



Fotografía: © Luis Carlos Celis Calderón. De la serie "Texturas vegetales".

Construcción de escenarios de cambio climático mediante el uso de modelos regionales del clima

ERNESTO RODRÍGUEZ CAMINO

El conocimiento detallado de las condiciones climáticas actuales y la estimación de las proyecciones climáticas en un país o región constituye un elemento imprescindible para la puesta en funcionamiento de un marco general de referencia para planificar las actividades de evaluación de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático de origen antropogénico en el que estamos inmersos.

La generación de proyecciones climáticas es un elemento crucial en este proceso y debe ser consistente con el marco general proporcionado por el informe especial sobre escenarios de emisiones (Nakicenovic *et al.*, 2000, *Special Report on Emission Scenarios [SRES]*), elaborado por el IPCC, y con los propios informes de evaluación del IPCC (2001 & 2007; <http://www.ipcc.ch/pub/reports.htm>).

La herramienta básica para realizar estimaciones de proyecciones climáticas son los modelos de circulación general acoplados océano-atmósfera (AOGCM es la sigla en inglés) que se desarrollan en un número reducido de centros internacionales de investigación climática. Estos modelos proporcionan las características a grandes rasgos de las proyecciones climáticas, pero la escasa resolución espacial de las proyecciones 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 *downscaling*, que basadas en algoritmos empíricos o en modelos regionales, se limitan a introducir detalle local. La información sólo fluye desde las escalas grandes (modelos globales) a las escalas regionales (modelos regionales).

En otras escalas temporales (por ejemplo, la predicción del tiempo) y, sobre todo, cuando se realiza experimentación con modelos, se utilizan modelos regionales anidados en modelos globales en los que la información puede fluir en los dos sentidos (*two-way nesting*, en inglés). Ésta es la misma filosofía de los modelos globales que utilizan una rejilla no uniforme con mayor densidad de puntos sobre la zona de interés. El procedimiento basado en el anidado en dos sentidos requiere que las integraciones de ambos modelos, global y regional, se realicen simultáneamente. Esta limitación es muy restrictiva desde el punto de vista operativo, y muy poco habitual incluso para predicciones a corto plazo. En modelización climática apenas se ha utilizado este concepto y la aproximación estándar a las proyecciones regionalizadas consta normalmente de dos pasos. Primero, la integración del modelo global, y después la adaptación regional.

De hecho, la mayoría de las proyecciones regionales de cambio climático realizadas por los diferentes grupos apenas se han salido de este enfoque por razones eminentemente prácticas.

Este texto está organizado como sigue. La sección 2 describe los modelos climáticos globales acoplados de atmósfera y océano. En la sección 3 se describen las técnicas de regionalización necesarias para utilizar las proyecciones en estudios de impactos. La sección 4 describe los modelos climáticos regionales utilizados como técnica de regionalización. En la sección 5 se discuten las incertidumbres que afectan a las proyecciones regionales. Finalmente, en la sección 6 se dan unas recomendaciones de uso para las proyecciones climáticas regionalizadas. En Brunet *et al.* (2008) y Gaertner *et al.* (2006) se describe pormenorizadamente la experiencia y los planes españoles de utilización de modelos regionales de clima por parte de la comunidad en el ámbito más general de un plan nacional de adaptación al cambio climático. Para una discusión de las limitaciones y solidez de los modelos climáticos, se recomienda CCSP (2008).

Modelos climáticos de circulación acoplados océano-atmósfera

Los AOGCM resuelven numéricamente las ecuaciones matemáticas fundamentales que describen la física y dinámica de los movimientos y procesos

Escoja bien sus gasodomésticos

Los gasodomésticos tales como calentadores de agua, estufas, hornos y secadoras de ropa, entre otros, deben tener encendidos eléctricos. Los pilotos siempre encendidos –a los que estamos acostumbrados– son un constante desgaste de energía combustible, además de peligrosos.

que tienen lugar en la atmósfera, el océano, el hielo y la superficie terrestre. Al contrario que los modelos utilizados en otras ramas de la ciencia, si bien incluyen relaciones empíricas, no descansan sobremanera en el uso de las mismas, sino en el planteamiento de las leyes físicas del sistema. Los AOGCM resuelven las ecuaciones del movimiento de los fluidos (Navier-Stokes), la ecuación de continuidad (conservación de masa), termodinámica (conservación de energía) y la ecuación de estado. Las variables (p.e., presión, temperatura, velocidad, humedad atmosférica, salinidad oceánica) necesarias para describir el estado de los sistemas se proporcionan en una red de puntos que cubre el globo, habitualmente con una resolución horizontal para la atmósfera entre 100 y 300 km, y aproximadamente el doble de resolución (la mitad del tamaño de la malla) para el océano, con el fin de poder resolver la dinámica de corrientes oceánicas. En ambos casos la resolución vertical suele ser de unos 20 niveles. Esta separación de puntos de red está limitada con frecuencia por la disponibilidad de recursos computacionales.

Dada la limitada resolución espacial, los modelos climáticos deben contener una representación de los procesos físicos que no pueden ser explícitamente resueltos por el modelo. Éstos se incluyen mediante *parametrizaciones* (algoritmos relativamente sencillos de cálculo paso a paso que permiten evaluar variables a escala espacial inferior a la de resolución). Éste es el caso de los procesos de cambio de fase (evaporación, condensación, formación de nubes), el intercambio radiativo (absorción, emisión y reflexión de radiación solar), procesos convectivos en escalas inferiores a la de resolución, cambios en vegetación, albedo, cubierta de hielo, etc.

La mayor parte de las ecuaciones en los AOGCM son ecuaciones diferenciales para la tasa de cambio de una cantidad, p.e., la velocidad del fluido, de tal forma que si es conocido su valor en un determinado instante, puede evaluarse el correspondiente en un instante posterior a través de la integración de las ecuaciones

apropiadas. Por tanto, los AOGCM tienen una orientación predictiva y permiten obtener soluciones de las ecuaciones, *i.e.*, simulaciones climáticas, a partir de un estado inicial del sistema (condiciones iniciales).

El potencial de los AOGCM reside en que permiten agrupar los efectos de un alto número de procesos físicos y dinámicos de los distintos subsistemas climáticos, no lineales en esencia y con múltiples interacciones, que serían muy difíciles de analizar de otro modo. En la realización de experimentos de cambio climático se suelen hacer integraciones de estos modelos en las que no se alteran las condiciones de contorno o forzamiento externo (solar, volcánico, cubierta vegetal, concentraciones de gases de efecto invernadero). Estos ejercicios reciben el nombre de *simulaciones de control*, y constituyen estados climáticos de referencia con los cuales se comparan los resultados de simulaciones con perturbación externa o de cambio climático. En las simulaciones de cambio climático, la concentración de gases de efecto invernadero va aumentando de forma gradual de acuerdo con futuros escenarios preestablecidos (IPCC, *SRES*). Estas simulaciones pueden compararse con las de control para hacer evaluaciones de los cambios esperables en el clima medio y sus extremos en distintas escalas espaciales. En sentido estricto, por tanto, estas simulaciones no son predicciones, sino que constituyen estados climáticos compatibles con el forzamiento externo que se aplica al modelo. Desde otro punto de vista, indicarían la previsible evolución del clima (global, hemisférico, gran escala...) en un sentido estadístico (clima medio y extremos), condicionada a la suposiciones adoptadas en cuanto a la evolución de los factores de forzamiento externo y las propias características del modelo.

La comparación de simulaciones globales con observaciones sugiere que los modelos son bastante fiables en la reproducción de las características del clima a gran escala. Ahora bien, el realismo a escala regional es limitado y, de hecho, distintos modelos ofrecen considerables diferencias a escala regional en simulaciones

con el mismo forzamiento externo. Hay varias razones para explicar las desviaciones de los modelos en la escala regional, entre las cuales podemos citar: la limitada resolución espacial que impone una descripción inadecuada de la topografía, distribución tierra-océano suavizada, la truncación numérica en la resolución de las ecuaciones diferenciales que obliga a parametrizar –utilizando diferentes algoritmos– los procesos en escalas espaciales inferiores a la resolución, el carácter global de las parametrizaciones –que pueden no ser apropiadas para distintas zonas del globo–, etc.

El clima global es la respuesta a las estructuras a gran escala en la superficie de la Tierra (distribución tierra-océano, topografía, etc.) y el calentamiento di-

ferencial para diferentes latitudes y épocas del año. Los climas regionales, por otro lado, representan el resultado de la interacción del clima a gran escala con los detalles a escala regional. Por tanto, es posible simular el clima global adecuadamente aunque los detalles regionales no se simulen de modo totalmente realista. De hecho, esta dependencia por parte del clima regional de los factores a gran escala es precisamente el mecanismo que se explota en modelización regional para deducir el clima en estas escalas a partir de las simulaciones proporcionadas por los AOGCM.

