

# Cambio climático en España: lo que hace AEMET

Texto: **Ernesto Rodríguez Camino**

Jefe del Área de Evaluación y modelización del clima

**L**as actividades de AEMET en materia de cambio climático amplían las tradicionales tareas de la Agencia en materia de observación y estudios relativos al clima de España, como consecuencia del reconocimiento explícito de la rápida evolución del clima debida a causas fundamentalmente antropogénicas. Estas nuevas actividades se encuadran actualmente en el marco del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) del MMA, aprobado en 2006 y en el mandato recogido en los propios estatutos de AEMET. El PNACC establece el marco general de referencia para las actividades de evaluación de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático. Como el conocimiento detallado de las condiciones climáticas actuales y la estimación de las proyecciones climáticas en nuestro país son elementos imprescindibles para la puesta en funcionamiento del PNACC, se asignó a AEMET en dicho plan el proyecto de generar escenarios de cambio climático regionalizados para España utilizando tanto sus propios recursos como coordinando los esfuerzos de otros grupos de investigación activos en este campo.

Según el 4º Informe de Evaluación (AR4) del IPCC (2007), el calentamiento del sistema climático es inequívoco tal y como se evidencia por el aumento

de las temperaturas medias globales del aire y del océano, la fusión generalizada en las regiones cubiertas por hielos y nieve y el aumento del nivel del mar. También se observan a nivel continental y regional cambios que afectan a las cantidades de precipitación, a los patrones de viento y a los extremos meteorológicos incluyéndose entre éstos cambios en las frecuencias de episodios de sequías, de precipitaciones intensas, olas de calor, etc. La OMM, reconociendo estos cambios en el clima que afectan a distintas escalas temporales (desde las estacionales a las seculares), está promoviendo la potenciación de las capacidades de los servicios meteorológicos en el seguimiento (*monitoring*) del clima (OMM, LX Consejo Ejecutivo, junio 2008) para preparar a las sociedades en la gestión de los riesgos asociados a la variabilidad y cambio climático. Para cumplir con los compromisos asignados en el PNACC, con el mandato de los Estatutos de la Agencia y con las recomendaciones de la OMM, AEMET:

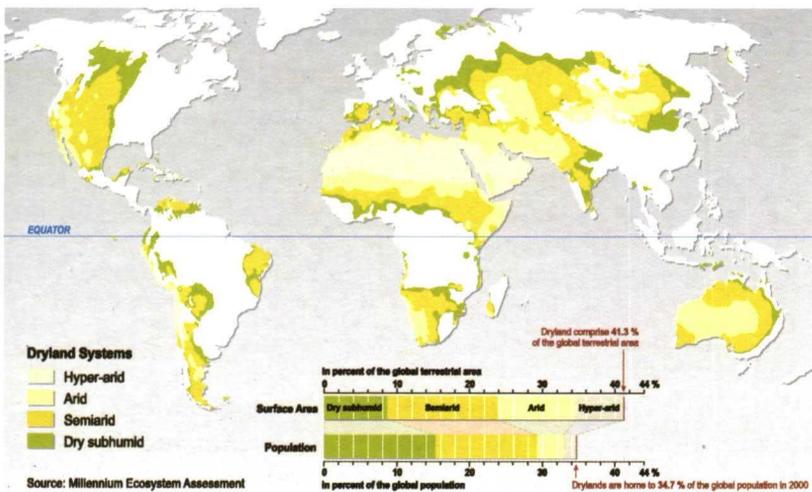
- \* Observa el clima y hace un seguimiento continuo de sus cambios, manteniendo una base de datos climáticos que constituye una referencia a nivel nacional.
- \* Proporciona estimaciones de los posibles escenarios de evolución del clima, manteniendo

una base de datos de libre acceso de escenarios de evolución del clima para la comunidad de impactos y adaptación al cambio climático.

- \* Proporciona asesoramiento al MARM, a otros departamentos ministeriales e instituciones en temas relacionados con el clima y su cambio y variabilidad.
- \* Participa activamente en los diversos foros nacionales e internacionales en los que se tratan los aspectos meteorológicos del cambio climático.

