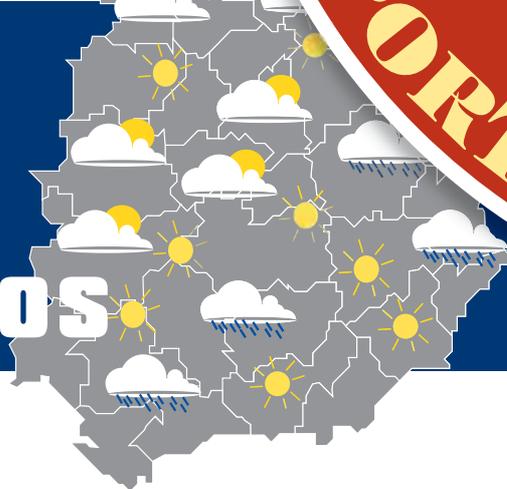


ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO REGIONALIZADOS

E. Rodríguez Camino
INM



El rango de posibilidades de la futura evolución del clima tiene ineludiblemente que ser considerado cuando se realizan estudios de impacto y se planifican estrategias de adaptación y mitigación al cambio climático. La necesidad de disponer de proyecciones climáticas robustas plantea el problema de estimar una descripción, no

solamente cualitativa sino también cuantitativa, de los cambios que se esperan en el clima durante el siglo XXI en las escalas espaciales y temporales más finas posibles. Además, tan importante como describir tales cambios, es acotar y evaluar las incertidumbres asociadas con ellos. Finalmente, debe tenerse siempre presente que las proyecciones de la evolución del clima lógicamente dependerán también de la incierta evolución de las actividades humanas que afectan al mismo.

PREDICCIONES, PROYECCIONES, ESCENARIOS

El término predicción se suele emplear referido a la evolución determinista del estado futuro de la atmósfera una vez conocidas las condiciones iniciales. Como la atmósfera es un sistema caótico, cuya evolución depende críticamente de las condiciones iniciales, existe un límite a las predicciones deterministas que normalmente se fija en alrededor de dos semanas. Las predicciones del estado de la atmósfera en el corto plazo (hasta 2-3 días) se realizan con modelos numéricos basados en la discretización de las ecuaciones termo-hidrodinámicas de la atmósfera en los que un componente esencial es la asimilación de las observaciones disponibles para fijar las condiciones iniciales del estado de la atmósfera. Si se extiende la predicción determinista hasta el medio plazo (4-10 días), la calidad de las predicciones cae drásticamente y, con frecuencia, pasada una semana, las predicciones apenas son solamente orientativas del estado futuro atmosférico. Mientras que en el corto plazo las predicciones son

esencialmente deterministas, es decir constituyen un problema de valores iniciales, en plazos más largos el comportamiento caótico de la atmósfera hace que sea necesario ensayar las predicciones de tipo probabilístico basadas en multitud de realizaciones de la predicción determinista, es la denominada predicción por conjuntos o mediante poblaciones (*ensemble prediction*). Las diferentes realizaciones de la predicción determinista se pueden obtener variando ligeramente las condiciones iniciales dentro del rango del error de observación, utilizando diferentes modelos numéricos o bien incluyendo términos estocásticos en las ecuaciones.