La nueva generación de modelos globales pertenecerá a la categoría de los llamados Modelos del Sistema Tierra (ESM, en su sigla en inglés), que incluirán

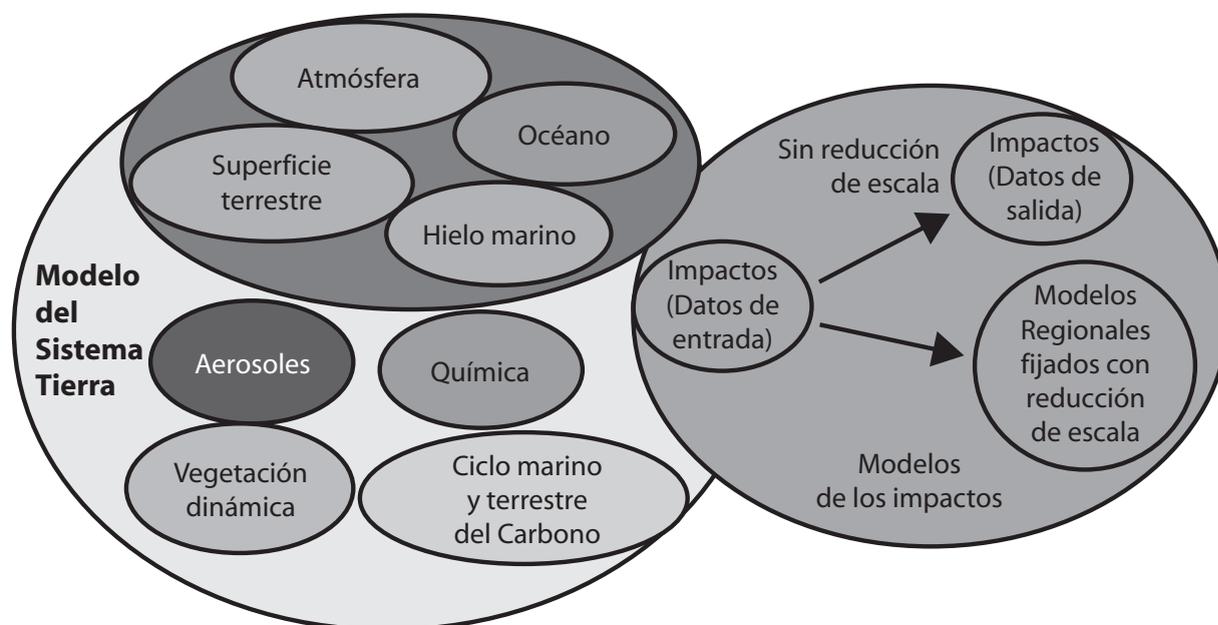


Figura 1. Diagrama esquemático de un AOGCM, de un ESM y de varios tipos de modelos de impacto (tomado de WCRP «Informal Report» N° 3, 2007).

Utilice correctamente su secadora de ropa

Secar demasiado su ropa es una forma de derrochar energía y una forma rápida de dañar las prendas. Estas máquinas vienen para ser usadas en distintos ciclos, según lo que se lave, precisamente para evitar el excesivo secado. Si puede, es mucho mejor secar la ropa al aire libre.

en su versión estándar modelos del ciclo del carbono, de aerosoles, de química y vegetación dinámica. El WCRP ya comenzó a discutir el diseño experimental de las proyecciones coordinadas de cambio climático que formarán parte del 5º informe de evaluación del IPCC (véase WCRP «Informal report» N° 3, 2007) (figura 1).

Respecto al desarrollo futuro de los modelos climáticos, se puede afirmar que avanzan 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 mesoscala. En las escalas oceánicas del orden de las decenas de kilómetros, dichos remolinos empiezan a ser resueltos explícitamente. La correspondiente escala de transición en la atmósfera es de unos pocos kilómetros, 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 CO₂ 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 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.

Regionalización de las proyecciones realizadas con modelos globales

Las proyecciones climáticas realizadas con modelos globales para diferentes escenarios de emisión carecen de la suficiente resolución espacial que de-

mandan la mayoría de los usuarios para los estudios de impacto y adaptación al cambio climático. Para acomodar 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*). Estas técnicas 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 & Wigley, 1997). Algunas instituciones utilizan la alternativa del doble anidado en la que se realizan, como paso intermedio previo a la regionalización, simulaciones globales con un modelo atmosférico de mayor resolución (entre 100 y 150 km aprox.). Este enfoque (Hulme *et al.*, 2002), si bien recomendable, introduce aumentos considerables en los requerimientos computacionales.

Todas las técnicas de regionalización parten de las proyecciones suministradas por los AOGCM a los que dotan de detalles de escala más pequeña asocia-

Las proyecciones climáticas realizadas con modelos globales para diferentes escenarios de emisión carecen de la suficiente resolución espacial que demandan la mayoría de los usuarios para los estudios de impacto y adaptación al cambio climático.

dos con información adicional de orografía, fisiografía, etc. 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.

Existen diferentes técnicas que implican un muy distinto nivel de complejidad pero que se pueden agru-

par en dos grandes categorías: (i) regionalización dinámica y (ii) regionalización estadística. Ambas técnicas de regionalización se conocen y se han aplicado desde los años 70 y 80 del siglo pasado 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 relaciones empíricas entre variables, tales como el MOS (Model Output Statistics) y el Perfect Prog (Perfect Prognosis). Aunque estas técnicas se han aplicado en distintas escalas temporales (por ejemplo en la predicción a corto plazo), las aplicaciones de cambio climático requieren de modelos estadísticos y modelos de área limitada que tengan en cuenta los procesos de escala interanual.

Las técnicas de regionalización dinámica, que se basan en el uso de modelos regionales o de área limitada (RCM, del inglés *Regional Climate Model*), tienen la ventaja de ser físicamente consistentes y la desventaja de necesitar un gran volumen de cálculo. Las técnicas de regionalización estadística agrupan multitud de algoritmos entre los que se incluyen los métodos de clasificación, los modelos de regresión y los generadores de tiempo (IPCC, 2001 & 2007). Las técnicas estadísticas se basan en relaciones cuantitativas entre variables atmosféricas de gran escala (predictores) y las variables locales de superficie (predictandos), usualmente precipitación y temperatura máxima y mínima. Las técnicas estadísticas son relativamente simples y normalmente requieren poco cálculo, aun-

Tape la olla en la que hierve el agua

Ya sea que vaya a cocinar pasta, a hervir habas o arvejas, hacer una suculenta sopa, o simplemente a descontaminar el agua, tape la olla mientras hierve. Entre menos calor se escape, menos energía se pierde, además el agua caliente más rápido. Échele sal para acelerar el proceso.

que los nuevos métodos no lineales recientemente desarrollados se basan en costosos algoritmos de optimización no lineal y requieren un tiempo mayor de cómputo. La regionalización estadística se basa en la hipótesis de que las relaciones establecidas entre los predictores y predictandos son invariables frente al cambio en el clima; ésta es una desventaja de este tipo de técnicas frente a los modelos dinámicos. Aunque existen multitud de técnicas de tipo estadístico, que proporcionan resultados diferentes, no es posible determinar cuál de ellas es la mejor, pues ninguna de ellas es superior al resto en todas las regiones y para todas las variables, tal y como aparece en las conclusiones del proyecto Stardex (del 5° programa marco financiado por la UE, 2002-2005). Un problema similar se presenta en los RCM en lo que respecta al uso de distintas parametrizaciones físicas.

En las proyecciones de cambio climático presentadas en los últimos informes de evaluación del IPCC (2001, 2007) las integraciones no parten de unas condiciones iniciales de océano y atmósfera reales, sino que más bien se comienzan las integraciones con décadas y siglos de anticipación para conseguir un sistema equilibrado tanto para representar el clima presente como los escenarios futuros. Debido a la larga memoria de la componente oceánica, para calcular proyecciones en las próximas pocas décadas es necesario simular la evolución temporal.

El procedimiento arriba esbozado para generar proyecciones climáticas regionales/ locales, basado en AOGCM que suministran información, bien sea en forma de condiciones de contorno para modelos regionales o bien en forma de predictores (basados en las variables atmosféricas a gran escala) para las técnicas empíricas, no permite incluir las posibles retroalimentaciones de las escalas regio-

nales/locales en las escalas globales. Estas posibles retroalimentaciones podrían tratarse, por ejemplo, utilizando modelos anidados con flujo de información en los dos sentidos (*two-way nesting*, en inglés) o modelos globales con rejilla variable. El procedimiento basado en el anidado en dos sentidos requiere que las integraciones de ambos modelos –global y regional– se realicen simultáneamente. Esta limitación es muy restrictiva desde el punto de vista operativo, y muy poco habitual incluso para predicciones a corto plazo. La otra alternativa, basada en el uso de modelos globales con rejilla variable, presenta otros problemas, asociados con las posibles opciones de parametrización de los procesos físicos, que en principio son dependientes de la resolución de los modelos. Una alternativa interesante en este contexto es la realización de experimentos de sensibilidad del clima a gran escala a cambios en las condiciones locales que pueden imponerse a través de cambios en alguna parametrización, cambios repentinos en la cubierta vegetal o usos de suelo, etc. Este tipo de estudios se conoce con frecuencia como estudios de *upscaling* y permiten estudiar la influencia de cambios a escala local/regional en el clima a gran escala. Un ejemplo interesante lo constituye la válvula salina de los flujos a través del estrecho de Gibraltar.

