Rev.R.Acad.Cienc.Exact.Fis.Nat. (Esp)
Vol. 93, N.º 1, pp 45-56, 1999
Monografía: El clima y sus efectos: conocimiento e incertidumbres

¿QUÉ SON LOS MODELOS DE SIMULACIÓN DEL CLIMA?

(Modelos climáticos/simulación clima presente/clima futuro)

S. ALONSO Y M. A. JIMÉNEZ

Dept. de Física. Universitat de les Illes Balears. 07071 Palma de Mallorca, España.

RESUMEN

El artículo pasa revista a diferentes modelos de simulación del clima, desde los más sencillos, de balance de energía, a los modelos acoplados de circulación general. Se presentan algunos resultados de simulaciones del clima actual y de proyecciones de clima futuro para diferentes escenarios.

ABSTRACT

This paper represents an elemental review of different climate models, including the simplest energy balance models and the more complex coupled general circulation models. Some results on present climate and future climate expected for diverse scenarios are presented.

1. INTRODUCCIÓN

Todo modelo, físicamente hablando, representa un simplificación de la realidad, que el hombre elabora con el fin de poder estudiarla más fácilmente. Se trata de recoger los rasgos que se consideran fundamentales y prescindir de aquellos que pudieran resultar superfluos. Este proceso se puede considerar consecuencia de no poder resolver, desde un punto de vista matemático, las ecuaciones que dan cuenta de toda la complejidad de la naturaleza o, al menos, aquella que se puede representar por medio de ecuaciones matemáticas que derivan de las leyes físicas conocidas.

En el caso que nos ocupa, los modelos de simulación del clima simplifican el sistema climático, y los procesos que en él tienen lugar, con el fin de conocer sus propiedades, reproducir, en lo posible, el clima presente observado e intentar prever como pueda evolucionar hacia el futuro.

No es difícil darse cuenta que puede haber, por lo tanto, gran cantidad de modelos; tantos como posibles simplificaciones se deban o deseen efectuar del sistema bajo estudio. Como consecuencia de ello debe quedar claro que un modelo concreto es capaz de proporcionar información sólo de aquello para lo que es adecuada la simplificación efectuada. No se debe esperar entonces la certeza universal de los resultados de un modelo. Sería equivalente a pensar que un modelo a escala de un avión diseñado para simulaciones en un túnel de viento, que evidentemente permite conocer muchas características físicas del comportamiento del avión real, pudiera reproducir toda la realidad del avión, incluso volar.

Un error, asociado a lo anterior, que se acostumbra a cometer cuando se evalúan resultados de modelos, sobre todo por no especialistas, consiste en creer que el modelo nunca se «equivoca». O sea, que comparados sus resultados con la realidad de la naturaleza, si no hay suficiente concordancia, «fallaría» la realidad, cuando ciertamente es la naturaleza la que siempre evoluciona como le corresponde evolucionar. Podemos verlo con un ejemplo.

Pensemos en una predicción meteorológica. Se prevé que en la ciudad de Lugo, como consecuencia de la llegada de un frente frío, se producirán precipitaciones durante la mañana del día siguiente. Esto evidentemente es el resultado de la aplicación de un modelo de predicción del tiempo. Llegada la mañana siguiente, la precipitación no se produjo pues el frente llegó por la tarde, al ponerse el sol. La valoración errónea del pronóstico sería: El frente debía haber llegado por la mañana, como el modelo indicaba, pero, como consecuencia de un comportamiento no esperado, el frente ralentizó su movimiento y llego a Lugo más tarde.

La valoración correcta es consecuencia de admitir que lo que ocurre es que el modelo no recoge toda la realidad (de lo contrario lo «no esperado» debería estar incluido en el modelo) y por lo tanto, es evidente que el pronóstico es erróneo, lo que se deduce al hacer la comparación con la realidad. Una cuestión diferente es qué error estamos dispuestos a admitir para considerar el pronóstico útil.

Cuando se valoren los resultados de simulación del clima futuro hay que tener en cuenta que no se está diciendo que ése va a ser el clima en el futuro, sino que ése es el clima que prevé el modelo. Además, para poder proyectar hacia el futuro el clima, es necesario hacer hipótesis acerca de cómo van a evolucionar un conjunto de condiciones generales (población, crecimiento económico, consumo de energía, emisiones de gases y substancias que modifican el efecto invernadero, etc.). Estas condiciones generales, que aparecen en la Tabla I, reciben el nombre de escenarios (1).

Tabla I. Diferentes escenarios considerados por el IPCC. Se incluyen algunas características necesarias para su definición.

Escenario	Población	Crecimiento económico	Emisiones de CO2 acumuladas de 1991 a 2100 (PgC)
IS92a	11.3 billones en el 2100	1990-2025: 2.9% 1990-2100: 2.3%	1500
IS92b	11.3 billones en el 2100	1990-2025: 2.9% 1990-2100: 2.3%	1430
IS92c	6.4 billones en el 2100	1990-2025: 2.0% 1990-2100: 1.2%	770
IS92d	6.4 billones en el 2100	1990-2025: 2.7% 1990-2100: 2.0%	980
IS92e	11.3 billones en el 2100	1990-2025: 3.5% 1990-2100: 3.0%	2190
IS92f	17.6 billones en el 2100	1990-2025: 2.9% 1990-2100: 2.3%	1830

Luego podrá, o no, parecerse a la realidad del clima que tiene que venir.

Al hilo de este comentario alguien podría pensar que entonces es inútil discutir sobre los resultados de los modelos. Craso error: la cuestión vuelve a ser la utilidad. Se debe tener en cuenta que una gran parte de la actividad humana está condicionada por el clima y que, entonces, los recursos afectados por esa actividad dependen del clima. No es lo mismo prever un plan energético para un clima como el presente que para uno, por ejemplo, más cálido y seco en el futuro.

También se podría pensar que, dado que los modelos son simplificaciones de la realidad, una de dos, o incluir toda la realidad sin simplificación, o no usar los modelos. A la primera parte de la disyunción se debe contestar con dos hechos. El primero es que no conocemos toda la realidad. Evidentemente la humanidad ha avanzado mucho, pero en cada paso que se da hacia adelante se abren, la mayor parte de las veces, más incógnitas que lo que hemos sido capaces de contestar. El segundo es que no es posible hoy día incluir, ni siquiera, todo aquello que sabemos que sabemos. La razón es que el nivel de complejidad que se puede incluir en los modelos más completos está limitado por la capacidad de los ordenadores empleados para resolver numéricamente, en cuantos más puntos mejor del sistema climático, la gran cantidad de ecuaciones implicadas. Todo lo anterior se acostumbra a agrupar bajo la idea de incertidumbre.

Y la segunda parte de la disyuntiva se contestaría diciendo que pese a las incertidumbres, que sabemos existen intrínsecamente ligadas a los modelos, se deben usar porque son la única herramienta disponible para poder estimar lo que pueda ocurrir en el futuro y, como tal única herramienta, es la mejor de las que poseemos por el momento. No se puede argumentar que, dadas las incertidumbres, mejor no usarlos; porque no sabemos ni siquiera el signo de esas incertidumbres. De la misma manera que los que utilizan ese argumento descalificador piensan que las incertidumbres van a jugar a su favor, la verdad es que también pueden actuar en su contra, con lo que las consecuencias de no usarlos serían, entonces, mas graves. En cualquier caso, su uso siempre implica substituir ignorancia por conocimiento y eso no es más que un nuevo paso en el avance de la humanidad (2).

Vistas las anteriores consideraciones generales sobre los modelos, sólo queda indicar los tipos que vamos a considerar en este artículo. Hay diversas formas de abordar una clasificación de los modelos (3), pero ello escapa al ámbito de este trabajo. Aquí consideraremos tres grandes grupos. El primero, apartado 2, corresponde a modelos que hacen uso del hecho observado de existir balance entre la energía absorbida, parte de la que llega procedente del Sol, y la que el planeta disipa hacia el espacio. El clima sería consecuencia de la redistribución interna de la energía total disponible entre diferentes partes del sistema. El apartado 3 incluye un grupo de modelos que el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) designa como sencillos, en comparación con los más complejos, de circulación general, que serán tratados en el apartado 4.

