

***Generación de  
Escenarios  
Climáticos para  
Evaluación de  
Impactos***

---

*fundación para la investigación del clima  
abril de 2005*

## **índice**

<b><i>el cambio climático: una amenaza a la que se presta cada vez más atención</i></b>	<b>2</b>
<b><i>los modelos de circulación general: una herramienta indispensable</i></b>	<b>3</b>
<b><i>las limitaciones de los modelos de circulación general</i></b>	<b>3</b>
<b><i>la necesidad del "downscaling"</i></b>	<b>5</b>
<b><i>estrategias posibles de "downscaling"</i></b>	<b>5</b>
<b><i>la unión europea: líder en la investigación del cambio climático</i></b>	<b>6</b>
<b><i>la fundación para la investigación del clima ("fic")</i></b>	<b>7</b>
<b><i>la metodología de "downscaling" de la "fic" destaca en el proyecto "stardex"</i></b>	<b>7</b>
<b><i>la "fic" también participa en el proyecto "ensembles"</i></b>	<b>7</b>
<b><i>una tarea pendiente: la generación de escenarios útiles para impactos</i></b>	<b>8</b>
<b><i>la aplicación de los escenarios para evaluar impactos: requerimientos</i></b>	<b>8</b>

## ***el cambio climático: una amenaza a la que se presta cada vez más atención***

En los últimos años, la comunidad científica internacional, ha advertido sobre el elevado riesgo de que el sistema climático pueda modificar severamente su comportamiento actual. Este cambio vendría provocado por modificaciones en los forzamientos radiativos sobre el sistema, debidas a alteraciones, principalmente antropogénicas, de las concentraciones en la atmósfera de los denominados "gases invernadero" y aerosoles. Los cambios en el sistema climático, de producirse en la magnitud prevista, alterarán fuertemente el funcionamiento de los sistemas naturales y sociales.

La sociedad en general es cada vez más sensible a este "cambio climático", y cada vez demanda con mayor intensidad, información y la adopción de medidas contra el mismo. La creciente preocupación por sus consecuencias hace que haya una también creciente disposición para destinar recursos a la investigación y a la prevención de este cambio y sus efectos. Consecuencia de ello es la adopción de acuerdos y protocolos internacionales focalizados en el cambio climático, como el Protocolo de Kyoto.

A nivel nacional, esta preocupación también se ha traducido en la definición de estrategias ante el cambio climático, tanto a nivel nacional como autonómico. Una muestra de este renovado interés es la creación de la Oficina Española de Cambio Climático, y el fomento de la investigación, mediante la inclusión de apartados específicos para proyectos en este ámbito, prioritario dentro de la I+D+i, tanto a nivel nacional como de Comunidades Autónomas.

La opinión pública, los políticos y los planificadores requieren previsiones de los impactos ecológicos, sociales y económicos de este cambio, para poder articular respuestas mitigadoras o de adaptación a los mismos. Los equipos de investigación que trabajan en la predicción de dichos impactos, precisan de simulaciones de variables meteorológicas que reflejen el futuro climático previsto. Estas simulaciones se denominan escenarios climáticos, y para que resulten de utilidad en la evaluación de impactos, tienen que tener unas especiales características (variables contempladas, resolución espacial y temporal, coherencia espacial, etc...).

La finalidad de este proyecto es obtener y difundir escenarios climáticos para el siglo XXI, con los requerimientos necesarios para hacerlos utilizables en la modelización de impactos del cambio climático sobre múltiples sistemas: recursos hídricos, agricultura, demanda energética, salud, ecosistemas, turismo...

Este objetivo responde específicamente a la prioridad 11, "Obtención de escenarios para la evaluación de impactos y riesgos climáticos" del Programa Nacional de Biodiversidad, Ciencias de la Tierra y Cambio Global, Subprograma Nacional de Atmósfera, Clima y Cambio Climático, dentro del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica.

