

# El Clima, el Cambio Climático y El Niño en América

**ANTONIO RUIZ DE ELVIRA**

Departamento de Física, Universidad de Alcalá

## **EL CLIMA**

El clima es la sucesión en el tiempo del reloj de los estados del tiempo atmosférico: Si la sucesión es frío en los meses de Diciembre a Marzo (de Junio a Septiembre), lluvias en Abril y Mayo (en Octubre y Noviembre), calor en Julio (en Enero), el clima se llama templado. En otras regiones, sobre todo en los trópicos, esta secuencia se debilita y la sucesión en el tiempo de reloj del tiempo atmosférico ocurre casi sin cambio. Son éstos los climas de las regiones templadas y tropicales del planeta.

La vida vegetal, animal y social se ajusta considerablemente al clima de la región donde discurre. Es por ello por lo que las oscilaciones de ese clima han producido en el pasado variaciones muy importantes en la vida de los seres humanos. a través de los cambios en su entorno. Así, es seguro que la revolución agrícola que se inició en Mesopotamia hace unos 8.000 fué consecuencia del aumento de la temperatura del aire en las latitudes medias y altas hace 10.000 años, al acabarse la última glaciación; y de la existencia de suelo fértil en esas llanuras, suelo arrastrado desde las montañas por avalanchas de agua que posiblemente dieron lugar a la leyenda del diluvio.

Es también seguro que el declive de la civilización maya fue consecuencia de un cambio en el régimen de lluvias en Yucatán, hacia el 900 de la era cristiana (EC), que en las mesas de Arizona los Anasazi desaparecieron, tras un periodo prolongado de sequía hacia 1400 EC, y que algo parecido ocurrió en Supe en el altiplano peruano hace unos 3000 años, en Moche, también en el norte de Perú durante el siglo vi, y en Tiwanaku en el siglo x (Weiss y Bradley, 1999)

Hoy, en una civilización industrial, en la cima del orgullo humano en su dominio del medio que lo rodea, es posible pensar que estamos por encima de los pro-

blemas que puede plantear el clima y su evolución: En su vanidad el ser humano piensa que su actividad está tan bien hecha que no causa problemas en el medio donde vive. En particular, hoy, en medio de problemas muy graves de ese medio ambiente, hay voces que insisten en que vivimos en el mejor de los mundos posibles y que no debemos preocuparnos por nada en lo que se refiere al medio ambiente (Lomborg, 2001).

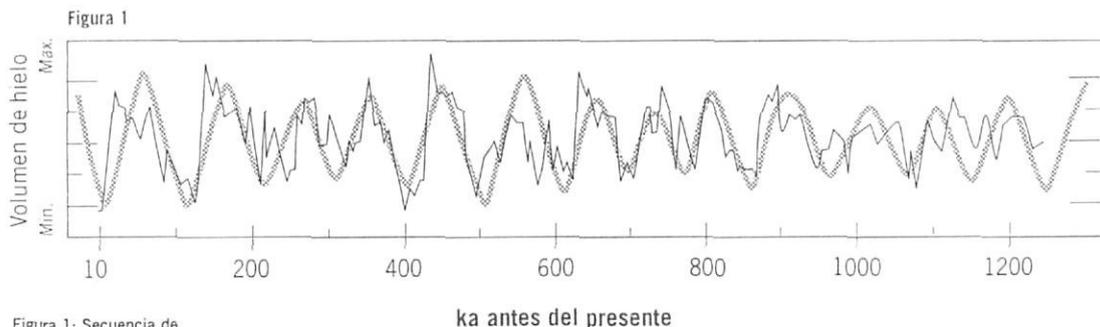
### **PERO, ¿ES ESTO ASÍ?**

La vida sobre la Tierra es posible porque unas pocas moléculas de algunos gases que se encuentran en la atmósfera del planeta en cantidades minúsculas, los gases traza, hacen que el calor que emite la superficie de la Tierra salga lentamente hacia el espacio exterior.

Todos los cuerpos en el Universo radian energía en forma de ondas electromagnéticas y, al radiar energía, la pierden, lo que en lenguaje coloquial se expresa diciendo que “se enfrían”. Al revés, cuando reciben energía, los cuerpos se calientan. La Tierra radia constantemente energía, pero recibe también constantemente energía del Sol, de manera que se alcanza finalmente un equilibrio entre la energía recibida y la emitida de nuevo hacia el espacio exterior.

Ahora bien, puesto que existe la atmósfera (esa manta de gases que recubre la superficie del planeta), la forma en que la energía sale hacia afuera varía considerablemente de unas etapas geológicas a otras. Hay etapas en las cuales la energía de la superficie del planeta se reparte muy bien de unas zonas a otras y la temperatura de esa superficie es razonablemente uniforme (sí, hasta en los Polos). Ha habido otras etapas, cuando una única masa de tierra bloqueaba la circulación de las aguas del océano, en las que los polos estaban muy fríos, las capas de hielo se extendían hasta las líneas tropicales y los trópicos, entre estas líneas a ambos lados del ecuador, eran un infierno.

En la etapa actual de distribución de continentes, los océanos son capaces de repartir la energía de la superficie de la Tierra de manera semi-eficiente. Al hacerlo así, favorecen la existencia de casquetes de hielo polar y mantienen una distribución de zonas tropicales, desérticas y templadas. Al mismo tiempo, forman lo que en física se denomina un oscilador estocástico, un tipo de oscilador (de columpio, vamos, para entendernos) que, alimentado por las oscilaciones estrictamente periódicas de la intensidad de radiación solar, debidas a los movimientos orbitales de nuestro planeta, está produciendo en esta etapa geológica, el pleistoceno, secuencias de glaciaciones largas intercaladas con cortas etapas interglaciales, con escalas de tiempo similares, pero distintas, de las de esos movimientos orbitales. En la figura 1 podemos ver tanto la secuencia real de las glaciaciones como las oscilaciones de los parámetros orbitales del planeta Tierra.



**Figura 1:** Secuencia de acumulación de hielo en un punto de Groenlandia en el último millón de años. Observamos como mientras que las etapas glaciales duran alrededor de 60.000 años, las etapas cálidas, interglaciales, son bastante más cortas, durando una media de unos 20.000 años.

estando las glaciaciones indicadas por el máximo volumen de hielo y las etapas de bonanza, interglaciales, por los años en que el volumen de hielo es mínimo.

Estamos, desde hace unos 15.000 años, en una etapa interglacial, con un máximo de temperatura hace unos 8.000-10.000 años. Las secuencias interglaciales han durado unos 20.000 años, de manera que era razonable esperar (aunque aún no tenemos un modelo exacto del resonador estocástico) que la siguiente etapa glacial debería empezar de aquí a unos milenios.