Un tema igualmente importante, y con frecuencia relacionado con el anterior por su carácter frecuentemente local, es el de los posibles procesos umbral (*tipping points*, en inglés) que, si bien representan escenarios de baja probabilidad en el siglo XXI, son procesos plausibles que se deben tener en cuenta. Además del ya mencionado ejemplo relacionado con el estudio del papel de válvula salina en el estrecho de Gibraltar, se pueden mencionar tam-

Existen diferentes técnicas que implican un muy distinto nivel de complejidad pero que se pueden agrupar en dos categorías: (i) regionalización dinámica y (ii) regionalización estadística.

Un tema igualmente importante, y con frecuencia relacionado con el anterior por su carácter frecuentemente local, es el de los posibles procesos umbral (*tipping points*, en inglés) que, si bien representan escenarios de baja probabilidad en el siglo XXI, son procesos plausibles que se deben tener en cuenta. Además del ya mencionado ejemplo relacionado con el estudio del papel de válvula salina en el estrecho de Gibraltar, se pueden mencionar tam-



bién los cambios en la circulación termohalina en el Atlántico norte (Schellnhuber & Held, 2002).

Modelos climáticos regionales

La resolución de los RCM se sitúa actualmente entre 15-30 km, y se incrementará hasta en 10 km en los próximos pocos años, permitiendo la resolución de efectos topográficos y costeros. Muchos RCM están siendo actualizados con un núcleo dinámico no hidrostático.

La mayoría de los modelos climáticos regionales solamente poseen la componente de atmósfera y de superficie terrestre, careciendo del correspondiente módulo de océano que poseen los AOGCM, porque la evolución de las variables oceánicas, singularmente la de la temperatura superficial del mar, se toma directamente de la interpolación horizontal del modelo global en el que se anidan. Obviamente, esto constituye una seria limitación, que ya está empezando a eliminarse en algunos RCM. A modo de ejemplo, se puede mencionar que de los nueve modelos regio-

Compre una tostadora

Encender el horno de la estufa para tostar el pan es demasiado desperdicio de calor. Más grave aún si se trata de un horno eléctrico, éstos trabajan con resistencias hechas de metales especiales para acumular mucho calor, su consumo de energía es de los más altos a la hora de pagar la luz.

nales participantes en el proyecto Prudence (<http://prudence.dmi.dk/>), en el que se generaron proyecciones regionalizadas a partir de un mismo modelo global (HadAM3) para el período 2070-2100 y para el escenario de emisión SRES A2, un solo modelo poseía un módulo oceánico.

Las técnicas de regionalización basadas en modelos regionales tienen la ventaja de ser físicamente consistentes y la clara desventaja de necesitar un gran volumen de cálculo. 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 mismos. Recientemente Von Storch *et al.* (2000) y Míguez-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 regionales disponibles hasta la fecha, y algunos autores la cuestionan porque limita los grados de libertad del RCM.

Entre los desarrollos previsibles que se incluirán en los próximos años en la mayoría de los modelos regionales del clima, algunos de los cuales ya se están desarrollando en los modelos de área limitada para la predicción del tiempo, se pueden enumerar los siguientes: a) dinámica no hidrostática, b) dinámica más eficiente (pasos de tiempo más largos), c) física avanzada para nubes, precipitación y turbulencia, d) tratamiento avanzado de la superficie terrestre, e)

condiciones de contorno transparentes, f) modelos regionales acoplados atmósfera-océano, etc.

Incertidumbres en las proyecciones climáticas regionales

La obtención de proyecciones o escenarios regionales de cambio climático está sujeta a una variedad de fuentes de incertidumbre

que incide en todos los pasos del proceso de su generación, desde el establecimiento de los escenarios alternativos de posibles evoluciones en las emisiones de gases de efecto invernadero y aerosoles —que afectan al forzamiento radiativo—, hasta los algoritmos que proyectan las evoluciones a escala regional. Estas incertidumbres se pueden describir en forma jerárquica o de cascada (Mitchell & Hulme, 1999), de tal manera que cada paso conducente a la generación de proyecciones regionales hereda todas las incertidumbres de los pasos anteriores. De todas las fuentes de incertidumbre que

De todas las fuentes de incertidumbres que a continuación se enumeran, habitualmente se exploran tres: las asociadas a las emisiones, las asociadas a los modelos globales de circulación general y las asociadas a las técnicas de regionalización, poniendo particular énfasis en las dos últimas.

a continuación se enumeran, habitualmente se exploran tres: las asociadas a las emisiones, las asociadas a los modelos globales de circulación general y las asociadas a las técnicas de regionalización, poniendo particular énfasis en las dos últimas.

Incertidumbres en los forzamientos naturales

En el vértice de todas las incertidumbres se sitúan los forzamientos externos de tipo natural. Entre éstos se pueden mencionar los cambios en la radiación solar que llega a la cima de la atmósfera y las emisiones de aerosoles sulfurosos procedentes de las grandes erupciones volcánicas que alcanzan la estratosfera y tienen un tiempo de permanencia de unos

pocos años. Éste último efecto se manifiesta principalmente como un aumento de la reflexión de la radiación solar incidente, y por lo tanto constituye un forzamiento radiativo negativo. Los forzamientos naturales se consideran impredecibles y no están contemplados patrones de evolución, al menos en las escalas temporales aquí consideradas.

Incertidumbres en las emisiones de gases de efecto invernadero

A continuación en la pirámide de las incertidumbres se sitúa la evolución futura de la emisión de gases de efecto invernadero, de aerosoles y de cambios de usos de suelo que afecta al forzamiento radiativo en la atmósfera. Obviamente esta evolución futura dependerá de la marcha de la economía, del desarrollo tecnológico, de las fuentes energéticas disponibles y el patrón de consumo energético, de la demografía, etc., y de las decisiones políticas que afecten a la evolución de los anteriores puntos. Como esta evolución no es predecible, al menos según los modelos físico-matemáticos que simulan los procesos del sistema climático, se recurre a utilizar una serie de escenarios plausibles de futura evolución de los anteriores factores de tipo socio-económico. Para ello se utiliza la colección de escenarios de evolución de emisiones propuestos por el IPCC (Nakicenovic *et al.*, 2000). Estos mismos escenarios de emisión se han utilizado en el tercer y cuarto in-

forme de evaluación del IPCC y no se han revisado desde el año 2000.

Incertidumbres en las concentraciones de gases de efecto invernadero

A las incertidumbres sobre la evolución futura de las emisiones hay que añadir las asociadas a cómo estas 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. Éste es un punto muy importante, porque algunos procesos implicados en el ciclo del carbono (equilibrio oceánico del dióxido de carbono, por ejemplo) son dependientes de la temperatura, que, a su vez, es sensible a las concentraciones de dióxido de carbono.

Incertidumbres en los modelos globales

Las mismas herramientas utilizadas para generar las proyecciones climáticas, es decir, los modelos acoplados atmósfera-océano de circulación general muestran en su nivel actual de desarrollo también muchas incertidumbres. Los diferentes AOGCM son distintas formulaciones de las ecuaciones que describen los distintos componentes del sistema climático, considerando distintas mallas, resoluciones, esquemas numéricos, parametrizaciones de procesos físicos, etc. Las simulaciones de cambio climático producidas con distintos AOGCM en los mismos escenarios de cambio

Duerma su televisor

La mayoría de los televisores, hoy por hoy, vienen con un control que se llama "sleep" (dormir en inglés). Éste es muy útil para las personas que se duermen con el televisor prendido y se puede programar para que, según lo que demore en dormirse, se apague a los 30, 60 o 90 minutos.

