2016, Inglaterra produjo solamente el 2% de su electricidad por la quema del carbón. En EUA, el carbón contribuye un decreciente 30% de la energía del país, mientras que, en Costa Rica, casi el 100% de su energía es renovable⁶.

Dado que el Gobierno de Guatemala utiliza de manera demasiado ineficiente sus recursos, invirtiendo inadecuadamente

³ https://www.nasa.gov/mp4/654254main_v1220j_H264l.mp4

⁴ (<http://jaguarenergy.com.gt/ambiente/>)

⁵ (<https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.LF.KT?locations=GT>)

⁶ (<http://www.independent.co.uk/environment/costa-rica-renewable-energy-electricity-production-2016-climate-change-fossil-fuels-global-warming-a7505341.html>)

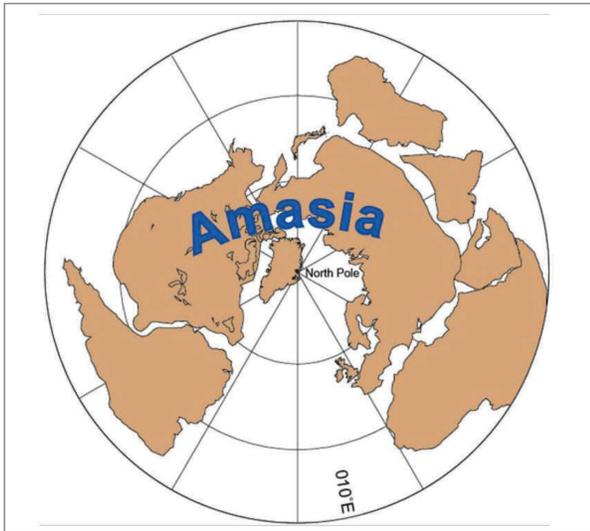


Figura 32. El supercontinente de Amasia dentro de 260 millones de años no tiene Mar Caribe ni Centro América. Adaptado de Mitchell et al., 2010.

aun en servicios básicos de educación y de salud, no se espera que lleguen incentivos gubernamentales para ayudar a la electrificación del transporte o producción de energía renovable en las siguientes décadas. La tecnología de transporte eléctrico no llegará a Guatemala en forma significativa hasta que esté suficientemente madura como para que sustituya a los motores de combustión interna por sí sola, siguiendo los lineamientos de varios países que han declarado la eliminación de los motores de gasolina en las siguientes décadas (China, Francia, Inglaterra y Suecia, por ejemplo). De tal manera, aunque sea moralmente apropiado que se elimine la combustión de carbón mineral importado para generar electricidad en Guatemala, asumo que esto no cesará en el futuro próximo por razones puramente económicas locales - la inversión en Jaguar fue de \$900 millones. Sin embargo, la situación es más positiva de lo que aparenta.

De acuerdo al reporte de AGEXPORT de agosto, 2017, la generación eléctrica en Guatemala llegó a un 73% a base de energía renovable, con Jaguar produciendo el 24% de energía a base de carbón mineral durante el mes de Julio, 2017. Guatemala tiene licitaciones por 420 MW pendientes este año para cualquier fuente de energía. El *National Renewable Energy Laboratory*, DOE, estima que el costo fotovoltaico instalado hoy es \$1.20/W, con lo que la licitación anterior costaría unos \$500 millones, a un precio menos de la mitad de los \$3/W que costo Jaguar. ¿Qué hacer con Jaguar en el futuro? Convertirla a la quema de biomasa es lo más razonable, pues la biomasa tiene su origen en la energía del Sol. La energía fotovoltaica contratada en Enero 2017 en El Salvador, fue una planta de 120 MW a un precio de \$51.48/MWh uno de los más bajos de la región al momento⁸. Honduras es el país con mayor proporción de

energía fotovoltaica en su red en el mundo, con 10% - Guatemala al momento tiene solamente 2%. Adicionalmente Centro América ha construido una red regional de distribución eléctrica: Sistema de Interconexión Eléctrica de Países de América Central (SIEPAC). Esperemos que Guatemala aumente su contratación de energía fotovoltaica ahora.