En los últimos 1000 años la temperatura media global del planeta ha ido disminuyendo con altibajos. En la figura 2, de Jones, Osborn y Briffa, (2001), de las anomalías de temperatura del hemisferio norte respecto a la temperatura de los años 1961-1990, observamos esta disminución hasta aproximadamente las primeras décadas del siglo XIX.

De la misma manera se observa una tendencia estable en las temperaturas de los últimos 400 años en el hemisferio sur (la temperatura aquí varía menos ya que el océano amortigua las fluctuaciones durante largo tiempo).

Pero observamos que esa tendencia se ha roto bruscamente y que, desde hace unos 120 años, la temperatura del planeta está aumentando a un ritmo totalmente distinto del de los siglos anteriores, hasta el punto de que esa velocidad de cambio se asemeja más a la de las etapas de glaciación y/o deglaciación que a las etapas de estasis intermedias. (Figuras 2 y 3)

¿Podemos atribuir a alguna causa ese cambio brusco de la tendencia, esa velocidad alta de calentamiento relativo del planeta? Y, ¿tendrá ese calentamiento consecuencias en nuestras sociedades?

Como he mencionado más arriba, la temperatura de la atmósfera depende de la concentración (muy pequeña) en la misma de ciertas moléculas de gases deno-

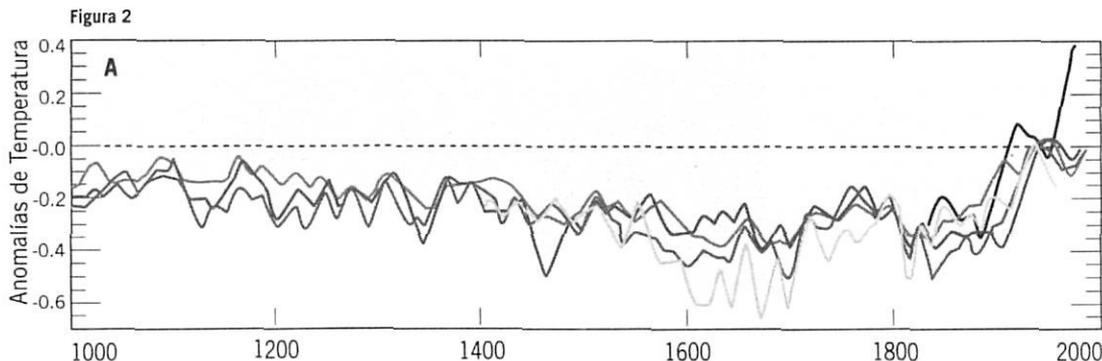


Figura 2: Secuencia histórica de la temperatura media del Hemisferio Norte según Jones, Osborn y Briffa, 2001. Los distintos colores corresponden a distintos registros y métodos de análisis.

minados gases traza. Son éstos el vapor de agua, el anhídrido carbónico o  $\text{CO}_2$ , el metano y algunos óxidos nitrosos. La radiación que proviene del Sol y que llamamos luz es una radiación de onda corta, mientras que la que emite la Tierra es radiación infrarroja de onda larga. Todas las especies químicas de la atmósfera son transparentes a la luz, y las dos especies oxígeno y nitrógeno lo son también a la radiación infrarroja.

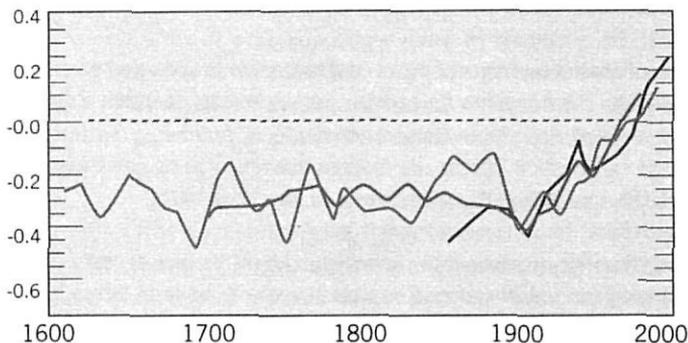


Figura 3: Secuencia histórica de la temperatura media del Hemisferio Sur según Jones, Osborn y Briffa, 2001. Los distintos colores corresponden a distintos registros y métodos de análisis.

Pero el agua, el  $\text{CO}_2$  y el metano atrapan esta radiación, de manera que devuelven una parte de ella de nuevo hacia la superficie. Como cualquier persona que se meta en la cama bajo una manta sabe perfectamente, el calor producido por el cuerpo mediante el metabolismo se pierde lentamente, a través del aire atrapado en las fibras de lana y ese calor mantiene una temperatura agradable entre el cuerpo y la manta. Una manta de hilo deja escapar más calor, la temperatura entre cuerpo y cobertor baja, mientras que si nos ponemos varias mantas, el calor que escapa de la primera queda atrapado en la segunda o tercera, de manera que se conserva mucha más energía y la temperatura aumenta entre el cuerpo y la serie de mantas de lana. De la misma manera, una concentración baja de gases traza permite fácilmente el paso de la radiación infrarroja de la superficie de la Tierra hacia el espacio, mientras que el aumento de concentración retiene más energía en las capas bajas de la atmósfera y aumenta la temperatura de las mismas (Figura 4).

Pues bien, a principios del siglo XIX se pusieron en marcha las máquinas de vapor alimentadas por carbón, cuyo funcionamiento produjo el lanzamiento a la atmós-

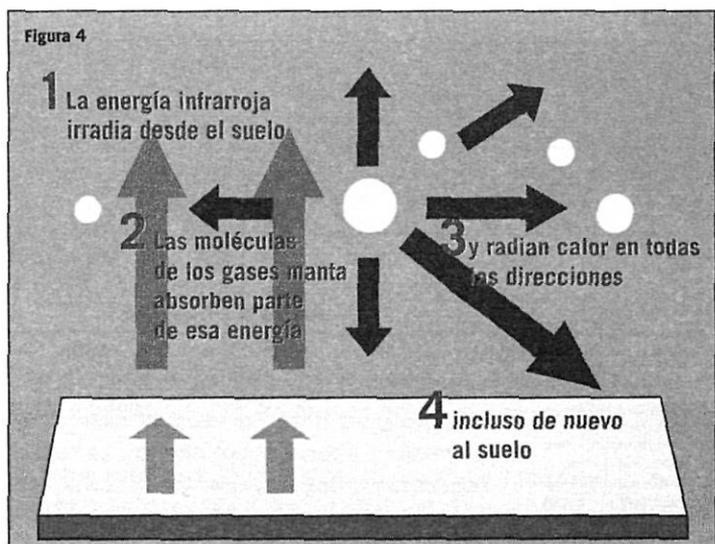


Figura 4. Diagrama indicativo del funcionamiento de los gases de efecto invernadero en la atmósfera, y el reenvío de energía de la atmósfera media hacia la superficie, responsable del aumento de temperatura en esta misma superficie.

fera de miles de toneladas de  $\text{CO}_2$ . A finales de aquel siglo la sociedad empezó a depender fuertemente del consumo de carbón, pero, además, también a finales del siglo XIX, se empezó a explotar sistemáticamente el petróleo y se inició la etapa del motor de combustión interna, de manera que ahora ya no son miles sino millones las toneladas de  $\text{CO}_2$  las que se lanzan al aire cada año.