En los plazos temporales más largos, correspon-

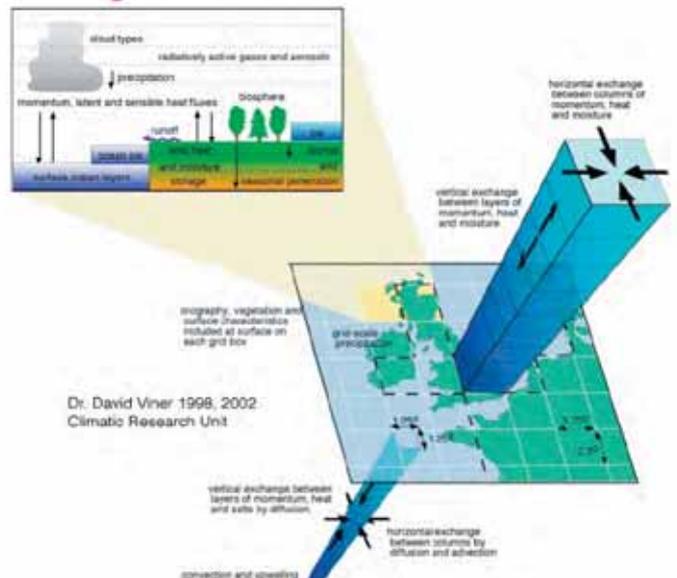
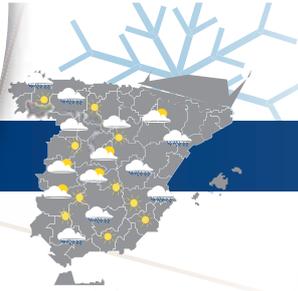


Fig. 1. - Los modelos de circulación general acoplados de atmósfera y océano en la discretización de las ecuaciones termo-hidrodinámicas de la atmósfera y océano. La figura representa los intercambios verticales y horizontales (de momento, calor y humedad) en la atmósfera y (de momento, calor y salinidad) en el océano. También se representan las características fisiográficas de la superficie terrestre y la parametrización de los procesos subrejilla (fuente: D. Viner, Climatic Research Unit, 2000).



dientes a las predicciones estacionales, anuales, decadales o seculares ya carece de sentido la predicción determinista de la componente atmosférica. En este caso la predecibilidad viene asociada a los componentes del sistema climático que evolucionan más lentamente, como es el caso de los océanos, los hielos marinos, etc. La atmósfera hereda una predecibilidad solamente referida a sus valores promedio, es decir a su climatología. En el caso de predicciones seculares, que es el caso que nos ocupa, hay un elemento adicional de incertidumbre que es la composición atmosférica futura consecuencia de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI) y de aerosoles sulfurosos. Para que quede patente el carácter no determinista de las predicciones seculares y por el hecho de que las predicciones están fuertemente condicionadas por elementos adicionales de incertidumbre asociados al desarrollo socio-económico, es más razonable hablar de proyecciones climáticas. La principal herramienta generalmente admitida para realizar dichas proyecciones son los modelos de circulación general acoplados de atmósfera y océano (AOGCM, del inglés *Atmosphere-Ocean General Circulation Models*). Existen en la actualidad unas pocas decenas de modelos AOGCM (IPCC, 2001) que se utilizan para cuantificar la respuesta del sistema climático a la perturbación de las actividades

Fig.2. - Componentes del sistema climático que se han ido añadiendo en la formulación de los AOGCMs, desde los modelos puramente atmosféricos que se utilizaban en los años 70 a los de última generación que constan de ocho componentes fuertemente acoplados entre sí (fuente: IPCC, 2001).

