

---

# EL MODELADO DEL CLIMA TERRESTRE

**Manuel de Castro**

Catedrático de Física de la Tierra – Universidad de Castilla-La Mancha  
Avda. Carlos III, 21. 45071 Toledo – Email: Manuel.Castro@uclm.es

---

## **Resumen**

*El avance en el conocimiento de la dinámica del clima terrestre es uno de los principales retos con que se enfrenta la ciencia actual. No solo se trata de un sistema dinámico extremadamente complejo sino que, además, hay evidencias de que algunas actividades humanas pueden estar modificando sustancialmente su evolución natural y llegar a provocar significativas alteraciones en su estado a lo largo de las próximas décadas, lo que es aún más preocupante. La mejor herramienta de que se dispone para su estudio son los modelos climáticos, capaces de reproducir matemáticamente de una forma adecuada los principales procesos que determinan el clima terrestre. Consisten en enormes programas informáticos, que se ejecutan en los superordenadores más potentes, con los que se resuelve numéricamente un numeroso conjunto de ecuaciones que expresan las leyes y principios de la Física que gobiernan el clima terrestre.*

*Con los modelos se simula la evolución de las condiciones climáticas observadas a lo largo de los últimos 150 años, teniendo en cuenta la variación observada de la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero (GEIs) y de aerosoles. Los resultados obtenidos se comparan con los registros climáticos disponibles para evaluar la calidad de los modelos. Una vez comprobado que son capaces de reproducir aceptablemente el clima observado, se continúa la simulación hasta el final del presente siglo, considerando diversos supuestos sobre cómo podrían evolucionar las emisiones antropogénicas de GEIs y aerosoles en dicho periodo de tiempo. De esta manera, para cada uno de tales supuestos, se obtienen los cambios proyectados de las principales variables climáticas en las diversas zonas del globo terrestre.*

## **1. Introducción**

Quizá la definición del clima más conocida es la que le relaciona con el tiempo meteorológico promedio en las proximidades de la superficie terrestre. Pero tras este enunciado tan sencillo no se percibe la extremada complejidad de la multitud de procesos que originan el clima terrestre. Una aproximación para apreciar lo intrincado del problema podría consistir simplemente en advertir la extraordinaria variabilidad climática. Si, por ejemplo, para caracterizar el clima de un lugar

sólo se consideraran las temperaturas y precipitaciones medias anuales o mensuales, se podría comprobar la escasa probabilidad de encontrar dos años o dos diciembres, por citar un mes cualquiera, con valores idénticos de esta pareja de variables climáticas. Y eso sería mucho más improbable si se añadiera otra variable climática en este análisis. La explicación científica del hecho radica en que el clima está en constante evolución, pues es fundamentalmente el resultado de las permanentes, complicadas y numerosas interacciones entre la atmósfera, los océanos, las superficies cubiertas por hielo o nieve, los suelos y la vegetación. Estos cinco componentes constituyen el llamado sistema climático, una enorme máquina térmica alimentada por la energía procedente del Sol. El estado de este complejo sistema en cada momento determina la evolución del clima terrestre.

La variabilidad del clima es fundamentalmente el resultado de dos efectos: Las variaciones generadas como respuesta a cambios en forzamientos externos y las provocadas por interacciones no lineales entre los diversos componentes del sistema climático. Los forzamientos externos pueden tener origen astronómico o terrestre. Entre los primeros se incluyen, por ejemplo, las variaciones en la intensidad de la radiación solar o en los parámetros orbitales y entre los segundos cabe citar las variaciones en la composición de la atmósfera o las alteraciones de la superficie terrestre. Las causas internas están asociadas a multitud de realimentaciones e interacciones entre los componentes que generan inestabilidades u oscilaciones en el sistema, las cuales pueden operar independientemente, inducir notables modificaciones en los forzamientos externos o verse alteradas por alguno de éstos. Por ejemplo, las variaciones estacionales del clima están claramente relacionadas con forzamientos astronómicos externos, pero hay otras variaciones que ocurren independientemente de cualquier cambio en tales forzamientos. Así, seguramente el pasado invierno no fue igual que el anterior, o no será igual al próximo, a pesar de que el forzamiento solar en estos tres años sea prácticamente idéntico. Como ejemplo de las variaciones internas se podrían mencionar las relacionadas con el paso de perturbaciones meteorológicas (anticiclones, ciclones, frentes, etc.) generadas por inestabilidades internas de la atmósfera, o las inducidas por el fenómeno de El Niño relacionado con interacciones atmosférico-oceano en el Pacífico ecuatorial.