El ser humano descubrió, bruscamente, la *energía*. Mientras que el resto de los seres vivos, plantas y animales, definen su vida por una búsqueda desesperada de una energía siempre escasa, la proveniente del sol y capturada primariamente mediante la fotosíntesis, los humanos descubrieron que podían gastar en un día la energía de un año, acumulada a lo largo de millones de años en el carbón y en el petróleo: Los seres humanos empezaron a consumir mucha más energía de la disponible; por decirlo en otro lenguaje, a comerse la herencia de sus antepasados a ritmos desenfrenados. El resultado es evidente: el paraíso. (Aunque no lo parezca, si atendemos a los discursos sociales. Pero aún los más desfavorecidos ven como sus hijos sobreviven, y tenemos un disparo exponencial y global de población, lo que no ocurre con ninguna otra especie viva). Es un paraíso temporalmente limitado, semejante a la buena vida del heredero que disfruta de la herencia sin preocuparse por rehacer el capital. La vida es magnífica mientras se puede gastar sin límites y algo más difícil cuando hay que trabajar para sobrevivir.

Pues bien, el consumo ilimitado de energía fósil produce bienes, pero produce también gases traza. Veremos al final que la riqueza inmensa producida por el aprovechamiento de la energía fósil puede, perfectamente, utilizarse para mantener ese consumo de energía, pero de otra forma, sin la dependencia del carbono.

Ahora bien, los gases traza, al aumentar en su concentración, producen un aumento continuado de la temperatura de la troposfera del planeta, como he dicho ya y he indicado en la figura 4. Esto en sí, si es limitado, no es malo. El problema es la palabra *continuado*.

El tiempo atmosférico afecta a las sociedades humanas, esencialmente a través de la lluvia. Necesitamos el agua para todos los procesos, tanto para la agricultura como para la industria, para la vida en las ciudades y el turismo. La lluvia es vapor de agua que condensa y precipita sobre el suelo. El vapor de agua existe en la atmósfera en las cantidades suficientes, incluso sobre los desiertos. Para la condensación se precisan movimientos verticales continuados de aire hacia arriba y la existencia de aire frío en altura.

En la atmósfera existen un par de corrientes poderosas de aire que discurren a unos 11 km de altura, de Oeste a Este, causadas por el gradiente meridiano de temperatura entre el trópico y los polos. A gradientes intensos corresponden corrientes intensas (invierno), mientras que cuando los gradientes son más débiles las corrientes, denominadas *chorro*, frenan sus velocidades. La posición de estas corrientes coincide con la posición del máximo gradiente de temperaturas.

Los *chorros*, como cualquier corriente fluida, hacen meandros. Cuando el chorro se curva hacia el norte, en el hemisferio norte, o hacia el sur, en el hemisferio sur, succiona aire hacia arriba y se forman zonas de baja presión (*borrascas*), que traen lluvias mas o menos continuadas. A sotavento de los Andes y de las Rocosas, el chorro debe curvarse hacia el norte y hacia el sur, respectivamente, y el aire se ve forzado a bajar y calentarse: Hay menos lluvia.

Por otro lado, en las zonas tropicales, el problema no es la escasez de agua, sino su sobreabundancia en forma de huracanes o, por otro lado, los cambios en la circulación, no del aire, sino del agua de los océanos, en la oscilación casi periódica de El Niño.

El aumento continuado de las emisiones de gases traza a la atmósfera hace que se calienten las capas bajas de la misma. Más energía en los trópicos implica mayor evaporación de agua y, puesto que el agua al evaporarse absorbe 540 calorías por gramo, un aumento muy moderado de la temperatura: La temperatura del trópico no experimentará grandes cambios en una situación de cambio climático.

Sin embargo, los polos están a treinta grados bajo cero. Pueden subir hasta cero grados sin cambio de fase, sin absorber más que una caloría por gramo y por grado. Una atmósfera más caliente lo que produce es una subida de temperatura en los polos, mientras que mantiene esencialmente la misma temperatura en los trópicos. Consecuencia: El gradiente de temperatura entre trópico y polo se debilita y la posición de máximo gradiente se desplaza hacia los polos. Una situación de cambio climático se parecerá más a un verano permanente, en las regiones templadas del planeta, con la energía disponible más abundante en las regiones tropicales. Evidentemente, las regiones más norteñas, en el hemisferio norte, y sureñas, en el sur, experimentarían una mejoría climática, que, en el hemisferio norte, donde hay tierra de sobra (Siberia y Canadá), puede suponer una colonización de territorio virgen e implicar, en su caso, movimientos migratorios.

El hemisferio norte se mantiene templado en regiones por encima de los 50 grados de latitud, gracias a dos corrientes oceánicas que transportan gigantescas cantidades de energía desde el trópico hacia las regiones boreales: La corriente del Golfo y la del Kuro-Shio. Estas corrientes se mantienen porque el agua que inyectan en la superficie del océano ártico puede desaguar en profundidad en forma de agua fría y salada, cayendo, en la zona europea, en una cascada gigantesca entre Groenlandia e Islandia. El agua puede caer hacia el fondo porque, al ser salada, incrementa su densidad. Y se hace más salada al formarse el hielo, pues éste es solo agua dulce. Ahora bien, si la temperatura en el Polo Norte aumenta tanto que se impide, momentáneamente, la formación de hielo, los modelos de circulación oceánica predicen que se interrumpiría la entrada de la corriente del Golfo, en el mar del Norte, desviándose aquella hacia el sur en las costas portuguesas. La eliminación de la corriente del Golfo puede lanzar al oscilador estocástico climático en la dirección de una nueva glaciación, de la que, como he dicho, no estamos tan lejos. Así, el aumento de la temperatura media global puede, si no se detiene, y paradójicamente, acelerar la entrada en glaciación. Jugar con el medio ambiente es repetir el juego de Prometeo y puede llevar a consecuencias incalculables.