La posibilidad de la generación de gas metano y su utilización para la producción de energía eléctrica en Guatemala ha sido considerada por Rolz (Rolz, 2015, 2017). La combustión del metano es muy favorable comparado con el carbón mineral pues genera mucho menos CO₂ por unidad de energía producida.

A pesar de estos avances, Guatemala sí va a sufrir las consecuencias del alza de CO₂ y el cambio climático, contribuya o no a mitigarlas. El análisis del cambio climático para Latinoamérica en general está bien presentado en el reporte específico del IPCC-AR5 (Carabine, Lemma, 2014). La consecuencia más importante en Guatemala probablemente será la sequía. La sequía vendrá en promedio al mismo tiempo que habrá inundaciones en momentos específicos. En la Figura 25 se nota el aumento en la severidad de la sequía en toda la región de México y Centro América en las siguientes décadas. Las consecuencias económicas de la sequía podrían ser severas, pero se pueden mitigar con programas urgentes y extensos de reforestación. De seguir como vamos, para el año 2050 el aeropuerto de San Francisco estará bajo de agua - lo mismo acontecerá para los establecimientos portuarios en Santo Tomás de Castilla en el Caribe y el puerto San José en el Pacífico. Las consecuencias económicas para el país serán graves si no se planifica la mitigación por el alza del nivel del mar a largo plazo en estos locales.

Para el futuro lejano, la situación es dramáticamente negativa, no por cambio climático en sí, sino por el movimiento de las placas tectónicas. Dentro de 200 millones de años, cuando se empiece a vislumbrar la formación del nuevo continente de Amasia (Mitchell et al, 2012), la total destrucción del istmo Centroamericano empezará. Como se ve en la Figura 32, al final de 260 millones de años, Centro América dejará de existir, habiendo sido apachurrada por completo entre los continentes de Norte y Sur América, al compás que Antártica abandona el Polo Sur y viaja hacia la nueva costa de Sur América. Por ende, cuidar nuestro bello pedazo de tierra antes que desaparezca podría ser lo mejor que pudiéramos hacer.

Agradecimiento

Agradezco al Dr. John Cook por el uso de muchas graficas de su folleto didáctico, *Scientific Guide to Global Warming Skepticism*, traducido al castellano por lamentiraestaahifuera.com. www.skepticalscience.com.

⁷ (<http://agexporthoy.export.com.gt/wp-content/uploads/2017/09/Monitor-Energ%C3%A9tico-Agosto-2017.pdf>)

⁸ (<https://pv-magazine-usa.com/2017/04/23/breaking-new-ground/>)