## 2. Los modelos climáticos globales

La mejor herramienta de que se dispone para el estudio de este complejo sistema son los modelos climáticos. Hay diversos tipos de modelos, desde los más sencillos que permiten comprender el efecto global de diversos forzamientos individuales, hasta los más complejos que son capaces de reproducir aceptablemente los principales procesos que tienen lugar en el sistema y que, a la postre, determinan el clima terrestre (McGuffie and Henderson-Sellers, 2005). Los modelos de este último tipo se basan en la resolución numérica del conjunto de ecuaciones que expresan las leyes y principios físicos que rigen la dinámica tridimensional de los procesos fundamentales que tienen lugar en cada componente del sistema climático, así como los intercambios de energía y masa entre ellos. Por esta razón, a los modelos que pueden simular las interacciones entre los cinco componentes del sistema climático global de forma acoplada se les da el nombre de Modelos del Clima Global con Acoplamiento (en adelante se usarán las siglas MCGC).

En la Tabla 1 se presenta, a modo de ejemplo, el conjunto de ecuaciones que rigen la dinámica de la atmósfera y del océano incluidas en los MCGC. Este complejo sistema no-lineal de ecuaciones diferenciales no tiene solución analítica, por lo que ha de resolverse aplicando técnicas numéricas. Eso requiere dividir el espacio ocupado por la atmósfera y el océano en celdillas tridimensionales. En cada una de ellas se asignan valores de las variables que caracterizan su estado (temperatura, velocidad, densidad etc.) a partir de observaciones directas o indirectas en un determinado instante inicial. Comenzando con estos valores, se resuelven las ecuaciones para derivar las evoluciones temporales de dichas variables de estado en cada celdilla de la malla del modelo. Esto se hace calculando iterativamente los valores previstos de tales variables en intervalos temporales discretos (paso temporal), es decir, avanzando en el tiempo hasta llegar al final del periodo de simulación que se desee. La duración de estos intervalos debe estar en concordancia con el tamaño de las celdillas: Cuanto menor sea su tamaño, más corto ha de ser el paso temporal y, por tanto, mayor número de iteraciones serían necesarias para completar el periodo de simulación. La resolución espacial de la parte atmosférica de los MCGC actuales varía entre 2° y 5° de latitud-longitud en la horizontal, y en la vertical se consideran de 10 a 30 capas entre la superficie y el tope superior de la atmósfera, cada una con espesor variable. Esto implica unos pasos temporales de entre 30 y 60 minutos. En la Tabla 2 se muestran las resoluciones horizontales y el número de capas en la vertical de las mallas atmosféricas y oceánicas que usan diversos MCGCs, y en la figura 1 se ilustra la disposición de las celdillas en la malla atmosférica de un modelo climático.

ECUACIONES ATMOSFÉRICAS	ECUACIONES OCEÁNICAS
Conservación de la energía: $\frac{dT}{dt} = (\mathbf{v} \cdot \mathbf{k}_h \nabla)T + \frac{1}{c_p} \sum \frac{dQ}{dt}$	Conservación de la energía: $\frac{dT}{dt} = k_v \cdot \nabla^2 T$
Conservación del momento: $\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - f \mathbf{k} \times \mathbf{v} - \nabla \Phi - \mathbf{F}$	Conservación del momento: $\frac{d\mathbf{v}}{dt} = f \mathbf{k} \times \mathbf{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{v} \cdot \nabla^2 \mathbf{v}$
Conservación de la masa: $\nabla(\rho \cdot \mathbf{v}) = 0$	Conservación de la masa: $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$
Conservación del agua: $\frac{d(\rho q)}{dt} = (\mathbf{v} \cdot \mathbf{k}_h \nabla)(\rho q) + E - P$	Conservación de la salinidad: $\frac{dS}{dt} = k_s \cdot \nabla^2 S$
Ecuación de estado: $p = \rho R_d T (1 + 0.61 q_v)$	Ecuación de estado: $\rho = \rho(T, S, p)$

T: temperatura Q: flujos de calor V: vector velocidad  
q: fracción de agua en el aire S: salinidad  $\mathbf{v} = 2\Omega \times \mathbf{r} + \mathbf{v}$   
p: presión ρ: densidad φ: latitud Φ: geopotencial  
c<sub>p</sub>: calor esp. aire R<sub>d</sub>: cte. del aire k: coef. difusión ν: coef. viscosidad  
 $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla$

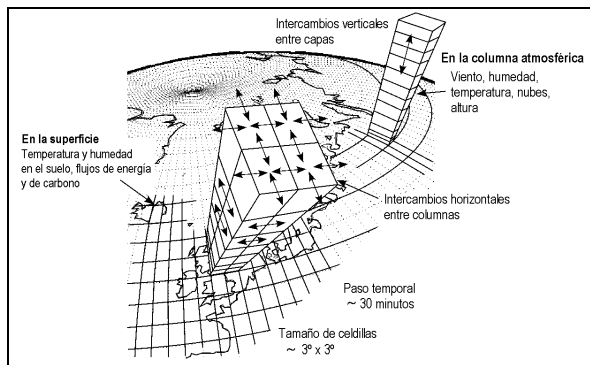
**Tabla 1. Sistema de ecuaciones de la dinámica atmosférica y oceánica que se resuelven en un modelo climático acoplado.**