### **¿CÓMO SABEMOS ÉSTO?**

Ya en 1900 el químico-físico sueco Svante Arrhenius calculó, a mano y durante un año seguido, cómo evolucionaría la temperatura del planeta, si se doblase la concentración de CO<sub>2</sub> en su atmósfera. La gente se preocupó, considerablemente, hasta el año 1914, en que otras preocupaciones más urgentes quitaron el problema de la mente de las personas. El asunto se olvidó hasta la década de los 60, del siglo xx. En esa época se habían empezado a construir modelos matemáticos para introducir en los ordenadores para la predicción del tiempo atmosférico. Al ir siendo los ordenadores cada vez más potentes, los modelos se empezaron a

extender a la predicción a largo plazo y los científicos empezaron a sentirse preocupados al ver que estas predicciones indicaban una subida notable de la temperatura media del planeta. Se inició entonces un programa informal de investigación sobre el clima, que ha ido creciendo lentamente hasta hoy.

La investigación sobre el clima implica el desarrollo de modelos matemáticos del movimiento de los tres fluidos: el aire, el agua y el hielo, que se mueve, aunque muy lentamente. Al principio los modelos eran independientes y las interacciones entre aire y agua se hacían esencialmente a mano. Hoy, atmósfera y océano se mueven (a través de sus ecuaciones) en los ordenadores, de manera acoplada, intercambiando energía (esencialmente del océano a la atmósfera, al calentar el agua al aire en contacto con ella) y cantidad de movimiento (del aire al agua, a través del viento sobre las olas del mar) y el hielo interactúa semi-manualmente. El movimiento de la atmósfera es uniforme sobre el globo, salvo los pequeños obstáculos de las montañas, mientras que los océanos se mueven constreñidos por las costas de unos continentes de formas muy irregulares. En la ciencia, los modelos matemáticos deben acordarse con las medidas. Medidas y datos de la atmósfera existen en abundancia, a través de una red de 40.000 estaciones meteorológicas, que reportan casi hora a hora a la red meteorológica mundial, de manera que los modelos matemáticos de circulación de la atmósfera se están controlando y corrigiendo de forma constante.

Pero, ¿y el océano?. ¡Ay, el océano! Es la parte más grande del sistema climático y tiene una influencia decisiva a largo plazo, pero las medidas del mismo son escasas, tanto en el tiempo como en el espacio. Hay algunos medidores fijos (boyas oceanográficas) en torno a las costas de algunas regiones de la Tierra (Europa, EEUU, Japón). Los Estados Unidos han montado una matriz de boyas en el Pacífico ecuatorial. Hay unas diez boyas en el Atlántico ecuatorial. Digamos que, en total e irregularmente distribuidas, puede haber unas 200 estaciones de medida fijas para un sistema que representa los 2/3 de la superficie de la Tierra, frente a las 40.000 estaciones meteorológicas.

Desde hace unos años los satélites de medida oceanográfica envían desde el espacio *informaciones enormemente útiles, de alta cobertura espacial, pero de escasa cobertura temporal y solamente de la superficie del mar.* Los modelos de circulación oceánica están, por tanto, menos controlados que los modelos atmosféricos, pero aún así son hoy día fiables en un 80% de sus predicciones.

A estos modelos de circulación es preciso añadir los modelos de evolución del hielo en los glaciares de Groenlandia y del continente antártico, así como el hielo marino del Ártico.

Y hay que añadir la interacción de la vegetación sobre el clima y la química atmosférica.

Los modelos del clima son razonablemente complejos y existe un factor adicional que los hace más interesantes: son modelos no lineales. Las ecuaciones lineales, que son las que ha estudiado la física hasta finales del siglo xx, implican que doble de causa produce doble de efecto.

Una ecuación no lineal sencilla es aquella que nos dice que una variable cualquiera  $X(t)$ , ( $X(t)$  puede ser, por ejemplo, una cierta cantidad de dinero) se eleva al cuadrado cada unidad de tiempo (por ejemplo, cada año):

$$X(t+1)=X^2(t) \quad (1)$$

Supongamos que empezamos con  $X(0)=1.000000001$  dólares. Al año siguiente tendríamos  $X(1)=1.000000002$ , dólares, y así durante mucho tiempo. Parece una inversión muy tonta, y lo es, a corto plazo. La inversión

$$X(t+1)=2X(t) \quad (2)$$

rinde más a corto plazo, pues empezando con  $X(0)=1.000000001$  dólares, el primer año ya tenemos 2 dólares y el segundo 4 dólares. Pero tengamos algo de paciencia, cojamos una calculadora de bolsillo, de lo más sencillo que queramos. Durante, digamos, 35 años, nuestra inversión no crece nada, y somos el hazmerreir del barrio. Pero de repente, el año 36 nuestro capital se convierte en 2 dólares y, 8 años más tarde, no hay dinero en el mundo para pagar nuestra inversión: La cifra se escapa de lo que puede calcular cualquier ordenador unos años después, mientras que el esquema de doblar el capital mantiene éste siempre en cifras normalitas: Hágalo el lector.

La ecuación (1) es una ecuación no lineal, la ecuación (2) es una ecuación lineal. Las ecuaciones no lineales esconden su crecimiento durante largo tiempo, pero llegadas a un punto crítico, explotan. Es esto lo que puede pasar con el sistema climático si seguimos atacándolo sin respeto a sus ecuaciones.

Los modelos nos dicen una serie de cosas. Pero, ¿cómo sabemos cómo se ha comportado el clima en el pasado? Desde mediados del siglo xix hay medidas fiables de observaciones, en superficie, en algunos puntos de la Tierra, pero, sólo después de la segunda guerra mundial, se establece la red de observatorios meteorológicos sistemática, que he mencionado más arriba. Antes de esto tenemos registros históricos y registros fósiles. La composición del aire es variable con su propia temperatura y, de esta manera, la proporción, que en cualquier momento

hay entre los isótopos  $O^{16}$  y  $O^{18}$  del oxígeno en el aire, depende de la temperatura de éste. El aire queda atrapado en las burbujas de hielo en los glaciares de Groenlandia y de la Antártida, de los Andes. Al sacar columnas de hielo de estos glaciares podemos deducir la temperatura del aire, cuando se depositó el hielo hace miles de años (Petit y otros, 1999). Al mismo tiempo, los árboles crecen de distinta manera, dependiendo de la temperatura del aire que les rodea, de manera que, midiendo anillos de crecimiento de ejemplares muy viejos (*Austrocedrus Chilensis*, en los Andes, el pino de piñas frágiles o Bristlecone Pine, en las Montañas Blancas de California), podemos saber esas temperaturas. Teniendo en cuenta que los anillos aparecen cada año, la datación es razonablemente exacta. Tenemos, pues, registros de la evolución de las temperaturas con el tiempo del reloj.