Finalmente se dan algunos resultados de la simulación del clima presente observado con diferentes modelos, lo que permitirá estimar las incertidumbres, y se comentan algunas proyecciones del clima hacia el futuro.

2. MODELOS DE BALANCE DE ENERGÍA

La energía que recibe el sistema climático proviene, en su inmensa mayor parte, del Sol. Conocida la trayectoria de la Tierra alrededor del Sol es posible calcular, a partir de sus propiedades físicas, la potencia recibida sobre cada unidad de superficie orientada perpendicularmente a los rayos solares (4). Promediando a lo largo de un año, resulta un valor

$$S_o = 1360\ Wm^{-2}$$

que recibe el nombre de constante solar. No hay que pensar que esa es la potencia que, por término medio, alcanza cada metro cuadrado de la superficie de la Tierra. Hay varias razones que justifican que no es así.

En primer lugar, hay una parte que el propio sistema devuelve al espacio. A la fracción de energía incidente que el planeta devuelve se le denomina albedo, α; por lo tanto, sólo la fracción $1-\alpha$ de la energía incidente sería absorbida. Como el valor del albedo terrestre es del orden de 0.3, el 70 % de la energía procedente del Sol, en la cima de la atmósfera, penetraría en el sistema climático.

En segundo lugar, los rayos no llegan con la misma inclinación a la cima de la atmósfera que, además, está siendo iluminada nada más en un hemisferio. Al promediar estos dos efectos sólo 1/4 de la potencia anterior penetra realmente por término medio.

Por último, una parte variable de la energía es absorbida en la atmósfera, por los gases atmosféricos, por las nubes y por las partículas en suspensión (aerosoles). En consecuencia, llega por término medio al suelo menos de $(1-\alpha)S_o/4$. Sin embargo, como la energía absorbida entre la cima de la atmósfera y el suelo queda dentro del sistema climático, transformándose en otras formas de energía, se considera que es aquella potencia la que recibe el sistema por unidad de superficie, como un todo, como si lo hiciera de forma continua.

El modelo más sencillo deberá establecer, como se indicó, que esa potencia absorbida por unidad de superficie está equilibrada por la que se emite desde el sistema. Admitiendo que dicha emisión se hace por un radiador perfecto, la ley de Stefan-Boltzmann establece que la potencia irradiada por unidad de área es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura, o sea

$$S_o(1-\alpha)/4 = \sigma T_e^4$$

donde σ es la constante de proporcionalidad de la ley de Stefan-Boltzmann. Resolviendo la ecuación anterior para la temperatura, resulta

$$Te \approx 255\ K \approx -18\ ^\circ C$$

Antes de continuar conviene hacer algunas precisiones con respecto a la temperatura anterior. La ley de Stefan-Boltzmann permite encontrar una temperatura efectiva de emisión, en el sentido de ser aquella a la que se debería emitir, como radiador perfecto, para igualar la potencia absorbida; luego no tiene porqué coincidir, y de hecho no coincide, con la temperatura del suelo. El valor medio alcanzado en la superficie de la Tierra, T_S, es unos 288 K $\approx$ 15 °C, o sea, unos 33 K superior a la calculada.

La explicación de esa diferencia hay que buscarla en el llamado efecto invernadero, consecuencia de las diferentes propiedades de absorción de los gases atmosféricos para la radiación que proviene del Sol frente a la que proviene de la superficie y de la propia atmósfera terrestres. Mientras en el primer caso los gases son poco absorbentes, en el segundo lo son bastante, lo que conduce a una temperatura en las capas bajas superior a la calculada. En realidad, el valor encontrado coincide aproximadamente con la temperatura de la superficie de la Luna, que se mueve alrededor del Sol casi igual que la Tierra, pero, sin embargo, no tiene atmósfera.

El modelo se completaría con la ecuación

$$T_S = T_e + \Delta T$$

donde ΔT da cuenta del efecto invernadero.

Este modelo, que como se ha venido indicando es muy sencillo y se ve perfectamente, permite únicamente determinar una temperatura media para la superficie del planeta, que depende de la constante solar, del albedo y del efecto invernadero. Sin embargo, no se obtiene ninguna información acerca de cómo la temperatura pueda estar distribuida. Se dice, por esta razón, que es un modelo cerodimensional, 0D.

Sin embargo, se puede estudiar cual es el efecto sobre la temperatura de los cambios que puedan experimentar la constante solar y el albedo. Más adelante se verá un ejemplo del papel del albedo. Ahora merece algo de atención el caso de la constante solar.

La constante solar depende de la actividad solar y de la distancia Tierra-Sol. Esta última dependencia ha merecido gran atención pues existe una teoría astronómica de los cambios de clima (ver artículo de J.I. Díaz, en este volumen). Determinando cómo ha cambiado la distancia Tierra-Sol (y otros parámetros orbitales) en el transcurso del tiempo, se ha podido ver que existe una fuerte correlación entre esos cambios y las eras geológicas. Sin embargo, no se explica del todo la intensidad de los cambios experimentados. Se piensa que algún proceso no lineal de retroalimentación interna del sistema puede haber incidido en dichas intensidades (3). En cuanto a la actividad solar, existe hoy día un interesante debate sobre su influencia en el clima. Desde luego parecería que su influencia debería ser irrefutable. Sin embargo, dado que su influencia debería dejarse sentir en todo el planeta, y que no se encuentran correlaciones importantes a nivel global con los ciclos de actividad solar, muchos autores no la toman en consideración. El caso más significativo para los defensores de la influencia corresponde a la denominada Pequeña Edad del Hielo, desde la Edad Moderna hasta mitad del siglo pasado, en que las temperaturas fueron substancialmente inferiores a las actuales. Sin embargo, hay quien indica que ese periodo pudo estar producido por el aumento de las erupciones volcánicas (más adelante, en el apartado 4, se discute este efecto) y quien señala que la Pequeña Edad del Hielo no tuvo extensión planetaria sino únicamente europea (1).

Una modificación, sobre la idea del modelo anterior, permite deducir un modelo 1D. Para ello se considera la con-

tribución de la constante solar y del albedo por franjas zonales (figura 1a). Además se debe considerar el transporte de energía entre dichas franjas para hacer que el modelo reproduzca rasgos observados muy generales de la circulación atmosférica. Por ejemplo, se puede consultar (3) para las distintas parametrizaciones de dichos flujos.

El modelo proporciona, entre otras cosas, la distribución de la temperatura media zonal a lo largo de un meridiano (figura 1b). Como dicha distribución depende de la latitud, se trata, como se decía, de un modelo 1D. Una característica interesante del modelo es que se puede hacer depender el albedo de la temperatura (por medio de la temperatura de fusión del hielo. El albedo es mucho mayor si se tiene agua en fase sólida que en fase líquida) lo que permite simular la retroalimentación hielo-albedo, una de las que se sabe ocurren en el sistema climático (5).

Una forma sencilla de ver la importancia de este proceso es considerando la transición de un albedo bajo (con todo el hielo fundido y energía solar absorbida grande) a un albedo alto (toda el agua en fase sólida y energía solar absorbida pequeña) entre dos temperaturas Th y Tf (figura 2), entre las que se tiene un albedo intermedio. Para conseguir el equilibrio entre la energía solar absorbida y la energía terrestre emitida, se deben cortar las dos líneas de dicha figura 2 (para el caso de la radiación terrestre se ha aproximado la curva, dependiente de la cuarta potencia de la temperatura, a una recta en el entorno de las temperaturas Tf y Th). Se observa que hay tres temperaturas posibles para dicho equilibrio, una a $T < Th$ (lo que implicaría tener todo el planeta helado), otra a $T > Tf$ (lo que implicaría tener todo los hielos fundidos) y otra intermedia $Th < T < Tf$ (en que se tendría sólo parte de hielo fundido) que podría representar nuestro clima presente. Se puede discutir, a partir de la figura 2, si las temperaturas de equilibrio corresponden a situaciones estables o inestables teniendo en cuenta lo que ocurriría de producirse un pequeño desequilibrio en cada una de las tres posibilidades encontradas.