Nombre modelo	Resolución atmosf.	Resolución océano
ARPEGE/OPA2	3.9 × 3.9 (L19)	2.0 × 2.0 (L31)
BMRCa	3.2 × 5.6 (L9)	3.2 × 5.6 (L12)
CCSR/NIES 2	5.6 × 5.6 (L20)	2.8 × 2.8 (L17)
CGCM 1,2	3.8 × 3.8 (L10)	1.8 × 1.8 (L29)
CSIRO Mk2	3.2 × 5.6 (L9)	3.2 × 5.6 (L21)
CSM 1.0, 1.3	2.8 × 2.8 (L18)	2.0 × 2.4 (L45)
ECHAM4/OPYC3	2.8 × 2.8 (L18)	2.8 × 2.8 (L11)
GFDL R15 a	4.5 × 7.5 (L9)	4.5 × 3.7 (L12)
GFDL R30 c	2.25 × 3.75 (L14)	1.875 × 2.25 (L18)
GISS2	4.0 × 5.0 (L9)	4.0 × 5.0 (L13)
GOALS	4.5 × 7.5 (L9)	4.0 × 5.0 (L20)
HadCM2	2.5 × 3.75 (L19)	2.5 × 3.75 (L20)
HadCM3	2.5 × 3.75 (L19)	1.25 × 1.25 (L20)
IPSL-CM2	5.6 × 3.8 (L15)	2.0 × 2.0 (L31)
MRI1	4.0 × 5.0 (L15)	2.0 × 2.5 (L21)
MRI2	2.8 × 2.8 (L30)	2.0 × 2.5 (L23)
DOE PCM	2.8 × 2.8 (L18)	0.67 × 0.67 (L32)

**Tabla 2. Modelos climáticos globales incluidos en el tercer informe del IPCC (2001) y la resolución horizontal (en grados latitud x longitud) y vertical (n° de niveles entre paréntesis) que cada uno usa en los módulos atmosférico y oceánico.**

El modelado numérico de la atmósfera y el océano se combina con representaciones matemáticas empíricas o semiempíricas de los otros tres componentes del sistema climático. Los actuales modelos más completos incluyen también representaciones del ciclo del carbono y de procesos físico-químicos que afectan a los aerosoles en la atmósfera.

Además, la discretización que precisan las técnicas numéricas para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales implica que con ellas no pueden resolverse los procesos atmosféricos u oceánicos con escalas espaciales o temporales menores que la resolución del modelo, por ejemplo nubes individuales en los modelos atmosféricos o remolinos de tamaño intermedio en los modelos oceánicos. Por eso, su efecto debe calcularse mediante una representación paramétrica en función de valores de las variables básicas resueltas por el modelo. Este procedimiento se llama parametrización.



**Figura 1. Ilustración de la malla rectangular atmosférica de un modelo climático y de los intercambios entre celdillas (adaptada de McGuffie and Henderson-Sellers, 2005).**

Por ejemplo, el módulo atmosférico de los modelos climáticos incluye las siguientes parametrizaciones en cada una de las celdillas de su malla:

- Procesos radiativos: Determinan explícitamente los efectos del aire, las nubes, los GEIs (vapor de agua, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, etc.) y los aerosoles atmosféricos sobre varias bandas espectrales de la radiación solar y de la radiación térmica infrarroja terrestre.
- Procesos superficiales: Derivan los efectos de los intercambios de masa y energía entre la atmósfera y la superficie, teniendo en cuenta las características superficiales, la evaporación, la conducción de calor, la acumulación de agua en el suelo y la escorrentía, así como el intercambio de agua y CO<sub>2</sub> por la vegetación.
- Procesos de difusión: Resuelven el efecto del intercambio vertical turbulento de masa, calor y momento entre las diversas capas de la atmósfera.
- Procesos nubosos y de precipitación: Para representar estos procesos se consideran simultáneamente dos tipos de esquemas, los de gran escala que resuelven explícitamente los procesos microfísicos que originan las nubes y la precipitación, y los de escala sub-celdilla que derivan implícitamente los efectos de sistemas nubosos de tipo convectivo con tamaño inferior al de las celdillas del modelo.
- Procesos químicos: Simulan la emisión, transporte, oxidación y deposición de compuestos de azufre para derivar los efectos directos e indirectos de los aerosoles sulfato.