La evolución de estas temperaturas la hemos visto ya en la figura 2, pero la podemos comentar de nuevo: Estas temperaturas han ido bajando, con oscilaciones, durante el último milenio. Si nos fijamos bien podemos jugar a correlacionar etapas de grandes fríos con etapas históricas, o de mejores temperaturas con algunos episodios que nos señala la historia. Por ejemplo, las fotos de personajes en el siglo XIX nos los presentan siempre envueltos en gruesos ropajes de lana, mientras que los cuadros de ciertas décadas de la Edad Media nos presentan a la gente con unas ropas más bien ligeritas, y esto en la misma zona de la tierra: en Inglaterra, por ejemplo. En clima hablamos de pequeñas edades del hielo u óptimos climáticos.

Recordemos que, cuando hablamos de la temperatura, estamos hablando de una media global, es decir, del promedio de temperaturas a todo el año y a todas las regiones del globo. Subidas y bajadas de décimas de grado suponen variaciones locales mucho más importantes. Y, ¿cómo encontrar esas variaciones locales?

Para ello es preciso construir modelos de alta resolución espacial, que tengan en cuenta las peculiaridades geográficas y topográficas de cada región. Hoy día es posible construir estos modelos pero no existen ordenadores suficientemente potentes para resolverlos, así que aquí estamos, en un límite tecnológico que se resolverá en su momento, pero hasta entonces debemos utilizar otras alternativas.

Una de estas alternativas es utilizar la estadística para tratar de encontrar patrones de variación. Puesto que una de las variables importantes del clima es la precipitación, podemos tratar de analizar cómo ha sido ésta en algunas regiones del globo y, particularmente, en Hispanoamérica. Existen series globales de lluvias desde 1900 (recopiladas por Hulme, IRI, 2001), aunque con algunos problemas y agujeros en las mismas, agujeros que se pueden rellenar, en algunos casos, utilizando datos de satélites de la NOAA. ¿Cómo han sido las lluvias en el siglo XX

en la región americana? La limitación de espacio de este trabajo me obliga a presentar sólo algunas gráficas y he elegido mostrar las lluvias en el Golfo de Méjico, en la vertiente oriental de los Andes y en su vertiente occidental.

Lo primero que podemos observar, a simple vista, es que, a lo largo de un siglo, las lluvias han variado, ligeramente, pero han variado en las tres regiones que presento aquí. ¿Son significativas estas variaciones? Recordemos que hemos visto más arriba que el sistema climático no es lineal y que los cambios son muy pequeños al principio, para acelerarse mucho, al avanzar el tiempo. Ha cambiado también la variabilidad, disminuyendo, por ejemplo, en Cuba, (25N,75W) y aumentando, lo mismo que la tendencia, en Rio Grande do Sul (30S,56W).

Lo segundo que quiero hacer notar es que, también a simple vista, parecen existir oscilaciones marcadas en la secuencia temporal de lluvias, que se detectan como manchas de color en las gráficas. Para analizar mejor estas oscilaciones de periodos largos, se pueden filtrar las series, eliminando las de periodos más cortos, obteniendo la figura 5, en la que he superpuesto la oscilación de temperaturas de la superficie del mar en el Pacífico equatorial, conocida como El Niño.

En las lluvias del golfo de Méjico estas oscilaciones tienen poco que ver con la oscilación del Pacífico, pero se relacionan bastante con ella en las lluvias de América del Sur, aunque éstas últimas tienen oscilaciones adicionales no relacionadas con ella. Las oscilaciones son complejas, como corresponde al sistema complejo que es el clima, y deben reflejar oscilaciones del océano, del mismo tipo que la oscilación de El Niño, pero no detectadas hasta el momento. Las lluvias dependen de los movimientos de las masas de aire, los contrastes entre aire frío y aire caliente y los movimientos convectivos y, por tanto, de las posiciones de los chorros polar y tropical. Puesto que la temperatura del aire depende de la temperatura del mar que tiene debajo, oscilaciones lentas e irregulares de las corrientes y ondas marinas pueden producir esas oscilaciones lentas e irregulares de los fenómenos meteorológicos.

Las escalas de tiempo de las oscilaciones de las lluvias en el Golfo de Méjico son del orden de los 5 años. Al combinar varias señales armónicas y armónicas cúbicas (del tipo  $\sin(t)$ ), se originan señales pseudo-aleatorias, con periodos de recurrencia muy largos y sistemas de batidos que aparecen de forma pseudo-aleatoria en una serie temporal corta (100 años es un periodo muy corto para los movimientos del océano).

Las lluvias en la costa de Chile dependen más directamente de las variaciones de la temperatura superficial del océano y, consecuentemente, las escalas de tiempo son bastante más parecidas a las del El Niño, aunque no son estrictamente