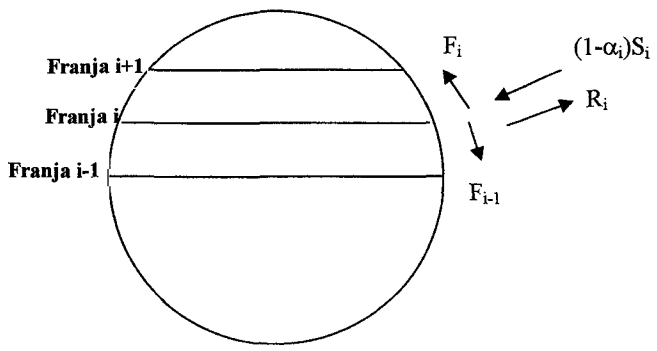

Figura 1a. Esquema de un modelo 1D de balance de energía. La superficie de la Tierra queda dividida en diferentes franjas según la latitud. En cada franja se establece un balance de energía $(1-\alpha_i)\ S_i = R_i + F_i$ donde α_i es el albedo de cada franja, S_i la contribución de la constante solar, R_i la radiación de onda larga emitida hacia el espacio y F_i el flujo de energía entre franjas.

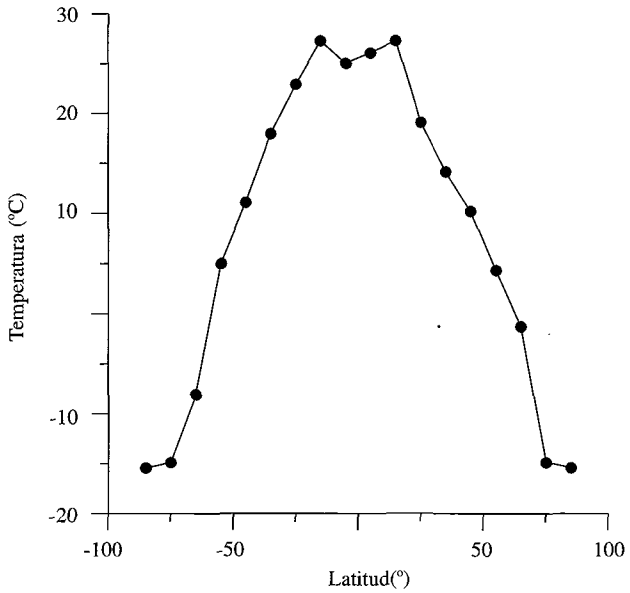

Figura 1b. A partir de un modelo 1D de balance de energía es posible deducir la distribución de la temperatura en función de la latitud. El perfil de temperaturas que se representa corresponde a un clima actual con el máximo cerca del ecuador y el mínimo en los polos. Se puede observar la asimetría de los resultados entre hemisferio norte y sur, debido al diferente valor del albedo en ambos hemisferios.

3. MODELOS SENCILLOS

Los modelos más completos para simular el clima de la Tierra son capaces de proporcionar distribuciones tridimensionales de las variables climáticas, tanto en la atmósfera como en el océano; sin embargo, su coste computacional es muy elevado. De hecho, los ordenadores más potentes del mundo se emplean para resolver las ecuaciones de la dinámica de fluidos, y de los procesos físicos que tienen lugar (evaporación desde las superficies de agua, formación de nubes, precipitación, transferencia de radiación, etc.) en varios cientos de miles de puntos del espacio, a lo largo del intervalo de tiempo en que se realiza la simulación. El resultado son muchos millones de operaciones.

Otro tipo de modelos (entre los que se podría incluir a los del apartado anterior) simplifican extraordinariamente el sistema, de tal forma que se pueden alcanzar simulaciones razonables usando ordenadores de tipo personal. Este tipo de modelos han sido denominados por el IPCC (6) modelos sencillos. Sirven para poder estudiar procesos concretos de forma rápida, de tal forma que es posible repetir muchos experimentos, modificando las condiciones de forma adecuada, y ver fácilmente los cambios que se producen en los resultados de las simulaciones.

Uno de los modelos más antiguos de este tipo es el denominado radiativo-convectivo (7). En él se representa toda la atmósfera por una columna y se estudia la temperatura en el suelo y la distribución con la altura en la atmósfera. Se trata, por lo tanto de un modelo 1D.

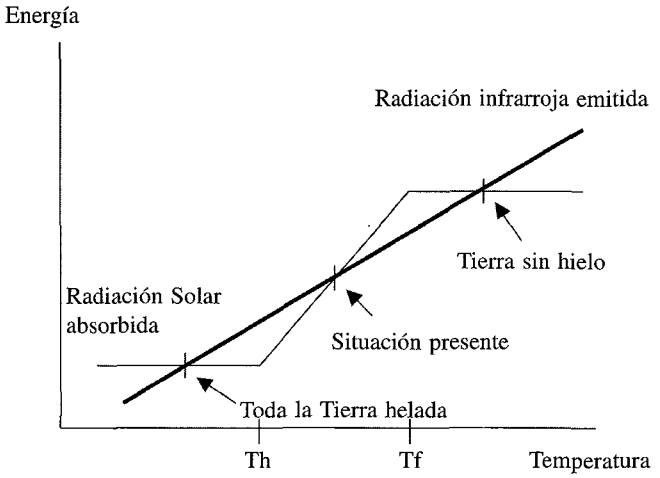

Figura 2. Considerando un albedo dependiente de la temperatura, con una transición suave entre dos temperaturas Th y Tf, puede haber tres estados de equilibrio. El intermedio podría corresponder a un clima como el presente en la Tierra, con parte de hielos permanentes y parte con agua fundida. Sin embargo habría dos estados posibles más: uno con todo el planeta helado y otro con todos los hielos fundidos.

Se calcula en cada nivel de la atmósfera la absorción tanto de radiación solar como terrestre y se determina la temperatura resultante (no se tratan aquí las ecuaciones por exceder del nivel de este artículo). La distribución de temperatura resultante (en equilibrio radiativo) hace que la atmósfera, con una excesiva temperatura en los niveles inferiores, sea favorable a la aparición de movimientos verticales (convección) que redistribuyen la energía hasta que se establece un equilibrio radiativo-convectivo.

Como las propiedades de absorción de radiación por la atmósfera vienen dadas por los gases que la constituyen, es posible, modificando la composición de la atmósfera, obtener diferentes distribuciones simuladas de temperatura. Por ejemplo, se puede ver como quedarían afectadas las temperaturas si la concentración de CO_2 aumentara, intensificándose, como consecuencia, el efecto invernadero (figura 3). En este figura se emplea, en el eje de ordenadas, la «coordenada sigma». Se trata de una coordenada obtenida a partir del cociente entre la presión en un nivel de la atmósfera, p, y la presión en superficie, p_s, sobre la misma vertical, o sea

$$\sigma = p/p_s$$

de tal forma que toda la columna atmosférica está comprendida entre $\sigma = 0$, en la cima de la atmósfera, y $\sigma = 1$, en superficie. Este tipo de coordenada no física, o alguna semejante, se usa con gran generalidad como coordenada vertical en muchos modelos, tanto meteorológicos como de simulación del clima.