## **los modelos de circulación general: una herramienta indispensable**

La principal herramienta para la prospección del clima de las próximas décadas son los denominados Modelos de Circulación General (MCGs). Se trata de Modelos de Predicción Numérica del Clima, que simulan flujos de energía, masa y cantidad de movimiento entre los puntos de una retícula tridimensional (figura 1) que se extiende por la Atmósfera, los Océanos y las capas superiores de la Litosfera y la Criosfera. Mediante la integración temporal de estos flujos, se obtienen simulaciones de la evolución futura de los estados atmosféricos.

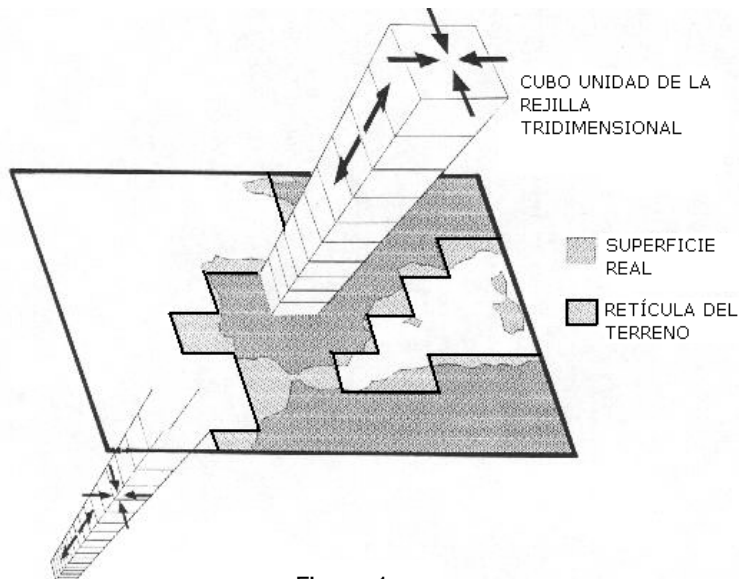


Figura 1.

Los MCGs más avanzados inician sus simulaciones en los comienzos del siglo XIX con los forzamientos radiativos de la era preindustrial. En la integración temporal se van modificando dichos forzamientos de acuerdo con los registros o estimas de las concentraciones históricas de gases invernadero y aerosoles. Cuando la integración alcanza el momento actual y se interna en el futuro, las concentraciones de estos agentes se estiman en función de las previsiones de la actividad humana (desarrollo económico, políticas energéticas y forestales...).

Estos MCGs muestran, en las integraciones con forzamientos radiativos observados (simulaciones del clima del siglo XX), una capacidad notable para reproducir las principales características de la circulación general atmosférica, como células de Hadley, cinturones extratropicales de borrascas... Sin embargo, cuando se analizan sus resultados a más pequeña escala, por ejemplo tomando solamente unos pocos puntos de su rejilla de trabajo (escala regional), su funcionamiento no se aproxima en general al observado en la realidad, al menos para variables de superficie.

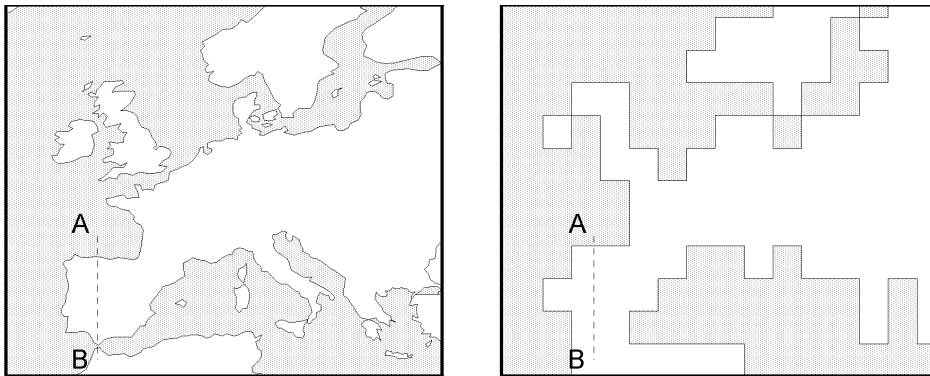
Existen varias razones para explicar estas limitaciones, todas ellas derivadas de la insuficiente resolución espacial de estos modelos, que actualmente es de unos 2° o 3° de latitud/longitud:

- Insuficientemente detallada descripción de la topografía (cordilleras, líneas de costa, etc.), y por tanto, de los forzamientos que ésta misma ejerce sobre el clima, de extraordinaria importancia a escala regional.

## **las limitaciones de los modelos de circulación general**

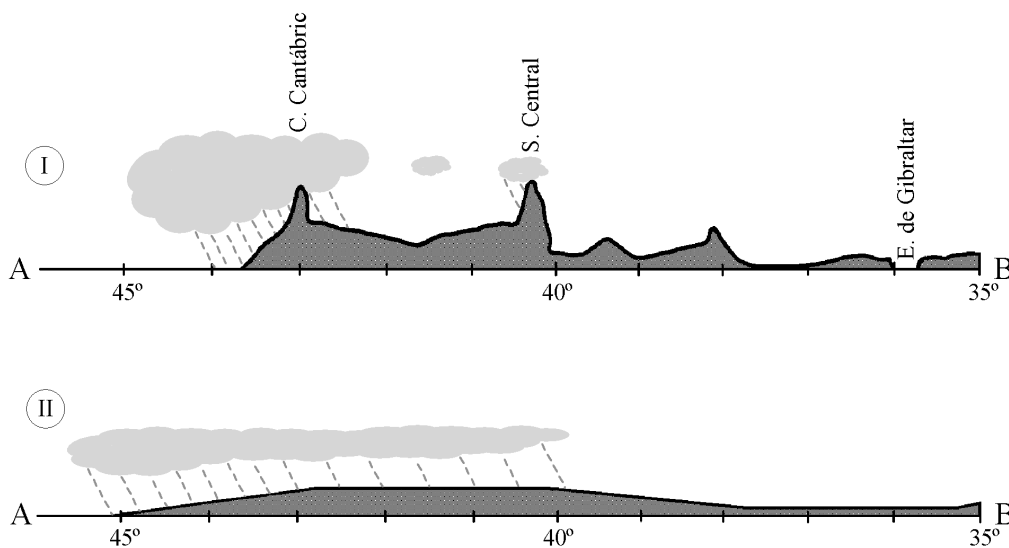
- Los procesos sub-grid (de escala espacial inferior a una cuadrícula, por ej. el fenómeno físico de la formación de precipitación a partir de vapor de agua dentro de una nube) en los MCGs están parametrizados. Estas parametrizaciones se han ajustado estadísticamente en todo el planeta y pueden ser ineficientes en regiones concretas.
- La parametrización del flujo de energía desde las escalas sinópticas (del orden de  $10^6$  km<sup>2</sup>), hacia las escalas sub-grid, afecta más fuertemente a la fiabilidad de las menores escalas resueltas.

La figura 2 ilustra la primera de las razones expuestas. La rejilla de cálculo de estos modelos es del orden de 200 / 400 Km. El aspecto de la Península Ibérica está drásticamente simplificado: unas pocas cuadrículas que hacen de puente entre Europa y África; el Estrecho de Gibraltar y los sistemas montañosos desaparecen, como puede verse en los perfiles transversales del terreno (figura 3).



Distribución tierra mar en la realidad, y en la retícula de un Modelo de circulación General. La línea de puntos indica el corte transversal A-B que se representa en la figura 3.

Figura 2.



Perfiles transversales de España siguiendo la dirección norte-sur representada en la figura 2. La compleja topografía de la Península (perfil I), condiciona fuertemente el clima. Se representa el reparto de precipitación asociado a vientos del noroeste. El efecto de la topografía desaparece drásticamente en el esquema del Modelo de Circulación General (perfil II).

