

## IDENTIFICACION DEL CAMBIO CLIMATICO INDUCIDO POR EL AUMENTO DE ANHIDRIDO CARBONICO Y OTROS GASES EN TRAZAS EN LA ATMOSFERA

Por W.W. KELLOGG\*

### El problema del cociente de la señal al ruido

Es comúnmente conocido que nuestros antepasados han tenido que enfrentarse a cambios del clima que duraron varios siglos o más; con frecuencia estos cambios fueron lo suficientemente graves como para contribuir a una ruptura de los estilos de vida, a la emigración, o incluso al colapso de naciones. Dichos cambios debieron ser causados por una variedad de factores naturales que alteraron el delicado equilibrio que determina el clima. Ahora, sin embargo, un nuevo factor se ha introducido en este equilibrio: la propia humanidad.



Dr. W.W. Kellogg (Foto: NCAR)

Hay numerosas actividades humanas que pueden cambiar nuestro clima a escala local o regional, lo que se demuestra por el hecho de que las grandes ciudades han alterado los regímenes de temperatura y precipitación. Sin embargo, a escala mundial una actividad predomina sobre todas las demás: la adición de anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ) a la atmósfera procedente de la quema generalizada de combustibles fósiles (carbón, petróleo o gas natural). No hay ninguna duda de que la concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera se ha estado aumentando constantemente de año en año, y que el aumento total durante aproximadamente los últimos cien años ha sido de un 20 por ciento, pasando de entre 280 y 290 a 340 partes por millón de volumen (ppmv).

Tal como se explicará en la siguiente sección, el hecho de que el  $\text{CO}_2$  añadido tenga consecuencias climáticas es debido a su capacidad de absorber y reemitir radiación infrarroja procedente de la superficie terrestre que de otra manera escaparía hacia el espacio exterior. Con frecuencia a este proceso se le denomina el “efecto de invernadero” (aunque la analogía está lejos de ser perfecta), y el resultado del mismo es una temperatura más alta en la superficie y una más baja en la estratosfera. También hay algu-

\* Centro Nacional de Investigación Atmosférica, Boulder, EE.UU.

nos otros gases en trazas, relativamente duraderos, que se emiten a la atmósfera y absorben radiación infrarroja tales como óxido nítrico, clorofluorometanos y metano, los cuales contribuyen aún más al efecto de invernadero del anhídrido carbónico.

A causa del aumento del  $\text{CO}_2$  teóricamente deberíamos haber experimentado desde finales del siglo pasado un aumento de la temperatura media mundial en superficie de unos 0,5 grados Celsius. Sin embargo, durante este mismo período ha habido marcadas variaciones de la temperatura media debidas a causas naturales, especialmente erupciones volcánicas (las cuales crean una capa de partículas de sulfatos en la estratosfera que difunden luz), y a posibles cambios de la actividad solar y de la radiación recibida desde el sol. Las amplitudes de estas variaciones naturales de la temperatura aparentemente han sido lo suficientemente grandes como para enmascarar el constante calentamiento debido al aumento de  $\text{CO}_2$  por sí sólo, y de hecho la temperatura media del hemisferio norte descendió entre 1940 y 1965. Este último descubrimiento ha llevado a que algunos escépticos negaran la realidad del calentamiento debido a la influencia del  $\text{CO}_2$ , a pesar de lo cual ahora podemos dar una explicación física razonable del mismo.

Si al aumento teórico, más o menos constante, de la temperatura media debido al aumento del  $\text{CO}_2$  durante los últimos 100 años le llamamos la “señal”, entonces su detección e identificación consiste en distinguirlo del “ruido” de fondo de las variaciones naturales. Este tipo de problema de determinar el cociente de la señal al ruido es bien conocido en la teoría de las comunicaciones y de la información, y hay varias técnicas estadísticas para resolverlo.

En el contexto de la detección anticipada de las variaciones del clima, los métodos alternativos a considerar son los siguientes:

- (a) La señal es un aumento constante y monótono de la temperatura media mundial en la superficie, de manera que simplemente basta esperar a que crezca lo suficiente con respecto a la amplitud media de las variaciones naturales (supuestas esencialmente aleatorias). Entonces podemos esperar a que el cociente de la señal al ruido crezca hasta ser tan grande que la señal sea estadísticamente significativa.
- (b) Mientras que la temperatura media mundial en la superficie es la prueba más directa del cambio climático inducido por el  $\text{CO}_2$ , es probable que haya otros índices que tengan un valor del cociente de la señal al ruido más grande a medida que el cambio progresa. Ejemplos podrían ser el cociente del calentamiento en la superficie en las latitudes altas del hemisferio norte respecto al enfriamiento general en la estratosfera, o el área cubierta por el hielo marino en el Artico y en el Antártico en una determinada época del año. Los estudios teóricos con modelos climáticos pueden revelar cuales son los índices que mejor responden a un aumento del  $\text{CO}_2$ , y pueden utilizarse los registros históricos para estimar las variaciones naturales de un índice, el cual aún se supone que está gobernado por un proceso aleatorio.
- (c) Actualmente no es necesario suponer que la variabilidad climática natural es aleatoria, dado que al menos parte de ella puede achacarse a modulaciones externas debidas a la actividad volcánica y solar, y quizás a cambios lentos en la circulación oceánica y en las características de la superficie terrestre. Si una gran parte de las variaciones en el clima pueden explicarse cuantitativamente,

entonces el componente aleatorio que queda (el ruido *residual*) quedará altamente reducido. Esto aumenta el valor del cociente de la señal al ruido.