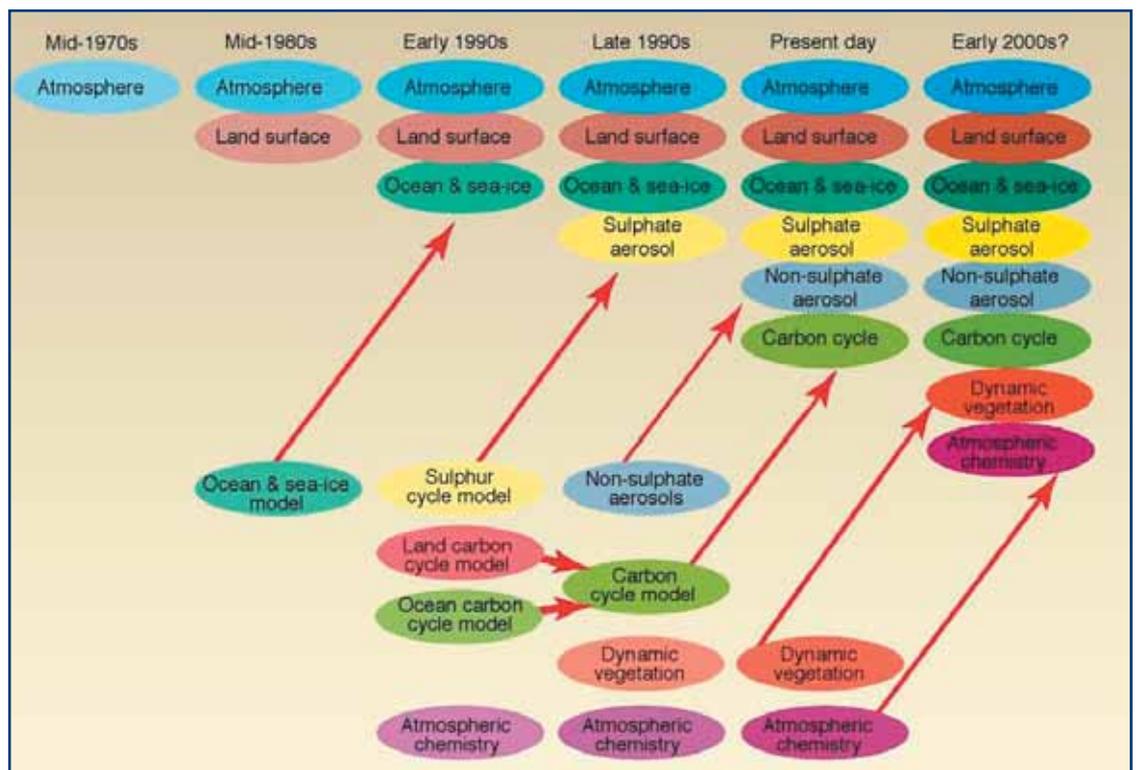
humanas y a los forzamientos de origen natural (véanse las figs.1 y 2, que incluyen las principales componentes de un AOGCM).

Los escenarios climáticos son "representaciones plausibles del futuro que son consistentes con las suposiciones de futuras emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y de otros contaminantes y con nuestra comprensión del aumento en la concentración atmosférica de tales gases en el cambio global" (IPCC-TGCIA, 1999). Se utilizan habitualmente un rango de escenarios para identificar la sensibilidad del sistema climático al cambio y para suministrar una herramienta útil a la hora de plantear estrategias de respuesta. El esquema de la fig.3 ilustra los principales elementos que se tienen en cuenta para los escenarios de emisiones. Un escenario climático es una indicación plausible de cómo puede ser el futuro climático en los próximos decenios o siglos, fijado un conjunto específico de suposiciones entorno a las actividades humanas que afectan al mismo, tales como demanda energética, emisiones de gases de efecto invernadero, cambios de uso de suelo, etc. La incertidumbre que rodea a estas suposiciones determina el rango de los posibles escenarios.

REGIONALIZACIÓN DE LAS PROYECCIONES CON MODELOS GLOBALES

Las proyecciones climáticas realizadas con modelos globales para escenarios de emisión alternativos carecen de la suficiente resolución espacial y temporal que demandan la mayoría de los usuarios para los estudios de impacto y adaptación frente al cambio climático. Para adaptar las proyecciones globales, con resoluciones espaciales del orden de 200-300 km, a las características regionales o incluso locales se utilizan diferentes técnicas de regionalización o reducción de escala (*downscaling*) que adaptan las salidas de los modelos globales a las características fisiográficas de una determinada región, vistas con una resolución apta para ser directamente utilizada por las distintas aplicaciones que tienen como datos de entrada las proyecciones climáticas (bien en rejillas regulares o en las posiciones de los observatorios) (Wilby y Wigley, 1997).

