

La realidad del cambio climático en sus causas, evolución y efectos



Antonio Ruiz de Elvira

Catedrático de Física Aplicada en la Universidad de Alcalá

Resumen

El cambio climático actual es uno de los cambios climáticos continuos del sistema atmósfera-océano-hielo de nuestro planeta, pero el presente es unas diez veces más intenso y más rápido que los anteriores. La causa es la inyección masiva de gases poliatómicos a la atmósfera, debido al uso de combustibles fósiles como fuente casi gratis de energía. Los efectos del cambio son acumulativos, y de difícil visualización. El análisis y la predicción del cambio precisa de nuevas herramientas matemáticas (de las que aún carecemos) adecuadas al carácter complejo y no lineal del sistema climático.

Palabras clave

Clima, cambio climático, subida de temperaturas, sequías, no linealidad, sistemas complejos

The reality of climate change: its causes, development and effects

Abstract

The actual Climate Change is one of the continuous climate changes of the atmosphere-oceans-ice of our planet, but this one is around ten times bigger and ten times faster than the previous ones. The cause of this increased rate is the massive injection of polyatomic gases into the atmosphere due to the use of fossil coal as the main almost free source of energy. The effects of the present change are cumulative and difficult to notice. The analysis and forecast of this change needs new mathematical tools (that we lack at the present) adequate for the complex and non-linear character of the climate system.

Keywords

Climate, climate change, temperature increase, droughts, non-linearity, complex systems

El clima es la estadística de los estados instantáneos del tiempo atmosférico. Por definición, el clima cambia siempre, al menos siempre que consideremos escalas de tiempo variadas: el clima del último millón doscientos mil años no es el mismo que el clima de los últimos 6.000 años, ni éste el mismo que el de los últimos 2.000 o 1.000 años. Nuestra perspectiva cambia según cambiamos las escalas de tiempo.

En los años 50 y 60 del siglo pasado, los abrigos de pieles eran prendas estándar. Hoy es raro el año en el que hay que utilizarlos. Los glaciares españoles del Pirineo, los alpinos, los de todo el globo están desapareciendo, en una escala de 100 años. Las estaciones agrícolas están cambiando en España y hoy se vendimia en agosto, en vez de hacerlo en septiembre y, en las bandas semidesérticas del planeta, la escasez de lluvias está trastornando la reserva de agua

Climate is the composite or prevailing weather conditions over a given period and, by definition, changes in accordance with the time scales considered. The climate of the last 1,200,000 years is not the same as that of the last 6,000 years, nor this the same as that of the last 2,000 or 1,000 years. Our perspective changes in accordance with these time scales.

In the 1950's and 60's fur coats were commonplace, but one rarely sees them today. Pyrenean and Alpine glaciers, in parallel to those around the world, have rapidly disappeared over the last 100 years. Agricultural seasons have changed in Spain with the grape harvest now in August instead of September and in semi-arid areas throughout the globe, the scarcity of rain has affected groundwater reserves due to a demand that far outstrips water recharge.

Is this a change on a millennium scale, such as glaciations, or rather one on a 100 or 150 year scale such as the rise in temperature

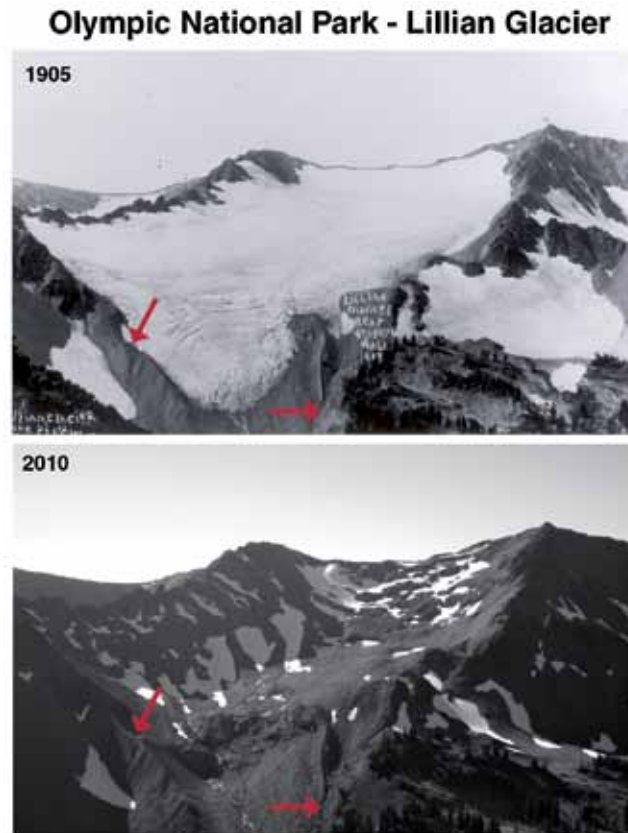


Fig. 1

del subsuelo, por una demanda que supera con mucho la recarga hídrica (Fig. 1).

¿Es esto un cambio como los de la escala de milenios, como las glaciaciones, o un cambio con escalas de 100, 150 años como las subidas de temperatura de la época de las salidas de vikingos de los hombres del norte o el enfriamiento de la pequeña edad del hielo? Realmente no lo sabemos, pero sí tenemos una serie de indicaciones interesantes. Interesantes, sobre todo, a la escala que nos interesa, la escala de dos o tres generaciones, unos 100 años como mucho. Sabemos aún poco del sistema climático, a pesar de 50 años de investigación, y lo que ignoramos se debe a que necesitamos resolver ecuaciones que no hemos querido aprender a resolver.

La ingeniería se desarrolló bajo ideas de la física lineal, del tipo que a doble causa corresponde un efecto doble. De hecho, se esforzó, desde hace siglos, en eliminar la no

during the Viking days that led to the Norse colonization or the late period of cooling during the Little Ice Age? While we really do not know the answer to this question, we do have an interesting series of indicators, particularly in terms of the scale that concerns us, this being one of two or three generations and 100 years at most. After 50 years of investigation we still know very little about the climate system and these unknown factors require us to resolve equations that we have not yet learned or wished to solve.