En cada uno de estos métodos es esencial la utilización de buenas técnicas estadísticas. El resultado final deberá ser, por ejemplo, una formulación del grado de "confianza" con el cual la señal del CO<sub>2</sub> puede distinguirse del ruido, dada la variabilidad del registro y el carácter de la señal esperada. Otra formulación estrechamente relacionada con la anterior puede ser cuál es la fracción del cambio observado en el clima (por ejemplo, la temperatura media en la superficie), que puede atribuirse a funciones moduladoras externas conocidas, incluyendo el CO<sub>2</sub>. La teoría estadística nos dice que cuando el cociente de la señal al ruido alcanza la unidad, la "confianza" de que la señal es real es del orden del 85 por ciento (aún hay un 15 por 100 de probabilidad de que no sea real, sino debida a sucesos aleatorios); cuando el cociente alcanza el valor dos, la "confianza" es del orden del 98 por ciento.

Hasta este punto es lo más lejos que puede llegar la ciencia y la estadística. Nunca se podrá decir con absoluta certeza que un calentamiento mundial ostensible es totalmente debido a la influencia del anhídrido carbónico. Sólo se podrán hacer formulaciones sobre la probabilidad de que sea atribuido al CO<sub>2</sub>, y además habrá una persistente incertidumbre debido a nuestro inadecuado conocimiento de las numerosas influencias o interacciones dentro del sistema climático. Es muy importante ser claro sobre los límites de confianza cuando se habla de la primera detección de un cambio climático, un punto sobre el que se volverá a tratar en la última sección.

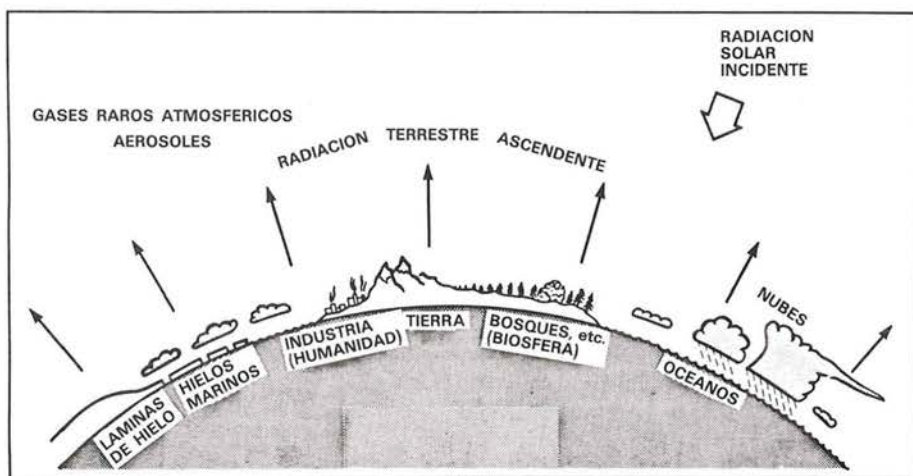


Figura 1. — Componentes del sistema mundial que determina el clima de la Tierra, la mayor parte de ellas interactúan entre sí en algún grado.

### Características de un cambio climático inducido por el CO<sub>2</sub>

Ya ha sido mencionada la influencia del anhídrido carbónico y de otros gases en trazas que absorben la radiación infrarroja en el balance radiativo de la atmósfera (el efecto de invernadero). Cuando se trata de atribuir un cambio climático al aumento de dichos gases, es importante comprender el conjunto complejo de respuestas que pueden ocurrir. Ahora estas respuestas deben deducirse en gran parte de los estudios teóricos con modelos del sistema climático, dado que tenemos poca experiencia sobre ta-



les cambios en el mundo real. Alternativamente, podemos realizar un análisis de la temperatura media en la superficie de la Tierra observada y, después de tener en cuenta los cambios externos tales como la turbiedad de la atmósfera, determinar si la señal del CO<sub>2</sub> es detectable en la serie de temperaturas de los últimos 100 años aproximadamente. Tenemos una fuente adicional de información en los estudios de los climas del pasado lejano cuando la Tierra estaba más cálida, así como en los estudios de años o épocas anormalmente cálidas durante este siglo. Ambos pueden servir como analogías parciales de un clima futuro más cálido.

Hay varios elementos a considerar en el problema de evaluar las características del cambio climático que hay que esperar de un aumento dado de CO<sub>2</sub>, así como en el de estimar la rapidez con que probablemente ocurrirá este cambio. Cada uno de ellos ha recibido una atención considerable.