Antes se ha señalado que el sistema de ecuaciones diferenciales de un MCGC se resuelve en una malla de celdillas abarcando todo el globo terrestre y avanzando en el tiempo de forma iterativa en pasos temporales discretos. Esto significa realizar miles de millones de operaciones matemáticas simples en cada intervalo temporal, hasta completar el periodo de integración, que normalmente abarca centenares de años. Es decir, en torno a un millón de iteraciones. Obviamente, este formidable volumen de cálculos se debe completar en un periodo de tiempo razonable

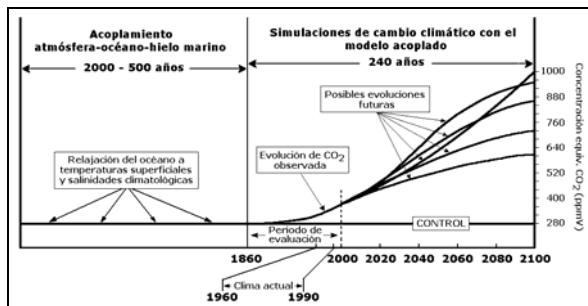
(semanas o meses), lo que requiere el uso de los superordenadores más potentes disponibles.

En la actualidad existen unas pocas decenas de MCGCs, desarrollados en varios centros climáticos y universidades merced a un extraordinario esfuerzo de investigación, en el que han colaborado directa o indirectamente miles de científicos a lo largo de las últimas décadas. Una clara muestra del avance conseguido es que en el primer informe del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático publicado en 1990 (IPCC, 1990) se presentaron resultados de solo dos modelos, mientras que en el elaborado once años después (IPCC, 2001) se consideraron diecisiete (ver tabla 2).

### 3. Modo de aplicación de los modelos climáticos

Los MCGC se usan para simular la evolución del clima partiendo de unas condiciones iniciales que correspondan con un estado equilibrio realista entre todos los componentes del sistema climático. Como no se tiene un conocimiento completo del estado actual del sistema, es decir del valor de las variables que simula el modelo en todas las celdillas de la malla, lo que se hace es deducir esos valores interpolando las observaciones puntuales disponibles. A partir de ese estado inicial, se ejecuta el modelo con forzamientos externos constantes hasta que se consiga llegar a un estado casi estacionario. El tiempo necesario para ello depende de los tiempos de respuesta de cada componente del sistema. La atmósfera, el hielo marino y las capas superficiales del suelo y del océano son las que evolucionan más rápidamente, alcanzando su ajuste al cabo de pocas décadas de simulación. Sin embargo, las capas oceánicas profundas requieren periodos de tiempo de siglos a milenios.

En la figura 2 se muestra un esquema del modo de aplicación de un MCGC para simular el cambio climático inducido por las emisiones antropogénicas de GEIs y aerosoles. Se inicia el modelo con valores adecuados de las características superficiales y atmosféricas, junto con una distribución media de temperatura y salinidad del océano en reposo. Se ejecuta el modelo con una concentración atmosférica constante de GEIs antropogénicos igual a la del inicio de la era industrial (p.e. 280 ppmV de CO<sub>2</sub>), dejando que interaccionen la atmósfera y el océano, pero imponiendo la condición de que los flujos de calor y agua entre las diferentes celdillas del modelo se conserven de forma exacta. Para evitar posibles derivas del océano hacia estados irreales, de forma periódica se relajan las temperaturas y salinidades superficiales a valores climatológicos. De esta manera, se consigue el acoplamiento atmósfera-océano al cabo de un periodo de simulación de muchos centenares de años, llegándose a un estado del sistema climático que se supone similar al que podría existir al inicio de la era industrial.



**Figura 2. Esquema del modo en que se aplica un MCGC para simular el cambio climático antropogénico.**

A partir de dicho estado, que se fecha en el año 1860, se ejecuta el modelo en dos modos: a) Una simulación de “control”, en la que se mantiene constante la concentración de GEIs, y b) una simulación de clima transitorio, en la que se van variando las concentraciones de GEIs y aerosoles sulfato de acuerdo con el conocimiento que se tiene de la evolución de las emisiones antropogénicas entre los años 1860 y 2000. Los resultados de esta simulación se verifican frente a observaciones climáticas, particularmente las del periodo 1960-90 (clima actual).

Una vez comprobado que el modelo es capaz de reproducir adecuadamente el clima “base”, se continua la simulación hasta el final del presente siglo, considerando estimaciones de los futuros incrementos de GEIs y aerosoles. Por tanto, resulta para ello necesario cuantificar las posibles futuras emisiones antropogénicas. En el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) hay un grupo multidisciplinar de expertos dedicados a estudios de prospectiva que han considerado un conjunto de posibles escenarios socio-económicos, asignando a cada uno los correspondientes niveles de emisión a lo largo del presente siglo. De esta manera se configuran diversos posibles escenarios de cambio climático antropogénico hasta el año 2100.

