

# Fundamentos, escenarios y estrategias de mitigación del cambio climático

Manuel de Castro

Este texto forma parte de la ponencia presentada por el autor en la "Jornada de Cambio Climático: Fundamentos y Respuestas Ciudadanas", organizada por la Fundación Centro de Recursos Ambientales de Navarra (CRANA) el 11 de noviembre de 2008 en Pamplona. Agradecemos al autor y a CRANA su colaboración para la publicación de este artículo.

El Centro de Investigación para la Paz (CIP-Ecosocial) es un espacio de reflexión que analiza los retos de la sostenibilidad, la cohesión social, la calidad de la democracia y la paz en la sociedad actual, desde una perspectiva crítica y transdisciplinar.

Centro de Investigación para la Paz (CIP-Ecosocial)  
C/ Duque de Sesto 40, 28009 Madrid

Tel.: 91 576 32 99 - Fax: 91 577 47 26 - [cip@fuhem.es](mailto:cip@fuhem.es) - [www.cip.fuhem.es](http://www.cip.fuhem.es)

# FUNDAMENTOS, ESCENARIOS Y ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Manuel de Castro  
Instituto de Ciencias Ambientales  
Universidad de Castilla-La Mancha  
Toledo

## Introducción

Por cambio climático se entiende el calentamiento global observado en la superficie terrestre a causa del incremento registrado en la atmósfera de ciertos gases que contribuyen al llamado efecto invernadero. La ciencia no tiene actualmente dudas sobre la consistencia de esta teoría, como tampoco de que la acumulación de dichos gases se debe a actividades humanas. Por ello, a menos que se acuerden medidas mitigadoras a escala global, este proceso podría llegar a provocar en el futuro indeseables impactos sobre el clima de muchas regiones del planeta a lo largo de este siglo y venideros, con repercusiones en los sistemas ambientales, la economía y la sociedad. La evaluación de estos posibles impactos se realiza en función de proyecciones sobre la magnitud y distribución de las alteraciones climáticas futuras según diversos escenarios posibles. Para ello se utilizan sofisticados y complejos modelos matemáticos que son capaces de simular los principales procesos que determinan el clima actual y que atribuyen inequívocamente el calentamiento global observado al aumento de los gases de efecto invernadero en la atmósfera.

## La variabilidad del clima terrestre

Quizá la definición del clima más conocida es el promedio de las condiciones meteorológicas 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 ser advertir la extraordinaria variabilidad climática. Por ejemplo, si para caracterizar el clima de un lugar sólo se consideraran las temperaturas y precipitaciones medias anuales, podría comprobarse la escasa probabilidad de encontrar dos años con valores idénticos de esta pareja de variables climáticas. No digamos nada si se añadiera más variables en este análisis. La explicación científica de semejante comportamiento radica en que el clima está en constante evolución, pues es el resultado de las incesantes, numerosas y complejas interacciones entre la atmósfera, los océanos, las superficies polares heladas, los suelos continentales y la vegetación. Estos cinco componentes constituyen el llamado sistema climático, una enorme máquina térmica alimentada por la energía solar. El estado de este complejo sistema en cada momento determina la evolución del clima terrestre.

Se considera que 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 entre los propios componentes del sistema climático. Los forzamientos externos pueden tener origen astronómico o terrestre. Entre los primeros se incluyen, por ejemplo, las variaciones de la intensidad de la radiación solar o de los parámetros orbitales de la Tierra, y entre los segundos las alteraciones en la concentración atmosférica de los “gases invernadero” o en las características de los suelos. Por ejemplo, las variaciones estacionales del clima están claramente relacionadas con forzamientos astronómicos externos, pero hay otras variaciones que ocurren debido a causas internas, independientemente de cualquier cambio en tales forzamientos. Así, el pasado invierno no fue exactamente igual que el anterior, ni será igual al actual, a pesar de que el forzamiento solar en esos tres años sea idéntico. Las causas internas de la variabilidad climática se asocian a la multitud de realimentaciones e interacciones entre los componentes del sistema, que generan inestabilidades u oscilaciones en su estado.

## El problema del cambio climático

Uno de los aspectos claves del cambio climático actual y futuro es el de la atribución, que 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 unos 0.8 C desde finales del siglo XIX. 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 36%, fundamentalmente a causa de actividades humanas. 3) El CO<sub>2</sub> es un gas que contribuye significativamente al efecto invernadero. 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 extremada 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 de mayor magnitud. Esto se debe a que cualquier alteración inicial tendería a amplificarse o a disiparse según fuera el resultado conjunto de los numerosos y complejos mecanismos de realimentación que se activarían 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 debido a la acumulación de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Para abordar adecuadamente este problema clave se utilizan los modelos climáticos.