Figura 3.

Estas simplificaciones, entre otras, incapacitan a los MCGs para reproducir el complejo entramado climático de un país de topografía tan irregular como España. Por poner un ejemplo, los frecuentes vientos húmedos del Noroeste que afectan a la Península, se encuentran en su trayecto con la Cordillera Cantábrica. Estos vientos, al ascender por la cara Norte (figura 3), descargan en ella sus precipitaciones, de forma que, al descender por la cara sur y alcanzar Castilla, se encuentran secos o con muy poca capacidad de generar lluvias. A la larga, este efecto de la cordillera justifica la existencia de una Castilla seca, y una vertiente Cantábrica lluviosa. En un MCG típico no existe la cordillera Cantábrica y no se reproducirá, por tanto, su efecto.

Una pregunta inmediata puede ser: ¿por qué los MCGs no trabajan con una rejilla lo suficientemente fina como para poder representar las montañas Cantábricas? Tal rejilla debería tener un punto cada 10 o 15 Km. Con ello, el volumen de cálculo a realizar por el MCG se multiplicaría algunos miles de veces. Considerando que para predecir un período de cien años un superordenador necesita actualmente varias semanas, si se aumenta su resolución, el tiempo requerido para integrar el modelo sería de varias décadas, con lo que las predicciones serían inabordables e inútiles.

Por otro lado, en la mayor parte de los estudios de evaluación de impactos se requieren escenarios climáticos con resolución local, y además de variables cercanas a la superficie (temperatura a 2 m, precipitación...). En general no resulta suficiente disponer de valores climáticos medios para las cuadrículas del MCG, ya que abarcan superficies excesivas (figura 3), con gran variabilidad interna. Se necesita información con mucha mayor resolución, para comarcas, valles, montes, y hasta para puntos concretos.

Se hace por tanto necesario extraer de la información más fiable aportada por las simulaciones de los MCGs (información de baja resolución, en general de atmósfera libre) la información requerida por los modelos de impacto (información de alta resolución -local-, en superficie). Este proceso se denomina "downscaling".

La bibliografía destaca dos posibles aproximaciones al problema:

- 1) Aproximaciones estadísticas ("**downscaling**" **estadístico**): Se definen relaciones estadísticas entre variables de baja resolución, y variables de alta resolución (casi siempre efectos en superficie). Esas relaciones se aplican a los campos de baja resolución simulados por los MCGs para obtener los escenarios.
- 2) Aproximaciones por modelización dinámica ("**downscaling**" **dinámico**): Se trata incrementar la resolución del modelo sobre el territorio de interés, bien mediante una técnica de "zoom" de la propia rejilla del MCG, bien mediante el anidamiento de un Modelo Regional de Clima (MRC), en las condiciones de contorno suministradas por el MCG.

Ambas aproximaciones tienen limitaciones, pero en el momento presente permiten aportar una valiosa información.

## ***la necesidad del "downscaling"***

## ***estrategias posibles de "downscaling"***

## **la unión europea: líder en la investigación del cambio climático**

Entre las simulaciones de MCGs más avanzadas en la comunidad científica internacional, destacan las del Centro Hadley en Inglaterra, y las del Max Planck Institute en Alemania, con sus respectivos MCGs: HadAM3 y ECHAM4/OPYC5. Ambos centros han realizado simulaciones recientes con diversos futuros de forzamiento radiativo y partiendo de condiciones iniciales diversas (simulaciones en "ensemble").

En el campo del "downscaling" Europa también es puntera a nivel mundial, con numerosos grupos de investigación. Aunque el objetivo final de estos grupos es la generación de escenarios de clima para el siglo XXI, que satisfagan los requisitos de los evaluadores de impactos, la mayoría de sus esfuerzos se centran ahora en la fase (previa) de perfeccionamiento de las metodologías de "downscaling", debido a las limitaciones que presentan todavía estas tecnologías.