#### 4. Verificación de los modelos

Todos los modelos son simplificaciones más o menos ajustadas de la extrema complejidad del sistema climático. Esto se debe a que aún no se conocen bien algunos aspectos del sistema y también a las limitaciones computacionales. Por tanto, los MCGC que se utilizan para cuantificar la respuesta futura del clima a perturbaciones inducidas por actividades humanas han de ser previamente verificados. El examen de la capacidad de un modelo para reproducir los principales procesos en el sistema climático, se realiza mediante una comparación sistemática entre los resultados de simulaciones con condiciones de clima actual (1960-90) y datos climatológicos observados.

Aunque este es el principal test de validación de los modelos, también se aplican otras técnicas, como el análisis de la sensibilidad en la respuesta del modelo cuando se alteran determinadas suposiciones clave, o la simulación de condiciones paleoclimáticas, por ejemplo el inicio o final de la última era glacial. En estos últimos tests se suelen usar versiones más simplificadas de los MCGC. Una vez evaluado satisfactoriamente el modelo, se considera que podría proporcionar proyecciones útiles del previsible cambio climático inducido por las emisiones antropogénicas de GEIs y aerosoles a lo largo del presente siglo.

Este tipo de evaluaciones permite además comprobar la notable mejora experimentada por los MCGC en los últimos años. Esto se atribuye a varias causas, entre las que destacan un mejor conocimiento de las características de los océanos y de los procesos de intercambio con la atmósfera, la consideración de procesos que afectan a los aerosoles en la atmósfera y sobre todo el formidable incremento en la potencia de computación, que ha permitido un sustancial aumento de la resolución espacial de los modelos. A continuación se presentan algunos resultados de evaluación de simulaciones del clima terrestre realizadas con MCGCs.

#### 4.1 Atribución del cambio climático observado

Uno de los aspectos claves del cambio climático actual y futuro se podría resumir en la pregunta: ¿Cuánto han influido las actividades humanas en el calentamiento global observado?. Hay tres hechos incontestables: 1) La temperatura media global del aire cerca de la superficie terrestre ha aumentado cerca de 0.8°C desde 1860. 2) En los últimos 150 años la concentración media global de CO<sub>2</sub> en la atmósfera se ha incrementado en torno a un 30%, fundamentalmente a causa de actividades humanas. 3) El CO<sub>2</sub> es un gas que contribuye al efecto invernadero, el mayor responsable de la ganancia global media de calor por la superficie terrestre, pues casi dobla en magnitud al calentamiento solar directo. Entonces, para responder a la anterior cuestión, habría que calcular de forma objetiva la relación entre el primer hecho y el segundo. Pero este cálculo no es trivial, pues la extrema complejidad del sistema climático hace que no exista una proporcionalidad predeterminada entre causa y efecto. Es decir, una pequeña perturbación podría inducir un cambio más significativo en el clima terrestre que otra con mayor magnitud. Esto se debe a que cualquier alteración inicial podría eventualmente amplificarse o disiparse según fuera el resultado conjunto de los numerosos y complejos mecanismos de realimentación que surgirían en el sistema climático. Por tanto, cabría la posibilidad de que el calentamiento global observado se debiese en su mayor parte a otros forzamientos naturales de menor magnitud relativa que el asociado con la acumulación de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

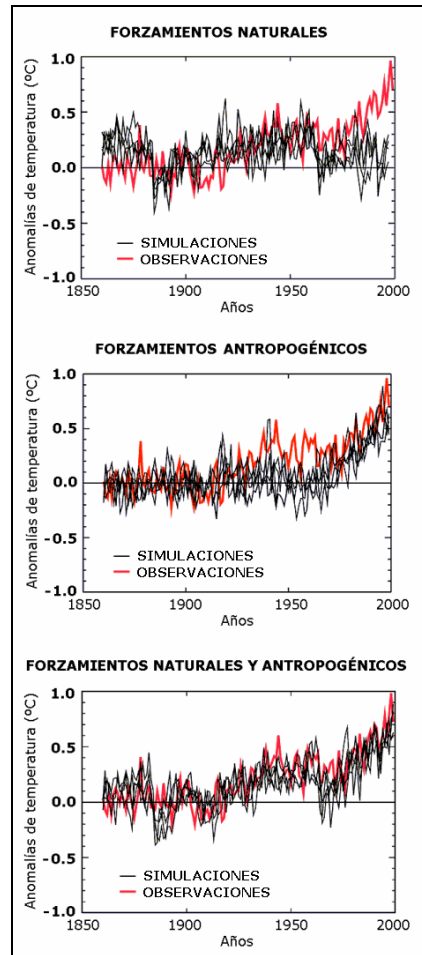
Para abordar adecuadamente este problema clave se utilizan los MCGC más completos. El método consiste en realizar simulaciones de la evolución del clima terrestre entre 1860 y 2000, considerando tres supuestos: a) Que en ese periodo sólo hubieran actuado los forzamientos naturales observados (variaciones de la radiación solar y ocurrencia de erupciones volcánicas), b) que sólo se hubieran producido forzamientos antropogénicos observados (concentraciones crecientes de GEIs y aerosoles en la atmósfera) y c) la situación real, es decir que ambos forzamientos hubieran actuado conjuntamente. En la figura 3 se muestran los resultados de la evolución de la temperatura global media anual para cada uno de los tres supuestos obtenidos por un conjunto de simulaciones con un MCGC, comparándolos con valores observados.