## Los modelos climáticos y su aplicación

La mejor herramienta de que se dispone para el estudio de este complejo sistema son los modelos climáticos, capaces de reproducir aceptablemente los principales procesos que determinan el clima terrestre. No consisten en analogías estadísticas con situaciones del pasado, ni en extrapolaciones hacia el futuro de tendencias observadas. Estos modelos matemáticos resuelven numéricamente el conjunto de ecuaciones matemáticas que expresan las leyes y principios físicos que gobiernan la dinámica de los procesos fundamentales que tienen lugar en cada componente del sistema climático, así como los intercambios de energía y masa entre ellos. En la actualidad existen varias decenas de modelos climáticos desarrollados en diversos centros de investigación, merced a un extraordinario esfuerzo en el que han colaborado directa o indirectamente miles de científicos a lo largo de las últimas décadas.

Con los modelos se simula la evolución de las condiciones climáticas observadas a lo largo de un extenso periodo de tiempo (generalmente los últimos 150 años), teniendo en cuenta la variación observada de la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero y de aerosoles. Los resultados obtenidos se comparan con los registros climáticos disponibles en dicho periodo, para evaluar la calidad de los modelos. Por otra parte, los modelos permiten realizar simulaciones sobre como hubiera sido la evolución del calentamiento global en caso de que no se hubiera producido el constatado incremento de gases invernadero. Esto ha permitido comprobar que sin dicha acumulación no se hubiera producido el calentamiento observado, lo que lleva a que el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) concluya aseverando que “... *la mayor parte del calentamiento observado en los últimos 50 años es atribuible a actividades humanas*”.

Una vez comprobado que el modelo es capaz de reproducir adecuadamente el clima “actual”, se continúa la simulación hasta el final del presente siglo, considerando estimaciones de los futuros incrementos de gases invernadero y aerosoles. Y, finalmente, se comparan las estadísticas de los valores simulados en un periodo de referencia del pasado reciente (“clima actual”) con las de un periodo de igual extensión correspondiente al clima futuro, deduciéndose así los escenarios de cambio climático en dicha época.

Por tanto, resulta para ello necesario cuantificar las posibles futuras emisiones antropogénicas. En el 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.

## Las proyecciones de cambio climático

Para cualquiera de los escenarios de emisiones considerados se proyecta un calentamiento global de alrededor de 0.4 C en las siguientes dos décadas. Esto se debe esencialmente a que la mayor parte de dicho calentamiento está ya determinado por el volumen de gases de efecto invernadero emitidos hasta el presente. A lo largo de las décadas posteriores el calentamiento será más o menos acelerado en función del ritmo al que se incrementen las emisiones por actividades humanas. Así, en la última década del siglo el incremento más probable de la temperatura media global estaría entre 1.1 C y 2.9 C en el escenario de emisiones más bajo (B1), mientras que llegaría a situarse entre 2.4 C y 6.4 C en el escenario de emisiones más altas (A1FI). Dicho calentamiento daría lugar también a una subida del nivel medio de los océanos de 0.18-0.38 m en el escenario más bajo (B1) y de 0.26-0.59 en el más alto (A1FI).

La distribución planetaria del calentamiento futuro se asemejará muy probablemente a la de la tendencia observada en las últimas décadas, es decir será máximo sobre las regiones continentales situadas más al norte y mínimo sobre los océanos del hemisferio sur y ciertas regiones del Atlántico norte. Por lo que respecta a las precipitaciones, aumentarán muy probablemente en las latitudes altas y decrecerán en la mayor parte de las regiones subtropicales, de forma semejante a los patrones de las tendencias recientes.

Por otra parte, se espera que también experimenten cambios a lo largo del siglo la frecuencia e intensidad de los eventos climáticos extremos. Así, es muy probable que en muchas regiones se incremente el riesgo de ocurrencia de olas de calor más intensas, frecuentes y duraderas, al tiempo que las heladas disminuyan significativamente. También, en la mayor parte de las zonas de latitudes medias y altas del hemisferio norte se proyecta un incremento de los veranos secos y de los inviernos húmedos. Los extremos húmedos serán probablemente más intensos en muchas áreas donde se espera incremento de la precipitación media y los extremos secos serán más severos donde se proyectan disminuciones de precipitación media. Asimismo, algunos estudios apuntan a que los ciclones tropicales tenderán a ser más severos, aunque posiblemente menos numerosos.