Todas las técnicas de regionalización parten de las proyecciones suministradas por los AOGCMs a los que dotan de detalles de escala más pequeña asociados con información adicional de orografía, fisiografía,



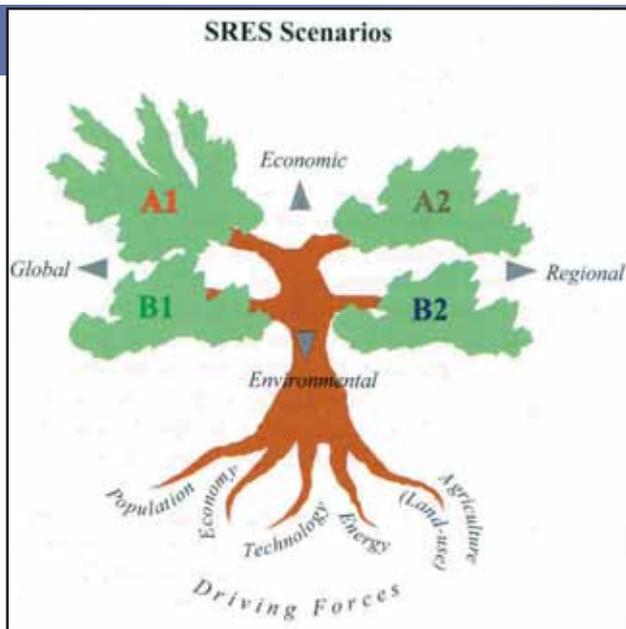


Fig. 3.- Los escenarios de emisión SRES (IPCC Special Report on Emission Scenarios) abarcan el conjunto de las principales fuerzas determinantes: demografía, economía, tecnología, energía, uso del suelo y agricultura. También distinguen entre las soluciones globales o regionales al crecimiento económico y entre políticas que priorizan el medio ambiente o el crecimiento económico (fuente: IPCC, 2000).

etc. En consecuencia, las proyecciones regionalizadas heredan todos los defectos y debilidades de los modelos "padre" globales. Si la proyección suministrada por el modelo global es incorrecta, carece de sentido regionalizarla. Pero, si es acertada -y los modelos globales cada vez dan una visión más consistente del cambio climático- entonces tiene sentido trasladar la información de los patrones globales a información local (Schiermeier, 2004). Esta limitación de las técnicas de regionalización es crucial tenerla siempre presente. La proyección de las grandes escalas la proporcionan los AOGCMs y las técnicas de regionalización se limitan a introducir los detalles en las escalas no resueltas por la rejilla de los modelos globales.

Existen diferentes técnicas que implican un muy distinto nivel de complejidad pero que se pueden agrupar en dos grandes categorías: (i) regionalización dinámica y (ii) regionalización estadística. Todas las técnicas de regionalización son una fuente adicional de incertidumbres que hay que estimar. Ambas técnicas de regionalización se conocen y se han aplicado desde los años 70 y 80 en la predicción numérica del tiempo mediante el uso muy extendido de modelos atmosféricos de área limitada y de técnicas de adaptación estadística basadas en regresiones lineales, tales como el MOS (Model Output Statistics) y el Perfect Prog.

Las técnicas de regionalización dinámica, que se basan en el uso de modelos regionales o de área limitada, tienen la ventaja de ser físicamente consistentes y la clara desventaja de necesitar un gran volumen de cálculo, lo que limita las simulaciones a resoluciones no superiores a los 20 km. Además, el hecho de que las condiciones de contorno no sean un problema matemático bien propuesto (Staniforth, 1997) plantea el problema adicional de que el modelo anidado cambia las escalas grandes suministradas por el modelo global, mostrando una dependencia de los resultados con

la posición y orientación del dominio de integración. Este hecho limita mucho la credibilidad de los resultados. Recientemente von Storch et al (2000) y Miguez-Macho et al (2005) han resuelto este problema ajustando las escalas grandes a las del modelo global que se consideran "verdaderas". Sin embargo esta mejora no se ha introducido en la mayoría de las simulaciones climáticas regionales disponibles hasta la fecha.