#### *Ritmo de producción de CO<sub>2</sub> y de otros gases que absorben la radiación infrarroja*

El ritmo mundial con que se queman los combustibles fósiles (y por lo tanto el ritmo de producción de CO<sub>2</sub>) aumentó exponencialmente desde principios de siglo hasta 1973 y dicho aumento fue ligeramente superior al 4 por 100 por año, sólo disminuyó durante las dos guerras mundiales y la Depresión. A partir de 1973 el ritmo de aumento ha sido algo superior al 2 por 100 por año. Así, en el año 1980 la masa de carbono añadida a la atmósfera fue de unas  $5,2 \times 10^9$  toneladas. (La biosfera puede haber contribuido con uno o dos miles de millones de toneladas más mientras que 100 millones de toneladas provinieron de la fabricación de cemento). La mayoría de los expertos en temas energéticos esperan que el ritmo con que se queman los combustibles fósiles continúe aumentando durante el próximo siglo, pero a un ritmo progresivamente más lento. Esto dependerá de las condiciones económicas de los países en desarrollo y de los países industrializados, de la introducción de fuentes alternativas de energía, y de las medidas a nivel mundial para la conservación de la energía. Los futuros ritmos de producción de los otros gases que absorben la radiación infrarroja (incluyendo el ozono, un constituyente producido fotoquímicamente en el aire contaminado) son inciertos, pero a principios del próximo siglo pueden añadir entre el 25 y el 50 por 100 al efecto de calentamiento del CO<sub>2</sub>.

#### *Ritmo de eliminación del CO<sub>2</sub> de la atmósfera*

Del CO<sub>2</sub> añadido a la atmósfera desde 1958 por la quema de combustibles fósiles, alrededor del 55 por 100 ha permanecido en el aire (suponiendo que no exista otra fuente importante). Indiscutiblemente el principal sumidero lo constituyen los océanos, pero la mezcla oceánica a gran escala es extremadamente lenta, y la constante de tiempo para su transporte a las aguas profundas se estima que es de 300 a 500 años. Los modelos oceánicos y los estudios de los indicadores radioactivos de las pruebas nucleares que tuvieron lugar alrededor de 1960 han sido utilizados para estudiar el ritmo con que en el futuro los océanos podrán absorber el CO<sub>2</sub> añadido; estas estimaciones indican que la fracción eliminada de la atmósfera puede disminuir algo cuando crece el ritmo de adición. En cualquier caso, haciendo unas suposiciones razonables en lo que se refiere a la futura quema de combustibles fósiles y a la incorporación y producción de CO<sub>2</sub> por parte de la biosfera, se puede decir que la concentración de CO<sub>2</sub> podrá duplicar su valor anterior al año 1900 (280-290 pmpv) antes del año 2050, o alternativamente algo después del año 2100. Probablemente hacia el año 2000 habrá crecido desde su actual valor de 340 hasta 380-400 pmpv.

## Respuesta del sistema climático al aumento de gases que absorben la radiación infrarroja

Recientemente se han publicado diversos estudios y resúmenes de experimentos con modelos climáticos, siendo su propósito determinar la forma mediante la cual el sistema climático responde a un aumento del  $\text{CO}_2$ . Aquí no se describirán los modelos en sí, sólo los resultados (aunque sea importante saber donde puede haber deficiencias en los modelos y sus diseños experimentales). Mientras que comprendemos bastante bien los efectos directos de un gas que absorbe la radiación infrarroja sobre el balance radiativo atmosférico, son las numerosas interacciones dentro del sistema climático (atmósfera, océanos, continentes, criosfera, biosfera) las que resultan más difíciles de incluir adecuadamente en un modelo. Algunas concepciones erróneas relativas a estas interacciones y a procesos de realimentación han llevado a importantes subestimaciones o sobrestimaciones sobre la sensibilidad del sistema en su conjunto.

En lo que respecta a la situación en algún momento de la segunda mitad del próximo siglo, cuando la concentración del  $\text{CO}_2$  probablemente haya duplicado el valor precedente al año 1900, los experimentos con los modelos sugieren lo siguiente:

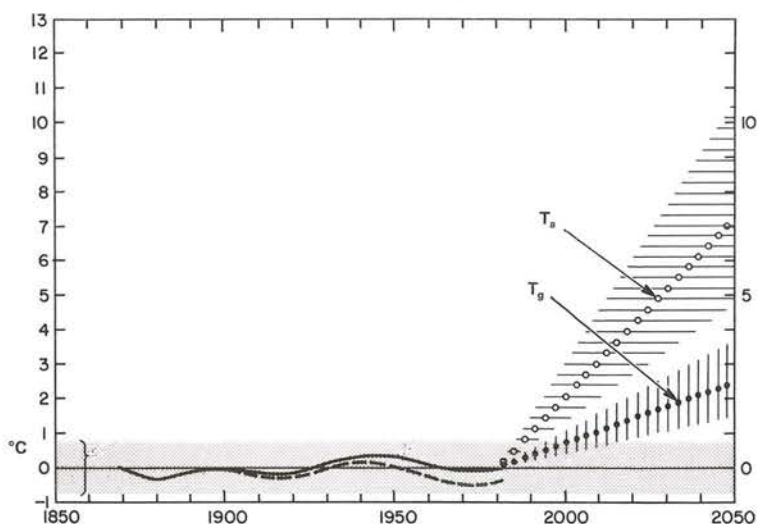


Figura 2. – Tendencias del pasado y estimadas para el futuro de la temperatura del aire en superficie para el hemisferio norte. La línea continua es la de las temperaturas observadas desde 1850 hasta el presente, y la línea de puntos es la de las que se habrían medido sin ningún incremento debido al  $\text{CO}_2$ .  $T_g$  indica la tendencia estimada para el futuro de la temperatura media hemisférica y  $T_a$  de la temperatura ártica. La zona rayada muestra el intervalo dentro del que ha permanecido la temperatura media de la Tierra durante los pasados 1000 años o más. La estimación más alta de los cambios de temperatura futuros supone un ritmo de aumento en la quema de combustibles fósiles de un cuatro por ciento anual; la estimación más baja supone una estabilización durante unos 50 años y una disminución posterior. En los dos casos, una concentración doble de  $\text{CO}_2$  provocaría un aumento de temperatura de tres grados Celsius.

- Aumento de la temperatura media mundial en superficie: 2-3 grados centígrados.
- Disminución de la temperatura media mundial de la estratosfera superior (por encima de los 30 km): 6-10 grados centígrados.
- Aumento de la temperatura de la superficie en el Ártico: 6-9 grados centígrados.



- Aumento de la temperatura de la superficie en los trópicos: menos de 2 grados centígrados.
- Disminución de la humedad del suelo en la parte central de los continentes alrededor de la latitud 35-50°, especialmente en primavera y en verano; algún aumento en la humedad del suelo en los subtrópicos.

Dado que en la mayoría de los experimentos con modelos climáticos realizados hasta la fecha se ha supuesto una condición de equilibrio (mientras que la actual situación implica un aumento continuo de la concentración de CO<sub>2</sub>), y dado que los océanos responderán mucho más lentamente que la atmósfera, se estima que habrá un retraso de una década o dos en alcanzarse estos cambios. La influencia de los otros gases en trazas que absorben la radiación infrarroja estará en la misma dirección que la influencia del CO<sub>2</sub>, ya que contribuirían al calentamiento debido al efecto de invernadero y acelerarán el cambio.

Hay otros aspectos del cambio climático que han recibido atención especial. Hemos mencionado el cambio de las configuraciones de precipitación (y de humedad del suelo) originado por cambios inevitables en las configuraciones de circulación a gran escala; sobre este importante punto se han obtenido conocimientos adicionales a partir de los estudios de los períodos más cálidos del pasado. Los hielos marinos del Ártico y del Océano Sur parece que son bastante sensibles a un calentamiento, y en varios estudios se ha llegado a la conclusión que bastante antes de que la concentración de CO<sub>2</sub> se haya duplicado, el Océano Ártico se verá completamente libre de hielo en verano, una condición que aparentemente no se ha presentado en el último millón de años. Una alteración significativa en los hielos marinos no afectará *per se* al nivel del mar, pero una disminución del volumen de cualquiera de los grandes campos de hielo continentales de Groenlandia y de la Antártida causarían una elevación del nivel del mar. El gradual aumento del nivel del mar observado en este siglo de 10 a 20 cm, puede atribuirse en parte a este efecto. Sin embargo el actual consenso de los glaciólogos es que una inestabilidad marcada en una capa de hielo que dé como resultado una gran elevación repentina del nivel del mar es un fenómeno que puede ocurrir dentro de varios siglos (sí es que de verdad ocurre), y por tanto se escapa del contexto presente.

### **Estrategias para una identificación anticipada del cambio climático**

Ya se ha realizado el trabajo básico para especificar un conjunto de observaciones que proporcionarán las mejores indicaciones sobre el cambio climático inducido por el CO<sub>2</sub> que se espera de acuerdo con lo descrito anteriormente. La estrategia también deberá incluir observaciones que revelen el papel de otras funciones moduladoras (naturales).

Hay que volver a resaltar que no resulta suficiente con descubrir que se ha producido un cambio climático. El propósito final deberá ser atribuir dicho cambio a una cierta función moduladora, siendo la que ahora buscamos el aumento de los gases que provocan el efecto de invernadero. Por ello trataremos de identificar las características climáticas únicas descritas en la anterior sección.

#### *Vigilancia de la temperatura mundial*

Resulta claro que, dado que el efecto de invernadero sobre el balance radiativo

atmosférico afecta directamente a la temperatura, un primer sitio donde buscar un cambio es en el campo de temperaturas. A este respecto se han realizado muchos trabajos sobre la temperatura media mundial o hemisférica, ya que las temperaturas regionales no pueden considerarse representativas. Las temperaturas del Artico y de la Antártida pueden dar una medida mejor que la media mundial, pero desafortunadamente la variabilidad interanual de la temperatura también es mayor allí, de manera que no resulta evidente que el cociente de la señal al ruido sea mayor. De forma similar, en las latitudes medias y altas, las temperaturas en la superficie durante el invierno pueden mostrar un aumento ligeramente mayor que las temperaturas en verano, pero la variabilidad de las temperaturas en invierno (es decir, el ruido) es más del doble de grande que en verano, lo cual sugiere que la respuesta medida por la temperatura de verano pueda tener un cociente de la señal al ruido más grande.