\* Contribuye a la formación en temas relacionados con los aspectos físicos del cambio climático en el contexto de cooperación internacional.

Figura 1: Zonas áridas actuales y sus categorías



Fuente: Millenium Ecosystem Assessment 2005

## España está situada en una región de alta vulnerabilidad

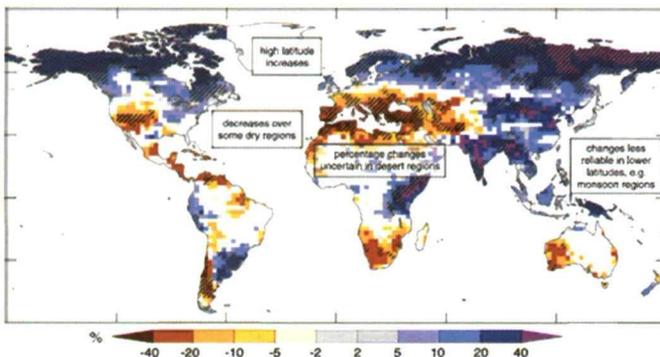
Una parte significativa del territorio español se encuentra situada en zonas clasificadas como áridas en las que la producción de cosechas, forraje, madera y otros servicios de los ecosistemas se encuentran limitados por el agua

disponible. La figura 1 muestra la distribución mundial de las cuatro categorías de sistemas áridos más comúnmente admitidas. Las zonas áridas, como gran parte de la región mediterránea, están habitualmente sujetas a sequías

estacionales, siendo especialmente vulnerables a la desertificación. La zona mediterránea se caracteriza también por las altas densidades de población, las fuertes concentraciones de la industria y la agricultura intensiva. A menudo la degradación está vinculada a un inadecuado uso del suelo.

Desde el punto de vista de la probable evolución de las condiciones climáticas el panorama no es especialmente halagüeño, ya que una parte significativa de las proyecciones de cambio climático generadas con la ayuda de modelos climáticos globales, identifican claramente a la región mediterránea como una de las zonas en las que con más probabilidad habrá reducción de recursos hídricos como consecuencia del cambio climático. Aún teniendo en cuenta

Figura 2: Cambio en la escorrentía (%) para el periodo 2090-2099 respecto al periodo 1980-1999.



Fuente: IPCC 2007

## Las actividades de AEMET en materia de cambio climático amplían las tradicionales tareas de la Agencia en materia de observación y estudios relativos al clima de España, como consecuencia del reconocimiento explícito de la rápida evolución del clima debida a causas fundamentalmente antropogénicas

que las incertidumbres que se manejan en las proyecciones de precipitación son relativamente altas, los diferentes modelos muestran un alto nivel de acuerdo sobre la zona mediterránea. Los cambios que se esperan en precipitación y en temperatura se traducen en cambios en escorrentía y en disponibilidad de agua. La figura 2 muestra los cambios relativos de escorrentía en la gran escala para el periodo 2090-2099 con respecto al periodo 1980-1999. Los valores representan la mediana de 12 modelos para el escenario de emisión SRES A1B (véanse más detalles en IPCC 2007). La zona mediterránea aparece claramente destacada en la figura, siendo la zona más grande del globo en la que se espera una clara reducción de recursos hídricos. Si se tienen en cuenta, no solamente los cambios en los valores medios, sino también los cambios en la variabilidad de la precipitación y de la temperatura, de nuevo la región mediterránea aparece como una de las regiones que va a mostrar más respuesta al cambio climático (Giorgi, 2006). Siendo la alta variabilidad interanual, por ejemplo de la precipitación, un motivo de gran preocupación en las condiciones actuales, se hace necesario extremar la preparación y adaptación de los sectores afectados por las condiciones climáticas para atenuar los efectos de un aumento en dicha variabilidad.