Las técnicas de regionalización estadísticas agrupan multitud de algoritmos entre los que se incluyen los métodos de clasificación, los modelos de regresión y los generadores de tiempo (IPCC, 2001). Las técnicas estadísticas se basan en desarrollar relaciones cuantitativas entre variables atmosféricas de gran escala (predictores) y las variables locales de superficie (predictandos), usualmente precipitación, temperatura máxima y mínima. Las técnicas estadísticas son simples y normalmente requieren poco cálculo, aunque se basan en la suposición de que las expresiones que correlacionan los predictores y predictandos son invariables frente al cambio en el clima. Existen multitud de técnicas de tipo estadístico que proporcionan

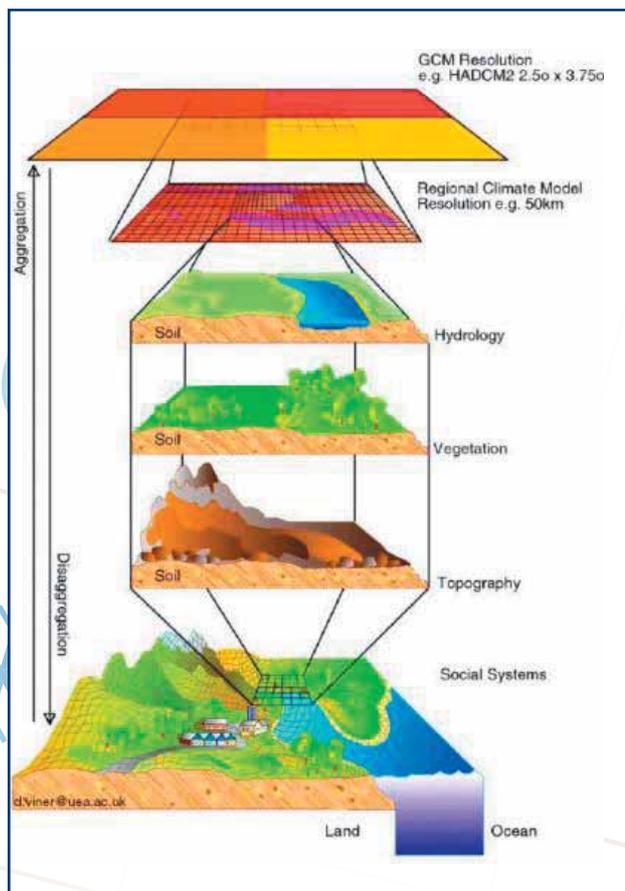


Fig. 4.- Las diferentes técnicas de regionalización o reducción de escala (downscaling) adaptan las salidas de los modelos globales AOGCMs a las características fisiográficas (topografía, vegetación, etc) de una determinada región (fuente: Climate Research Unit, 2000)



resultados claramente diferentes, siendo muy difícil determinar cual posee características superiores a los demás tal y como aparece en las conclusiones del proyecto STARDEX (del 5º programa marco financiado por la UE, 2002 - 2005).

INCERTIDUMBRES

La estimación de escenarios de cambio climático es un problema dominado por las incertidumbres que aparecen en forma de cascada (Mitchell y Hulme, 1999). En el vértice de las incertidumbres se sitúan los escenarios de emisión, que se basan en consideraciones de tipo socio-económico

(véase fig. 3), y los forzamientos externos no predecibles (p.e., actividad volcánica). Sin embargo, las incertidumbres relacionadas con el desarrollo económico, tecnológico y demográfico no son ni mucho menos las únicas o más importantes que limitan la certeza de las proyecciones climáticas.