Muchos de estos equipos de trabajo se han agrupado en tres grandes proyectos de investigación financiados por la Comisión Europea dentro del V Programa Marco (para más información, consultar <http://www.cru.uea.ac.uk/projects/mps/>): PRUDENCE (Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects), MICE (Modelling the Impact of Climate Extremes) y STARDEX (STATistical and Regional Dynamical downscaling of EXTremes for European regions).

Este último coordina el esfuerzo de 12 centros de investigación de 8 países europeos, con la finalidad de determinar las tecnologías de "downscaling" más robustas (estadísticas o dinámicas) y aplicarlas para obtener escenarios del clima del siglo XXI en diversas regiones de Europa, con especial énfasis en la adecuada simulación de fenómenos extremos.

Estos tres proyectos comenzaron hacia 2002 y están finalizando entre 2004 y 2005.

Si el pasado reciente de la investigación europea en "downscaling" se centra en el *cluster* de proyectos compuesto por PRUDENCE, MICE y STARDEX, el presente y el futuro próximo estará protagonizado por el proyecto del VI Programa Marco denominado ENSEMBLES (Ensemble-based Predictions of Climate Changes and their Impacts, <http://www.ensembles-eu.org/>). Es un Proyecto Integrado de gran dimensión, con 70 entidades participantes.

Su objetivo principal es generar un sistema probabilístico de predicción estacional y climática, que permita la cuantificación de las incertidumbres asociadas a la evolución del clima. El proyecto se basa en la filosofía denominada "Ensemble", que pretende cuantificar la incertidumbre asociada a la propia variabilidad interna del sistema climático, trabajando con diversas integraciones temporales del mismo MCG con el mismo forzamiento, pero variando las condiciones iniciales de cada integración. ENSEMBLES contempla tanto la generación de simulaciones "ensemble" de diversos MCGs, como la adaptación y aplicación a esas simulaciones de técnicas de "downscaling".

ENSEMBLES se ha iniciado en septiembre de 2004 y su duración será de 5 años.

La Fundación para la Investigación del Clima (FIC) es una entidad privada sin ánimo de lucro, cuyos objetivos fundacionales se centran en la investigación en el ámbito del cambio climático, así como en las áreas de climatología, meteorología y medio ambiente.

## ***la fundación para la investigación del clima ("fic")***

El equipo de la FIC comenzó sus investigaciones sobre cambio climático en 1992, participando en proyectos coordinados por el Instituto Nacional de Meteorología (INM), el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y el Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA). En el seno de esos proyectos, el equipo investigador de la FIC desarrolló una metodología de "downscaling" estadístico que ya desde el principio pasaba por ser una de las más avanzadas del mundo. Los excelentes resultados obtenidos fueron presentados entre 1996 y 1998 en los principales foros internacionales especializados en la materia, alcanzando un reconocimiento que hizo que la FIC fuera invitada a colaborar con importantes grupos europeos de investigación en "downscaling".

Estas invitaciones cristalizan en la participación de la FIC en el proyecto STARDEX, siendo su cometido en él quizás el más ambicioso de todos los grupos, ya que consiste en la obtención de escenarios climáticos de fenómenos meteorológicos extremos para 500 localidades de toda Europa (los demás integrantes generan escenarios de áreas concretas del continente, o/y limitados a la variable precipitación).

En octubre de 2004 se han dado a conocer los resultados de la intercomparación de las metodologías de los 12 grupos de investigación que participan en STARDEX. Las conclusiones son excelentes para la FIC: su metodología es la que mejores prestaciones ofrece entre las que se han aplicado a toda Europa. Destaca especialmente en temperatura, variable en la que bate incluso a los métodos especialmente adaptados a subregiones. En precipitación, también es la de mejores prestaciones a escala Europea, aunque algunos métodos específicamente adaptados a subregiones han mostrado resultados en ocasiones mejores para esa región en concreto. Como consecuencia, la metodología de la FIC será seleccionada como la de referencia para temperatura, y, junto a otras, entre las más robustas para precipitación.