Engineering is developed along the lines of linear physics to the extent that a double cause corresponds to a double effect. This is so much the case that great efforts have been made over the centuries to eliminate the nonlinearity (with its ensuing doubt) of the natural environment and to attempt to replace this by linear arrangements (one of the best illustrations of this attempt to linearize nature being seen in canals). After centuries of this type of reasoning, the crucial importance of a one-degree rise in the average global temperature or a drop of several litres in the local rainfall is almost impossible to comprehend, and even less so by a good engineer.

linealidad (con su consecuencia de incertidumbre) del ámbito natural y tratar de sustituirla por esquemas lineales (los canales son uno de los mejores ejemplos de este intento de linealización de la naturaleza). Tras siglos de utilización de este tipo de razonamiento, la idea de que la subida de un grado en la temperatura media global, o la disminución de unos litros en la precipitación local son cruciales, es casi imposible de entender, y menos por un buen ingeniero.

Las ecuaciones del clima son no lineales y pertenecen a un sistema complejo de componentes que evolucionan con escalas de tiempo muy diversas. Es obvio que no tienen solución exacta, pues las fluctuaciones se amplifican, pero es obvio también que la amplificación no es infinita. El sistema climático oscila de cuenca en cuenca de atracción, y no sabemos aún, a pesar de ordenadores gigantescos, cómo resolver las ecuaciones que lo rigen. Como con el plasma, estamos intentando subir pendientes del 15 % con Fords modelo T. Se ha hecho un enorme esfuerzo para encontrar la solución de unas ecuaciones no lineales y complejas con las herramientas diseñadas para resolver sistemas simples y lineales. Dejando aquí clara la urgencia de desarrollar otro tipo de análisis matemático, hablaré de lo que, aún con lagunas, sabemos sobre el clima.

Desde 1880 la temperatura media global (TMG) (un promedio de la temperatura instantánea del aire a 2 metros sobre el nivel del suelo en cada punto del globo y a lo largo de un año natural) ha subido (Fig. 2), con altibajos, como corresponde a una variable de un sistema complejo no

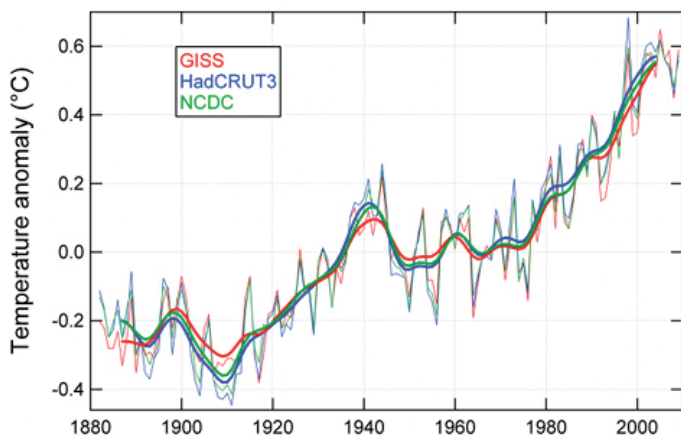


Fig. 2

Climate equations are nonlinear and belong to a complex system of components that evolve with very diverse time scales. While these clearly have no precise solution, as the fluctuations amplify, it is also the case that this amplification is not infinite. The climate system varies from one basin of attraction to another and, in spite of massive computing power, we still do not know how to solve the equations governing the same. We have the tools, but the tools are inadequate and it is like trying to drive up a 15% slope in a Model T-Ford. An enormous amount of time and effort has been made in an attempt to solve nonlinear and complex equations with tools designed for simple, linear systems. When leaving to one side the urgent need to develop another type of mathematical analysis, we shall now move on to discuss what we actually know about the climate, while mindful of the many gaps in this knowledge.

Since 1880 the global average temperature (the average instantaneous air temperature 2 metres above ground level at any point on the globe throughout a calendar year) has shown an overall increase, and while there have been peaks and troughs as corresponding to a variable of a complex, nonlinear system, the fact is that this global average temperature has increased. We have now reached a plateau on the upward rising curve but, after a series of rises and falls, it is clear that the overriding tendency since 1880 is an upward one. The same has occurred with the sea surface temperature and where the Artic sea ice extent, at its lowest annual point, has been seen to shrink constantly ever since it was first measured.

In parallel to all this, the concentration of CO₂ has increased in a slightly exponential manner ever since 1800, this gas absorbing electromagnetic energy in the infrared region, an emission corresponding to the current temperature of the Earth's surface. In theory, any increase in concentration should lead to an increase in the temperature of the surface below, much in the same manner as a wool coat will increase the temperature between the wearer's skin and the coat, as the coat serves to retain the escape of warm air from our skin to the outside. While this is evidently not the only factor controlling the air temperature at the Earth's surface, it is one of the most powerful and direct means of doing so. Other factors are changes in the ocean currents that transport heat from the equator towards the poles and which may change this temperature by changing the amount of Artic ice reflecting the incident energy, or variations in the strength of solar radiation.

There have been interesting changes in the power radiated by the Sun over the last 130 years, but these variations do not serve to explain away the constant rise in temperature over this period.

We shall assume for the sake of argument that there is climate change and accept, as a working hypothesis, that this is caused by the constant emission of CO₂, methane and other industrial gasses.

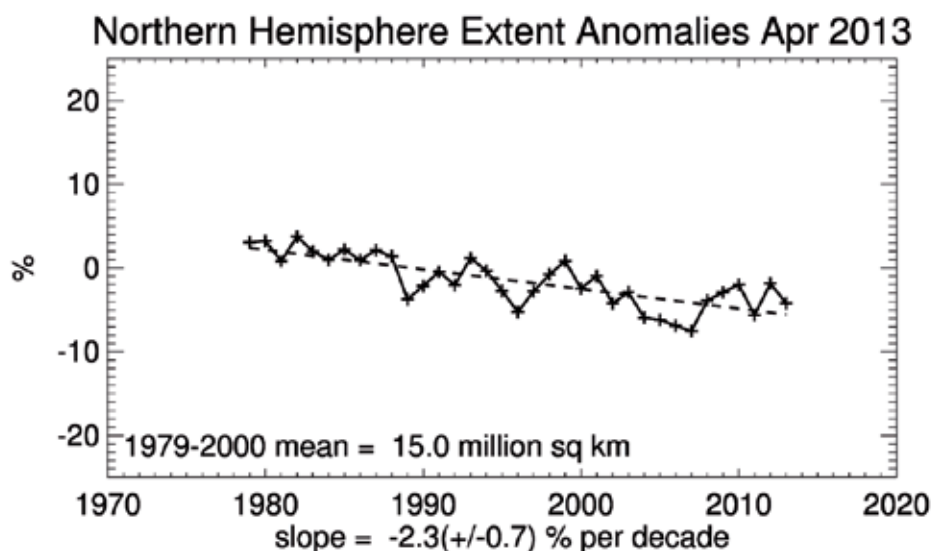


Fig. 3

lineal, pero ha subido. Ahora estamos en una meseta de la curva de subida, y en esta curva hay también bajadas, pero es evidente que la TMG sube desde 1880. Lo mismo ha ocurrido con la temperatura superficial del océano. La secuencia de extensión de hielo en el Ártico, en su punto anual más bajo, ha disminuido de manera constante desde que se empezó a medir (Fig. 3).