Existe también incertidumbre en como las emisiones afectan a las concentraciones de gases de efecto invernadero, puesto que no se conoce exactamente el destino de las emisiones o lo que es lo mismo no se conoce plenamente el ciclo del carbono. Las mismas herramien-

tas utilizadas para generar las proyecciones climáticas, es decir los AOGCMs, muestran en su nivel actual de desarrollo también muchas incertidumbres. La figura 5 muestra la gran dispersión que posee la proyección de la precipitación en el área europea para el año 2100 y para el escenario de emisión A2 cuando se utilizan 16 modelos globales diferentes de los utilizados en el IPCC para respuesta del sistema climático a la perturbación de las actividades humanas. Los diferentes AOGCM son distintas realizaciones de las ecuaciones que describen los distintos componentes del sistema climático. Las distintas realizaciones tienen su origen en las distintas mallas, resoluciones, esquemas numéricos, parametrizaciones de procesos físicos, condiciones iniciales, etc. Como se muestra en fig.5, estas distintas realizaciones muestran una gran dispersión y por lo tanto un alto nivel de incertidumbre en el caso particular de la variable precipitación.

Los procesos mismos simulados por los AOGCMs incluyen incertidumbres. De hecho la modelización del sistema climático ha ido añadiendo complejidad y subsistemas adicionales con el paso de los años (véase fig. 2). Por ejemplo, gran parte de las simulaciones realizadas en los últimos años se suponía que la vegetación era constante en el tiempo y permanecía invariable en simulaciones seculares de cambio climático antropogénico. En la realidad, la vegetación lógicamente depende de las