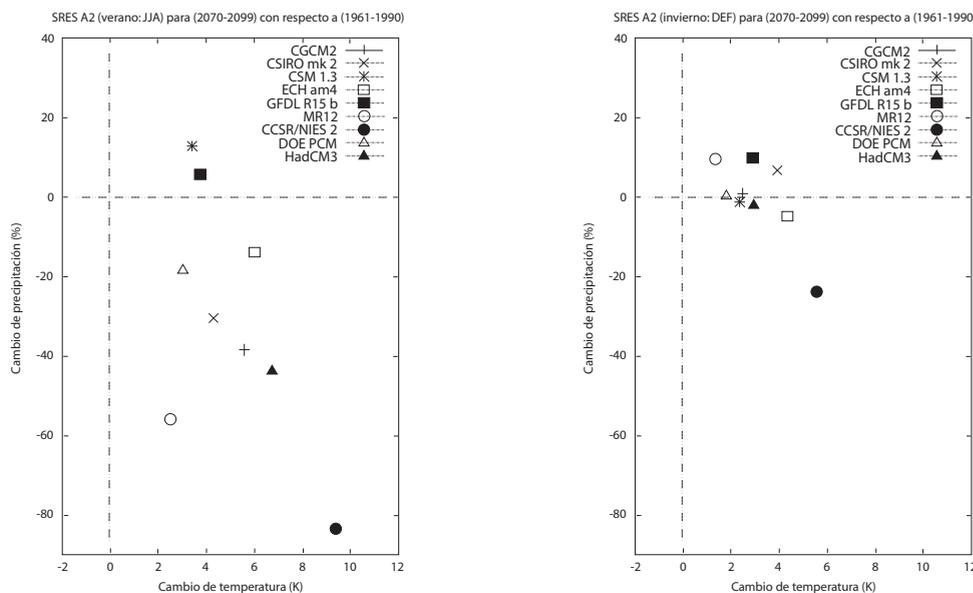


Figura 2. Cambio de precipitación (%) y temperatura (°C) para el período 2070-2100 con respecto al período 1961-1990. Los datos proceden de nueve modelos globales revisados en el IPCC (2001). Se representan dos estaciones –verano (izquierda) e invierno (derecha)– para el escenario de emisión SRES A2 y promediando los puntos de rejilla sobre la Península Ibérica.

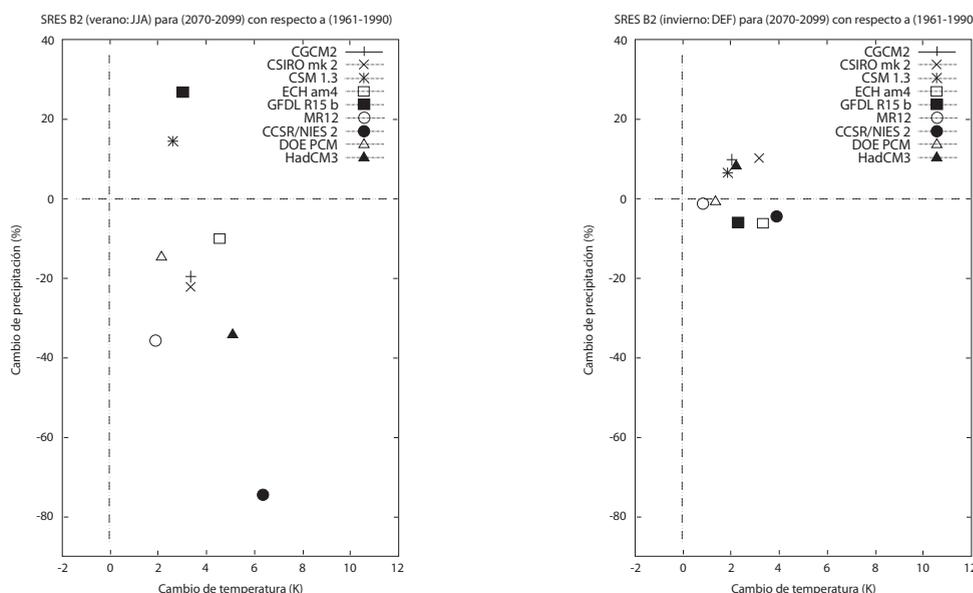


Figura 3. Igual que la figura 2, pero para el escenario de emisión SRES B2.

climático muestran una considerable dispersión, reflejando distintas representaciones de la sensibilidad del clima a cambios en el forzamiento externo (sensibilidad climática), y por lo tanto, un alto nivel de incertidumbre, que depende en gran medida de las regiones, estaciones, variables, etc. Los procesos mismos simulados por los AOGCM incluyen incertidumbres. De hecho, la modelización del sistema climático ha ido añadiendo complejidad y subsistemas adicionales con el paso de los años. Por ejemplo, gran parte

de las simulaciones realizadas en los últimos años suponían que la vegetación era constante en el tiempo y permanecía invariable en simulaciones seculares de cambio climático antropogénico. En la realidad, la vegetación, que lógicamente depende de las condiciones climáticas cambiantes, tiene también capacidad para afectar al clima, y como tal debería simularse.

Para ilustrar una primera aproximación a la evaluación de las incertidumbres de los modelos globales para el caso particular de la Península Ibérica se

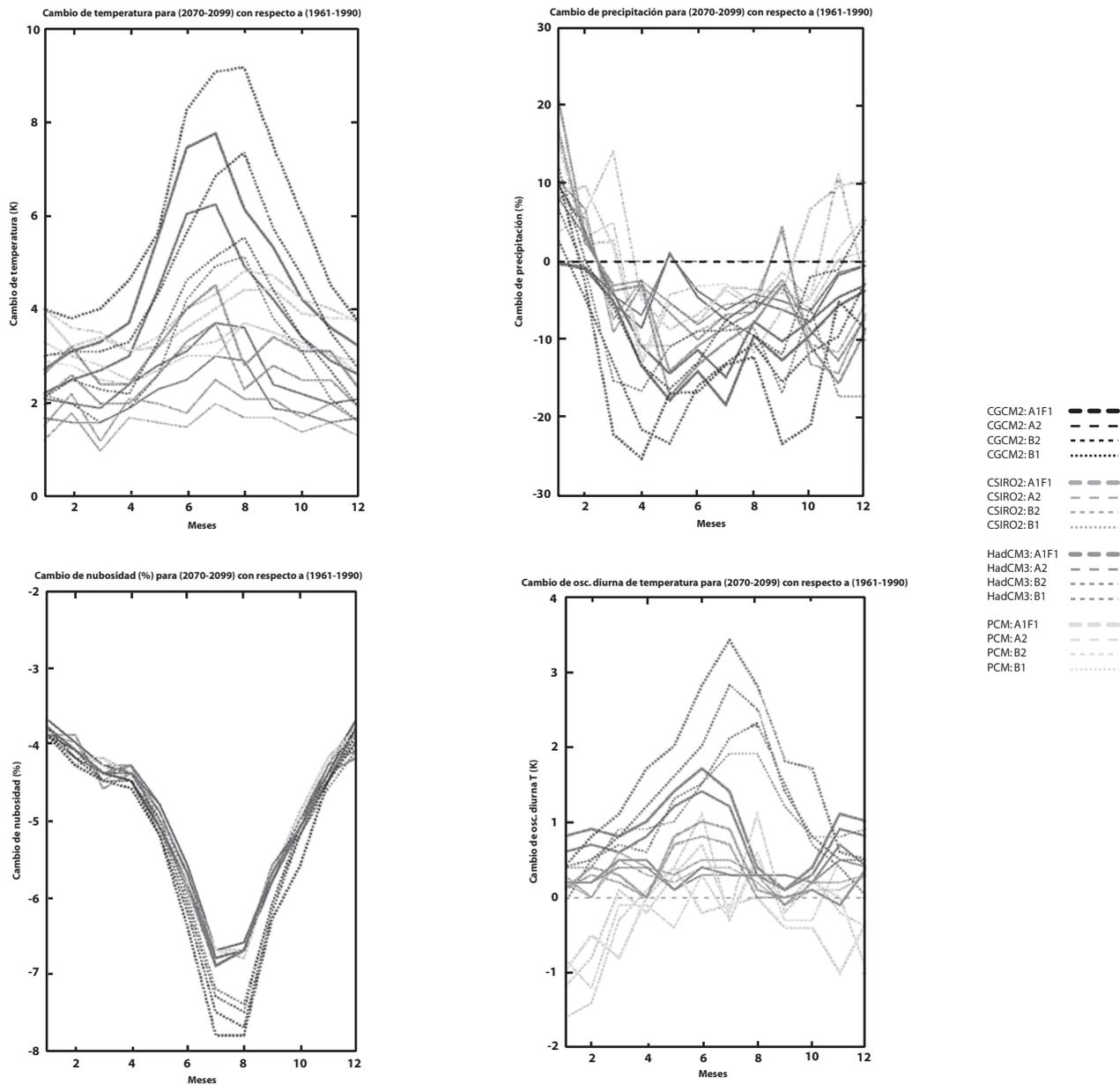


Figura 4. Cambio de temperatura media (arriba, izq.), precipitación (arriba, der.), nubosidad (abajo, izq.) y oscilación diurna (abajo, der.) para el período 2070-2100 respecto al período de referencia (1961-1990) en función de los distintos meses, proporcionado por cuatro modelos globales (CGCM2, CSIRO2, HadCM3 y PCM) y cuatro escenarios de emisión SRES (A1F1, A2, B2 y B1) promediando los puntos de rejilla sobre la Península Ibérica.

Recargue las pilas

Muchos aparatos permiten en la actualidad baterías convencionales y recargables. Consumen lo mismo pero su proceso de fabricación produce tanto desgaste de energía y son tan poco biodegradables que en la medida que se re-usen, pues menos habrá que fabricar y que botar.

muestra (véanse las figuras 2 y 3) la evolución que proporcionan algunos de los diferentes modelos globales participantes en el IPCC-TAR (2001). Utilizando los datos extraídos por Mitchell *et al.* (2002) de la base de datos IPCC-DDC para el período 2070-2100 y representando el cambio de precipitación en función del cambio de temperatura respecto al período de referencia (1961-1990), se observa para el escenario de emisión SRES A2 un claro aumento de temperatura de entre 3 y 9 °C (entre 2 y 6 °C para SRES B2) en verano, y entre 2 y 5°C (entre 1,5 y 4 °C para SRES B2) en invierno. Por el contrario, el cambio de precipitación apenas es significativo en invierno, y es predominantemente negativo en verano, aunque algunos modelos invierten esta última tendencia.