Simultáneamente a esto la concentración de CO₂ ha aumentado de manera ligeramente exponencial desde 1800. El CO₂ es un gas que absorbe energía electromagnética en la región del infrarrojo, la emisión que corresponde a la temperatura de la superficie actual del planeta Tierra. Teóricamente un aumento de su concentración debe hacer aumentar la temperatura de la superficie que tiene debajo, lo mismo que el ponernos un abrigo de lana hace aumentar la temperatura del aire entre nuestra piel y el abrigo, ya que el abrigo retiene la salida de aire caliente de nuestra piel hacia el exterior. No es el único mecanismo, evidentemente, que controla la temperatura del aire en la superficie de la Tierra, pero es uno de los más potentes y directos. Otros mecanismos son los cambios en las corrientes marinas que transportan calor del ecuador hacia los polos, y que pueden cambiar esa temperatura al cambiar la cantidad de hielo del Ártico que refleja la energía incidente, o la variación de la potencia de radiación del Sol (Fig 4).

En los últimos 130 años ha habido variaciones interesantes en la potencia solar emitida pero esas variaciones son in-

This emission is going to continue in an ever-increasing manner as there are five thousand million people desperate for energy, which is essential for life and which for many years will continue to be produced from the burning of fossil fuels.

The atmosphere of the Earth and its oceans are in very unstable dynamic equilibrium, in consonance with an enormously complex and nonlinear system. The meteorology of the cooler regions of the planet are directly derived from the meanderings of the polar jet streams, two very powerful air currents that circulate at a height of 11,000 metres around the North and South Poles.

This current (when concentrating on the Northern Hemisphere jet stream) is generated by the difference in temperature between the tropical and the polar zones and where the temperature gradient combines with the Coriolis effect. Its average position is given by the point of the maximum meridian temperature gradient and its strength by the value of this gradient. If there is no gradient there is no circulation, and a lowering of the gradient, even as a result of a temperature drop of just three degrees, weakens the jet streams and these begin to meander. As climate is the historical sequence of weather conditions, a jet stream without meanders implies continuous cold and wet weather conditions over several months and hot and dry conditions throughout the remainder. However, large meanders give rise to continually changing weather conditions, alternating between hot and cold, wet and dry conditions both in winter and in summer: these two radically different climates being simply due to a drop of one degree over 5,000 kilometres of the meridian temperature gradient. In meteorology a change of 1°C is

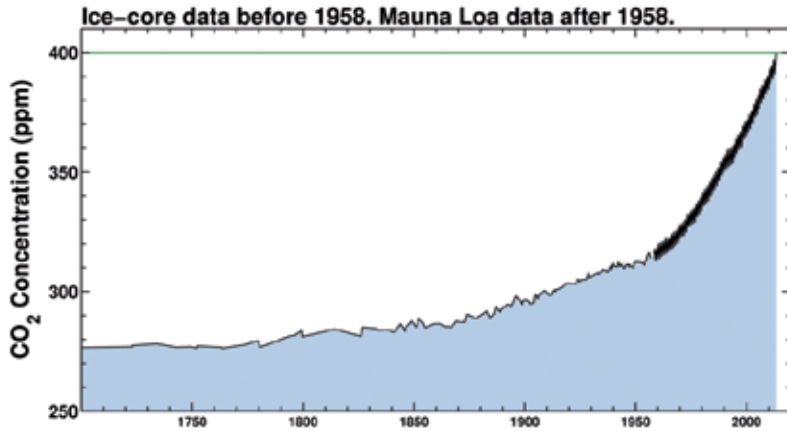


Fig. 4

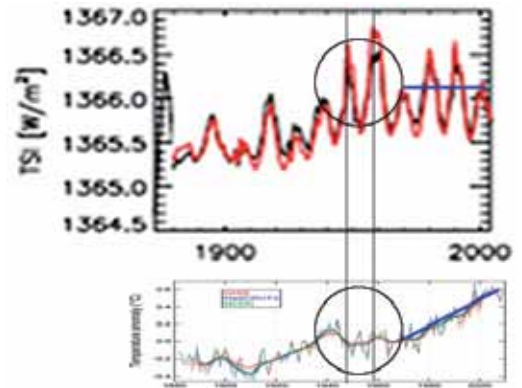


Fig. 5

capaces de explicar la subida constante de temperaturas a lo largo de esos 130 años (Fig. 5)

Asumamos que hay cambio climático, y aceptemos, como hipótesis de trabajo, que está causado por la emisión constante de CO₂, de metano y de otros gases industriales. Esta emisión va a continuar de manera creciente, puesto que cinco mil millones de personas ansían acceder a la energía que es la vida, y esta energía será, durante mucho tiempo, la quema de combustibles fósiles.

La atmósfera de la Tierra y sus océanos están en un equilibrio dinámico muy inestable, como corresponde a un sistema enormemente complejo y no lineal. La meteorología de las regiones templadas del planeta deriva directamente de los meandros de los chorros polares ('polar jet'), dos corrientes de aire muy poderosas que circulan a 11.000 metros de altura rodeando el Polo Norte y el Sur.

Esta corriente (me voy a centrar en la corriente del hemisferio norte) se genera por la diferencia de temperaturas entre la zona tropical y la zona polar, combinando el gradiente de temperaturas con la aceleración de Coriolis. Su posición media viene dada por el punto de máximo gradiente meridiano de temperaturas y su intensidad por el valor del gradiente. Sin gradiente no hay circulación y con un gradiente reducido, incluso debida la reducción a la bajada de no mas de tres grados, la corriente se debilita y empieza a hacer meandros. Puesto que el clima es la secuencia histó-

an enormous amount and where the heating of just 1°C for the entire atmosphere would entail 1015 kwh, or the equivalent to the worldwide energy consumption over 10 years.

The atmosphere and the oceans are essentially conveyor belts (with these latter also serving as energy reservoirs) that transport energy from the tropical regions to the rest of the planet. As the system is essentially a hydraulic machine, any slight small difference in the circulation of both fluids leads to vast differences in the climate behaviour. A third factor also has to be added to all this in the form of the ice cover of the Polar regions. In the same way that the Earth's temperature depends on the concentration of water vapour and CO₂ retains the energy emitted from the surface in the manner of an almost black body, the polar icecaps and the glaciers act on the energy received by the Earth, acting as an almost perfect mirror.