En otro modelo sencillo, denominado de cajas, se consideran diferentes subsistemas representados por cajas. En la figura 4 se consideran cuatro cajas, dos de las cuales representan la atmósfera (sobre los continentes y sobre los océa-

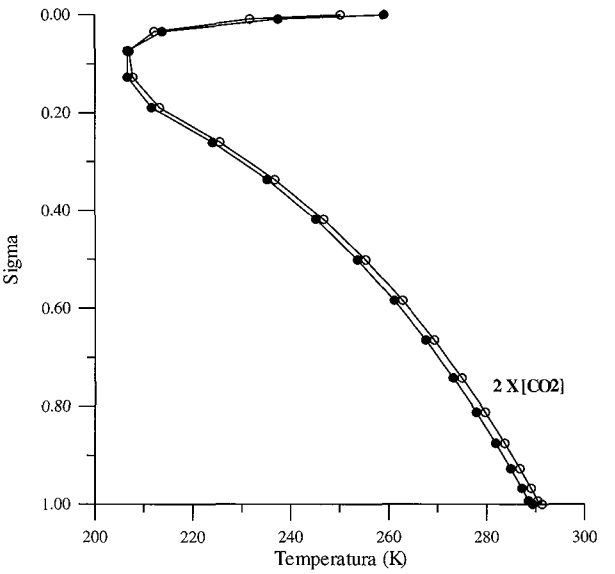

Figura 3. Uno de los posibles resultados que se puede obtener a partir del modelo radiativo-convectivo es la distribución de la temperatura con la altura. En la figura se han representado dos perfiles: uno considera la duplicación de la concentración de CO_2 (puntos vacíos) mientras que el otro no (puntos llenos). Por lo tanto, la duplicación de la concentración de CO_2 en la atmósfera daría como consecuencia un aumento de la temperatura en la parte baja de la atmósfera y una disminución en niveles altos.

nos) y otras dos el océano (una para la capa de mezcla y otra para el océano profundo). El modelo, en su conjunto, es de balance de energía, pero los flujos de energía que se establecen entre las diferentes cajas dependen de escenarios climáticos prescritos.

La generación más reciente de este tipo de modelos ha merecido gran atención por parte del IPCC. Llevan incorporado el ciclo del carbono, con lo que es posible calcular a partir de las emisiones, debidas a la quema de combustibles fósiles y a la actividad humana en general, las concentraciones de CO2 y con ello el cambio de clima esperado para diferentes escenarios. Otro módulo del modelo permite calcular el aumento del nivel del mar, debido en su mayor parte a la dilatación del agua del mar como consecuencia del calentamiento que los modelos pronostican.

Posiblemente sorprenda a los lectores este comentario, cuando se ha oído decir repetidamente que el aumento del nivel del mar es debido a la fusión de los hielos. Conviene aclarar que sólo contribuye positivamente a este efecto el hielo que se pueda fundir en los continentes, pero no el que flota sobre los mares. Se debe esto a que, debido a la menor densidad del hielo frente al agua líquida (por esta razón flota el hielo), cuando se produjera la fusión, toda el agua fundida ocuparía sólo el volumen de la parte de hielo sumergida y, en consecuencia, no subiría el nivel del mar por esta razón. En estos modelos se considera sólo una pequeña contribución de la fusión de los hielos continentales (o incluso no se considera este efecto) ya que se piensa que en la Antártida se podría producir un aumento de la preci-

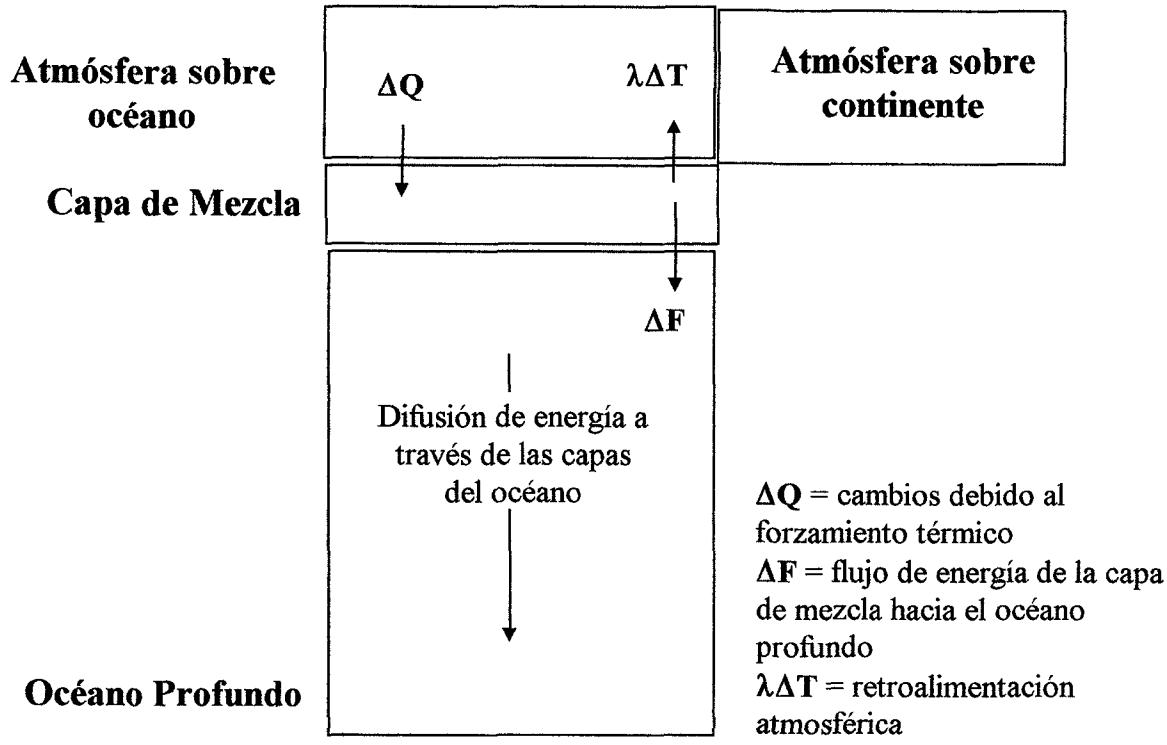

Figura 4. Esquema de un modelo de cajas. Las flechas indican los diferentes flujos de energía que se consideran.