### Observación y seguimiento continuo del clima en España

AEMET dispone de una red de 4.500 estaciones pluviométricas y termoplumiométricas, atendidas por colaboradores voluntarios, que constituye la base de la observación climatológica en España. Además, los datos procedentes de los 90 observatorios con personal, las estaciones

automáticas (de las cuales 260 son completas, y 540 termoplumiométricas (implantadas y en proceso de adquisición)), las 7 estaciones de radiosondeo, la red de observación radiométrica y de composición química del aire, los datos de teledetección, etc., permiten que AEMET lleve a cabo una observación meteorológica continuada del territorio nacional y que disponga de una base de datos única para fines no solamente de vigilancia y predicción en el corto plazo, sino también para realizar las tareas asociadas al seguimiento y evolución del clima en España. A modo de ejemplo, la figura 3 muestra la evolución de la anomalía de temperatura media en la España peninsular y Baleares desde el año 1965. El aumento de las temperaturas medias detectado por AEMET es consistente y superior al calentamiento observado a nivel global. La base de datos climatológicos de AEMET convenientemente controlada en su calidad y homogeneizada constituye además un elemento esencial para regionalizar las proyecciones de evolución del clima generadas por los modelos climáticos globales y para validar el comportamiento de los modelos climático globales y regionales sobre el territorio nacional.

### Estimaciones de los posibles escenarios de la evolución del clima

La herramienta básica para realizar estimaciones de proyecciones climáticas son los modelos de circulación general acoplados océano-atmósfera (AOGCM, de las siglas en inglés) que se desarrollan en un número reducido de centros internacionales de investigación climática. La nueva generación de modelos globales que está actualmente en desarrollo, y que formarán parte del 5º informe de evaluación

Figura 3: Anomalías de la temperatura media de la España peninsular y Baleares con relación al periodo 1965-2005.

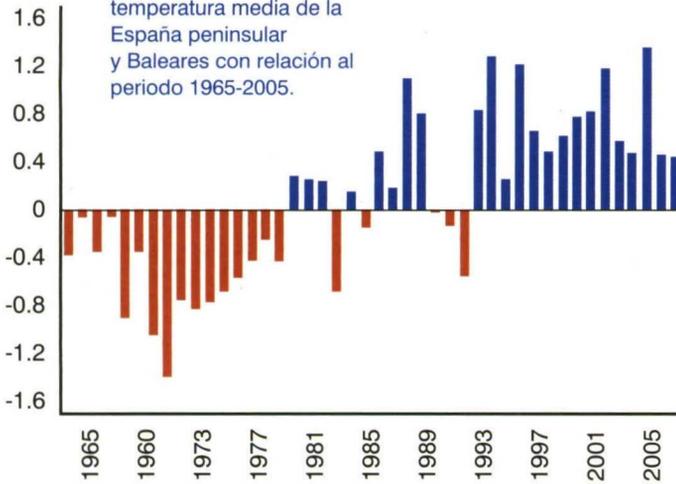


Figura 4: Diagrama esquemático de un AOGCM, de un ESM y de varios tipos de modelos de impacto (tomado de WCRP Informal Report N° 3/2007).

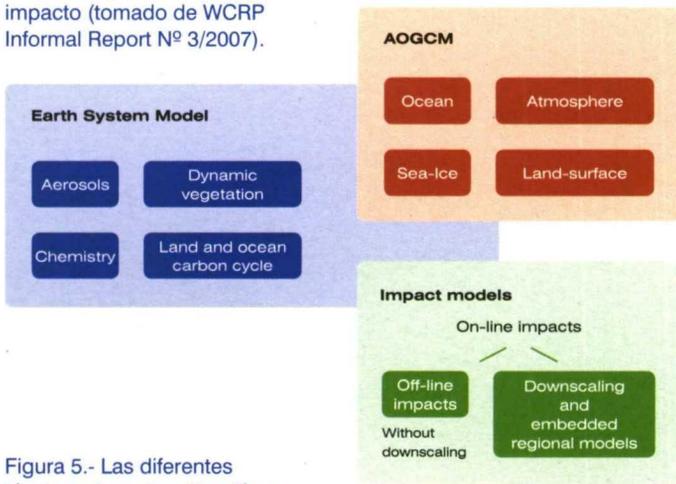
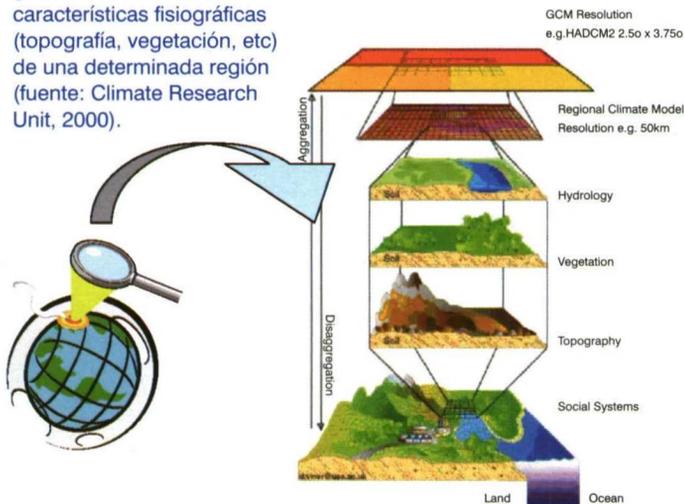