## ***la metodología de "downscaling" de la "fic" destaca en el proyecto "stardex"***

En la actualidad, STARDEX se centra en la aplicación de las metodologías más robustas a las simulaciones de GCMs, para generar escenarios climáticos. La metodología de la FIC se está aplicando para la obtención de escenarios de fenómenos extremos de precipitación y temperatura en 500 localidades europeas.

Como consecuencia de estos excelentes resultados en STARDEX, la FIC también ha sido invitada a participar en el proyecto ENSEMBLES. Esta participación da continuidad y consolida el equipo investigador de la FIC en cambio climático, y permitirá incrementar las prestaciones de la metodología, buscando cuantificar la incertidumbre asociada a toda simulación climática.

## ***la "fic" también participa en el proyecto "ensembles"***

La participación de la FIC en ENSEMBLES comenzará en 2006, una vez se hayan generado las simulaciones "ensemble" de los MCGs.

El proyecto STARDEX se ha centrado en la mejora de las diferentes metodologías existentes, y en la selección de las más robustas. Sólo al final del proyecto se van a aplicar las metodologías seleccionadas para generar escenarios. Pero sólo para 500 localidades europeas (35 españolas). Además, las características de los escenarios que se generarán (variables, resolución temporal y espacial...) no han sido consensuadas con los usuarios de los mismos (evaluadores de impactos en ecosistemas, turismo...).

En definitiva, STARDEX ha tenido una carga más teórica que práctica. Se requiere ahora cambiar el enfoque para dotar de una utilidad práctica a los resultados de las investigaciones. Esta utilidad práctica ha sido desde el principio el fin, y a la vez la justificación, de todos los desarrollos teóricos realizados.

ESEMBLES sí está diseñado con una clara vocación práctica. Sin embargo, los primeros resultados de este proyecto, que acaba de comenzar, no estarán disponibles hasta dentro de algunos años.

Por tanto, una vez ajustada con éxito la metodología para optimizar sus prestaciones, logrando hacer de ella una de las herramientas de "downscaling" estadístico más potentes, ha llegado el momento de iniciar nuevas líneas de trabajo, enfocadas en la aplicación de dicha herramienta para generar escenarios climáticos útiles para la evaluación de impactos del cambio. En definitiva, se trata de pasar de la teoría a la práctica, de la investigación a la aplicación.

Los escenarios, para ser utilizados en la evaluación de los impactos del cambio climático en las diferentes áreas, deben cumplir con los requerimientos de sus usuarios. Los investigadores especializados en esta evaluación disponen de modelos que permiten estimar parámetros de interés para su área de especialización, a partir de información de variables, entre otras, climáticas.

Por ejemplo, existen modelos que pueden estimar la producción de cierto cultivo, que utilizan como información de entrada, entre otra, la climatológica. Aplicando estos modelos a los escenarios climáticos, se pueden obtener estimas de las producciones futuras, y por tanto del impacto del cambio climático sobre ese cultivo.

Pero cada modelo tiene sus propios requerimientos sobre:

- Las variables que utiliza: en función de la actividad, pueden requerir unas variables climatológicas u otras: temperatura, precipitación, humedad, viento, radiación solar...
- La resolución espacial: en general, se requiere información a escala local, del punto concreto en el que se desarrolla la actividad. Pero en ocasiones usan información relativa a superficies, más que puntual. Por ejemplo, la precipitación en toda la cuenca de cabecera de determinado curso fluvial.
- La resolución temporal de la información: algunos modelos requieren valores medios mensuales (p.ej. temperatura media mensual), otros trabajan con resolución diaria (p.ej. precipitación acumulada en 24 horas), etc.

***una tarea pendiente:  
la generación de  
escenarios útiles  
para impactos***

***la aplicación de los  
escenarios para  
evaluar impactos:  
requerimientos***