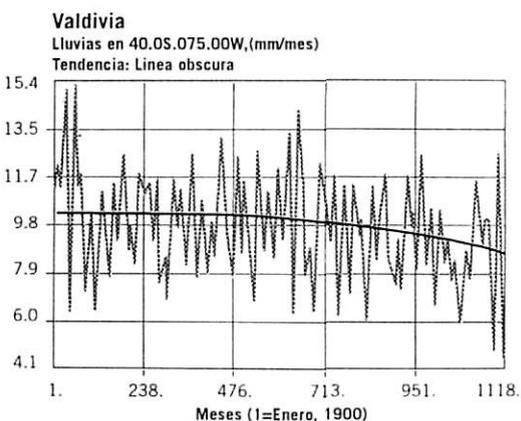
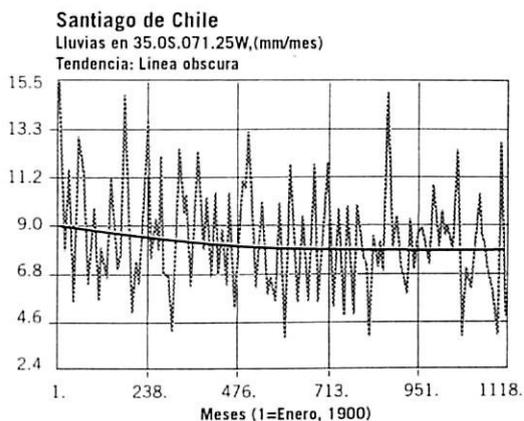
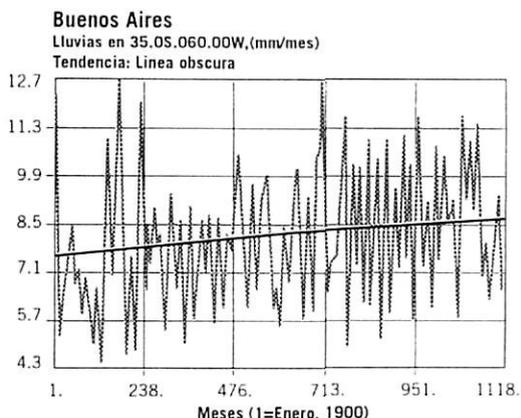
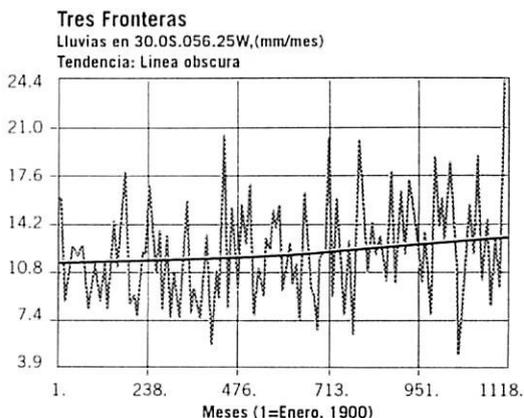
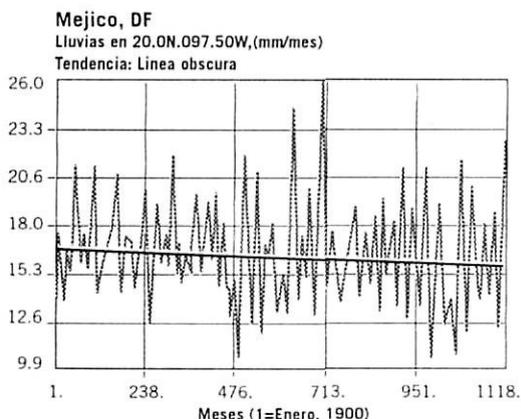
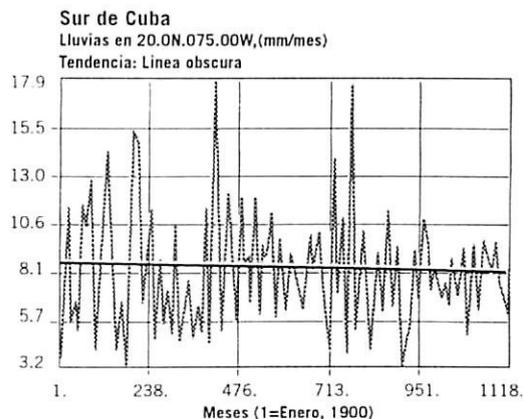
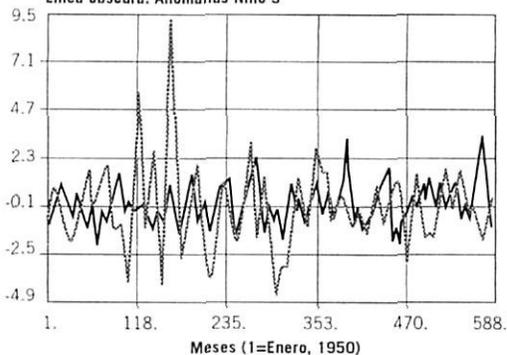


Figura 5: Lluvias en Mesoamérica y en Sudamérica, y sus tendencias de evolución.

### Sur de Cuba

Anom. precip. en 20.0N.075.00W

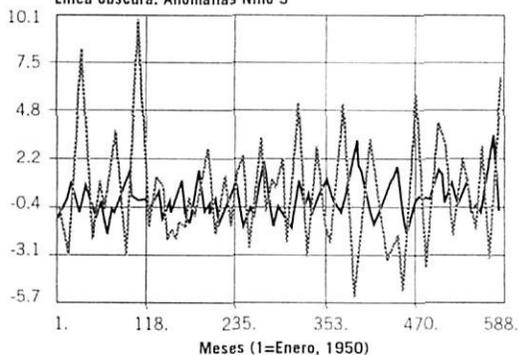
Línea oscura: Anomalías Niño 3



### Mejico, DF

Anom. precip. en 20.0N.097.50W

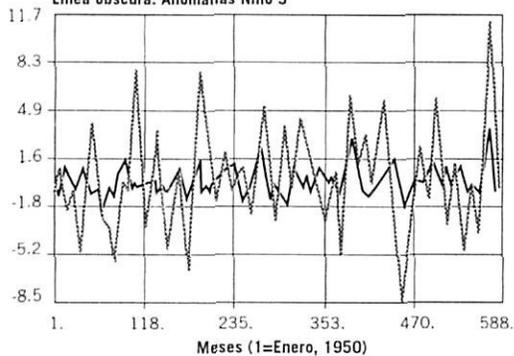
Línea oscura: Anomalías Niño 3



### Tres Fronteras

Anom. precip. en 30.05.056.25W

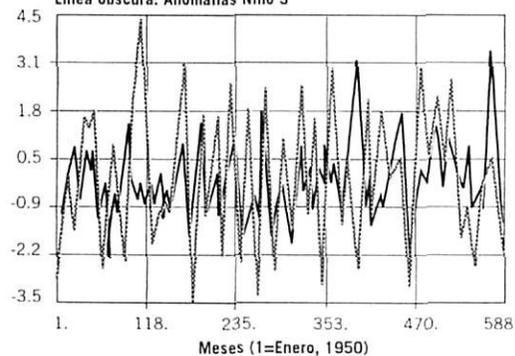
Línea oscura: Anomalías Niño 3



### Buenos Aires

Anom. precip. en 35.0S.060.00W

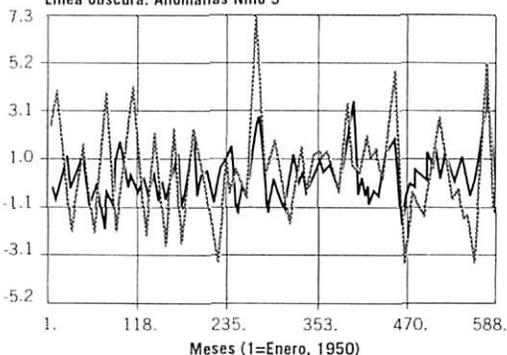
Línea oscura: Anomalías Niño 3



### Santiago de Chile

Anom. precip. en 35.0S.071.25W

Línea oscura: Anomalías Niño 3



### Valdivia

Anom. precip. en 40.0S.075.00W

Línea oscura: Anomalías Niño 3

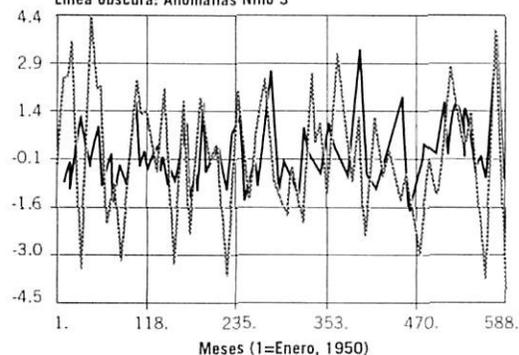


Figura 6: La misma secuencia de lluvias en América, pero ahora con fluctuaciones en torno a la tendencia, y la secuencia de El Niño en la región Niño 3.

las mismas. Como en el caso de las glaciaciones, una variación más o menos regular de ciertas causas, produce oscilaciones de frecuencias similares en los efectos. La figura 6 indica estas relaciones en las cuales algunos máximos de precipitación coinciden con máximos de El Niño, mientras que hay otras oscilaciones de la precipitación que no tienen nada que ver con la oscilación de El Niño y, en otras situaciones (1958), el mínimo de lluvias coincide con un máximo de El Niño.