Bibliografía

- Alexander, L.V., Zhang, X., Peterson, T.C., Caesar, J., Gleason, B., Tank, A.M.G.K., Haylock, M., Collins, D., Trewin, B., Rahimzaden, F., Tagipour, A., Kimar, K.R., Revadekar, J., Griffiths, G., Vincent, L., Stephenson, D., Burn, B., Aguilar, E., Brunet, M., Taylor, M., New, M., Zhai, P., Rusticucci, M., Vasquez-Aguirre, J.L. (2006) Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation J. Geophysical Research 111: D05109.
- Baden, T.A., Marland, G., Andres, R.J. (2009) Global, regional and national fossil-fuel CO₂ emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., doi 10.3334/CDIAC/00001
- Böning, C.W., Behrens, E., Biastoch, A., Getzlaff, K., Bamber, J.L. (2016) Emerging impact of Greenland meltwater on deepwater formation in the North Atlantic Ocean Nature Geoscience 9: 523-527.
- Burton, M.R., Sawyer, G.M., Granieri, D. (2013) Deep carbon emissions from volcanoes Reviews in Mineralogy and Geochemistry 75: 323-354.
- Carabine, E., Lemma, A. (2014) IPCC Fifth Assessment Report: What's in it for Latin America? IPCC.
- Cook, J. (2010) The scientific guide to global warming skepticism SkepticalScience.com.
- Dai, A. (2011) Drought under global warming: a review WIREs Climate Change 2: 45-65.
- Deconto, R.M., Pollard, D. (2016) Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise Nature 531: 591-597.
- Dore, J.E., Lukas, R., Sadler, D.W., Church, M.J., Karl, D.M. (2009) Physical and biogeochemical modulation of ocean acidification in the central North Pacific Proceedings of the National Academy of Sciences USA 106:12235-12240.
- Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Adler, A., Baum, I., Brunner, S., Eickemeier, P., Kriemann, B., Savolainen, J., Schlömer, S., von Stechow, C., Zwickel, T., Minx, J.C. (eds.) (2014) Summary for Policymakers In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK and NY.
- Etheridge, D.M., Steele, L.P., Langenfelds, R.J., Francey, R.L., Barnala, J.M., Morgan, V.I. (1998) Historical CO₂ records from the Law Dome DE08, DE08-2, and DSS ice cores. In Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., USA.
- Faure, G. (1986) Principles of Isotope Geology 2nd Ed, John Wiley, NY.
- Fox-Skelly, J. (2017) Long dormant bacteria and viruses, trapped in ice and permafrost for centuries, are reviving as Earth's climate warms, BBC. <http://www.bbc.com/earth/story/20170504-there-are-diseases-hidden-in-ice-and-they-are-waking-up>.
- Francey, R.J., Allison, C.E., Etheridge, D.M., Trudinger, C.M., Enting, I.G., Leuenberger, M., Langfelds, R.L., Michel, E., Steele, L.P. (1999) A 1000-year high precision record of $\delta^{13}\text{C}$ in atmospheric CO₂ Tellus B: Chemical and Physical Meteorology 51: 170-193.
- Gerlach, T. (2011) Volcanic versus anthropogenic carbon dioxide EOS 92: 201-202.
- Harries, J.E., (2001) Increases in greenhouse forcing inferred from the outgoing longwave radiation spectra of the Earth in 1970 and 1997 Nature 410: 355-357.
- Hartmann, W.K., Davis, D.R. (1975) Satellite-sized planetesimals and lunar origin Icarus 24: 504-505.
- Hays, J.D., Imbrie, J., Shackleton, N.J. (1976) Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages Science 194: 1121-1132.
- Hughes, L., Steffen, W., Alexander, D., Rice, M. (2017) Climate change: a deadly threat to coral reefs Climate Council of Australia. https://uploads.guim.co.uk/2017/04/11/CC_Report_1.pdf.