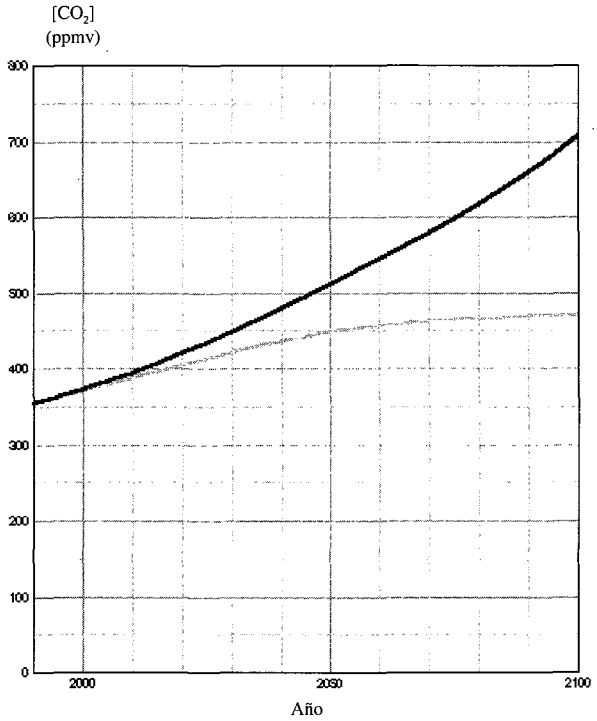

Figura 5a

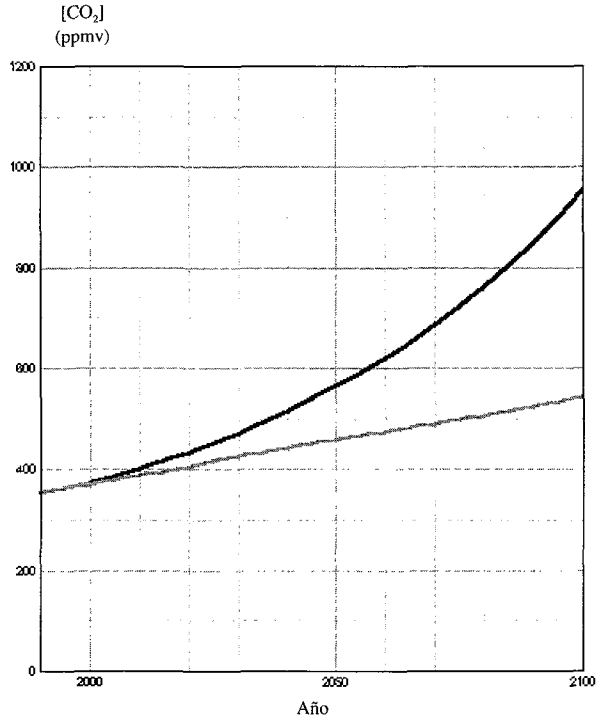

Figura 5b

Figura 5a. Se representa la concentración de CO_2 (en ppmv) para diferentes escenarios: IS92a (superior, en negro), IS92c (inferior, en gris). Se puede comprobar que, dependiendo de las suposiciones que se hacen para cada escenario, las concentraciones de CO_2 para el año 2100 varían.

Figura 5b. Igual que en la figura 5a pero considerando dos escenarios distintos: IS92e (superior, en negro) y IS92d (inferior, en gris). Nótese la diferente rotulación del eje de ordenadas.

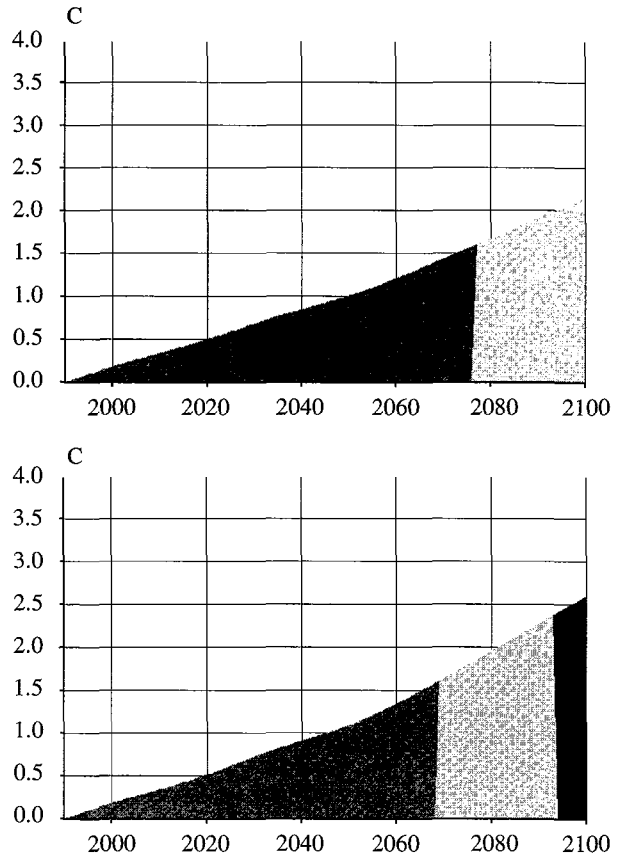

Figura 6. Se representan aquí dos simulaciones realizadas con el modelo ISS. El gráfico superior corresponde al aumento de temperatura, respecto de 1990, para el escenario IS92a mientras que el gráfico inferior corresponde al escenario IS92e. Los tonos de gris (colores en el original) son los indicadores de la política de control. El color negro (parte inferior, a la derecha) indica que el objetivo considerado se supera en un 20% mientras que para el gris oscuro se está por debajo en un 20%. El color gris claro indica que se está dentro del rango de incertidumbre.

pitación en forma de nieve, lo que haría aumentar allí el volumen de hielo, y compensaría la fusión en otras partes del mundo.

Los más conocido de estos modelos son el IMAGE (8) y el MAGICC (9). En la figura 5 se presentan algunos resultados para diferentes escenarios adoptados por el IPCC.

También esta gozando hoy día de gran popularidad el ISS (10). En realidad incluye al modelo IMAGE pero incorpora capacidades gráficas y de control que el anterior no posee. Se puede, por ejemplo, simular lo que ocurre si se aplican medidas políticas de mitigación del cambio climático, como las establecidas en la conferencia de Kioto, o determinar en que momento se incumplirían algunos objetivos prescritos. En la figura 6 se pueden ver diferentes simulaciones que corresponden a diversos escenarios de emisión de gases con efecto invernadero.

4. MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL

Los modelos climáticos de circulación general constituyen la herramienta más elaborada para la simulación del clima. Provienen de los modelos meteorológicos de predicción del tiempo y de los modelos de circulación general de la atmósfera, con lo que se aprovechan de varias décadas de experiencia en la simulación de este subsistema del sistema climático. Estos modelos están acoplados a modelos oceánicos de circulación general; es decir, resuelven las ecuaciones de gobierno tanto en la atmósfera como en el océano, y las de interacción entre los dos subsistemas (flujos de masa, cantidad de movimiento y energía). Además llevan incorporado un módulo de interacción con la biosfera (evapotranspiración, cobertura vegetal, etc.) y tienen en cuenta diferentes tipos de suelo (incluso hielo) y la orografía. Se pueden encontrar más detalles sobre estos modelos, que deben ser omitidos en este trabajo por razón de su extensión, en diferentes obras. En relación con las ecuaciones de gobierno se puede consultar (11) y (12), y (1) y (13) para la descripción de los modelos.

Una de las novedades más destacables de este tipo de modelos (también de algunos de los sencillos, vistos con anterioridad) es que tienen en cuenta el comportamiento radiativo de los aerosoles, nombre que se da a las partículas normalmente sólidas que se encuentran en suspensión en el aire. Es importante este hecho ya que se había podido comprobar, tras las grandes erupciones volcánicas recientes del Pinatubo y del Chichón, que la temperatura media del planeta había descendido y se mantenía con valores bajos durante algunos años. Este comportamiento, hoy por hoy imprevisible (no se pueden predecir las erupciones volcánicas con suficiente antelación, ni el lugar, ni su intensidad) pudo ser simulado a posteriori mediante modelos climáticos. Ni que decir tiene que esta falta de conocimiento es una importante fuente de incertidumbre en las simulaciones climáticas.

Los aerosoles atmosféricos impiden que una parte de la radiación solar alcance el planeta, con lo que se tiene menos energía disponible para todos los procesos que se producen en el sistema. Como consecuencia de ello la temperatura media debe disminuir, al menos para intervalos de tiempo no demasiado grandes, y mientras los aerosoles se encuentren en la atmósfera. Esto es precisamente lo que ocurrió en esas grandes erupciones, al alcanzar las cenizas volcánicas la estratosfera terrestre, a más de 10 km de altitud.

Sin embargo, no todos los aerosoles son de origen natural. La actividad humana introduce en la atmósfera terrestre contaminantes que, tras sufrir diversas transformaciones químicas, dan lugar a aerosoles. Esta interacción química-clima se puede también simular con los modelos y, en concreto, es posible considerar escenarios con diferentes concentraciones de aerosoles sulfato, derivados del dióxido de azufre de origen antrópico.

Un aspecto importante a señalar es que los modelos no proporcionan distribuciones continuas de las variables si-

muladas, sino que lo hacen de forma discreta, sobre algunos puntos de la superficie terrestre, dependiendo de su resolución. En el mejor de los casos estos puntos pueden estar separados algunos cientos de km. Los valores discretos disponibles no se pueden tomar como estimas de previsiones para escala local o escala regional. Deben ser tratados adecuadamente, en un proceso que se denomina de downscaling, para ser considerados a esas escalas (ver artículo de E. Zorita, en este volumen).