Figura 5.- Las diferentes técnicas de regionalización o reducción de escala adaptan las salidas de los modelos globales AOGCM a las características fisiográficas (topografía, vegetación, etc) de una determinada región (fuente: Climate Research Unit, 2000).



del IPCC, pertenecerá a la categoría de los llamados modelos del sistema Tierra (ESM, de sus siglas en inglés) que incluirán en su versión estándar modelos del ciclo del carbono, de aerosoles, de química y vegetación dinámica (véase WCRP Informal Report N° 3/2007).

El desarrollo de los modelos climáticos avanza en el sentido de aumentar la resolución y de incluir más procesos, incorporando aspectos del medio ambiente químico y biológico tales como una vegetación activa y una bioquímica oceánica acopladas con los procesos físicos del clima. Una mayor resolución de los modelos permitirá entrar en el dominio de los modelos oceánicos que resuelven los remolinos de mesoescala. En las escalas oceánicas del orden de las decenas de km dichos remolinos empiezan a ser resueltos explícitamente. La correspondiente escala de transición en la atmósfera es de unos pocos km, que es cuando los modelos empiezan a resolver las circulaciones correspondientes a la convección profunda. Esta transición para el caso atmosférico ya se está atravesando en el caso de los modelos de predicción del tiempo. Los modelos que incluyen el ciclo del carbono son capaces de predecir la evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> utilizando como datos de entrada solamente las emisiones antropogénicas en lugar de las concentraciones, que es como funcionan ahora la mayoría de los modelos globales. Los modelos que incluyen un módulo de aerosoles permitirán además acoplar la evolución de éstos con otros efectos indirectos sobre la radiación, la formación de nubes y la eficiencia de la precipitación a través de los procesos de microfísica de nubes. Otros temas emergentes que irán incorporando en los modelos climáticos son la inclusión de otros gases de efecto invernadero y gases reactivos, el almacenamiento de agua y carbono por las plantas, los ciclos de nitrógeno y fósforo, que actúan como limitantes en el crecimiento de ecosistemas, la aclimatación de la microbiología del suelo a temperaturas más altas, etc. Mientras que los modelos globales proporcionan las características a grandes rasgos de las proyecciones climáticas, la escasa resolución espacial de las proyecciones climáticas que

## AEMET responde a la cada vez mayor demanda social de conocer cómo puede evolucionar el clima para ayudar a reducir los impactos negativos en ecosistemas y sectores de actividad muy dependientes de las condiciones climáticas

proporcionan las hace poco útiles para ser utilizadas por los distintos tipos de modelos de impacto. Por este motivo es necesario aplicar técnicas de regionalización a las proyecciones generadas por los AOGCM para aumentar su resolución espacial. La metodología, generalmente aceptada, para hacer estimaciones de proyecciones regionalizadas de cambio climático utiliza la idea del descenso de las escalas grandes a las escalas pequeñas. Las escalas grandes se estiman con los modelos globales acoplados océano-atmósfera y a continuación se desciende a las escalas más pequeñas con diferentes técnicas de regionalización. En este enfoque la tarea predictiva la realizan los modelos globales y las técnicas de regionalización o de reducción de escala (*downscaling*), bien basadas en algoritmos empíricos o en modelos regionales, se limitan a introducir detalle local. La información solamente fluye desde las escalas grandes (modelos globales) a las escalas regionales (modelos regionales y algoritmos estadísticos).