Las variaciones anuales proyectadas por el conjunto de simulaciones en cada supuesto quedan representadas por las líneas de color negro, cuya dispersión indica el grado de incertidumbre del modelo en el cálculo de las temperaturas globales promedio de cada año. Esta figura ilustra con claridad que las simulaciones del supuesto (c) reproducen de manera muy aceptable la evolución experimentada por la temperatura media global a lo largo de los últimos 150 años, mientras que las del supuesto (a) no muestran el calentamiento observado en las últimas tres décadas. Así pues, estos ensayos permiten discriminar la contribución de las actividades humanas en el calentamiento global observado con un grado de confianza aceptable. En función de estos resultados, el tercer informe del IPCC (2001) concluye señalando que “... la mayor parte del calentamiento observado en los últimos 50 años es atribuible a actividades humanas”.

#### 4.2 Comparación con la variabilidad geográfica del clima actual

Antes se ha señalado que los actuales MCGC tienen una resolución horizontal de unos pocos centenares de kilómetros. Por tanto, se debe examinar si serían también capaces de reproducir aceptablemente la distribución geográfica actual de la temperatura, la precipitación y otras variables climáticas a lo largo del planeta, con un grado de detalle acorde a dicha resolución espacial. Estas comparaciones con la realidad proporcionarían una confirmación adicional de la capacidad de los actuales MCGC para simular los rasgos más importantes del clima terrestre.

Con este propósito, en el año 2002 se inició el Programa para el Diagnóstico e Intercomparación de Modelos Climáticos (PCMDI) en el que participan todos los centros mundiales que han desarrollado los MCGC más completos. El principal objetivo del programa es valorar cada 2 años la calidad de las simulaciones del clima actual y de su previsible evolución futura, realizadas con versiones actualizadas de los MCGC que incorporan los últimos avances en



**Figura 3. Evoluciones de temperaturas medias anuales observadas (líneas rojas) y simuladas por un MCGC (líneas negras) considerando: a) Sólo los forzamientos naturales (arriba), b) sólo los forzamientos antropogénicos (en medio) y c) todos los forzamientos (abajo). Tomada de IPCC (2001).**

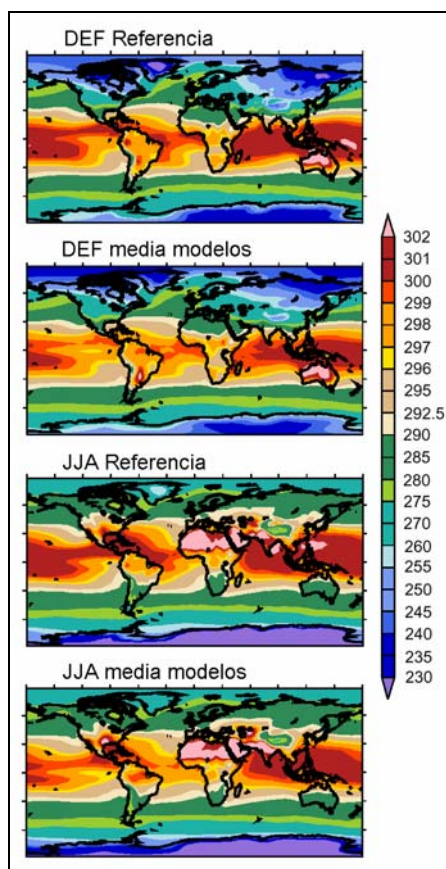
el conocimiento científico del sistema climático. El ejercicio consiste en realizar diagnósticos intuitivos del conjunto de simulaciones con todos los MCGC, sin enjuiciar los modelos individuales. Los resultados del conjunto de simulaciones se centralizan en una gran base de datos, a la que tiene libre acceso cualquier investigador .

Para comprobar el grado de ajuste que ofrece el conjunto de los once MCGC incluidos en el PCMDI, a continuación se presentan algunos resultados correspondientes a simulaciones del clima actual, extractados del último informe publicado (AchutaRao et al., 2004).