Todas estas características generales de los modelos de circulación general son decisivas para poder entender la discusión sobre simulaciones del clima presente y las previsiones de clima para el futuro, del próximo apartado.

5. SIMULACIONES DE CLIMA PRESENTE Y DE CLIMA FUTURO PREVISTO

Los modelos de simulación del clima constituyen, como ya se ha dicho, una herramienta única para estudiar los cambios que puede experimentar el clima de la Tierra. Sin embargo, para poder estar seguros que los resultados proporcionados por los modelos son aceptables, es preciso someterlos a ejercicios de comparación de las simulaciones con el clima observado y a ejercicios de intercomparación. Se trata de averiguar si los modelos son o no capaces de reproducir la variabilidad natural del clima para aceptar, con ciertas garantías, las previsiones del clima futuro.

Entre las causas de variabilidad natural del clima en escalas de unos pocos años se encuentra el Fenómeno de El Niño, cuya persistencia es debida aun acoplamiento bastante crítico entre el océano y la atmósfera tropicales (ver artículo de M.J. Ortiz, en este volumen). Tanto los modelos oceánicos como los atmosféricos han sido capaces de reproducir adecuadamente este proceso natural cuando son forzados por condiciones prescritas de la atmósfera o del océano, respectivamente. Cuando se hacen trabajar de forma acoplada, sin prescribir las condiciones del otro subsistema, las simulaciones no son del todo aceptables, aunque se están consiguiendo avances significativos en los últimos años. Por lo menos, la causa de las derivas que se observan parece estar identificada: los flujos de energía entre la atmósfera y el océano no están bien representados en los modelos acoplados (2).

La percepción del clima por el hombre se tiene en la atmósfera. No es raro, por lo tanto, que la mayor parte de las comparaciones entre simulaciones con modelos y realidad se haga por medio de la temperatura y de la presión en superficie y de la precipitación.

Uno de los procedimientos que se sigue para dicha comparación consiste en promediar por franjas zonales los resultados de las simulaciones con modelos 3D. Posteriormente se pueden comparar con el mismo tipo de promedio de las observaciones, o simplemente se puede analizar la diferencia entre ambos promedios. En la figura 7 se representan las diferencias entre las medias zonales de las temperaturas simuladas y de las observadas en función de la latitud, para la estación de invierno (figura 7a) y para la de verano (figura 7b) del hemisferio norte, utilizando varios modelos de circulación general en un ejercicio de intercomparación. De forma similar, en las figuras 8 y 9, se tienen las distribuciones de precipitación y presión al nivel del mar, simuladas y observadas, para ambas estaciones.

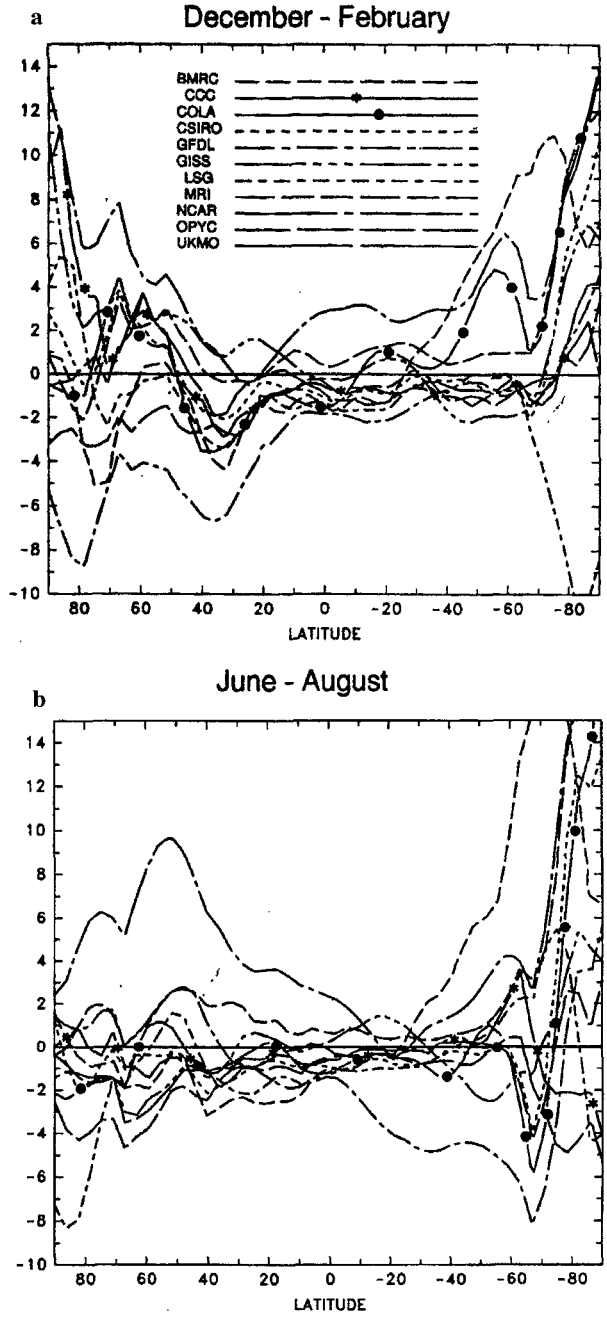

Figura 7. Diferencia en °C entre la temperatura media zonal simulada por 11 modelos acoplados y la observada, (a) durante los meses de DEF y (b) durante los de JJA.

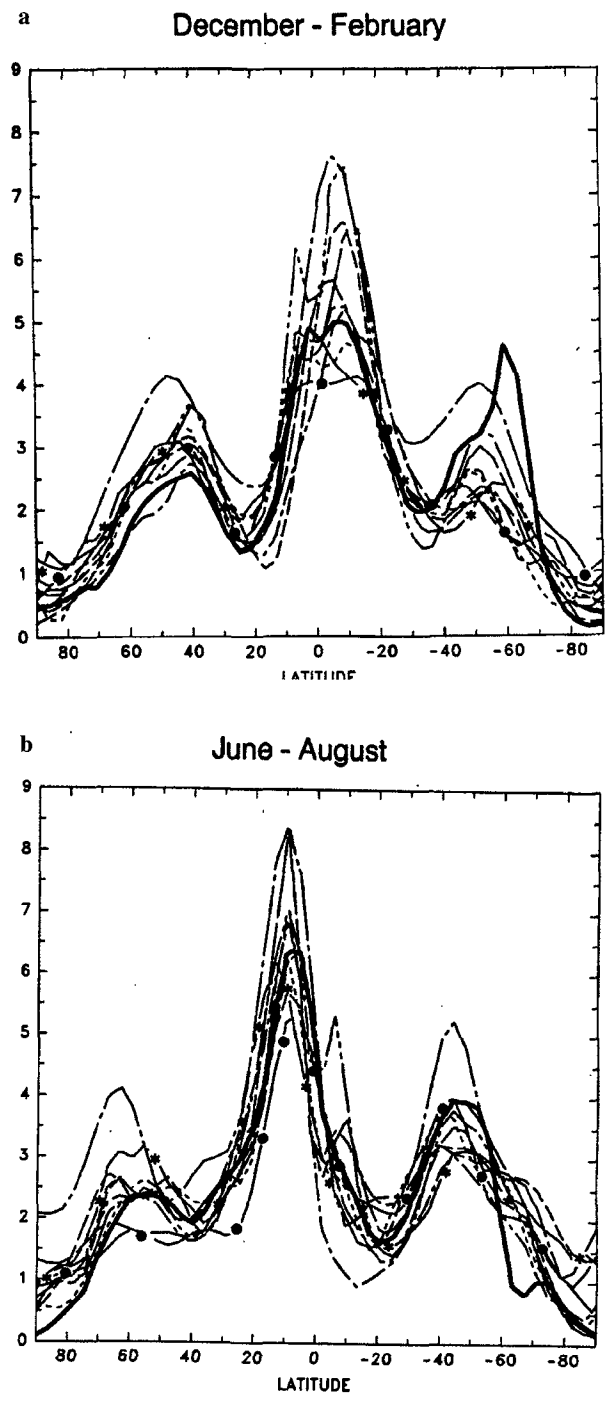

Figura 8. Comparación entre la precipitación media zonal simulada por 11 modelos acoplados y la observada (línea gruesa), (a) durante los meses de DEF y (b) durante los de JJA. Unidades mm/día.