Todas las técnicas de regionalización parten de las proyecciones suministradas por los AOGCM a los que dotan de detalles de escala más pequeña asociados con información adicional de orografía, fisiografía, etc (véase fig. 5). En consecuencia, las proyecciones regionalizadas heredan todos los defectos y debilidades de los modelos “padre” globales. Si el modelo global simula incorrectamente aspectos de la variabilidad a gran escala relevantes para el clima regional/local, carece de sentido regionalizar proyecciones climáticas realizadas con el mismo. Ahora bien, si la simulación de la variabilidad climática natural es aceptable, entonces tiene sentido trasladar la información de los patrones globales a información local. Es importante tener también en cuenta que debido a que la variabilidad natural es mayor en las escalas regionales y locales que en la gran escala, las proyecciones de cambio climático en escalas regionales estarán sometidas forzosamente a más incertidumbre que las de los AOGCM. Esta limitación de las técnicas de regionalización debe tenerse siempre presente. Los AOGCM

proporcionan las proyecciones climáticas a gran escala y las técnicas de regionalización introducen los detalles en las escalas no resueltas por la rejilla de los modelos globales. En este proceso se incluye información relevante que permite aumentar la resolución de las proyecciones climáticas, incorporando relaciones entre variables a más resolución que la proporcionada por los AOGCM o resolviendo procesos físicos en estas escalas, ahora bien, se incluyen también incertidumbres adicionales que hay que estimar.

### **Generación de escenarios regionalizados de cambio climático**

AEMET coordina la generación de escenarios regionalizados de cambio climático con los objetivos específicos de: (i) desarrollar, documentar y poner a disposición del PNACC escenarios de cambio climático para España a la escala adecuada para su utilización por la comunidad de impactos, y (ii) poner en funcionamiento un mecanismo de generación operativa y actualización de escenarios regionales de cambio climático para España, que alimente de forma periódica al PNACC.

Se completó a principios de 2007 una primera fase de un proyecto dedicado a la generación de escenarios climáticos regionales para España. En esta primera fase, cuya duración ha sido de un año, se han utilizado fundamentalmente las técnicas de regionalización ya desarrolladas y las bases de datos actualmente existentes. También se ha hecho uso de resultados provenientes de los proyectos PRUDENCE y STARDEX del 5º Programa Marco de la Unión Europea (FP5 EU) relacionados con modelización climática, regionalización dinámica y estadística y estimación de extremos (véase (Brunet *et al.*, 2008) para una descripción detallada de la primera fase que ha sido desarrollada por AEMET, FIC y UCLM).