Some 35 million years ago South America split from Antarctica to form the Drake Passage and this gateway eventually led to the formation of the Antarctic Circumpolar Current and cut Antarctica off from warm southward flowing currents leaving it frozen and desolate. The GAT fell one degree due to the effects of energy reflection and the ensuing reduction in the energy received by the Earth from the Sun.

Following the closure of the Panama Strait some three million years ago and in accordance with the current position of the continents, there are now two ocean conveyor belts that distribute energy and control the Earth's climate: the meridional circulation, formed in part by the Gulf current, and the Kuroshio current in the North Pacific.

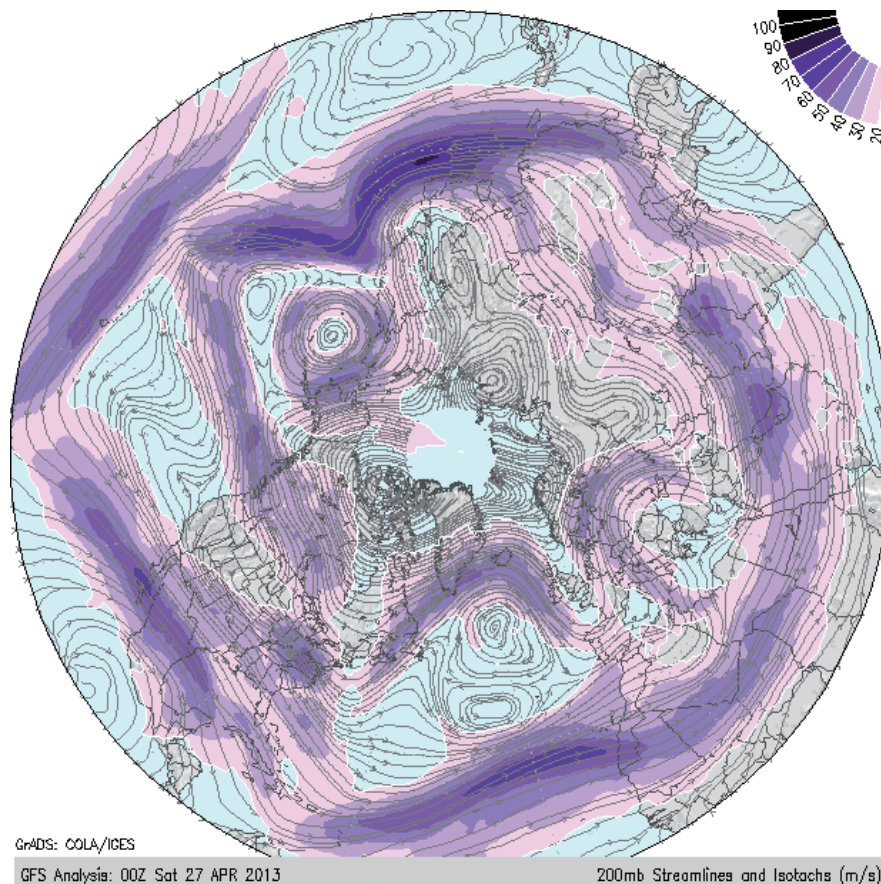


Fig. 6

rica de estados del tiempo meteorológico, una situación de chorro sin meandros implica un clima de estados de tiempo continuos: frío y lluvia a lo largo de varios meses, calor y sequía a lo largo de otros. Una situación de meandros intensos implica alternancias continuas de calor y frío, de lluvia y tiempo seco, tanto en invierno como en verano: dos climas radicalmente distintos, debidos, sencillamente, a la debilitación en un grado por 5.000 kilómetros del gradiente meridiano de temperaturas. En la meteorología 1 °C es una cantidad enorme. Un calentamiento de 1 °C supone, para toda la atmósfera, 10^{15} kWh, el consumo mundial de energía durante 10 años (Fig. 6).

La atmósfera y los océanos son esencialmente cintas distribuidoras de energía (actuando los últimos de almacén de la misma, adicionalmente) desde la zona de su captura, esencialmente los trópicos, al resto del planeta. Puesto que el sistema es esencialmente una máquina hi-

We shall turn our attention to the first of these, often referred to as the AMOC (Atlantic Meridional Overturning Circulation) by way of example and because this directly concerns Europe. The prevailing winds in the tropics are the easterly trade winds that carried the merchant sailing ships from Europe to America. These winds force the warm intra-tropical surface waters from Africa to the Caribbean and the warm water is further reheated and, as a result of thermal expansion, increases in volume and height over the cold waters of the Atlantic. The warm water then heads out through the Florida Strait where as a result of the Coriolis effect and the prevailing winds, the current then heads eastward to Europe. Part of the warm, salt water turns towards the coast of Portugal, but the majority heads into the North Sea between Scotland and Iceland. This very salty water increases in salinity further still when ice forms in the winter and expels the salt into the sea.

This dense overflow water then heads downwards through the 2,500 m chasm of the Denmark Strait between Iceland and Greenland (This is an

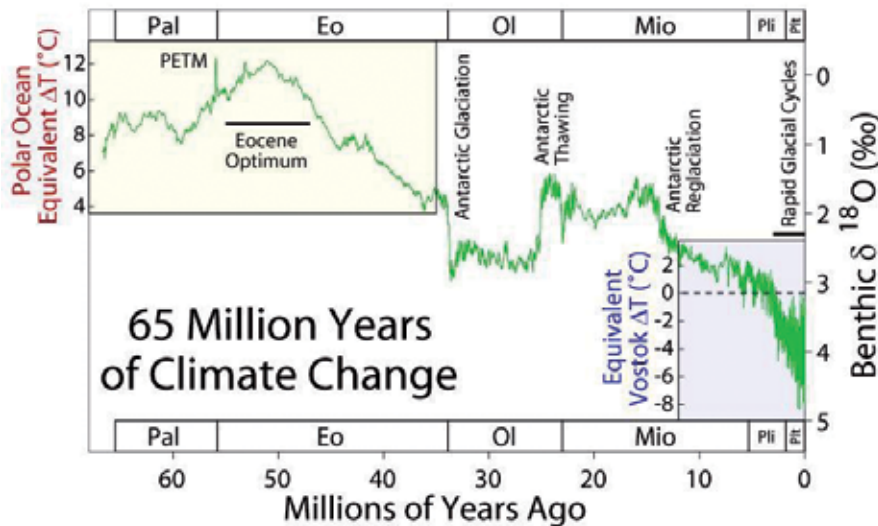


Fig. 7

dráulica, las ligeras diferencias de circulación de ambos fluidos suponen inmensas diferencias de comportamiento climático. A esto es preciso añadir un tercer elemento: la cubierta de hielo de la superficie. Así como la temperatura del planeta depende de la concentración de vapor de agua y CO₂ en la atmósfera, que retienen la energía que la superficie emite como cuerpo casi negro, el hielo de los casquetes polares y de los glaciares actúa sobre la energía recibida por la Tierra, funcionando como un espejo casi perfecto.