Mediante la aplicación de un conjunto de modelos climáticos globales y regionales se han deducido las siguientes proyecciones de cambio climático en la Península Ibérica:

- Es *virtualmente cierto* que a lo largo del presente siglo en todas las regiones se experimentará una tendencia creciente de la temperatura media anual. En el último tercio de siglo el aumento medio anual respecto al periodo 1961-90 podría ser de entre 2 C y 3.5 C en el escenario de emisiones más bajas (B1) y de entre 4 y 6.5 C en el de emisiones más altas (A1FI). En las regiones del interior peninsular las tasas de calentamiento serían aproximadamente un 25% más altas que en las de la periferia o en las insulares.
- En todas las regiones es *muy probable* que se incremente más la temperatura media de verano que la de invierno, con respecto al clima actual. El mayor aumento térmico en verano ocurriría en las regiones del interior y el menor calentamiento en invierno correspondería a las regiones del norte y noroeste..
- Es *probable* que los promedios de temperaturas máximas diarias aumenten más que los de temperaturas mínimas, es decir que se incremente el rango térmico diario, más acusadamente en las regiones del interior.
- Es *muy probable* que la precipitación total anual tienda a disminuir en general, pero la magnitud de la reducción depende de la región y del escenario de emisiones considerado. Las más acusadas se producirían en el tercio sur y las menos en el cuadrante noroeste.
- La mayor reducción de las precipitaciones tendería a producirse *muy probablemente* en primavera-verano. En el periodo estival, la disminución proyectada para el último tercio de

siglo sería bastante uniforme en todas las regiones.

- Es *muy probable* que se experimente un aumento generalizado de la frecuencia de días extremadamente calurosos en la época de verano (Junio-Septiembre), pudiendo llegar a ser de 3 a 10 veces superior al actual en el último tercio de siglo, dependiendo del escenario de emisiones y de las regiones que se consideren. El mayor incremento correspondería al centro y sur de la Península (6 a 10 veces) y el menor al norte y noroeste (3 a 5 veces).

- En la mayoría de regiones es *probable* que en el último tercio de siglo haya una reducción del número total de días en el año con precipitación extrema respecto al clima actual, aunque la desagregación estacional por regiones presenta más incertidumbre.

El uso de los términos “*virtualmente cierto*”, “*muy probable*”, “*probable*” en las anteriores proyecciones de cambio climático viene determinado por el grado de incertidumbre que se asigne a cada una. Dicha valoración se deduce objetivamente en función de la mayor o menor coincidencia entre los valores de los cambios calculados por el conjunto de los modelos climáticos utilizados.

## Las estrategias de mitigación

Es indudable que la magnitud del cambio climático proyectado a lo largo de este siglo por los modelos en muchas regiones del planeta acabará por provocar unos impactos que tendrán repercusiones ambientales, económicas y sociales. La evaluación de tales impactos permitiría considerar posibles medidas de adaptación al cambio climático proyectado en una determinada región, así como una cuantificación en términos económicos del coste ligado a su adopción frente a las pérdidas que acarrearía la inacción. Esta es una de las estrategias que cabría establecer para minimizar las consecuencias del cambio climático a escala regional o local. La otra estrategia se enfoca a tratar de evitar en lo posible que la magnitud del futuro cambio climático global sobrepase un cierto umbral, es decir a mitigar dicho cambio a escala planetaria. El primer intento de estrategia global de mitigación fue el protocolo de Kioto, en el que los países firmantes se comprometían a limitar o reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en unos determinados valores. El objetivo primordial de la estrategia de mitigación adoptada en el Convenio Marco de la Convención sobre Cambio Climático de Naciones Unidas (UNFCCC) es conseguir que las concentraciones medias de gases invernadero en la atmósfera se establezcan en “... un nivel que prevenga de una interferencia peligrosa con el sistema climático”.

La cuestión entonces es determinar qué magnitud del futuro cambio climático provocaría dicha *peligrosa interferencia*. Es decir, establecer el valor del incremento global de la temperatura que no se debería sobrepasar. A este fin, por ejemplo, la Unión Europea ha propuesto que el nivel de calentamiento global futuro no sobrepase 2 C respecto a la temperatura media de la era preindustrial (siglo XIX). Pero establecer un umbral de calentamiento global incluye mayor incertidumbre que fijar un nivel de estabilización en la concentración de gases invernadero. En consecuencia, se ha decidido que la mejor estrategia de mitigación sería establecer cuánto y cuando habría que reducir las emisiones globales para que la concentración de estos gases en la atmósfera se establezca sin sobrepasar un determinado umbral. El problema es que, a consecuencia de la enorme inercia del sistema climático, han de pasar muchos años para que una reducción en las emisiones de algunos gases invernadero se traduzca en una disminución de su concentración media en el aire. Por eso, el IPCC ha establecido una serie de “*trayectorias*” de escenarios de mitigación en función de una serie de categorías de objetivos de estabilización de concentraciones, acompañando a cada una el riesgo de sobrepasar determinados valores de calentamiento global.