En la figura 4 se muestran las comparaciones de las temperaturas medias estacionales del aire superficial correspondientes al clima actual (Jones and Moberg, 2003) y al promedio de las simulaciones con los once MCGC considerados. Se comprueba el buen ajuste que en general ofrecen los modelos climáticos, aunque también se aprecian algunas diferencias entre los valores observados y simulados. Así, se percibe que las temperaturas sobre los océanos resultan en



promedio 0.5°C más frías que las observadas, con diferencias de hasta 1.5 – 2°C en el Atlántico Norte durante el verano boreal (JJA). Sobre las áreas continentales las diferencias son algo mayores, especialmente en las áreas de montaña y las mesetas elevadas, donde se llegan a observar desviaciones de hasta 10°C. A este respecto se debe señalar que una parte de ellas se debe a que los modelos no resuelven directamente la temperatura superficial a 2 m de altura, sino que se derivan de interpolaciones verticales entre el suelo y la capa inferior, con diferente espesor en cada modelo, y también a que las resoluciones horizontales (tamaño de celdillas) no son iguales en todos ellos, por lo que se ha tenido que realizar una interpolación horizontal a una malla común con tamaño aproximado de 300 km.

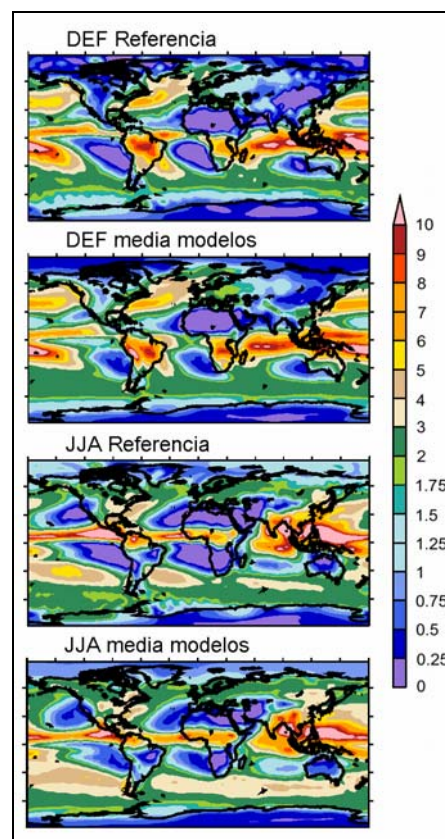


**Figura 4.** Distribuciones de temperatura superficial media en invierno (DEF) y verano (JJA) boreales deducidas de observaciones (*referencia*) y del promedio de simulaciones de clima actual realizadas con el conjunto de los once MCGC considerados (*media modelos*). Los valores están expresados en grados Kelvin.

En la figura 5 se presentan los resultados de los valores medios estacionales de la precipitación, expresados en mm/día, obtenidos con los modelos frente a los observados (Hoffman et al., 1997). Se aprecia que los patrones de distribución estacional a gran escala están bien representados en los modelos climáticos, aunque en general las diferencias entre valores observados y simulados son mayores que en el caso de las temperaturas. Por ejemplo, los modelos

sobreestiman la precipitación en las zonas subtropicales al este de los océanos, mientras que la subestiman en las zonas tropicales de convergencia máxima, particularmente en el verano boreal (JJA). Esto indica la mayor incertidumbre que presentan los modelos para reproducir los valores de la precipitación observada en comparación con los de las temperaturas superficiales.

Las distribuciones de la fracción nubosa simuladas por los modelos y las observadas por el International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP) se pueden comparar en la figura 6. En ella se comprueba que, de forma cualitativa, el promedio de los modelos se ajusta razonablemente bien a las observaciones. No obstante, en un examen cuantitativo más detallado se encuentran discrepancias. Por ejemplo, en las zonas orientales de los océanos los modelos no reproducen la abundancia de estratos, mientras que sobreestiman la nubosidad en el Pacífico tropical y en Eurasia durante el invierno boreal (DEF). De forma general, se podría decir así que la nubosidad es la variable climática peor reproducida por los modelos, a causa de lo cual los científicos están dedicando un gran esfuerzo a mejorar este aspecto



**Figura 5.** Como en la figura 4, pero para las precipitaciones medias estacionales expresadas en mm/día.

En resumen, los resultados indican que los actuales MCGC son capaces de reproducir aceptablemente el clima terrestre y su variabilidad espacial. No obstante, hay que tener presente que aún existen incertidumbres, en gran parte asociadas a deficiencias

en las parametrizaciones de ciertos procesos físicos determinantes para el clima (IPCC, 2001). Además, la baja resolución espacial de los MCGC no permite reproducir detalles que determinan decisivamente el clima a escala regional en muchas zonas del planeta. Esta limitación hace que los resultados de los MCGC no puedan ser directamente aplicados para simular los diversos impactos asociados al cambio climático global.