De hecho, la separación del continente americano de la Antártida al establecerse el Estrecho de Drake supuso el establecimiento de la corriente oceánica circumpolar antártica y el aislamiento térmico del Polo Sur del resto del globo. La Antártida se heló de manera brusca (a escala histórica) y la TMG cayó un grado hace 35 millones de años, al disminuir, por reflexión, una parte de la energía que recibe la Tierra desde el Sol (Fig. 7).

schematic description. Scientific literature abounds in debates on the effects of the combination of salt and fresh water, topography and other details, but the reality is as described above). The current continues along the bottom of the ocean until Antarctica, where it then enters the Indian Ocean, turns to the south of the Philippines and returns to the surface once more around South Africa and the Saharan coasts.

The balance between the Arctic ice cap, that acts as a thermostat, and the AMOC meridional circulation has, throughout the present geological stage, maintained the Earth's climate in a cold, metastable state, alternating between glaciations and deglaciations over the last 800,000 years with irregular time intervals of around 100,000 years. The Earth's orbital parameters, eccentricity, ecliptic angle and equinox precession, while not generating any of these time scales, may act as the trigger for other phenomena that cause changes in the north ice cap of the planet. These changes are very abrupt and are essentially due to the speed of the thawing or freezing of the polar caps and respond to positive feedback climate processes such as ice-albedo feedback.

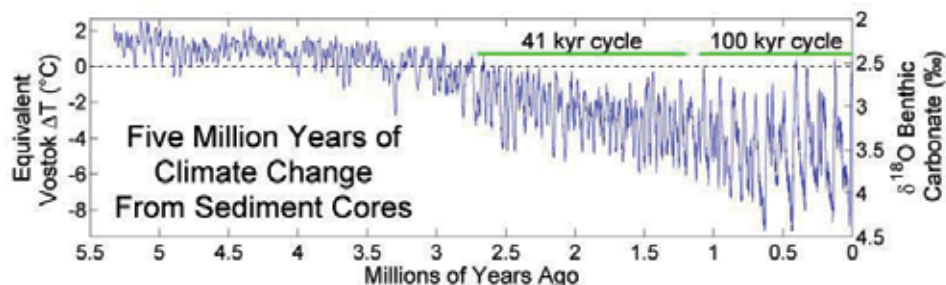


Fig. 8

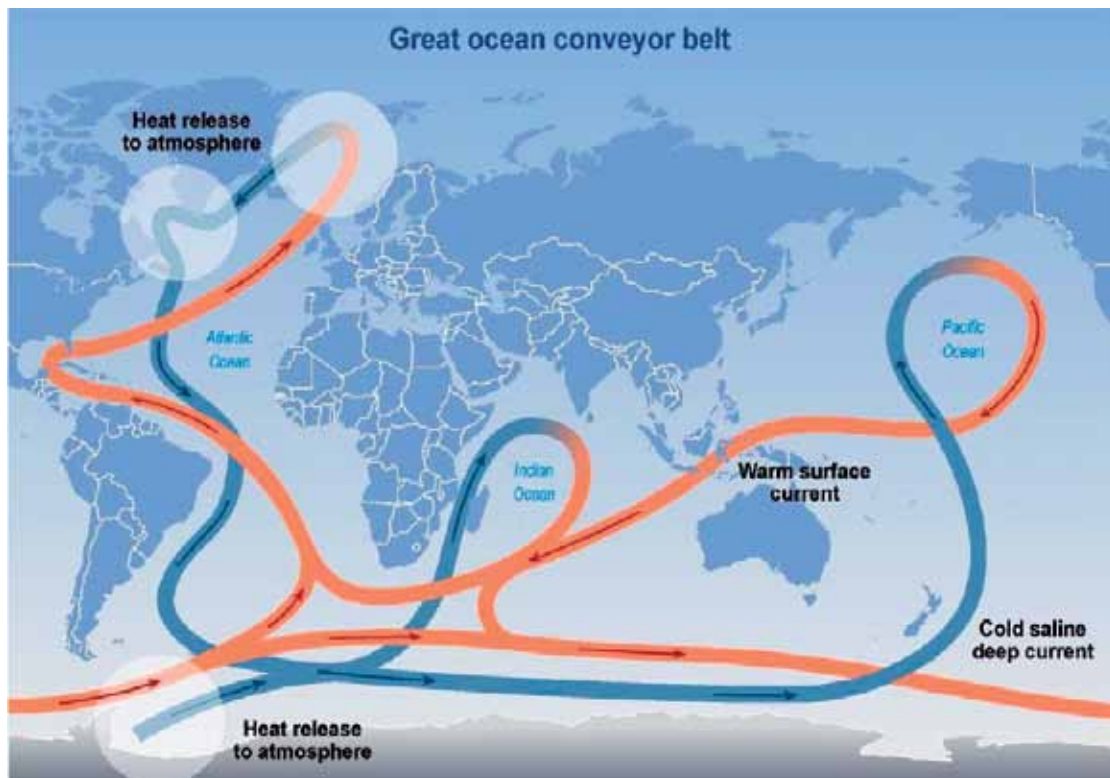


Fig. 9

Hoy, con la posición actual de los continentes y el cierre del Estrecho de Panamá hace unos 3 millones de años, hay dos cintas transportadoras oceánicas que distribuyen la energía y controlan el clima terrestre: la circulación meridiana, de la que una parte es la corriente del Golfo, y la corriente del Kuro-Shio en el Pacífico Norte (Fig. 8).