Ha habido varios intentos de deducir las temperaturas medias en superficie, hemisféricas y mundiales, a lo largo de los últimos 100 años aproximadamente, y es notable que no se haya llegado exactamente a los mismos resultados, a pesar de que más o menos se ha utilizado el mismo conjunto de registros de estaciones meteorológicas. En primer lugar esto es debido a las suposiciones hechas al promediar las temperaturas para cada banda de latitud, existiendo grandes lagunas en la distribución geográfica de estaciones con registros largos. Esto resulta especialmente perturbador en el hemisferio sur con sus grandes extensiones oceánicas. Otra fuente de error surge allí donde las estaciones están emplazadas, dentro o en las proximidades de ciudades, y la influencia local de la urbanización ha originado a lo largo de los años un aumento artificial de la temperatura.

Se ha argumentado que la temperatura promediada sobre la troposfera inferior, en lugar de la temperatura en superficie, puede ser más representativa al estudiar los cambios en el equilibrio radiativo debidos a los gases causantes del efecto de invernadero. Desafortunadamente, no existe una buena cobertura aerológica con anterioridad a los años 50, y aún después sobre los océanos todavía resulta deficiente. Hasta el momento aún no se han utilizado los sondeos indirectos desde los satélites para cubrir las lagunas existentes.

Puesto que las temperaturas estratosféricas deben mostrar una disminución, el cociente entre los cambios de la temperatura en superficie (o de la troposfera inferior) y los de la temperatura estratosférica podría ser un buen índice; en este caso sería importante vigilar la distribución del ozono de la estratosfera y de otros gases en trazas, ya que esto puede tener su influencia en los cambios de la temperatura en la estratosfera.

### *Vigilancia de otros índices del cambio climático*

A medida que se van perfeccionando nuestros modelos climáticos, debemos ser capaces de describir con mayor detalle los cambios climáticos inducidos por el CO<sub>2</sub>, y algunas características especiales del cambio climático puede ser que resulten más marcadas aún que la temperatura por sí sola. Por ejemplo, la extensión de los hielos marinos en el Artico y en el Antártico en verano ha mostrado ser un buen indicador del calentamiento en las latitudes altas, y tiende a integrar el régimen de temperatura durante uno o dos años. Los cambios en la distribución de la precipitación pueden ser un buen indicador, y al mismo tiempo serían un anuncio de condiciones agrícolas favorables o desfavorables, pero desafortunadamente aún no conocemos lo suficiente sobre la res-



puesta de las precipitaciones a un cambio general de las configuraciones de la circulación general (esto probablemente merezca un estudio especial). Se ha sugerido que la altura y la temperatura de la tropopausa tropical debe responder de una manera sensible a los cambios de la temperatura en superficie, debido al carácter de la convección de los cúmulos en la rama ascendente de la célula de Hadley. Sin embargo, a ninguno de estos índices indirectos se le puede dar una prioridad muy alta hasta que los conozcamos mejor.

### *Recapitulación de todas las causas de cambio climático*

Hay que decir que debemos continuar vigilando la concentración y la distribución mundial del CO<sub>2</sub> y de los otros gases causantes del efecto de invernadero. En el caso de estos últimos, también son importantes sus distribuciones en la estratosfera debido al papel que algunos de ellos juegan en los procesos fotoquímicos allí.

Las medidas espectrales del flujo descendente de la radiación infrarroja en la superficie y de la radiación ascendente en la cima de la atmósfera (medida desde los satélites) pueden servir como una valiosa comprobación de nuestras estimaciones teóricas de la transferencia radiativa, y como un medio de vigilar los diversos cambios en el sistema climático. Se ha sugerido que los flujos descendentes deben medirse preferentemente en las regiones secas de las latitudes medias y altas donde los efectos del vapor de agua son menores, aunque el mismo vapor de agua haya de ser vigilado.

La vigilancia satelitaria de la radiación ascendente de onda corta (radiación solar reflejada) y de la radiación infrarroja en la cima de la atmósfera merece especial atención. Es una técnica potencialmente poderosa para vigilar una variedad de cambios en la atmósfera y en la superficie que pueden ejercer su influencia sobre el clima. Por ejemplo, los cambios de unos pocos tanto por ciento en la nubosidad mundial pueden enmascarar el efecto de un cambio debido al CO<sub>2</sub> (aunque esto resulte difícil de determinar, incluso mediante los satélites). Hay otros varios mecanismos de realimentación en el sistema climático que deben ser vigilados desde los satélites, así como mediante sistemas en el suelo. Algunos de ellos son: la extensión de la cobertura de hielo y de nieve, el gradiente vertical de temperatura, el vapor de agua estratosférico, los cambios a gran escala en la vegetación, etc. Ciertos intervalos de las bandas espectrales de onda corta e infrarroja han sido identificados como especialmente apropiados para estos fines. Sin embargo, la interpretación de la mayoría de las medidas desde satélites con la precisión requerida para explicar cambios de temperatura de unas pocas décimas de grado parece muy difícil, dado que se requiere que se deduzcan cambios absolutos en el equilibrio de radiación del orden del 0,2 por ciento sobre un período de años.