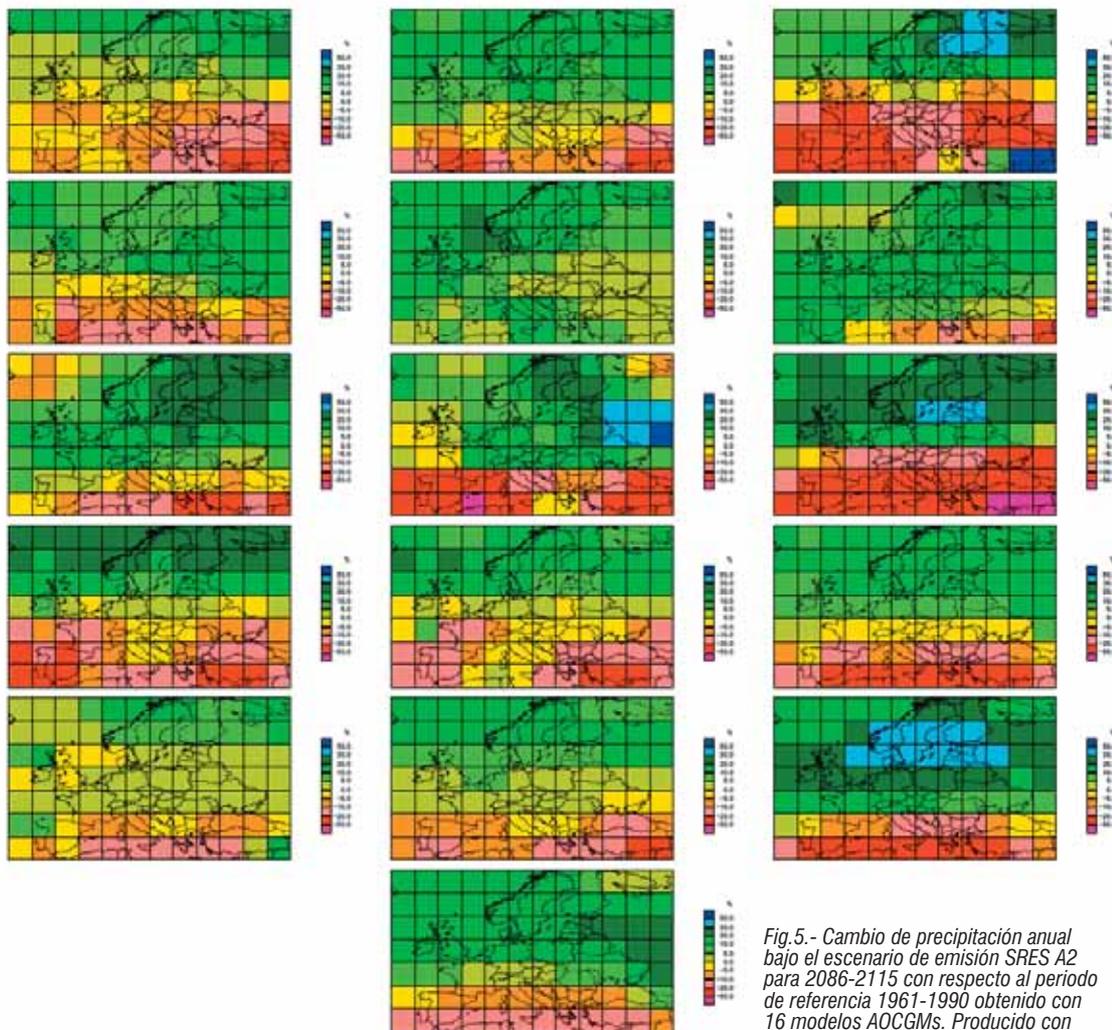


Fig.5.- Cambio de precipitación anual bajo el escenario de emisión SRES A2 para 2086-2115 con respecto al periodo de referencia 1961-1990 obtenido con 16 modelos AOGCMs. Producido con MAGICC-SCENGEN (versión 2.4) con la opción de sensibilidad climática media y los parámetros de MAGICC por defecto que producen un promedio global de incremento de temperatura (incluyendo GEI y SO4) de 3.04 grados centígrados.

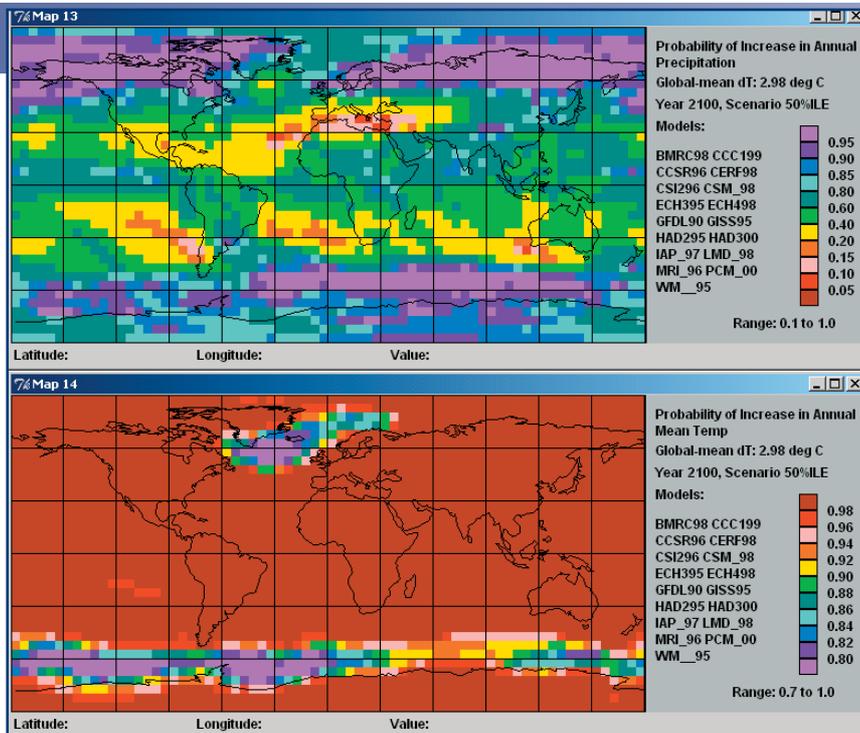


Fig. 6.- Probabilidad de aumento de precipitación (arriba) y temperatura (abajo) media anual obtenida mediante MAGICC-SCENGEN (versión 4.1) promediando 17 AOGCMs y 50 escenarios de emisión

mos frente a un problema en el que predomina la falta de conocimiento y en el que las incertidumbres no nos permiten extraer conclusiones útiles para planificar nuestro futuro. La misma figura 6 nos demuestra que, mientras que las proyecciones de la precipitación sobre algunas regiones muestran un bajo nivel de fiabilidad, las correspondientes predicciones para el incremento de la temperatura media muestran un alto porcentaje de probabilidad y por lo tanto son altamente fiables en la mayoría de las regiones. Tan importante como acotar y horquillar las incertidumbres es determinar la robustez con las que se pueden hacer proyecciones sobre la evolución de diferentes variables, sobre los comportamientos en las diferentes regiones, sobre la evolución de la variabilidad en distintas escalas temporales, etc.