Fijémonos en la primera, que se suele denominar AMOC (*Atlantic Meridional Overturning Circulation*), como ejemplo, y porque atañe a Europa directamente. Los vientos dominantes en la línea de los trópicos son los alisios en dirección este-oeste, los que hacían posible el paso de Europa a América de los barcos de vela. Estos vientos arrastran agua desde las costas de África hacia el Caribe. El agua, caliente en origen se recalienta en este mar Mediterráneo y allí aumenta su volumen por dilatación térmica y, por tanto, su altura sobre las aguas frías del Atlántico: el agua caliente sale por el estrecho de Florida y se dirige, por la aceleración de Coriolis y los vientos dominantes, hacia Europa. Una parte del agua caliente y salada gira hacia las costas de Portugal, pero la mayor parte entra en el Ártico entre Escocia e Islandia. Es agua cargada de sal, que au-

Over the last glacial periods, that is to say over the last million years, the CO₂ concentration has varied between 180 and 280 ppm in the atmosphere. However, this concentration is now set at a level of 400 ppm and we continue to pump CO₂ into the atmosphere to such an extent that the annual increase is around 1.75 ppm/year. If we continue to pour CO₂ into the atmosphere at this rate, we will reach 450 ppm in 2040, and 500 ppm in 2070, these being concentrations that have not been matched in the planet for tens of millions of years.

The initial repercussions of this increase in IR retention in the lower atmosphere are the accelerated melting of Greenland glaciers, the thawing of permafrost in the Siberian and Canadian tundra and the thinning of ice in the Arctic Ocean, at the north pole. This reduction in ice acts a positive feedback system, as the loss of ice means that more radiation within the visible spectrum will reach land and sea, and lead to greater energy retention within the same.

In addition to which, a thawing of the Siberian permafrost would inject vast amounts of fresh water into the Arctic and alter the salinity of the same, which would, in turn, complicate the passage of water through the Denmark Strait and, subsequently, the entry of warm water to the Arctic via the Gulf Stream. We are once again in a situation of

menta aún más su contenido en esta materia cuando en invierno se forma hielo, que expulsa la sal del agua del mar al congelarse. Agua fría y salada es agua pesada (Fig. 9).

Entre Islandia y Groenlandia, el estrecho de Dinamarca presenta un talud de unos 2.500 metros de caída por donde sale el agua pesada de exceso que entra mediante la corriente del Golfo (ésta es una descripción esquemática, la literatura científica abunda en discusiones sobre los efectos de la mezcla de agua salada y dulce, la topografía y otros detalles, pero la realidad es la que he descrito). La corriente sigue, llega a la Antártida por el fondo del océano entra en el Índico, gira al sur de Filipinas y vuelve en superficie de nuevo hacia África del sur y a las costas saharianas.

Entre la capa de hielo del Ártico, que actúa de termostato, y la corriente meridiana AMOC, el clima del planeta se mantiene, en la presente etapa geológica, en una situación metastable, fría y oscilante entre glaciaciones y deglaciaciones que han ocurrido en los últimos 800.000 años con escalas de tiempo irregulares del orden de 100.000 años. Las distintas excentricidades del movimiento del planeta Tierra, orbitales, de precesión y ángulo de su eje de giro no generan ninguna de estas escalas de tiempo, pero pueden ser un punto de partida para otros fenómenos que generan los cambios de cubierta helada del norte del planeta. Los cambios son muy bruscos y la brusquedad se debe esencialmente a la velocidad de fusión del hielo o

metastable equilibrium which may evolve in one direction or another with just the smallest changes in parameters. Our mathematical tools are not precise enough to establish the direction in which developments will take place and, at a time where the science appears somewhat ill at ease, this problem then presents a huge scientific and practical challenge.

Climate-related equations are generally resolved by numerical models that give answers to suit all tastes. All the models reveal multidecadal and secular variations, though no model is capable of extending the integration of the equations to scales of thousands of years. There is a certain degree of confidence among scientists, engineers and economists with respect to numerical models. They trust their results. However, numerical models are like oscilloscopes: laboratory tools that give some idea how a system works but do not faithfully reproduce the same. This trust is based on the fact that many of the problems dealt with in engineering are artificial problems and concern systems subject to strict boundary lines (canals, roads, dams, ports, flights paths, lineal machinery, etc., etc.) which require a series of generally linear equations.

Nature is not like this and the boundaries change further and faster than the systems themselves. With regards to the AMOC, what we could really say is that its movements have produced glaciation over the last million years, but have done so with very low CO₂ concentrations. We do not know how the AMOC would behave with concentrations higher than 400 ppm, as when the Earth previously had this level of concentration the Panama isthmus was open and the continents were arranged in a different manner to today. However,

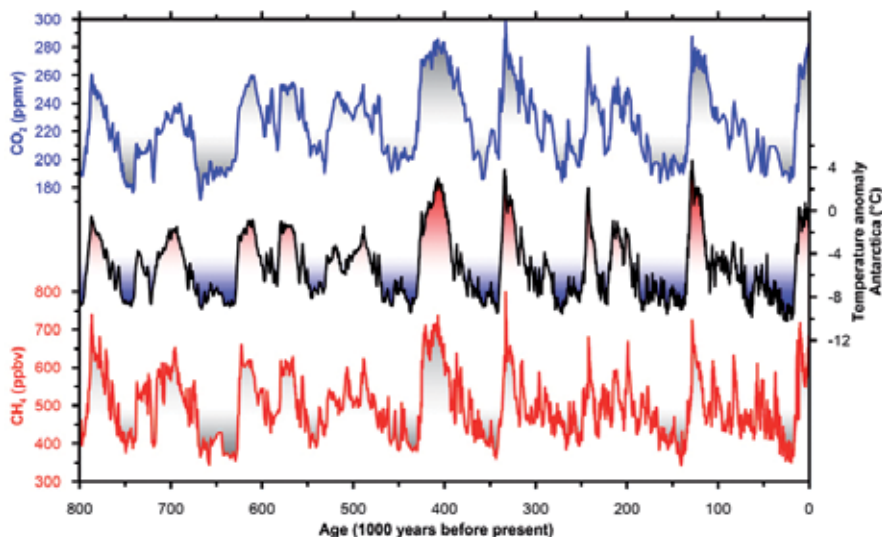


Fig. 10

congelación de los casquetes polares, que son fenómenos realimentados positivamente (Fig. 10)

Durante los últimos periodos glaciales, es decir, durante el último millón de años, las concentraciones de CO₂ se han movido entre las 180 y las 280 ppm (partes por millón) en la atmósfera, mientras que hoy la concentración de CO₂ ha alcanzado ya las 400 ppm. Hoy, también, estamos emitiendo CO₂ de manera que el aumento de su concentración en la atmósfera es de 1,75 ppm/año, de forma que si este ritmo se mantiene alcanzaremos las 450 ppm en 2040 y las 500 ppm en 2070. Esta concentración no se ha alcanzado en el planeta desde hace muchas decenas de millones de años.