Los aerosoles influyen tanto en la radiación solar de onda corta como (aunque en menor proporción) en la radiación infrarroja, de modo que cambios en sus concentraciones también pueden afectar al clima. Siempre hay que hacer distinción entre los aerosoles de la troposfera inferior (procedentes del polvo levantado por el viento o debidos a la contaminación del aire) y los aerosoles introducidos en la estratosfera por los volcanes. Los aerosoles de los niveles bajos tienen una vida media del orden de una semana o menos y, dado que aquellos que proceden de la contaminación industrial casi invariablemente absorben la radiación solar, originan un calentamiento neto de la atmósfera inferior cuando están sobre tierra (que es donde la mayoría de ellos generalmente se encuentran). En cualquier caso, debido a su vida relativamente corta, los aerosoles debidos a la actividad humana tienden a influir más en el clima regional que en el clima mundial.



**Medidas necesarias para la identificación anticipada de un cambio climático inducido por el CO<sub>2</sub>**

Medida	Propósito o justificación	Situación
<i>Vigilancia de la temperatura mundial:</i>		
* Media mundial y distribución de la temperatura en superficie.	Todas estas variables se ven afectadas directamente por el balance radiativo atmosférico, y por tanto responden en grados diversos al aumento del CO <sub>2</sub> .	Rutinaria
* Media mundial y distribución de la temperatura de la troposfera inferior.		Rutinaria
* Distribución de la temperatura de la superficie del mar.		Continúan los esfuerzos especiales
* Distribución de la temperatura de la estratosfera.		Rutinaria para la estratosfera inferior; medidas desde los satélites para la estratosfera superior.
* Cociente entre los cambios en la temperatura en superficie y los de la temperatura estratosférica.	Estos cocientes pueden constituir unos indicadores más sensibles que la temperatura media por sí sola.	
<i>Vigilancia de otros índices de cambio climático:</i>		
Extensión de los hielos marinos del Ártico y del Antártico durante el verano.	Responde a la temperatura media de la atmósfera inferior.	Satélites de órbita polar con radiómetros de microondas.
Altura y temperatura de la tropopausa tropical.	Responde a la temperatura en la superficie y a la circulación de Hadley.	Rutinaria
<i>Resumen de todas las causas de cambio climático:</i>		
* Vigilancia de la concentración mundial de CO <sub>2</sub> .	En potencia una función moduladora primaria del clima.	Rutinaria
* Vigilancia de las concentraciones de otros gases de vida larga causantes del efecto de invernadero, incluyendo el vapor de agua.	Otra función moduladora potencialmente grande.	Continúan los esfuerzos especiales.
Vigilancia de la distribución del ozono en la troposfera y en la estratosfera.	Influencias sobre el clima, especialmente en la temperatura de la estratosfera.	Continúan los esfuerzos especiales.
Medidas espectrales en la superficie de la radiación infrarroja descendente.	Confirmación del efecto radiativo de los gases que originan el efecto de invernadero.	Nuevo esfuerzo mediante medidas desde el suelo.
Medidas espectrales en la radiación de onda corta ascendente y de la radiación infrarroja de la atmósfera.	Técnica potencialmente útil para vigilar los cambios en el clima.	Continúan los esfuerzos especiales utilizando satélites.
* Vigilancia de los aerosoles estratosféricos, especialmente después de las grandes erupciones volcánicas.	Pueden originar un enfriamiento de la atmósfera inferior y un calentamiento de la estratosfera, siendo por tanto una función moduladora del clima.	Continúan los esfuerzos especiales con satélites y lidar.
* Vigilancia del flujo solar total en la cima de la atmósfera.	En potencia una función moduladora primaria del clima, pero sólo indicadores indirectos tales como manchas solares que puedan ser observadas desde tierra.	Continúan los esfuerzos especiales utilizando satélites.
Vigilancia de la turbiedad atmosférica total.	El contenido total de aerosoles en la atmósfera puede medirse por la atenuación del brillo solar directo, y es en potencia una función moduladora primaria del clima.	Se está realizando con una red actinométrica.

*Nota:* \*indica la más alta prioridad.

Por otro lado, los aerosoles estratosféricos muestran un incremento cuando se producen grandes erupciones volcánicas; estos aerosoles permanecen en la estratosfera durante un tiempo medio de dos o tres años, y originan un enfriamiento mundial en la superficie, al mismo tiempo que causan un calentamiento de la estratosfera a unos 20 km de altitud. Actualmente los aerosoles estratosféricos pueden ser vigilados desde los satélites así como mediante globos, aeronaves y lídars en el suelo; resulta claro que este control es necesario con vistas a evaluar los efectos de la futura actividad volcánica sobre el clima.

Durante mucho tiempo se ha sospechado que nuestro Sol no ha sido una fuente de radiación perfectamente estable, y ahora sabemos que su emisión varía de una forma acusada en las bandas espectrales del extremo ultravioleta y de los rayos X, y que su flujo radiativo total puede variar al menos entre el 0,1 y el 0,2 por ciento durante períodos de una semana o más. Teóricamente estas variaciones, si persistiesen durante un período de años, podrían dar lugar a cambios en la temperatura en la superficie de 0,2 a 0,3°C, lo cual prácticamente resulta comparable con el cambio ya experimentado a causa del aumento de CO<sub>2</sub>. La vigilancia desde los satélites del flujo solar (o de la constante solar como suele llamarsele), situados muy por encima de la atmósfera absorbente, debe tener por tanto una alta prioridad en nuestra estrategia.