Un análisis detallado de estas relaciones entre El Niño y las lluvias en América del Sur ha sido realizado en una serie de artículos por Patricio Aceituno, de la Universidad de Chile, que ha detectado correlaciones significativas entre esas lluvias en sus modos estacionales y EL Niño (Aceituno, 2000 y artículos citados allí).

Si las tendencias observadas se siguen manteniendo, podemos esperar un incremento en la cantidad y variabilidad de las lluvias en la región atlántica de América de Sur (Argentina, Paraguay, Uruguay), una paulatina disminución de las mismas en la vertiente occidental de la cordillera andina y una disminución muy ligera en la zona del Golfo de Méjico.

Acabamos de ver que las lluvias en América del Sur (y en la zona ecuatorial, pero los datos tienen aún muchos problemas) están considerablemente correlacionadas con el fenómeno de El Niño.

### **¿QUÉ SABEMOS DE ÉSTE FENÓMENO?**

El Niño es una oscilación de las masas de agua del Pacífico Ecuatorial entre Indonesia y las costas peruanas. Un ejemplo sencillo pero ilustrativo lo podemos hacer todos en la bañera de casa, dando un empujón hacia abajo en el agua de un extremo de la misma con una tabla de la misma anchura que la bañera: El agua empieza una oscilación lenta, que permanece por largo tiempo, y cuya frecuencia depende de lo larga que sea la bañera. Si complicásemos el asunto, poniendo agua más fría en uno de los extremos y permitiendo que el agua superficial se calentase y se enfriase en regiones de 20 cm, a lo largo de una bañera de, digamos, un metro y medio de longitud, veríamos fenómenos muy interesantes de circulación del agua.

El agua en la zona ecuatorial del Pacífico funciona en cierto modo como una bañera, pues la rotación de la Tierra hace que le sea muy difícil escapar de una región de unos 5 grados de latitud a ambos lados del ecuador. Las oscilaciones de esa región amplia del océano no son tan sencillas como las de una bañera y están forzadas por variaciones de temperatura, en vez de por empujones que cambian la altura del agua, pero el resultado es similar: Una serie de oscilaciones muy

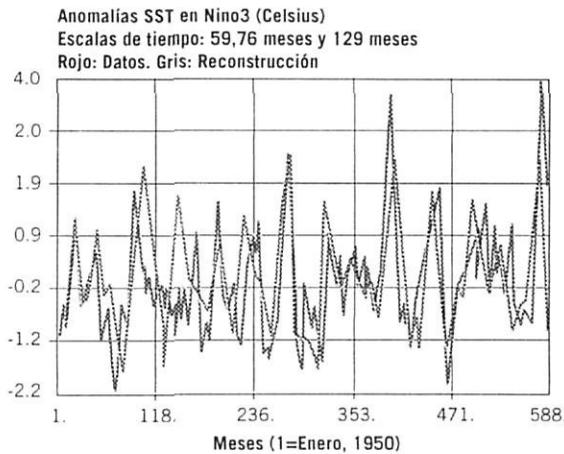
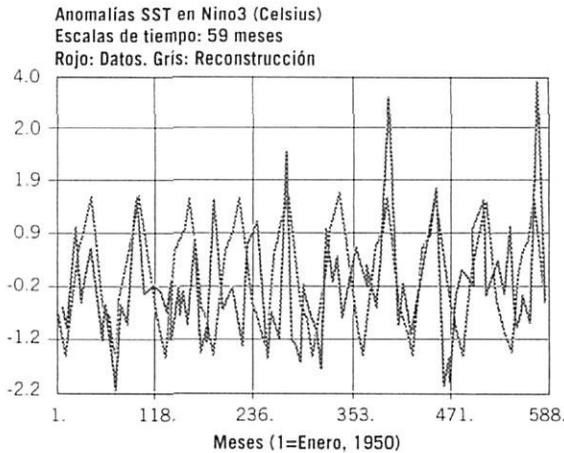


Figura 7: Anomalías de la temperatura superficial del mar en la región Niño 3, y dos reconstrucciones mediante análisis espectral bayesiano (Ruiz de Elvira y Ortiz...)

lenfas y que se mantienen durante muy largo tiempo. Las variaciones de temperatura se mantienen, mediante flujos de energía en forma de calor, entre el océano y el aire y, de esta manera, la oscilación propia del agua del Pacífico se vé influenciada por otros fenómenos climáticos a lo largo y ancho del globo, de manera que, sobre la oscilación propia con escalas de tiempo de entre cinco años y siete años, se superponen otras oscilaciones de escalas de tiempo las largas. Un análisis bayesiano de las escalas características de las SST (Temperaturas superficiales del mar), produce los siguientes valores:

$$T = (4.9, 6.3 \text{ y } 10.7) \text{ años}$$

La reproducción del fenómeno, con una combinación de funciones armónicas y armónicas cúbicas con la escala de tiempo principal de unos 5 años, se presenta en la figura, donde podemos ver cómo las oscilaciones de SST siguen razonablemente bien estas oscilaciones de 5 años, salvo en el intervalo de 1963-1965 (175 en la escala de meses), en el que, por motivos que aun desconocemos pero que pueden tener que ver bien con alguna erupción volcánica o con alguna explosión nuclear, la oscilación perdió la fase. En el resto de los episodios, la escala de 59 meses ajusta bien los datos medidos. Una representación mejor de los datos, en términos de oscilaciones acopladas de distintas escalas de tiempo, se consigue

introduciendo la escala de 76 meses (6 años y 4 meses), observando que es el juego de estas dos escalas de tiempo próximas, más la de 129 meses (10 años y 9 meses), que es casi un múltiplo de la de 59 meses, el que produce batidos en la oscilación, que generan el esquema aparentemente irregular del fenómeno.

Observamos también que los máximos grandes, que ocurren con la escala de tiempo de 129 meses, son crecientes en amplitud, lo que puede reflejar un aumento de la energía disponible por el sistema oceánico como consecuencia del cambio climático.