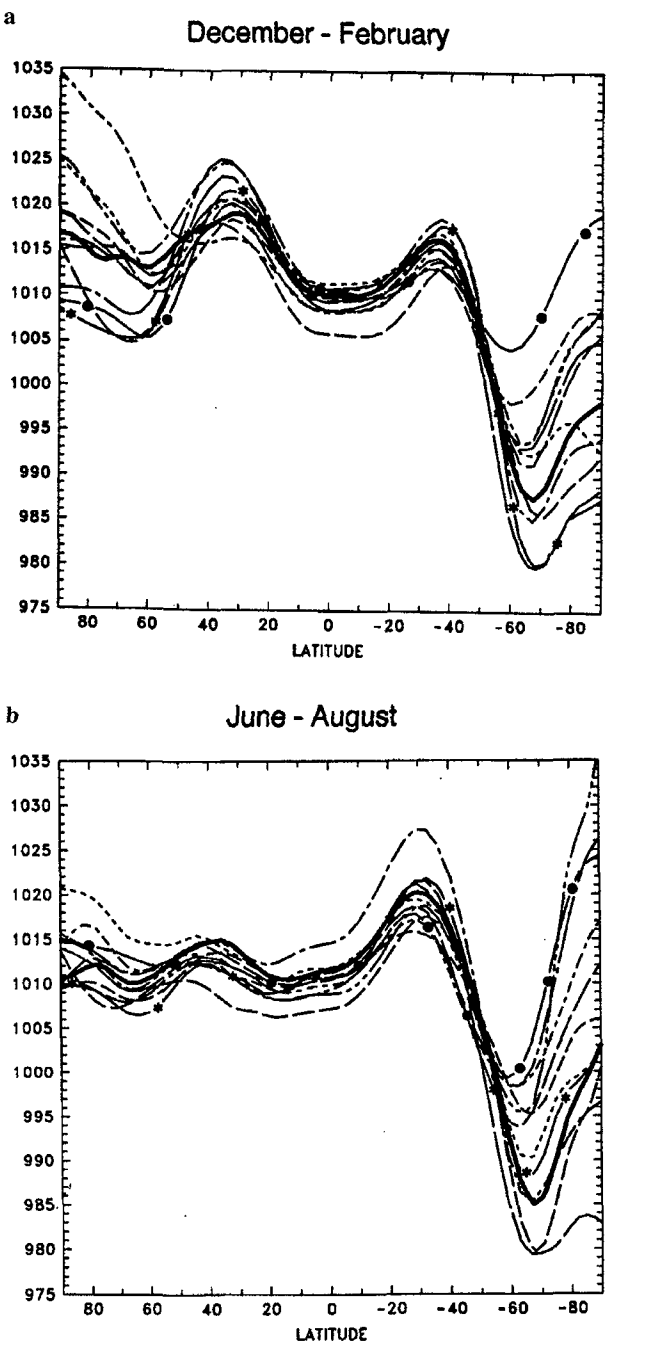

Figura 9. Comparación entre la presión al nivel del mar media zonal simulada por 11 modelos acoplados y la observada (línea gruesa), (a) durante los meses de DEF y (b) durante los de JJA. Unidades: hPa.

Se puede ver que, aunque hay diferencias de unos modelos a otros, el comportamiento medio de los modelos es muy correcto, sobre todo en latitudes próximas al ecuador y templadas. Sin embargo, la simulación del clima en los polos es claramente mejorable. Se tiene, por lo tanto, allí mucha mayor incertidumbre en la simulación del clima actual que en el resto del planeta.

Con esta valoración presente, se pueden analizar los ejercicios de simulación del clima futuro. Como ya se ha dicho, para alcanzar proyecciones del clima hacia el futuro hay que

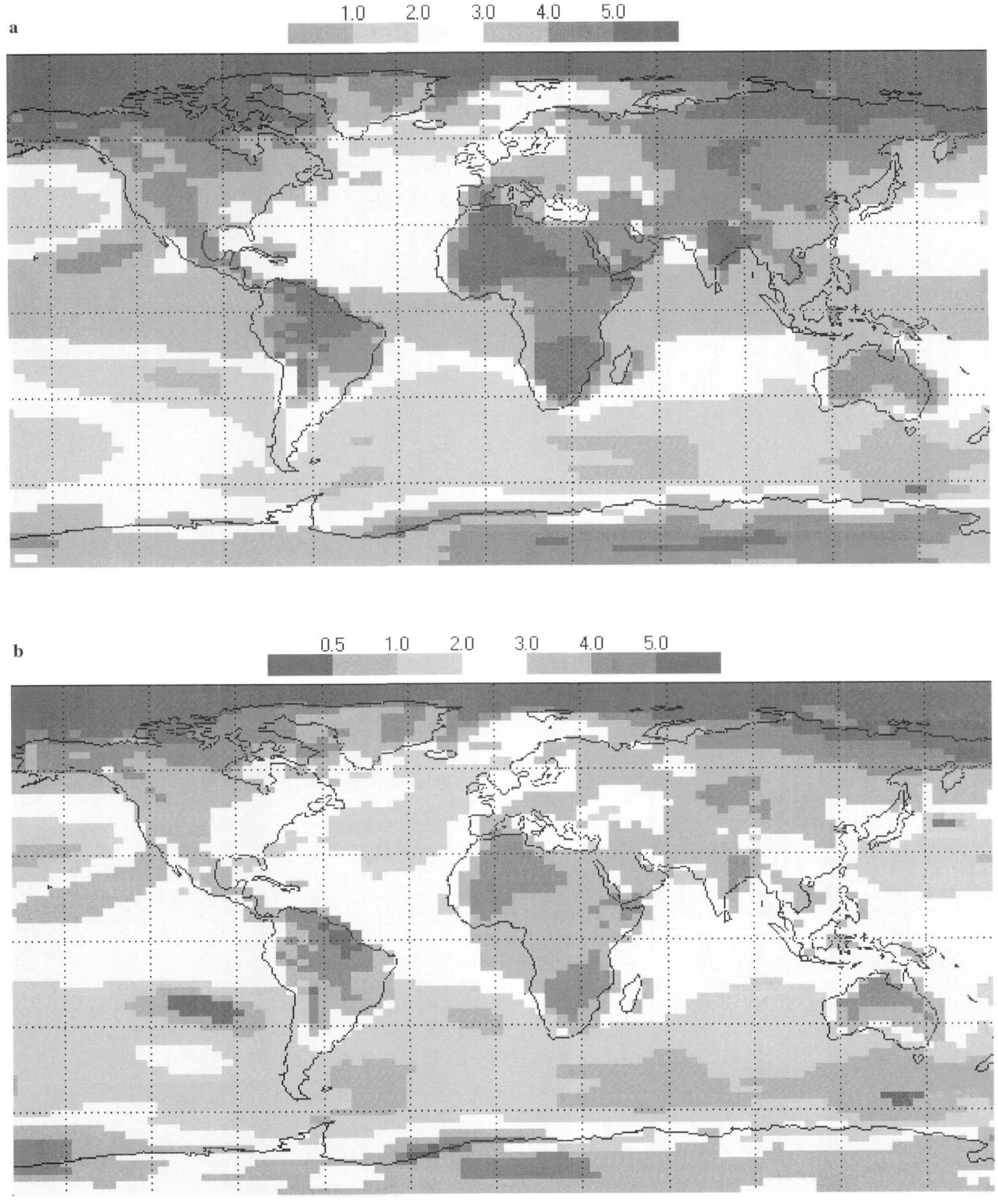

Figura 10. Cambio de la temperatura respecto a 1961-90 para el escenario IS92a debido sólo a los gases de efecto hivernadero (a) e incluyendo la contribución de los aerosoles (b).