Si se representa el cambio promediando por meses, se observa una clara variación estacional. La figura 4 muestra el cambio proporcionado por cuatro modelos globales (CGCM2, CSIRO2, HadCM3 y PCM) y cuatro escenarios de emisión SRES (A1FI, A2, B2 y B1) en cuatro parámetros (temperatura, nubosidad, precipitación y oscilación diurna). Se muestra que el grado de robustez de las diferentes evoluciones varía ampliamente. Para la temperatura, la dispersión entre los distintos modelos y escenarios de emisión es bastante grande, mostrando claramente valores mayores de cambio y mayor dispersión también en los meses de verano. La nubosidad muestra disminuciones bastante consistentes para casi todos los modelos y escenarios de emisión, oscilando su valor entre una reducción de aproximadamente un 4% en invierno y hasta un 8% en verano. La precipitación muestra también una gran dispersión entre modelos y escenarios de emisión, si bien parece haber una tendencia generalizada a la reducción, salvo en los meses invernales. La dispersión de la oscilación diurna es en

general grande, con predominio del aumento de la oscilación, sobre todo fuera del período invernal.

Gran parte de las incertidumbres provenientes de los modelos globales provienen de procesos de retroalimentación que, o bien no son suficientemente conocidos, o bien tienen diferentes formulaciones en los diferentes AOGCM. Éste es el caso de la retroalimentación debida a las nubes, a los procesos ligados al ciclo del carbono, a los aerosoles, a los procesos en los que intervienen la nieve y los hielos marinos y a los procesos debidos a la liberación de metano.

Gran parte de las incertidumbres provenientes de los modelos globales provienen de procesos de retroalimentación que, o bien no son suficientemente conocidos, o bien tienen diferentes formulaciones en los diferentes AOGCM.

Incertidumbres estructurales

Bajo este epígrafe se incluyen las incertidumbres asociadas a la absoluta falta de conocimiento de algún proceso que afecte al sistema climático. A modo de ejemplo se puede mencionar el relativamente reciente papel de la “circulación de aguas profundas” como posible agente de cambio climático abrupto. De hecho, las simulaciones del

sistema climático se han ido haciendo más complejas al incluir subsistemas y procesos que en los primitivos modelos no estaban contemplados.

Incertidumbres en las técnicas de regionalización

Las distintas técnicas de regionalización (estadísticas y dinámicas) contribuyen a la incertidumbre con fuentes de error adicionales. Los métodos estadísticos sufren, en su capacidad predictiva, la limitación específica debida a que las relaciones entre las variables a gran escala y las variables locales no tienen porqué mantenerse frente a cambios en el clima. De hecho las relaciones entre ambas variables se establecen en un período relativamente corto observacional y se prescriben para situaciones futuras que pueden distar

bastante en el tiempo. Los RCM añaden fuentes de error similares a las de los AOGCM con los que son forzados y algunas específicas a la simulación a escala regional. La incertidumbre en el forzamiento radiativo asociada a la distribución espacio-temporal de aerosoles tiene una relevancia especial a escala regional debido a la heterogeneidad del forzamiento y la respuesta. Otro aspecto que incide de forma importante en estas escalas son las variaciones en usos de suelo y el realismo en los modelos de suelo. La evaluación de incertidumbres a escala regional se complica adicionalmente por la baja relación de la señal de respuesta frente a la variabilidad climática interna. Éste es especialmente el caso de variables como la precipitación, no directamente relacionadas con el forzamiento externo, y cuya estimación en sí misma posee ya unas incertidumbres que dependen de otros factores meteorológicos. 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 a la hora de determinar los impactos.

Las incertidumbres provenientes de las distintas técnicas de regionalización, bien sea basadas en métodos empíricos o en modelos regionales, se han explorado ampliamente en el contexto europeo en el marco de proyectos FP5 EU: Stardex (<http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/>) y Prudence (<http://prudence.dmi.dk/>).

En el experimento Prudence se han comparado modelos acoplados de atmósfera-oceano, modelos globales solamente atmosféricos de alta resolución y modelos regionales de clima. La mayor parte del experimento se ha centrado en un único escenario de emisión, A2, si bien algunos experimentos se han realizado también con el escenario B2.

Efectos de la variabilidad natural

Una fuente adicional de incertidumbre en las proyecciones de clima futuro surge como consecuencia de los efectos de la variabilidad natural. Para un cierto período en el futuro (p.e., 2071-2100), la variabilidad natural puede reforzar el cambio de origen antropogénico o puede contrarrestarlo. Es importante, por lo tanto, considerar la variabilidad en los estudios de impacto y adaptación al cambio climático. Como no se puede predecir la variabilidad natural del clima determinísticamente sobre largas escalas temporales, es razonable hacer uso de un *ensemble* de experimentos, cada uno empezando con distintas condiciones iniciales para el sistema oceano-atmósfera.

Los efectos de la variabilidad natural son mayores a medida que la escala temporal disminuye, siendo más importantes en las escalas entre anuales y decadales. Esto se puede ilustrar mediante el registro de la proyección de la precipitación anual sobre un punto de rejilla en la Península Ibérica calculado mediante tres miembros de un *ensemble* que parten de

Desenchufe el cargador del celular

Los cargadores de los celulares continúan conduciendo electricidad así no estén recargando la batería del aparato. Es mejor desenchufarlos cada vez que se utilizan. Sucede lo mismo con los cargadores de las pilas recargables y con los de algunos modelos de cámaras fotográficas.

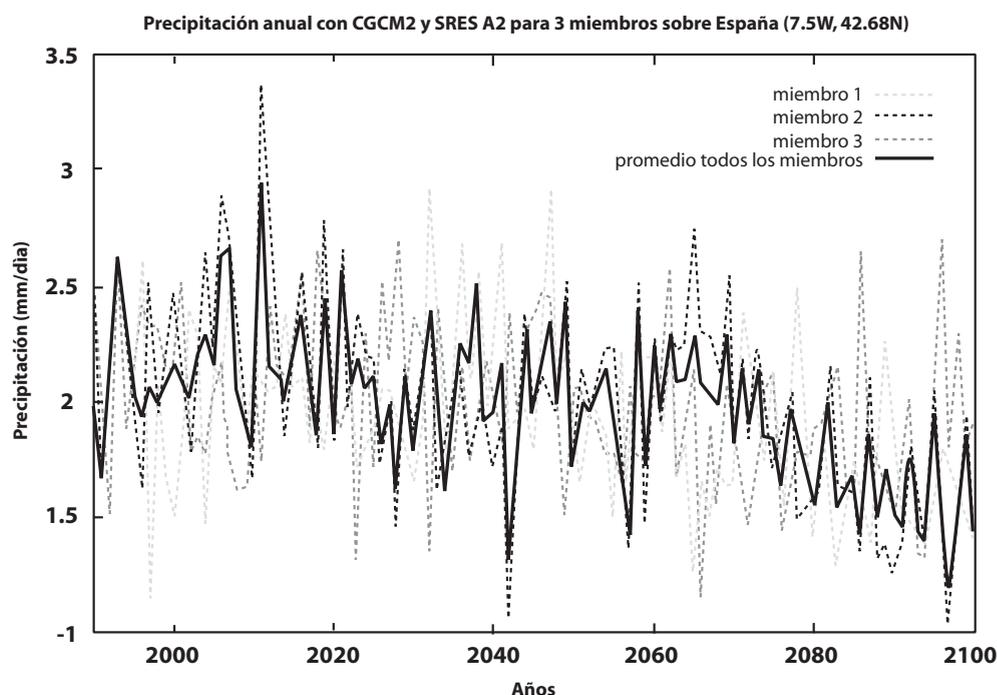


Figura 5. Evolución de la precipitación anual sobre un punto de rejilla (7,5 °W, 42,68 °N) en la Península Ibérica calculado para tres miembros de un ensemble del modelo global CGCM2 correspondientes al escenario de emisión SRES A2. La línea gruesa representa el promedio sobre todos los miembros del ensemble.

condiciones iniciales distintas (figura 5) desde 1990 y correspondientes al escenario de emisión SRES A2 utilizando el modelo global CGCM2. Las tres proyecciones para la precipitación anual son muy diferentes cuando se comparan año a año o década a década, lo que indica que la evolución precisa década a década de la precipitación para los próximos 100 años es mucho más dependiente de la variabilidad climática interna que del forzamiento antropogénico del clima. Sin embargo, las tres series sugieren una tendencia a largo plazo hacia una reducción en la precipitación anual. Esta gráfica ilustra el problema de adaptación a las tendencias a largo plazo en el clima, a la vez que es necesario gestionar la importante e impredecible variabilidad climática natural que afecta a las escalas anuales y decadales. Las proyecciones climáticas regionalizadas que se presentan en este informe no pueden predecir la precipitación en el rango que va desde 1 a 10 años, que está sustancialmente afectada por la variabilidad climática natural. En consecuencia, y para eliminar estas fluctuaciones que enmascaran las tendencias a largo plazo, es recomendable promediar los diferentes miembros de un *ensemble* o utilizar promedios temporales suficien-

temente largos (p.e., 30 años), que filtran las oscilaciones naturales del clima.