¿Son reales estas oscilaciones? Las escalas de tiempo son totalmente reales y el análisis bayesiano no produce más escalas significativas. Sin embargo, la reproducción de los datos es un artificio estadístico, obtenido mediante la generación de los coeficientes de las oscilaciones elementales para maximizar la bondad del ajuste, de manera que el peso relativo de esas oscilaciones elementales, es peculiar del intervalo de ajuste, en este caso entre 1950 y 1999. Las oscilaciones en el océano no adoptan la forma de oscilaciones armónicas o armónicas cúbicas, sino que son ondas dinámicas con los nombres de ondas de Rossby y de Kelvin. Existe una literatura amplísima intentando el análisis del fenómeno desde el punto de vista de la dinámica oceánica, la dinámica acoplada océano-atmósfera, los modelos numéricos y modelos estadísticos de índole más complicada, pero las leves indicaciones presentadas aquí tienen la virtud de su sencillez, del ajuste excelente del modelo a los datos y de su interpretación como descomposición de modos complejos de oscilación, en términos de los modos armónicos simples, que puede servir de guía a un nuevo tipo de análisis dinámico más detallado a realizar en el futuro.

El fenómeno de El Niño, las lluvias en América, la floración en Europa y otras muchas señales, son indicadores de que el clima está siendo cambiado por la actividad humana. ¿Es eso bueno o malo?

Los cambios siempre son disruptivos, pues la sociedad necesita mucho tiempo para adaptarse a ellos. Pero, adicionalmente, estos cambios pueden producir problemas tan graves, a nuestra escala actual, como los problemas con los que se enfrentaron los Anasazi, con los que se debieron enfrentar los Mayas y las civilizaciones peruanas.

### **¿ES ÉSTO IMPORTANTE?**

En un artículo reciente, O'Neill y Oppenheimer (2002), de las universidades de Brown y Princeton, estiman que una subida de más de 2 grados de la temperatura media global, traerá consigo la fusión del hielo del oeste antártico, con una subida media del nivel de mar de unos 5 metros, mientras que una subida de 3 grados en la TMG produciría el colapso de la circulación termohalina y el corte de la corriente del Golfo. Lo primero produciría inundaciones muy considerables en las ciudades costeras y destruiría los deltas de los que viven cientos de millones de personas que habría que reubicar. Lo segundo destrozaría Europa y, con ella, uno de los motores de la civilización actual.

La mitigación del cambio climático exige la sustitución masiva de los sistemas energéticos, basados en el petróleo por sistemas de energías renovables, lo cual implica dedicar dinero a esa sustitución.

Una excusa, puesta por el Sr. Bush y por muchos políticos y escritores en el campo de la *ciencia política* (Lomborg, 2001), es que los daños que puede causar el cambio climático son pequeños frente a los costes de mitigación. Aquí es preciso hacer notar dos cosas.

En un artículo reciente en el Bulletin de la American Meteorological Society, Pielke y Carbone (2002), de NCAR, indican que de una economía del orden de los  $7 \times 10^{12}$  o 7 billones (europeos) de dólares, 1 billón está relacionado o influenciado por el tiempo atmosférico y, por tanto, por el clima. Los daños que puede causar el cambio climático, aún siendo difíciles de estimar, pueden ser, por tanto, muy considerables.

Por otro lado, tenemos el elusivo concepto de *coste*. Después de haber consultado casi veinte libros de economía, me encuentro sin una definición del concepto de coste: sencillamente los libros de economía no se sienten obligados a definir un término básico y que utilizan constantemente.

Evidentemente si la sociedad decide que es bueno invertir  $X$  dólares en energías alternativas, esos  $X$  dólares no se dedicarán a construir teatros, estadios deportivos, carreteras o a financiar centros de investigación en partículas elementales o en el desarrollo de la fusión. En ese sentido, los costes de mitigación existen: significan redirigir las inversiones, que constantemente hace la sociedad, de unos conceptos a otros. Pero en el proyecto de fusión nuclear de Culhan, Europa ha invertido en los últimos 50 años unos 200.000 millones de dólares, con un único resultado: nulo. Lo mismo se puede decir de la inversión en el CERN. Invertir en carreteras produce ganancias para la sociedad, porque aumenta la velocidad de transferencia de bienes de unos puntos a otros del territorio. Pero, ¿una inversión de 6.000 millones de dólares en carreteras produce más ganancia para la sociedad que una inversión de 6.000 millones de dólares en celdas solares? No existen estudios comparativos de ese estilo y eso es algo que debe hacerse sin falta.

Para terminar, la sociedad humana se enfrenta con un cambio en el medio en el que vive, cambio causado por ella misma en su disfrute del paraíso terrenal, un cambio comparable o superior a otros cambios de enorme magnitud, causados por cataclismos del tipo del impacto de un meteorito o erupciones volcánicas continuadas. Tiene en sus manos mitigar ese cambio, mediante un esfuerzo que, además, produciría un cambio tecnológico de la misma magnitud que el cambio producido por el descubrimiento de las máquinas térmicas, pero sin las consecuencias que éstas han generado. Es un desafío para la humanidad. ¿Nos atrevemos a afrontarlo? ●

## BIBLIOGRAFÍA

- Aceituno, P.- 2000. Proceedings, 6th. International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, American Meteorological Society, 2000.
- Hulme, M.- 2000. Dataset "gu23wld0098.dat". International Research Institute for Climate Prediction.
- Jones, P.D., T.J. Osborn, K.R. Briffa.- 2001. "The Evolution of Climate over the Last Millennium, Science, 292, 662-667.
- Lomborg, B.- 2001. "The Skeptical Environmentalist", Cambridge University Press.
- O'Neill, B.C. , M.Oppenheimer.- 2002. "Dangerous Climate Impacts and the Kyoto Protocol", Science, 296, 1971-72.
- Petit, J.R. y otros.- 1999. "Climate and atmospheric history of the past 420.000 years from the Vostok ice core, Antarctica. Nature, 399, 429-436.
- Pielke, R. Jr., R.E. Carbone.-2002. "Weather Impacts, Forecast and Policy". BAMS, 83, 393-403.
- Ruiz de Elvira, A.- 2001. "Quemando el futuro: Clima y Cambio Climático" Editorial Nivola, Madrid.
- Ruiz de Elvira, A., M.J. Ortiz.- 1995. "Applications of statistical techniques to the analysis and prediction of ENSO. Bayesian Oscillation Patterns as a prediction scheme". Dyn. Atmos. Oceans. 22, 91-114.
- Weiss, H., R.S. Bradley.- 2001. "What drives society collapse?", Science, 291,609-610.