La temperatura de la superficie del mar experimenta una variedad de cambios en numerosas escalas cronológicas, y desde luego estos cambios pueden afectar al clima. Sin embargo, la oceanografía física no ha desarrollado sus modelos teóricos hasta el punto en que estas características puedan simularse de una manera lo suficientemente adecuada para nuestros propósitos, y la respuesta de la atmósfera a las anomalías de la temperatura de la superficie del mar sólo está empezando a recibir la atención que se merece.

Existen otras causas del cambio climático que funcionan a escalas cronológicas mucho más largas de las que hemos tratado aquí, siendo una de las más importantes los cambios lentos de la órbita de la Tierra alrededor del Sol y de la dirección de su eje de rotación. Sobre este tema no se profundizará en el presente artículo.

#### *Resumen de las medidas más importantes*

En la tabla que se acompaña se da una lista de las diversas observaciones que pueden contribuir a una identificación anticipada de los cambios climáticos inducidos por el CO<sub>2</sub>. Hemos señalado con asterisco aquéllas que parecen más importantes, aunque hay que admitir que en este estado de cosas resulta difícil establecer prioridades.

#### **Conclusiones**

Hemos descrito un problema científico sin precedentes y muy estimulante. Nunca con anterioridad la ciencia ha sido capaz de predecir un tipo específico de cambio climático (cambio que probablemente resultará evidente durante la vida de la mayoría de los que viven hoy día) y, además, tener la oportunidad de investigarlo sistemáticamente a medida que surge del ruido de fondo de las fluctuaciones climáticas naturales. Más aún, una demostración convincente de que con toda probabilidad el cambio climático, que ya ha empezado, atraerá mucho la atención del público.



Tal como hemos señalado, la propia naturaleza de los tests estadísticos que han de emplearse para distinguir la señal del cambio climático inducida por el CO<sub>2</sub> del ruido de fondo significa que nunca se podrá hacer una formulación con una certeza del 100 por 100. Los resultados se expresarán como probabilidades, y a medida que aumente la probabilidad de que la señal no sea aleatoria, así crecerá nuestra confianza en su realidad. Pero superpuestos a los tests estadísticos persistirán las incertidumbres en nuestro conocimiento teórico del sistema con el cual estamos tratando. Estas incertidumbres son prácticamente imposibles de cuantificar: como ya se ha dicho, existe una incertidumbre referente al grado de incertidumbre. Todavía hay que investigar mucho para conocer mejor el sistema climático y este es el propósito del Programa Mundial conjunto OMM/CIUC de Investigaciones Climáticas.

En último análisis, la aceptación de las pruebas que demuestren un cambio climático inducido por el CO<sub>2</sub> corresponde al público y a los organismos políticos del mundo. Habrá que tomar decisiones referentes a cómo debe reaccionar la sociedad ante la perspectiva de un cambio climático mundial y ante las perturbaciones que ocasionará. En un sentido estricto, estas decisiones no son un asunto científico.

*Agradecimiento:* Muchas de estas ideas fueron discutidas y aclaradas durante un cursillo práctico, patrocinado por el Departamento de Energía de los EE.UU., y celebrado en junio de 1981 en Harpers Ferry (West Virginia), y posteriormente durante un cursillo práctico internacional que tuvo lugar en Moscú en octubre de 1982, patrocinado por el Comité Científico Mixto (CCM) OMM/CIUC para el Programa Mundial de Investigaciones Climáticas y por la Comisión de Ciencias Atmosféricas (CCA) de la OMM. Dado que el autor actuó como ponente en ambos cursillos prácticos, en este documento se presentan sus propios puntos de vista e interpretaciones y no necesariamente la de los mencionados cursillos. El documento ha sido estudiado por una serie de colegas en varios países y sus sugerencias han sido de la máxima ayuda.