- Jakosky, B.M., Grebowsky, J.M., Luhmann, J.G., Brain, D.A. (2015) Initial results from the MAVEN mission to Mars Geophysical Research Letters 42: 8791-8802 <https://youtu.be/EoUy4lsgRo8>. Video de la pérdida de la atmósfera de Venus.
- Jones, G., Tett, S., Stott, P. (2003) Causes of atmospheric temperature change 1960-2000: A combined attribution analysis Geophysical Research Letters 30: 1228.
- Keeling, C.D., Bacastow, R.B., Bainbridge, A.E., Ekdahl, C.A., Guenther, P.R., Waterman, L.S., Chin, J.F.S. (1976) Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii Tellus 28: 558-551.
- Kopparapu, R.K., Ramirez, R., Kasting, J.F., Eymet, V., Robinson, T.D., Mahadevan, S., Terrien, R.C., Domagal-Goldman, S., Meadows, V., Deshpande, R. (2013) Habitable zones around main-sequence stars: New estimates The Astrophysical Journal 765: 131 (16pp).
- Karycansky, D.G., Laughlin, G., Adams, F.C. (2001) Astronomical engineering: a strategy for modifying planetary orbits AstroPhys. Space Sci. 275:349-366
- Krivova, N.A., Balmececa, L., Solanki, S.K. (2007) Reconstruction of solar total irradiance since 1700 from the surface magnetic flux Astronomy Astrophysics 467: 335-346.
- Laskar, J., Joutel, F., Robutel, P. (1993) Stabilization of the Earth's obliquity by the Moon Nature 361: 615-617.
- Lastovicka, J., Akmaev, R.E., Beig, G., Bremer, J., Emmert, J.T. (2006) Global change in the upper atmosphere Science 314: 1253-1254.
- Leconte, J., Forget, F., Charnay, B., Woodworth, R., Pottier, A. (2013) Increased insolation threshold for runaway greenhouse processes on Earth-like planets Nature 504: 268-271.
- Lee, J.E., Shen, A., Fox-Kemper, B., Ming, Y. (2016) Hemispheric sea ice distribution sets the glacial tempo Geophysical Research Letters 44: 1008-1014.
- Lisiecki, L.E., Raymo, M.E. (2005) A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records Paleoceanography 20: 1-17.
- Lissauer, J.J., Barnes, J.W., Chambers, J.E. (2013) Rotation of a moonless Earth. Nasa Ames Research Report.
- Ma, Q. (1998) Greenhouse gases: redefining the role of carbon dioxide NASA Science Briefs https://www.giss.nasa.gov/research/briefs/ma_01/
- Mann, M., Zhang, Z., Hughes, M., Bradley, R., Miller, S., Rutherford, S., Ni, F. (2008) Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variation over the past two millennia Proceedings of the National Academy of Sciences 105: 1352-1357.
- Mann, M. (2012) The Hockey Stick and the Climate Wars Columbia University Press, NY.
- Milanković, M. (1998) Canon of Insolation and the Ice-age Problem (Translated From German Edition of 1941), 619 pp. Agency for Textbooks, Belgrade.
- Mitchel, R.N., Kilian, T.M., Evans, A.D. (2012) Supercontinent cycles and the calculation of absolute palaeolongitude in deep time Nature 482: 208-211.
- Moberg, A., Rezwani, M., Mearns, T. (2008) Analysis of the Moberg et al (2005) hemispheric temperature reconstruction Climate Dynamics 31:957-971.
- Murphy, D.M., Solomon, S., Portmann, R.W., Rosenlof, K.H., Forster, P.M., Wong, T. (2009) An observationally based energy balance for the Earth since 1950 Journal of Geophysical Research 111: D17107
- O'Leary, M.H. (1988) Carbon Isotopes in photosynthesis BioScience 38: 328-336.
- Pachauri, R.K., Meyer, L.A. (2014) Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the IPCC, IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Parmesan, C., Yohe, G. (2003) A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems Nature 421: 37-42.