Cuantificación de las incertidumbres procedentes de distintas fuentes

En el ya mencionado proyecto Prudence se han comparado modelos acoplados de atmósfera-oceano, modelos globales solamente atmosféricos de alta resolución y modelos regionales de clima. La mayor parte del experimento se ha centrado en un único escenario de emisión, A2, si bien algunos experimentos se han realizado también con el escenario B2.

En el contexto de Prudence se ha estudiado la dispersión de los distintos GCM y RCM alrededor de su centroide medida por la desviación estándar inter-modelos, que permite explorar el grado de acuerdo de los diferentes modelos y por lo tanto explorar la incertidumbre asociada a los GCM y RCM (Dequé *et al.*, 2005). Se ha visto (véase figura 6) que la dispersión de los GCM es mayor que la de los RCM (forzados por el mismo GCM) para el caso de la temperatura, tanto en verano como en invierno. Esto es consistente con la ligadura adicional de los RCM por

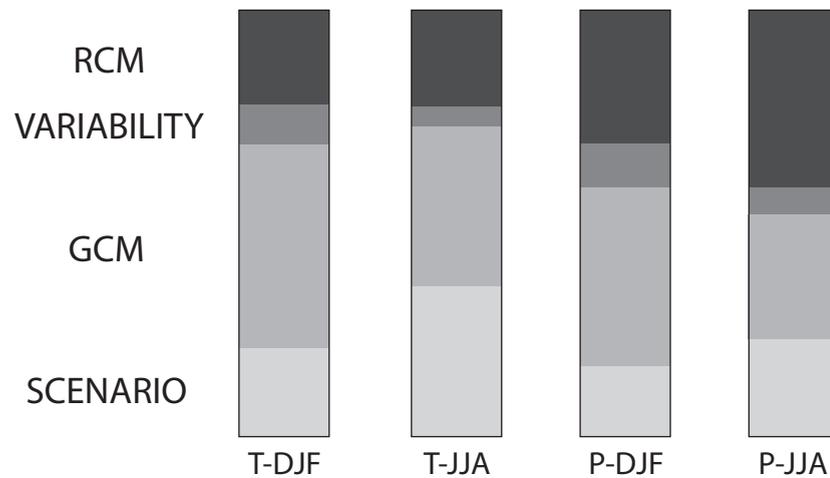


Figura 6. Fuentes de incertidumbre en la simulación del cambio de temperatura y de precipitación (2071-2100 menos 1961-1990) por el ensemble de simulaciones Prudence (tomado de Déqué *et al.*, 2005).

las condiciones de contorno. En el caso de la precipitación, el comportamiento es distinto; los RCM muestran mayor dispersión que los GCM en el verano. Esto puede explicarse por el hecho de que los GCM poseen una resolución más baja que los RCM y pierden algunos forzamientos orográficos.

En una primera evaluación para estimar el rango de la incertidumbre de las proyecciones de cambio climático sobre la península Ibérica asociado a la elección de los GCM, de los RCM y de los escenarios de emisión, se han seleccionado, a partir de los modelos utilizados en el proyecto Prudence, dos modelos regionales (DMI y SMHI), a su vez anidados en dos modelos climáticos globales (HadAM3H y ECHAM4/OPYC) y para dos escenarios de emisión (A2 y B2). Se han evaluado los cambios de la tem-

peratura media y de la precipitación para el período 2071-2100 respecto a los valores medios del período de control usado por estos modelos (1961-1990) solamente para la parte peninsular de España. Las figuras 7 y 8 representan el valor medio (punto central) y el rango de valores que se distancia del valor medio en \pm una desviación estándar (línea vertical) para la temperatura media y la precipitación, respectivamente, para las ocho proyecciones seleccionadas (2 GCM \times 2 RCM \times 2 escenarios SRES) y para las cuatro estaciones del año.

La incertidumbre proveniente de los RCM en el cambio de la temperatura media para el área analizada es pequeña comparada con las diferencias entre los GCM y entre los escenarios analizados que muestran diferencias claramente mayores. A su vez, el período

Apague el carro cuando está esperando a alguien

Por regla general, la persona que uno está esperando se demora más de lo que uno cree, apague el carro desde el momento que llega al lugar de encuentro. Otra cosa, los carros de ahora no necesitan calentarse cuando se prenden, absténgase de hacerlo por mucho frío que esté haciendo.

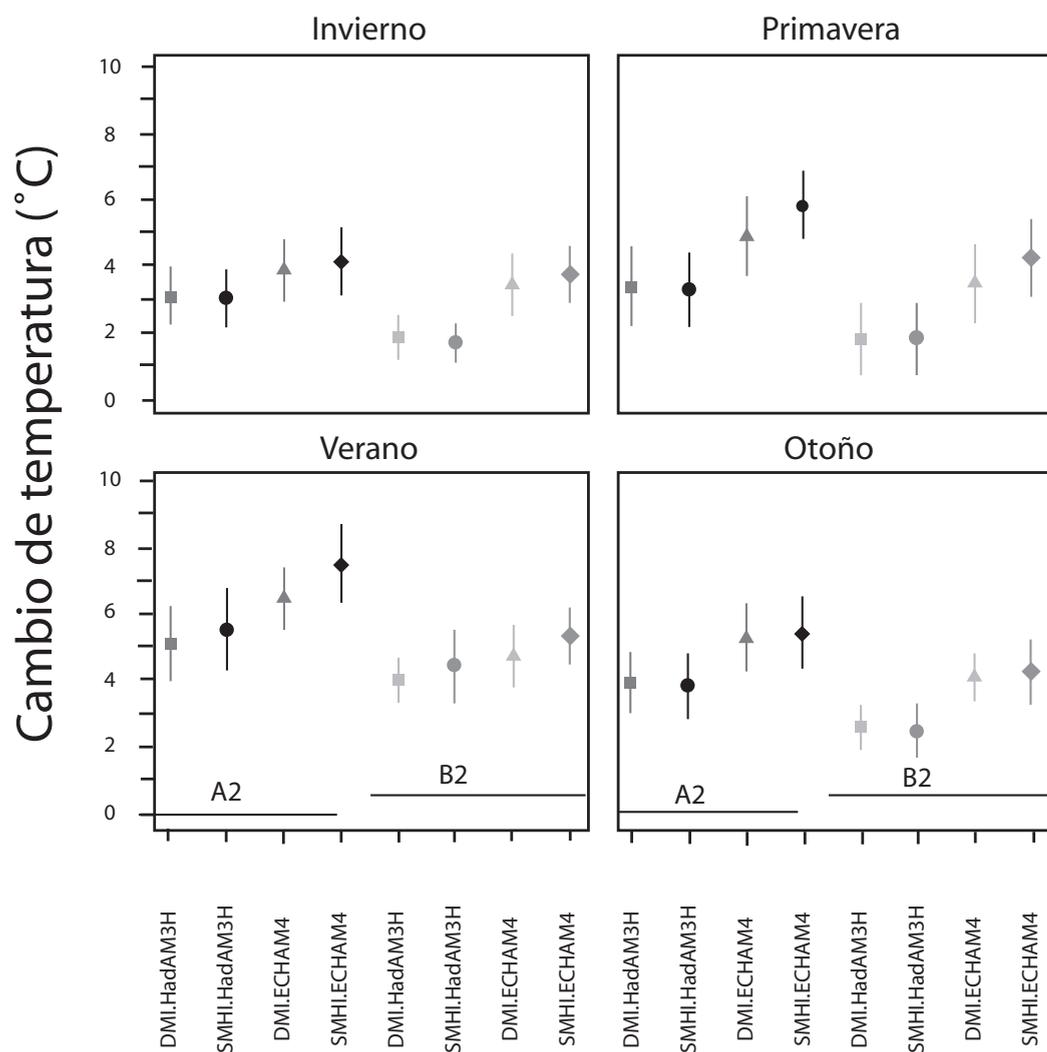


Figura 7. Valor medio de la diferencia de temperatura del período 2071-2100 respecto al período 1961-1990 para la España peninsular en invierno, primavera, verano y otoño. Este valor se ha estimado a partir de dos modelos regionales (DMI y SMHI), dos modelos globales (HadAM3H y ECHAM4/OPYC) y dos escenarios de emisión (A2 y B2). Cada barra indica la separación en +/-1 desviación estándar respecto de la media.