## ESPAÑA PENINSULAR

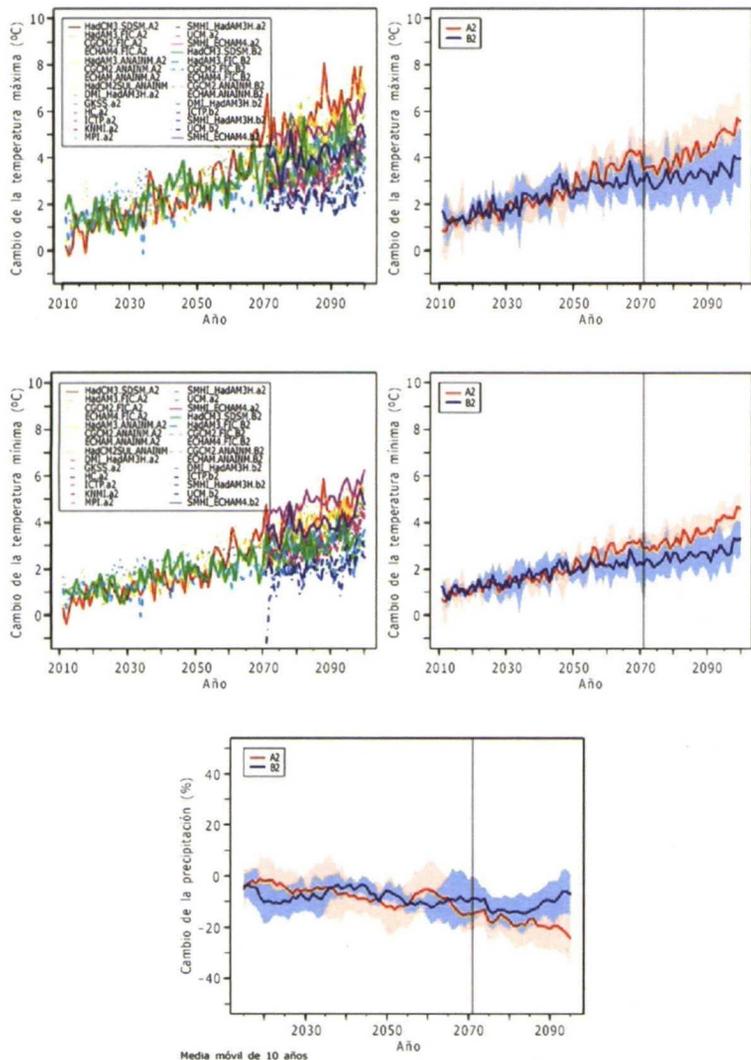


Figura 6: Evolución del cambio de Tmax (arriba izda.) y Tmin (centro izda.) anual media en España peninsular obtenido con diferentes modelos globales, técnicas de regionalización y escenarios de emisión respecto al valor promedio de referencia en el periodo 1961-1990. Evolución del valor medio (curva continua) y valor medio +/- desviación estándar (sombreado) para Tmax (arriba der.), Tmin (centro der.) y precipitación (abajo). (La curva correspondiente al valor medio de la precipitación representa la media móvil centrada para un periodo de 10 años).

La colección de proyecciones regionalizadas, para su utilización por parte de los usuarios de las comunidades de impactos y adaptación, correspondientes a la primera fase del proyecto intenta cuantificar algunas de las incertidumbres inherentes al proceso mismo de generación de las mismas, explorando diferentes escenarios de emisión de gases de efecto invernadero, diferentes modelos globales y diferentes técnicas de regionalización. La primera fase es el punto de partida de un flujo continuo de datos para la comunidad de impactos, que se irán revisando y refinando sucesivamente mediante la utilización de los resultados más recientes de integraciones globales y la incorporación de nuevas técnicas de regionalización.

El número de proyecciones regionalizadas de la primera fase del proyecto es todavía bastante modesto como para representar fiablemente las incertidumbres que afectan a las proyecciones de cambio climático. Las distintas proyecciones permiten al menos evaluar la sensibilidad de las estimaciones frente a cambios en las emisiones, en los modelos globales y en las técnicas de regionalización. Esta colección de proyecciones constituye una mejora respecto al procedimiento muy utilizado de presentar una única regionalización a partir de un único modelo global. El informe de la primera fase (Brunet *et al.*, 2008) pone especial énfasis en el

estudio y cuantificación de las incertidumbres asociadas a las proyecciones de cambio climático, incertidumbres que varían según las variables, las regiones del globo y las escalas temporales y espaciales consideradas (véase fig.6). La coincidencia de resultados o tendencias obtenidos por los diferentes escenarios, modelos y regionalizaciones son considerados como un índice de la robustez y fiabilidad de las estimaciones de las proyecciones. Por el contrario, la falta de coincidencia se asocia con alta incertidumbre y por lo tanto con estimaciones de poca fiabilidad. Se ha de tener presente que la finalidad última de este proyecto, que se pretende alcanzar en la segunda fase, es la de llegar a disponer de proyecciones probabilísticas a partir de un