La primera consecuencia del aumento de retención de radiación infrarroja en la baja atmósfera es el deshielo, acelerado, de los glaciares de Groenlandia, de la tundra siberiana y la disminución, también acelerada, de la acumulación de hielo en el océano Ártico, en el Polo Norte. Esta disminución de hielo funciona como un sistema de realimentación positiva, pues menos hielo supone más llegada de radiación en el rango del visible al suelo y al mar, y más retención de energía en éstos.

Por otro lado, una Siberia deshelada inyecta mucha agua dulce al Ártico, de manera que cambia la salinidad del mismo, y esto influye en la dificultad de salida del agua por el estrecho de Dinamarca, y por tanto en la entrada de agua caliente a este Ártico gracias a la corriente del Golfo. Estamos de nuevo en una situación de equilibrios metastables que pueden evolucionar en una dirección u otra con minúsculos cambios en los parámetros. Estamos ante fenómenos no lineales de sistemas complejos. Nuestras herramientas matemáticas no tienen la precisión necesaria para determinar el sentido de la evolución, y el problema, en una etapa en la cual la ciencia parece un poco alicaída, presenta un enorme desafío científico y práctico.

En general, las ecuaciones que rigen el clima se resuelven mediante modelos numéricos que dan respuestas para todos los gustos. Todos los modelos indican variaciones multidecadales y seculares, aunque ningún modelo es capaz de extender la integración de las ecuaciones hasta escalas de miles de años. Hay, entre científicos, ingenieros y economistas, una cierta dosis de confianza en los modelos numéricos. Confianza en sus resultados. Los modelos numéricos son como osciloscopios: herramientas de laboratorio para obtener una cierta idea de como se comporta un sistema, pero no

numerical models are constantly used to establish how the earth's climate will behave under these variable conditions and every new model gives answers that are different from the other models. We have the tools, but the tools cannot be trusted.

In situations such as this, it is far more reasonable, though less common, to use a precautionary approach which attempts to establish potential threats or outcomes and to then take the necessary measures with respect to the same. An example may be given by way of illustration: large waves can cause considerable damage to coastal structures; floods can lead to loss of life as may hurricanes. Can a wave then be higher than a 100 metres? How often do waves of over 20 metres occur? How many Category 5 hurricanes may occur in the Gulf of Mexico each year? In the North Sea oil rigs have design protocols for 25 metre waves and it is, in fact, taken that these types of wave may occur. However, the USA lacks any such protocol with respect to intense hurricanes and for this reason hurricane Katrina in New Orleans and Sandy in New York proved so devastating.

What are the expected effects of a climate change that is clearly going to continue and worsen throughout the 21st century? Climate acts on society in an integral manner, that is to say, its effects are accumulative and it is then far more difficult to establish action protocols for this scenario than for a giant wave that lasts a couple of hours.

Humans need fresh water and need it in ever growing amounts due to the rise in population. Water is obtained from rainfall over a specific place at a specific time or from natural or artificial rivers and groundwater. The problem of water is not so much one of quantity, but one of availability. By way of illustration, California, like Spain, has dams on all its major rivers. The water stored in reservoirs lasts up to April or May and from this time on it is necessary to resort to surface runoff, such as that from the snows in the Sierra Nevada. And this "runoff" is ever rapidly decreasing. There is a water shortage, but this water shortage is particularly acute in the summer months when there is no rain.

The Sahel is home to some 50 million people and 300 million people live between the Sahara and the Gulf of Guinea. Here, as in India or Indochina, monsoons serve as the primary source of water, in terms of quantity and availability, though in the case of Africa this primarily refers to the summer monsoon as there is no transversal mountain range.

The Mediterranean-Middle Eastern region is already suffering the effects of climate change. There is no direct influence, but it is su-

reproducen fielmente el tal sistema. La confianza deriva de que muchos de los problemas tratados en la ingeniería son artificiales: son sistemas a los que se imponen ligaduras estrictas (canales, carreteras, diques, puertos, vuelos a lo largo de caminos aéreos, máquinas lineales, etc.) para que sigan un cierto conjunto de ecuaciones, generalmente lineales.

La naturaleza no es así y las ligaduras cambian más y más deprisa que los propios sistemas. Con respecto a la AMOC, lo que realmente podemos decir es que sus movimientos han producido las glaciaciones durante el último millón de años, pero lo han hecho con concentraciones muy bajas de CO₂. No sabemos cómo se comporta la AMOC cuando las concentraciones son superiores a 400 ppm, entre otras cosas porque cuando el planeta tenía esas concentraciones estaba abierto el istmo de Panamá o los continentes estaban dispuestos en una geometría distinta de la actual. Es evidente que los modelos numéricos se utilizan de manera constante para tratar de determinar cómo se va a comportar el clima de la Tierra en estas condiciones variables. Cada modelo de los existentes produce respuestas diferentes de las del resto de los modelos. Tenemos herramientas, pero las herramientas no son muy de fiar.

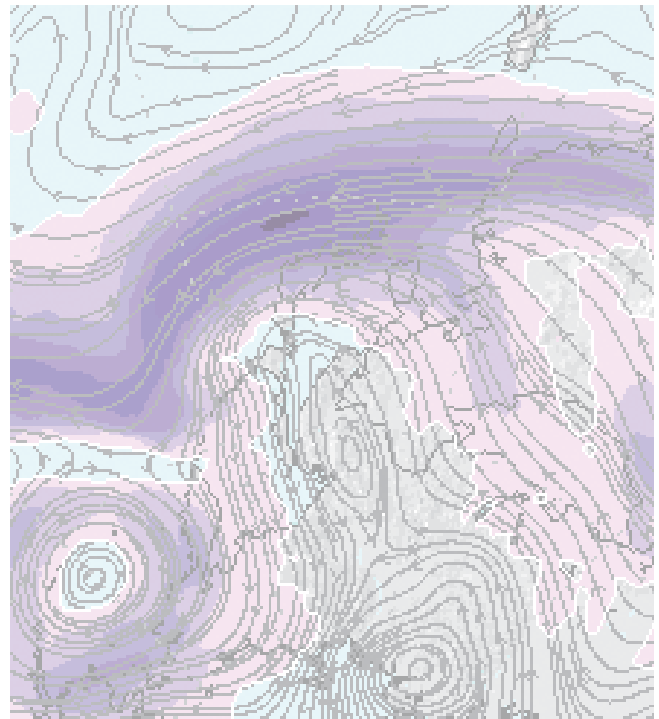
Ante situaciones como ésta lo razonable, aunque no lo habitual, es utilizar el principio de precaución que, como es sabido, es tratar de determinar posibles extremos y tomar las medidas oportunas frente a ellos. Un ejemplo nos aclara esta afirmación. Las olas grandes causan daños muy considerables en las estructuras costeras. Las inundaciones causan hasta víctimas humanas, lo mismo que los huracanes. ¿Puede una ola ser mayor de 100 metros? Y olas de más de 20 metros, ¿con cuánta frecuencia ocurren? ¿Cuántos huracanes son de esperar anualmente en el golfo de México de categoría 5? Ante olas de 25 metros en el mar del Norte, las plataformas petrolíferas tienen diseñados protocolos de actuación: de hecho, suponen que pueden darse este tipo de olas. Ante huracanes intensos, sin embargo, los EE. UU. carecen de tales protocolos, y por eso los daños de los últimos –Katrina en New Orleans y Sandy en New York– han resultado tan dañinos.