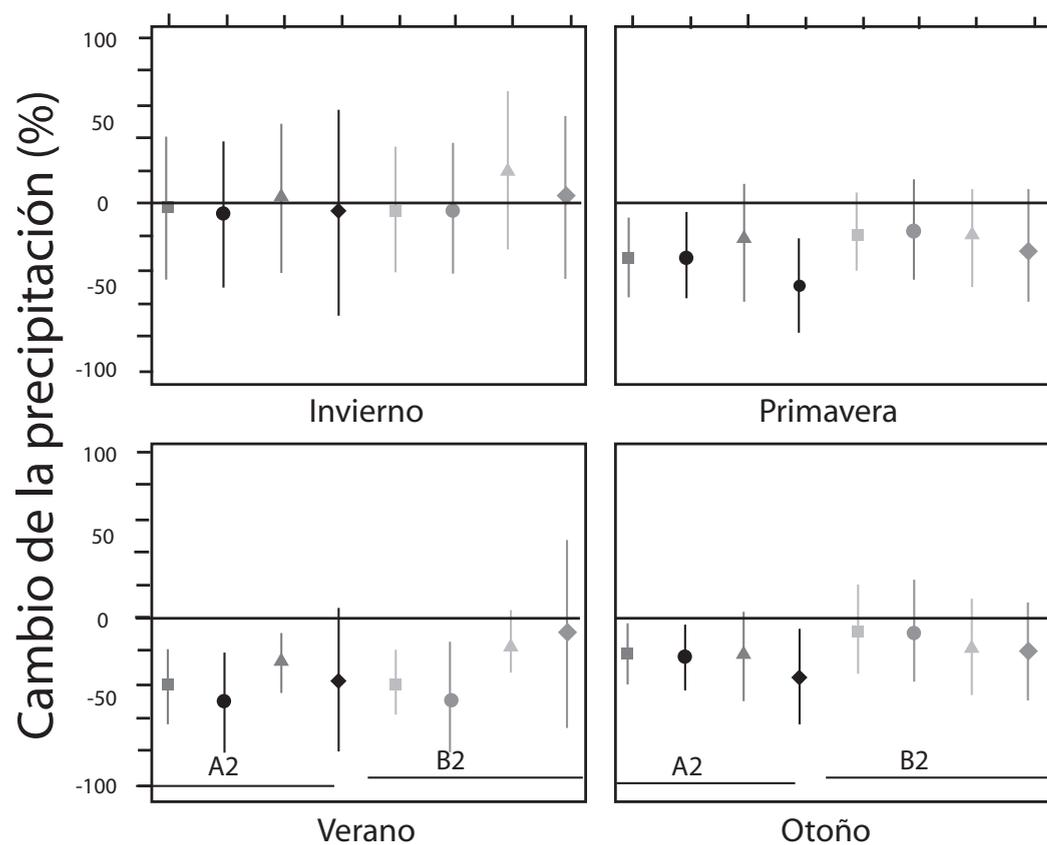


Figura 8. Igual que la figura 7, pero para precipitación.

invernal es el que muestra menores diferencias entre los RCM, posiblemente debido a la predominancia de los efectos advectivos, regidos principalmente por la elección de las condiciones de contorno.

Para el cambio de precipitación, en líneas generales, la dispersión es mayor que la diferencia que puede existir entre las diferentes proyecciones realizadas. La dispersión en términos porcentuales es mayor durante el período invernal y durante el estival. En este último caso, puede ser determinante la escasez de lluvias estivales. Uno de los modelos regionales (SMHI) muestra en los meses de verano una mayor dispersión que el otro.

Recomendaciones de uso de las diferentes proyecciones regionalizadas

En la sección anterior se han descrito algunas de las incertidumbres que afectan al proceso de generación de proyecciones regionalizadas de cambio climático. Tal y como allí se ha escrito, algunas de ellas pueden explorarse e incluso acotarse mediante la utilización de *ensembles* de proyecciones. Los *ensembles* están constituidos idealmente por un número suficiente de miembros que permiten cuantificar las incertidumbres de las proyecciones, bien sea me-

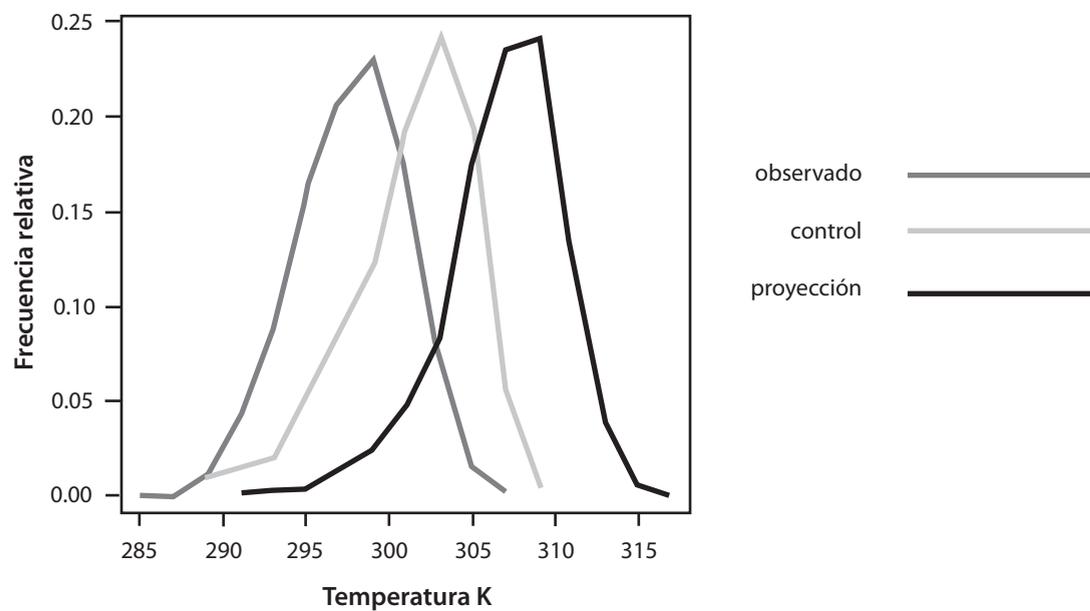


Figura 9. Distribución de temperatura para una localidad y mes fijados obtenida a partir de: (i) serie diaria de observaciones en el período 1961-1990; (ii) simulación de control (AOGCM + regionalización) en el período 1961-1990; (iii) simulación futura (AOGCM + regionalización) bajo un escenario de emisión en el período 2071-2100.

Compre un carro de cambios manuales

El conductor asertivo sabe que lo más importante es hacer más kilómetros por galón de gasolina. En esa medida, también se ahorra más energía. Los carros de transmisión automática consumen más combustible por el simple hecho de que es el vehículo el que controla la velocidad, no usted.

dianter rangos, o mediante funciones de densidad de probabilidad.

Las proyecciones probabilísticas basadas en *ensembles* pueden asignar un peso a cada miembro del *ensemble* que dependa de la calidad o grado de confianza que se asigne a cada uno de ellos. Esta ponderación de los miembros es actualmente tema de investigación activa y no existe un grado suficiente de consenso sobre su aplicación práctica. De hecho, en la mayoría de las implementaciones operativas para predicción probabilística para el corto tanto como para el medio plazo se consideran todos los miembros del *ensemble* como equiprobables.

En la práctica, con frecuencia la selección de modelos globales y de técnicas de regionalización no sigue solamente criterios de calidad, sino también criterios de accesibilidad y disponibilidad, tanto de datos de modelos globales (con la resolución temporal deseada) como de técnicas de regionalización (previamente utilizadas y evaluadas para otros fines).

La recomendación fundamental para los distintos usuarios es la utilización de la mayor cantidad de proyecciones basadas en diferentes escenarios de emisión, en diferentes modelos globales y en diferentes técnicas de regionalización para explorar el efecto de estas incertidumbres en sus modelos concretos de impacto. La utilización de una única proyección en los estudios de impacto confiere a éstos un valor muy relativo, ya que las proyecciones pueden depender fuertemente de la elección hecha del modelo global, del escenario de emisión y de la técnica de regionalización.

Finalmente, debe insistirse mucho en el hecho de que habitualmente las proyecciones regionalizadas muestran diferencias entre climatologías de proyecciones futuras realizadas bajo un escenario de emisión y un período de control obtenidos ambos a partir de un modelo climático global con el correspondiente método de regionalización, bien sea dinámico

o estadístico. Esto no implica que la simulación del período de control esté libre de sesgos o errores medios cuando se compara frente a observaciones o frente a análisis obtenidos a partir de éstas. De hecho, suele ser bastante habitual que haya desviaciones entre la climatología observada y la climatología que se utiliza como control. En muchos casos, la diferencia entre ambas climatologías (observada y de control) es comparable a la diferencia que se aprecia entre la climatología de proyecciones futuras y la de control (Giorgi y Francisco, 2000). Si se mantiene la hipótesis de que los sesgos que se obtienen en las simulaciones de control también se mantendrán en las proyecciones futuras, pueden estimarse los valores absolutos de éstas a partir de la observación y de la diferencia entre la simulación

futura y la de control.