## REFERENCIAS a fuentes adicionales

- ANGELL, J. and KORSHOVER, J. (1978): Global temperature variation from the surface to 100 mb: An update into 1977. *Monthly Weather Review* **106** pp. 755-770.
- BOLIN, B., DEGENS, E.T., KEMPE, S. and KETNER, P. (Editors). *The Global Carbon Cycle*. SCOPE 13. John Wiley & Sons, Chichester. 491 pp.
- BRYAN, K., KOMRO, F.G., MANABE, S., and SPELMAN, M.J. (1982): Transient climate response to increasing atmospheric carbon dioxide. *Science* **215** pp. 56-58.
- BUDYKO, M.I. (1977a): *Contemporary climate change*. Gidrometeoizdat. 47 pp.
- BUDYKO, M.I. (1980): Climate in the past and future. Leningrad, Gidrometeoizdat. 351 pp.
- DEPARTMENT OF ENERGY (USA) (1982): Proceedings of the Workshop on First Detection of Carbon Dioxide Effects. DOE/CONF-8106214.
- GACE, K.S. and REID, G.C. (1981): Solar variability and the secular variation in the tropical tropopause. *Geophys. Res. Ltrs.* **8** pp. 187-190.
- GILLILAND, R.L. (1982): Solar, volcanic and CO<sub>2</sub> forcing of recent climatic changes. *Climatic Change* **4** pp. 111-132.
- HANSEN, J. *et al.* (1981): Climate impact of increasing atmospheric CO<sub>2</sub>. *Science* **213** pp. 957-966.
- KELLOGG, W.W. and SCHWARTZ, R.S. (1981): *Climate Change and Society: Consequences of increasing atmospheric carbon dioxide*. Westview Press, Boulder.
- KUKLA, G. and GAVIN, J. (1981): Summer ice and carbon dioxide. *Science* **214** pp. 497-503.
- MADDEN, R.A. and RAMANATHAN, V. (1980): Detecting climate change due to increasing carbon dioxide. *Science* **209** pp. 763-768.
- MANABE, S. and WETHERALD, R.T. (1980): On the distribution of climate change resulting

- from an increase in CO<sub>2</sub> content of the atmosphere. *J. Atmos. Sci.* **37** pp. 99-118.
- MARCHUK, G.I., KONDRATYEV, K.Ja. and DIMNIKOV, V.P. (1981): Some problems of the theory of climate. *Meteorologia i Klimatologia* Vol. 7. Itogi Nauki i Tekniki, Moscow. 104 pp.
- MILES, M.K. and GILDEKSLEEVES, P.B. (1978): A statistical study of the likely influence of some causative factors on the temperature since 1665. *Meteorological Magazine* **107** (1272) pp. 193-204.
- NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES (USA) (1982): *Carbon dioxide and climate: A second assessment*. NAS, Washington, D.C.
- RAMANATHAN, V. (1980): Climate effects of anthropogenic trace gases. In: *Interactions of Energy and Climate*. D. Reidel Publishing Co., Dordrecht. pp. 269-280.
- SCHNEIDER, S.H. and THOMPSON, S.L. (1981): Atmospheric CO<sub>2</sub> and climate: Importance of the transient response. *J. Geophys. Res.* **86** pp. 3135-3147.
- THOMPSON, S.L. and SCHNEIDER, S.H. (1982): Carbon dioxide and climate: Has a signal been observed yet? *Nature* **295** pp; 645-646.
- VINNIKOV, K. Ja. and GROISMAN, P. Ja. (1981): Empirical analysis of CO<sub>2</sub> influence on the modern changes of the mean annual northern hemisphere surface air temperature. *Meteorologia i Hidrologia* No. 11, pp. 30-43.
- WIGLEY, T.M.L. and JONES, P.D. (1981): Detecting CO<sub>2</sub>-induce climatic change. *Nature* **292** pp. 205-208.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (1979a): *Proceedings of the World Climate Conference*. WMO-537, Geneva.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (1979b): Report No. 2 of the WMO Project on Research and Monitoring of CO<sub>2</sub>. Geneva.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (1980): *Outline plan and basis for the World Climate Programme*. WMO-540, Geneva.
- YAMAMOTO, R. (1981): Change of global climate during recent 100 years. In: *Proceedings of the Technical Conference on Climate - Asia and Western Pacific*. WMO-578, Geneva. 449 pp.
- ZIMEN, K.E., OFFERMAN, P. and HARTMAN, G. (1977): Source functions of CO<sub>2</sub> and future CO<sub>2</sub> burden in the atmosphere *Zeit. Naturforschung.* **32** a pp. 1544-1554.

## **BASES FÍSICAS PARA LA PREDICCIÓN DEL CLIMA A ESCALAS CRONOLÓGICAS ESTACIONAL, ANUAL Y DECENAL**

### **CONFERENCIA DE ESTUDIO OMM/CIUC, LENINGRADO, SEPTIEMBRE 1982**

Los actuales progresos en el análisis de las observaciones del clima y en los estudios de sensibilidad de la variación del clima a corto plazo han constituido un estímulo importante para la organización de la Conferencia de Estudio sobre las Bases Físicas para la Predicción del Clima. Esta Conferencia, propuesta inicialmente por el Comité Conjunto de Organización OMM/CIUC en abril de 1978, se celebró en Leningrado (URSS) del 13 al 17 de septiembre de 1982. Fueron invitados importantes científicos de todo el mundo que se hallan trabajando en el campo de la elaboración de modelos climáticos, del diagnóstico del clima y de la predicción del tiempo a largo plazo para que asesoraran sobre la capacidad de predicción de los modelos actuales del clima y para definir la estrategia científica y las prioridades en la aplicación de los modelos climáticos para simulación y predicción. En sus dimensiones la conferencia se centró sobre las tres principales áreas de problema:

- Bases físicas para la predicción de las anomalías atmosféricas mundiales y regionales a escalas cronológicas mensuales o estacionales;
- Bases físicas para la predicción de los cambios de clima a largo plazo;
- La capacidad de los modelos para predecir las anomalías atmosféricas a corto plazo y los cambios climáticos a largo plazo.