- Petit, J.R., Jouzel, J., Raynaud, D., Barkov, N.I., Barnola, J.M., Basile, I., Bender, M., Chappellaz, J., Davis, M., Delaygue, G., Delmotte, M., Kotlyakov, V.M., Legrand, M., Lipenkov, V.Y., Lorius, C., Pépin, L., Ritz, C., Saltzman, E., Sievenard, M. (1999) Climate and atmospheric history over the past 420,000 years from the Vostok ice core, *Antarctica Nature* 399: 429-436.
- Petit, J.R., Raynaud, D., Barkov, N.I., Barnola, J.M., Basile, I., Bender, M., Chappellaz, J., Davis, M., Delaygue, G., Delmotte, M., Kotlyakov, V.M., Legrand, M., Lipenkov, V.Y., Lorius, C., Pépin, L., Ritz, C., Saltzman, E., Wang, K., Liang, S. (2009) *Global atmospheric downward longwave radiation over land surface under all-sky conditions from 1973 to 2008* *Journal of Geophysical Research* 114: D19.
- Rolz C (2015) *La generación futura de electricidad: ¿el carbón o el metano?* *Revista de la Universidad del Valle de Guatemala* 31: 8-10.
- Rolz C (2017) *Procesamiento de aguas domésticas e industriales, basura municipal y desechos agroindustriales como productores netos de energía ¿Es posible?* *Revista de la Universidad del Valle de Guatemala* 34: 9-14.
- Ribas, I. (2009) *The Sun and stars as the primary energy input in planetary atmospheres* En: Kasavichev, A.G., Andrei, A.H., Razelat, J.P. (eds) *Solar and Stellar Variability: Impact on Earth and Planets Proceedings IAU Symposium 264*, pp 3-18.
- Saunders, B.D., Wehner, M.F., Wigley, T.M., Sausen, R., Meehl, G.A., Taylor, K.E., Ammann, C., Arblaster, J., Washington, W.M., Boyle, J.S., Gragemann, W. (2003) *Contributions of anthropogenic and natural forcing to recent tropopause height changes* *Science* 301: 479-483.
- Schädel, C., Bader, M.K.F., Schuur, E.A.G., Biasi, C., Bracho, R., Capek, P., De Baets, S., Diakova, K., Ernakovich, J., Estop-Aragones, C., Graham, D.E., Hartley, I.P., Eversen, C.M., Kane, E., Knoblauch, C., Lupascu, M., Martikainen, P.J., Natali, S.M., Norby, R.J., O'Donnell, J.A., Chowdhury, T.R., Santruckova, H., Shaver, G., Sloan, V.L., Treat, C.C., Turetsky, M.R., Waldrop, M.P., Wickland, K.P. (2016) *Potential carbon emissions dominated by carbon dioxide from thawed permafrost soils* *Nature Climate Change* 6: 950-953.
- Schmidt, G.A., Ruedy, R., Miller, R.L., Lacis, A.A. (2010) *The attribution of the present-day total greenhouse effect* *Journal Geophysical Research* 115, D20106.
- Schuur, E.A.G., Abbott, B. (2011) *High risk of permafrost thaw* *Nature* 480: 32-33.
- Sherwood, S.C., Meyer, C.L., Allen, R.J. (2008) *Robust tropospheric warming revealed by iteratively homogenized radiosonde data* *Journal of Climate* 21: 5336-5350.
- Stahl, W.J. (1979) *Carbon Isotopes in petroleum geochemistry* En: Jäger, E., Hunziker, J.C. (eds) *Lectures in Isotope Geology* Springer-Verlag, Berlin pp 274-282.
- Tans, P., (2009) *Trends in atmospheric carbon dioxide - Mauna Loa*, NOAA ESRL. www.esrl.noaa.gov/gmd/ccg/trends.
- Thoning, K.W., Tans, P.P., Komhyr, W.D. (1989) *Atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa Observatory: 2. Analysis of the NOAA GMCC data, 1974-1985* *Journal of Geophysical Research* 94: 8549-8565.
- Touma, J., Wisdom, J. (1993) *The chaotic obliquity of Mars* *Science* 259: 1294-1297.
- Van Der Marel, R.P., Besla, G., Cox, T.J., Sohn, S.T., Anderson, J. (2012) *The M31 velocity vector. III Future Milky Way M31-M33 orbital evolution, merging and fate of the sun* *The Astrophysical Journal* 753: 9 (21pp).
- Wang, K., Liang, S. (2009) *Global atmospheric downward longwave radiation over land surface under all-sky conditions from 1973-2008* *Journal of Geophysical Research* 114: D19.
- Wei, G., McCulloch, M.T., Mortimer, G., Deng, W., Xie, L. (2009) *Evidence for ocean acidification in the Great Barrier Reef of Australia* *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73: 2332-2346.
- Wolf, E.T., Toon, O.B. (2014) *Delayed onset of runaway and moist greenhouse climates for Earth* *Geophysical Research Letters* 41: 167-172.
- Wolf, E.T., Toon, O.B. (2015) *The evolution of habitable climates under the brightening Sun* *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 120: 5775-5794.