### 5. Consideraciones finales

En primer lugar, hay que destacar que los modelos numéricos más completos que se utilizan para simular el clima terrestre se basan en la resolución de ecuaciones que describen la física y la dinámica de los procesos fundamentales que tienen lugar en la atmósfera, los océanos, el hielo y el suelo. Aunque incluyen cierto empiricismo, en su mayor parte no se basan en relaciones empíricas, como ocurre en los modelos de muchos otros sistemas, por ejemplo los económicos o sociales (Houghton, 1997). Es decir, no consideran semejanzas o tendencias estadísticas deducidas de comportamientos observados, sino que calculan evoluciones de variables climáticas partiendo de unas condiciones iniciales y de contorno, sin necesidad de tener en cuenta anteriores estados o comportamientos del sistema.

Los resultados que se obtienen con estos modelos climáticos permiten atribuir con bastante confianza la cuota antropogénica del cambio climático observado. Asimismo, se comprueba que los resultados de la simulación del clima actual se corresponden razonablemente con las observaciones climatológicas. No obstante, hay tener presente que los modelos son representaciones aproximadas de la realidad. Las comparaciones de los resultados de los modelos con la climatología permiten acotar las incertidumbres inherentes. Pero también hay que tener presente que la propia incertidumbre en la sensibilidad climática del modelo podría hacer que distintos escenarios fueran consistentes con las observaciones.

Los errores en la simulación de la variabilidad interna del sistema climático también pueden provocar un incremento de la incertidumbre, pero de forma más sutil. Por ejemplo, si alguno de los principales modos interanuales o intraestacionales de variabilidad del clima no se simulara aceptablemente, tampoco podrían deducirse las alteraciones que ese modo sufriría en condiciones de clima perturbado, incrementándose entonces la incertidumbre de las proyecciones del cambio climático antropogénico deducidas con los modelos.

Una manera de valorar objetivamente la incertidumbre de las simulaciones con los modelos climáticos consiste en realizar diversos experimentos, bien con un modelo considerando diferentes condiciones iniciales y parametrizaciones de los procesos físicos, o bien utilizando diversos modelos. Así, en función del grado de discrepancia entre los resultados obtenidos

con el conjunto de modelos, sería posible cuantificar la incertidumbre en las proyecciones de cambio climático mediante la aplicación de técnicas estadísticas. Este es el método que se está siguiendo actualmente a fin de que las proyecciones con modelos climáticos puedan utilizarse para realizar análisis objetivos de riesgo y establecer protocolos de mitigación o adaptación a los posibles escenarios de cambio climático futuro.

### Referencias

- AchutaRao, K., C. Covey, C. Doutriaux, M. Fiorino, P. Gleckler, T. Phillips, K. Sperber, K. Taylor: *An Appraisal of Coupled Climate Model Simulations*. Lawrence Livermore National Laboratory UCRL-TR-202550, 197 pp, 2004 (disponible en <http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/about-ipcc.php>).
- Houghton, J.: *Global Warming: The complete briefing*. Cambridge Univ. Press, 251 pp., 1997.
- Huffman and co-authors: The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) combined data set. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, 5-20, 1997 (datos disponibles en: [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/global\\_precip/html/wpage.cmap.html](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/global_precip/html/wpage.cmap.html))
- IPCC: *Climate change: the Intergovernmental Panel on Climate Change scientific assessment*. World Meteorological Organisation and United Nations Environment Programme, Geneva. 270 pp., 1990.
- IPCC: *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. [Edited by J. T. Houghton, et al.]. Cambridge University Press, Cambridge, 994, 2001.
- ISCCP: International Satellite Cloud Climatology Project. Base de datos en <http://isccp.giss.nasa.gov/>
- Jones, P.D. and A. Moberg: Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: An extensive revision and update to 2001. *J. Climate*, 16, 206-223, 2003
- McGuffie, K. And A. Henderson-Sellers: *A Climate Modelling Primer*. John Wiley&Sons, 280 pp., 2005.

### Enlaces de interés

- <http://www.ipcc.ch>
- [http://www.grida.no/climate/ipcc\\_tar/wg1/index.htm](http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/index.htm)
- [http://www.icess.ucsb.edu/esrg/dianes\\_dir/lectures/climate\\_html/sld001.htm](http://www.icess.ucsb.edu/esrg/dianes_dir/lectures/climate_html/sld001.htm)
- [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/global\\_precip/html/wpage.cmap.html](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/global_precip/html/wpage.cmap.html)
- <http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/about-ipcc.php>
- <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>
- [http://www.cru.uea.ac.uk/link/res\\_scens/index\\_files/res\\_scen\\_index.html](http://www.cru.uea.ac.uk/link/res_scens/index_files/res_scen_index.html)
- [http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/dkrz/dkrz\\_index.html](http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/dkrz/dkrz_index.html)
- <http://www.aip.org/history/climate/GCM.htm>
- <http://climatechange.unep.net/jcm/>