La estimación de escenarios de cambio climático regionalizados es una compleja tarea, que si se quiere complementar con un estudio de la robustez de las proyecciones mismas implica manejar y comparar diversos modelos globales y variedad de técnicas de regionalización. ☞

Referencias

- Miguez-Macho, G., Stenchikov, G.L. and Robock A. 2005. Spectral nudging to eliminate the effects of domain position and geometry in regional climate simulations. Submitted to Journal of Geophysical Research-Atmospheres.
- Mitchell, T. D. and Hulme, M., 1999. Predicting regional climate change: living with uncertainty. Progress in Physical Geography 23(1): 57-78.
- Staniforth, A. 1997. Regional modeling: a theoretical discussion. Meteorol. Atmos. Phys., 63, 15-29
- Schiermeir, Q. 2004. Modellers deplore "short-termism" on climate. Nature, 428, 593.
- Wilby, R.L. and Wigley, T.M.L. 1997. Downscaling General Circulation Model output: a review of methods and limitations. Progress in Physical Geography, 21, 530-548.
- Von Storch, H., H. Langenberg and F. Feser. 2004. A Spectral Nudging Technique for Dynamical Downscaling Purposes. Mon. Wea. Rev. 128, 3664-3673.

condiciones climáticas cambiantes y como tal debe simularse.

Las distintas técnicas de regionalización, tal y como se ha visto en la sección anterior, añaden una incertidumbre adicionales. Finalmente, los modelos de impacto en los diferentes sectores sensibles a las condiciones climáticas (p.e., sector hidrológico, agrícola, energético, etc.) añaden fuentes adicionales de incertidumbre que hay que estimar y acotar.

En consecuencia, y a la vista de la gran cantidad de incertidumbres que existen en el proceso de generación de escenarios climáticos regionalizados, hay que utilizar metodologías que permitan estimar las incertidumbres asociadas a cada paso de los arriba mencionados.

PROYECCIONES DETERMINISTAS Y PROBABILÍSTICAS

La metodología que se va paulatinamente imponiendo en las predicciones para las escalas temporales que van desde el plazo medio (4-10 días) hasta las proyecciones seculares de cambio climático persigue acotar las incertidumbres que contaminan el proceso de predicción. En esta nueva metodología, las predicciones de tipo determinístico van cediendo a favor de las predicciones probabilísticas basa-

das en un conjunto o población de predicciones. El proyecto integrado ENSEMBLES (del 6º programa marco financiado por la UE) que se desarrolla entre los años 2005 y 2009 tiene entre otros objetivos el de acotar las incertidumbres en las predicciones seculares de cambio climático mediante integraciones con diferentes escenarios de emisión, diferentes modelos globales, diferentes modelos regionales y diferentes técnicas estadísticas de regionalización. Esta metodología basada en multi-emisiones, multi-modelos y multi-regionalización permite explorar las incertidumbres asociadas a la generación de los escenarios climáticos regionalizados y proporcionar proyecciones de tipo probabilístico como las mostradas en la fig.6 para predicción y temperatura media.

CONCLUSIONES

De todo lo anteriormente expuesto, se deduce la gran complejidad y magnitud de la tarea de estimar proyecciones de cambio climático regionalizadas. La estimación de las incertidumbres implica explorar muchos métodos, modelos, emisiones, etc. No obstante, no debe sacarse la errónea conclusión de que nos encontra-