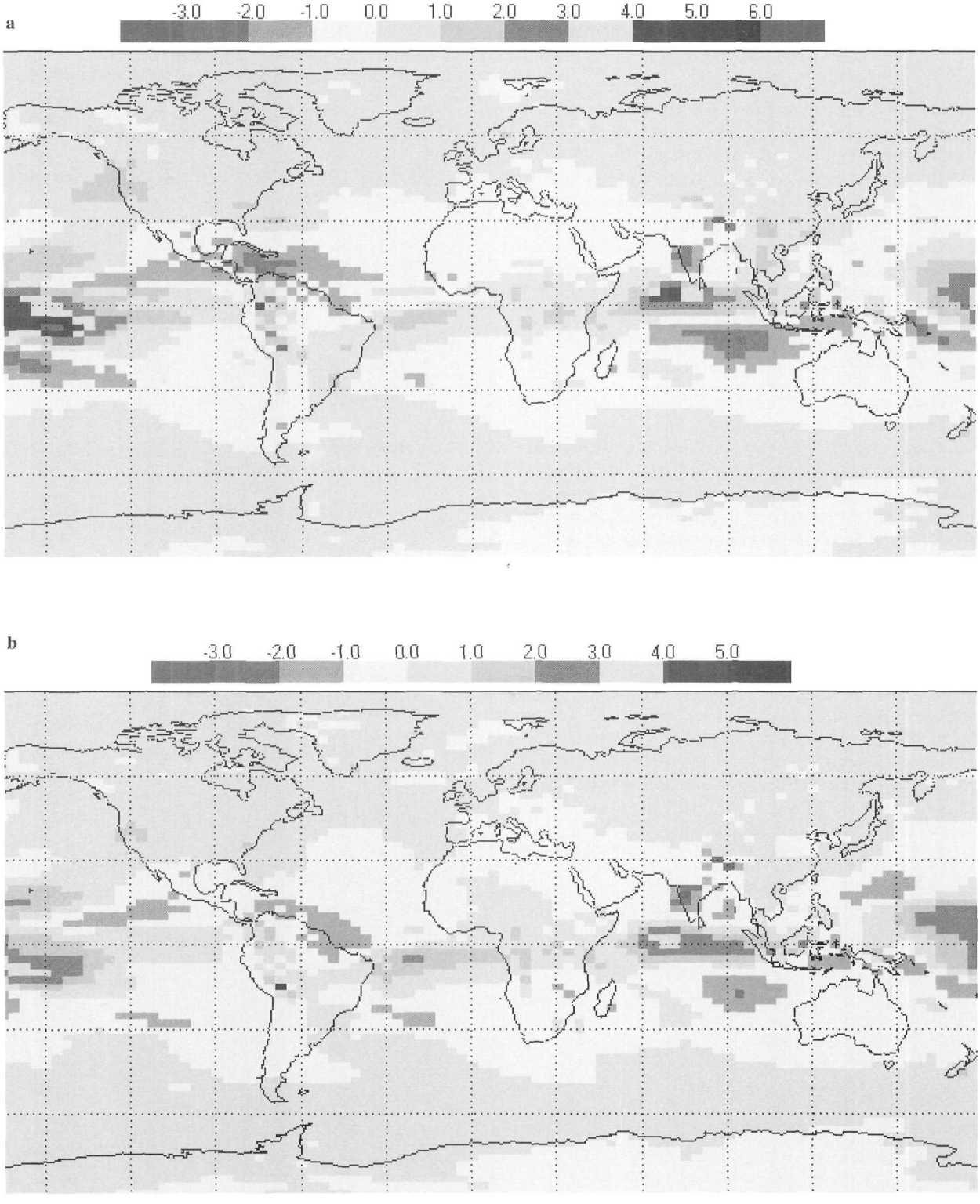

Figura 11. Cambio de la precipitación respecto a 1961-90 para el escenario IS92a debido sólo a los gases de efecto hivernadero (a) e incluyendo la contribución de los aerosoles (b).

emplear escenarios. En las figuras que siguen se ha utilizado el escenario IS92a y, además, considerando o no el efecto de los aerosoles.

Como ejemplo, en la figura 10 se observa el clima simulado con un modelo concreto (HadCM2), para el año 2080, por medio de la distribución geográfica de la diferencia de temperatura con respecto al clima actual (1961-90), teniendo en cuenta sólo los gases con efecto invernadero (figura 10a) y considerando además el efecto de los aerosoles (figura 10b). Se debe hacer notar que el calentamiento esperado es menor cuando se toman en consideración los aerosoles. En la figura 11 se representa la previsión futura de la precipitación, también por medio de la diferencia con la precipitación actual. Es importante recordar, a la vista de estas figuras, que no se deben aplicar estas simulaciones a escalas local o regional.

¿Estamos seguros que eso es lo que va a ocurrir? Evidentemente, no. Pero lo que sí es cierto es que esas distribuciones de temperatura y precipitación son las más fiables que podemos obtener en estos momentos. Por otra parte, como en los escenarios se encuentra incluida la actividad antrópica, también estamos seguros que el papel del hombre es decisivo, pues, las mismas simulaciones realizadas sin modificar las condiciones dan resultados diferentes (no mostrados aquí). Dicho de otra forma, los modelos de simulación del clima son capaces de realizar la mejor estima cuantitativa del cambio de clima que se pueda producir como consecuencia de la actividad humana.

Por supuesto existen incertidumbres, además distribuidas geográficamente de forma desigual, y algunas de ellas sin que estén claras sus causas. Por esta razón es imprescindible seguir investigando, para mejorar la observación, para conocer mejor las causas del clima que tenemos, para desarrollar mejores modelos y, en fin, para poder prever con mayor seguridad el clima que tiene que llegar, habida cuenta de la evolución natural y de la influencia que la actividad del hombre ejerce.

BIBLIOGRAFÍA

1. IPCC, 1992: Cambio Climático. Primer Informe de Evaluación. Versión en castellano publicada por el INM. 3 volúmenes.
2. GER, 1996: UK National Strategy for Global Environmental Research. GER Office, Swindon, Wiltshire SN2 1EU, UK.
3. McGuffie, K. y A. Henderson-Sellers, 1994: A Climate Modelling Primer. John Wiley.
4. Peixoto, J.P. y A.H. Oort, 1992: The Physics of Climate. American Institute of Physics.
5. Hartmann, D.L., 1994: Global Physical Climatology. Academic Press.
6. Houghton, J.T, L.G. Meira Filho, D.J. Griggs y K. Maskell, 1997: An Introduction to Simple Climate Models used in the IPCC Second Assessment Report. IPCC, Working Group I.
7. Manabe, S. y R.F. Stricker, 1964: Thermal equilibrium of the atmosphere with a convective adjustment. J. Atmos. Sci., 32, 3-15.
8. Alcamo, J., 1994: IMAGE 2.0, Integrated Modeling of Global Climate Change. Kluwer Academic Publishers.
9. Wigley, T.M.L., 1994: MAGICC (Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change): User«s Guide and Scientific Reference Manual. National Center for the Atmospheric Research.
10. Berk, M. y M. Janssen, 1998: The Interactive Scenario Scanner (ISS): A tool to support the dialogue between Science and Policy on Scenario Analysis. Change, 42, 11-13.
11. Pedlosky, J., 1987: Geophysical Fluid Dynamics. Springer-Verlag.
12. Trenberth, K.E., 1992: Climate System Modeling. Cambridge University Press.
13. IPCC, 1995: Climate Change. Second Assessment Report. Cambridge University Press. 3 volúmenes.