## El Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático asignó a AEMET el proyecto de generar escenarios de cambio climático regionalizados para España, utilizando tanto sus propios recursos como coordinando los esfuerzos de otros grupos de investigación activos en este campo

*ensemble* con un número suficiente de miembros que cubran razonablemente las fuentes de incertidumbre susceptibles de ser tratadas por este método. En la segunda fase del proyecto de generación de escenarios regionalizados de cambio climático, de 5 años de duración, se está procediendo a desarrollar nuevos métodos, tanto dinámicos como estadísticos, y se intentará, asimismo, incorporar a la mayor parte de grupos universitarios nacionales que trabajan en este campo, ya que su experiencia de trabajo y los resultados por ellos obtenidos hasta el momento son de indudable interés para alcanzar los objetivos del proyecto (véase Gaertner *et al.*, 2006). AEMET está actualmente trabajando en la evaluación de los modelos climáticos globales del 4º Informe del IPCC, en la mejora de los métodos de regionalización estadísticos utilizados en la primera fase (y en la implementación de otros nuevos) y en la aplicación de métodos dinámicos basados en una versión climática del modelo HIRLAM utilizado de forma operativa en AEMET para las predicciones a corto plazo.

### Conclusiones

Como viene ocurriendo desde hace muchos años, AEMET utiliza su densa infraestructura observacional para hacer un seguimiento del clima y de su evolución en todo el territorio nacional. Además, la necesidad de minimizar la vulnerabilidad de diferentes ecosistemas y sectores socioeconómicos, así como la necesidad de planificar racionalmente una adaptación de los mismos, a unas condiciones climáticas rápidamente cambiantes ha generado en los últimos años una ampliación de la actividad de AEMET en el tema de la generación de proyecciones regionalizadas de cambio climático. AEMET responde de esta forma a la cada vez mayor demanda social de conocer cómo puede evolucionar el clima para ayudar a reducir los impactos negativos en ecosistemas y sectores de actividad

muy dependientes de las condiciones climáticas. De esta forma AEMET está ampliando el ámbito y alcance de su actuación en vigilancia y predicción de la atmósfera desde las predicciones inmediatas (*nowcasting*), a corto (2-3 días) y medio (4-10 días) plazo, hasta las proyecciones de cambio climático. Las predicciones intermedias que abarcan el alcance estacional, anual y decadal presentan especiales dificultades por tratarse todavía de problemas de valores iniciales -al contrario que las proyecciones seculares de cambio climático que están dominadas principalmente por los forzamientos externos- con una muy baja predecibilidad de la atmósfera en latitudes medias fundamentalmente regida por el comportamiento caótico del continuo tránsito de sistemas de presión. La especial dificultad de estas escalas temporales hace que estas predicciones tengan en AEMET y en la mayoría de los servicios meteorológicos un carácter experimental y se encuentren todavía en fase de investigación. **a**

### Referencias

- Brunet, M.; Casado, M.J.; Castro, M.; Galán, P.; López, J.A.; Martín, J.M.; Pastor, A.; Petisco, E.; Ramos, P.; Ribalaygua, J.; Rodríguez, E.; Sanz, I.; Torres, L., (2008). Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España. Ministerio de Medio Ambiente (en prensa).
- Gaertner, M.A.; Gutiérrez, J.M.; González, F.; Ruiz-Elvira, A.; y Rodríguez, E., (2006). Programa coordinado para generación de escenarios regionalizados de cambio climático. (MMA, Noviembre 2006).
- Giorgi, F. (2006), Climate change hot-spots, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L08707, doi:10.1029/2006GL025734.
- IPCC, (2007), Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor y K.L. Miller (Eds.). Cambridge University Press, U.K. y New York, NY, USA, pp 996.
- MMA, (2006). Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC), OECC, MMA. [[http://www.mma.es/portal/secciones/cambio\\_climatico/areas\\_tematicas/impactos\\_cc/pdf/pna\\_v3.pdf](http://www.mma.es/portal/secciones/cambio_climatico/areas_tematicas/impactos_cc/pdf/pna_v3.pdf)].
- WCRP Informal Report N° 3/2007.

Foto: Álvaro López