¿Cuáles son los efectos esperables de un cambio climático que es evidente que se va a mantener e intensificar durante el siglo XXI? El clima actúa sobre la sociedad de manera integrada, es decir, sus efectos son acumulativos, de manera que es mucho más difícil establecer protocolos de actuación en este caso que frente a una ola gigante que dura un par de horas.

ffering. The highest temperatures since 1800 have been recorded in the Persian Gulf in 2010 and 2011 and the ensuing 10% reduction in water runoff estimated for the year 2050 will have to meet demands that are projected to increase by a further 60% (Ref. 1). By way of example, a few years ago there was a plague of common voles in Spain. A rational explanation for this plague would be that a warm winter tends to lead to an early start in the activity of the vole population and where the first litters appeared in February rather than April. As the growth in this population is exponential to something that is not climate related, but rather a human related factor, the numbers of common voles took on plague proportions by October. This non-climate related factor, referring to the almost complete eradication of birds of prey and vermin that previously served to control the growth of the rodent population.

In the same way, a small reduction in the amount of rainfall or the time of this rainfall, together with massive deforestation and the channelling of water, with the vast amount of evaporation produced by the same, then leads to droughts, through positive feedback, which does not lineally correspond to this reduction.

We need another type of engineering that takes into account the intrinsic nonlinearity of nature and one capable of understanding that small disturbances to a system may have very large effects. **ROP**



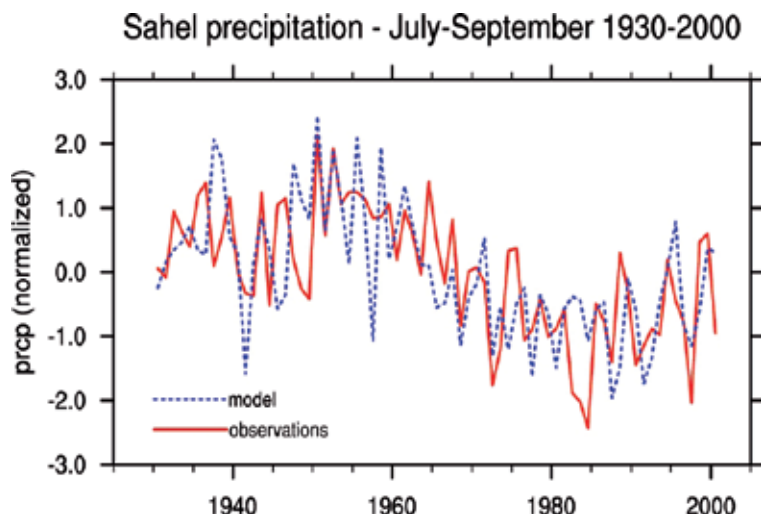


Fig. 11

Los seres humanos precisan agua dulce y la precisan en cantidades crecientes de acuerdo con el aumento de población. El agua se obtiene por precipitación sobre el lugar y el momento, o por conducción mediante ríos naturales y artificiales y almacenamiento en acuíferos en el subsuelo. El problema del agua no es esencialmente uno de cantidad, sino mucho más de oportunidad. Pongamos algunos ejemplos: California tiene todos sus ríos embalsados, como España. El agua de los embalses dura hasta abril/mayo. A partir de ahí el agua debe ser del 'embalse' que son las nieves en la Sierra Nevada. Y este 'embalse' está disminuyendo a marchas aceleradas. Falta agua, pero sobre todo falta agua cuando no llueve, durante el verano boreal.

El Sahel es hogar de unos 50 millones de personas y 300 millones viven entre el Sahara y el Golfo de Guinea. Como en la India e Indochina, su suministro de agua depende, en cantidad y oportunidad, de los monzones, y particularmente en África, puesto que no hay cordillera transversal, del monzón de verano.

Las lluvias del Sahel tienen una clara tendencia descendente (Fig. 11).

La región Mediterránea-Oriente Medio está sintiendo ya los efectos del cambio climático. No hay influencia directa, pero lo está sufriendo. Las temperaturas más altas desde 1800 se han registrado en 2010 y 2011 en el Golfo Pérsico, y la reducción de agua será del 10 % en 2050, para una demanda un 60 % mayor que la actual¹

Pongamos un ejemplo. Hace unos años sufrió España una plaga de topillos de campo. Preguntado por esto, indiqué la repuesta racional: un invierno cálido provoca un inicio temprano de la actividad de los topillos, de manera que su primera camada ocurre en febrero, en vez de en abril. Puesto que el crecimiento es exponencial por algo que no es el clima, sino el ser humano, en octubre la cantidad de topillos se ha convertido en una plaga. Ese algo que no es el clima es que también antropogénicamente hemos casi erradicado las aves de presa y las alimañas, que son las que realmente controlan el crecimiento de las poblaciones de roedores.

De la misma manera, una pequeña disminución de la cantidad de agua precipitada, o de la fecha de precipitación, unida a la acción humana de deforestación masiva y canalización del agua con su evaporación también masiva produce, por efecto de realimentación positiva, sequías que no corresponden linealmente con esa disminución.

Necesitamos otro tipo de ingeniería que tenga en cuenta la no linealidad intrínseca de la naturaleza y que sea capaz de estimar que los impactos de una causa pequeña pueden llegar a ser muy grandes. **ROP**

Notas

(1) 'Adaptation to a Changing Climate in the Arab Countries', Dorte Verner, Editor, Report 64635 - MNA, The World Bank, 2012