La figura 9 muestra un ejemplo de distribución de la temperatura regionalizada para una localidad dada y para un mes del año fijado obtenido a partir de la serie diaria de observaciones (obs), de la simulación de control (con) para el mismo período de referencia que la serie de observaciones (obtenida a partir de un AOGCM a cuyas salidas se ha aplicado una técnica de regionalización), y finalmente de la simulación para una proyección futura (pr) con un escenario de

Debe insistirse mucho en el hecho de que habitualmente las proyecciones regionalizadas muestran diferencias entre climatologías de proyecciones futuras realizadas bajo un escenario de emisión y un período de control obtenidos ambos a partir de un modelo climático global con el correspondiente método de regionalización, bien sea dinámico o estadístico.

emisión prefijado (obtenida igualmente a partir de un AOGCM y una técnica de regionalización). Al tratarse de un ejemplo obtenido con datos reales, la curva de distribución no tiene por qué ajustarse exactamente a una distribución gaussiana. Si se desea obtener la distribución de la proyección futura en valor absoluto y que sea consistente con las observaciones, es razonable corregir la distribución de la proyección simulada con el sesgo de la simulación de control (con-obs), o lo que es lo mismo, a la distribución observada sumarle el cambio entre proyección futura y control:

$$pr_{corr} = pr - (con-obs) = obs + (pr-con).$$

Conclusiones

Dentro del aspecto metodológico, se ha prestado especial atención a la discusión de las incertidumbres que indefectiblemente contaminan las proyecciones climáticas. Algunas de estas incertidumbres pueden explorarse con métodos probabilísticos que constituyen el marco ideal para expresar las estimaciones de cambio climático. También se ha insistido en que la existencia de incertidumbres no implica necesariamente falta radical de conocimiento del comportamiento del sistema climático. La existencia misma de incertidumbres prescribe un marco conceptual probabilístico que se desarrolla mediante el uso de *ensembles* que explora distintas alternativas de evolución del sistema climático. La colección de proyecciones

regionalizadas debe tener un suficiente número de miembros que permita explorar las principales fuentes de incertidumbre y que utilice alguna técnica de ponderación para primar los miembros del *ensemble* que objetivamente sean de más calidad.

Se han presentado las fortalezas y debilidades asociadas al estado actual del conocimiento tanto de los modelos globales como regionales. Asimismo, se han presentado las líneas de trabajo que permitirán elaborar la siguiente generación de modelos globales y regionales.

La disponibilidad de escenarios regionalizados de cambio climático es el primer y necesario elemento para comenzar los estudios de impacto en los diferentes sectores sensibles a las condiciones climáticas y para planificar la posterior estrategia de adaptación para cada uno de dichos sectores. Los escenarios de cambio climático deberán idealmente basarse en una visión probabilística de la evolución de la atmósfera que integre las incertidumbres que actualmente existen y que se generan en todos los pasos de su producción.

Bibliografía

BADER, D.C., C. COVEY, W.J. GUTOWSKI, I.M. HELD, K.E. KUNKEL, R.L. MILLER, R.T. TOKMAKIAN & M.H. ZHANG. 2008. *Climate Models: An Assessment of Strengths and Limitations. A Report by the U.S. Climate Change Science*

Abra las ventanas del carro

Procure, en lo posible, no utilizar el aire acondicionado del carro, es el dispositivo que, después del motor, más afecta el consumo de gasolina. A menos que esté a 40 °C a la sombra y esté de corbata, abra las ventanas, póngale "sunroof" al carro que, a la postre, le saldrá más barato.

- Program (CCSP) and the Subcommittee on Global Change Research*. Washington DC, Department of Energy, Office of Biological and Environmental Research. 124 pp.
- BRUNET, M., M.J. CASADO, M. CASTRO, P. GALÁN, J.A. LÓPEZ, J.M. MARTÍN, A. PASTOR, E. PETISCO, P. RAMOS, J. RIBALAYGUA, E. RODRÍGUEZ, I. SANZ & L. TORRES. (EN PRENSA). *Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España*. Ministerio de Medio Ambiente.
- CASTRO, M., J. MARTÍN-VIDE & S. ALONSO. 2005. «El clima de España: pasado, presente y escenarios de clima para el siglo XXI». En: *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático*. Informe del Ministerio de Medio Ambiente. Disponible en: http://www.mma.es/secciones/cambio_climatico/areas_tematicas/impactos_cc.
- DEQUE, M., R.G. JONES, M. WILD, F. GIORGI, J.H. CHRISTENSEN, D.C. HASSELL, P.L. VIDALE, B. ROCKEL, D. JACOB, E. KJELLSTROM, M. DE CASTRO, F. KUCHARSKI y B. VAN DE HURK. 2005. «Global high resolution versus Limited Area Model climate change projections over Europe: quantifying confidence level from PRUDENCE results». *Climate Dynamics* 25(6), 653-670. DOI: 10.1007/s00382-005-0052-1.
- GAERTNER, M.A., J.M. GUTIÉRREZ, F. GONZÁLEZ, A. RUIZ-ELVIRA & E. RODRÍGUEZ. 2006. «Programa coordinado para generación de escenarios regionalizados de cambio climático». España, Ministerio de Medio Ambiente, noviembre de 2006.
- GIORGI, F. y R. FRANCISCO. 2000. «Evaluating uncertainties in the prediction of regional climate change». *Geophysical Research Letters* 27, 1295-1298.
- HULME, M., G.J. JENKINS, X. LU, J.R. TURNPENNY, T.D. MITCHELL, R.G. JONES, J. LOWE, J.M. MURPHY, D. HASSELL, P. BOORMAN, R. McDONALD & S. HILL. 2002. *Climate Change Scenarios for the United Kingdom: The UKCIP02 Scientific Report*. Norwich (UK), University of East Anglia, School of Environmental Sciences, Tyndall Centre for Climate Change Research.
- IPCC. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. HOUGHTON, J.T., Y. DING, D.J. GRIGGS, M. NOGUER, P. J. VAN DER LINDEN & D. XIAOSU (eds.). Cambridge (UK), Cambridge University Press. 944 pp.
- 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*. SALOMON, S., D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K.B. AVERYT, M. TIGNOR & K.L. MILLER (eds.). Cambridge (UK) & New York, Cambridge University Press. 996 pp.
- MÍGUEZ-MACHO, G., G.L. STENCHIKOV & A. ROBOCK. 2004. «Spectral nudging to eliminate the effects of domain position and geometry in regional climate simulations». *Journal of Geophysical Research* 109. D13104, DOI: 10.1029/2003JD004495.
- MITCHELL, T.D. & M. HULME. 1999. «Predicting regional climate change: living with uncertainty». *Progress in Physical Geography* 23 (1), 57-78.
- & M. NEW. 2002. «Climate data for political areas». *Area* 34: 109-112.
- NAKICENOVIC, N., J. ALCAMO, G. DAVIS, B. DE VRIES, J. FENHANN, S. GAFFIN, K. GREGORY, A. GRÜBLER, T.Y. JUNG, T. KRAM, E.L. LA ROVERE, L. MICHAELIS, S. MORI, T. MORITA, W. PEPPER, H. PITCHER, L. PRICE, K. RAIHI, A. ROEHL, H.-H. ROGNER, A. SANKOVSKI, M. SCHLESINGER, P. SHUKLA, S. SMITH, R. SWART, S. VAN ROOIJEN, N. VICTOR & Z. DADI. 2000. *Emission Scenarios. A Special Report of Working*

- Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge (UK) & New York, Cambridge University Press. 599 pp.
- SCHELLNHUBER, H.J. y H. HELD. 2002. «How Fragile is the Earth System?» En: BRIDEN, J.C. y T.E. DOWNING (eds.). *Managing the Earth. The Linacre Lectures, 2001*. Oxford University Press.
- STANIFORTH, A. 1997. «Regional modelling: a theoretical discussion». *Meteorology and Atmospheric Physics* 63, 15-29.
- VON STORCH, H., H. LANGENBERG y F. FESER. 2000. «A Spectral Nudging Technique for Dynamical Downscaling Purposes». *Monthly Weather Review* 128, 3664-3673.
- WCRP. 2007. «Informal report». N° 3.
- WILBY, R.L. & T.M.L. WIGLEY. 1997. «Downscaling General Circulation Model output: a review of methods and limitations». *Progress in Physical Geography* 21, 530-548.

ERNESTO RODRÍGUEZ CAMINO

Actualmente, a cargo del Servicio de Modelización Numérica del Tiempo (Subdirección General de Programas Especiales e Investigación Climatológica) de la Agencia Estatal de Meteorología, Madrid (España).

Comparta el carro

La mayoría de sus compañeros de oficina llegan solos, manejando carros de cuatro pasajeros. ¿No es mejor solamente un carro consumiendo gasolina y contaminando el ambiente que cuatro? Además, es más seguro manejar acompañado y, sin lugar a dudas, más animado y entretenido.