

Cómo abordar las necesidades de información climática a nivel regional: el marco del CORDEX

por Filippo Giorgi¹, Colin Jones² y Ghassem R. Asrar³

Introducción

La necesidad de disponer de información relativa al cambio climático a escalas que van desde el ámbito regional al local constituye uno de los aspectos que centran el debate sobre el cambio global. Este tipo de información es necesario para evaluar los impactos del cambio climático sobre los seres humanos y los sistemas naturales, así como de cara a desarrollar estrategias adecuadas de adaptación y mitigación a nivel nacional. Las comunidades de usuarios finales y de encargados de la elaboración de políticas han solicitado durante mucho tiempo la posibilidad de contar con proyecciones fiables a escala regional y local, a fin de contar con una base sólida para determinar las opciones de respuesta.

Hasta la fecha, la mayor parte de la información regional relacionada con el cambio climático se ha basado en la utilización de modelos de circulación general acoplada atmósfera-océano (MCGAO) habilitados por el Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (PMIC) durante los últimos treinta años (Busalacchi y Asrar, en este número del *Boletín de la OMM*). Los MCGAO han demostrado ser las herramientas más valiosas de cara a comprender los procesos que determinan la respuesta

del sistema climático a los forzamientos antropogénicos, como por ejemplo el incremento en las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) y los cambios en la utilización del terreno y en las concentraciones de aerosoles atmosféricos. También han suministrado una importante información sobre el cambio climático a escala mundial y subcontinental (IPCC, 2007). Aunque hemos sido testigos de notables mejoras en estos modelos, especialmente en el último decenio gracias a la mejor representación de los procesos atmosféricos y de la superficie de la Tierra y al aumento de la capacidad computacional, la resolución horizontal de la mayor parte de los MCGAO actuales sigue siendo del orden de unos pocos cientos de kilómetros (Meehl et al., 2007), lo que impide que puedan registrar los efectos de los forzamientos a nivel local (por ejemplo, la topografía compleja y las características de la superficie del terreno), que son los que modulan la señal climática en el caso de las escalas finas.

Su resolución gruesa también descarta que los modelos mundiales puedan ofrecer una descripción precisa de los fenómenos extremos, que tienen una importancia fundamental para los usuarios de la información climática con respecto a los impactos regionales y locales de la variabilidad del clima y del cambio climático. En otras palabras: sigue existiendo una brecha fundamental en términos de escala espacial entre la información climática ofrecida por los MCGAO y los datos necesarios para llevar a cabo un trabajo de evaluación de impactos.

Con el fin de sortear este problema, se han desarrollado diversas técnicas de "regionalización" o "*downscaling*"; para así perfeccionar la información climática del MCGAO en términos espaciales y tender un puente para reducir la brecha existente a escala espacial (Giorgi et al., 2001). Estas técnicas se han dividido tradicionalmente en técnicas de *downscaling* "dinámicas" y "estadísticas". El *downscaling* dinámico (DD) emplea los modelos basados en elementos físicos, como por ejemplo modelos atmosféricos globales de alta resolución o con resolución variable (modelos MCGA y VARGCM, respectivamente) ejecutados en modo de "pasos de tiempo" (por ejemplo, Cubasch et al., 1995; Deque y Piedelievre, 1995) y "modelos climáticos regionales" de área limitada o MCR (Giorgi y Mearns, 1999).

En el caso del *downscaling* estadístico (SD), las relaciones estadísticas se desarrollan en primera instancia entre predictores a gran escala y las variables objeto de predicción (predictandos) con arreglo a una escala que va del ámbito regional al local y, posteriormente, se aplican sobre los resultados procedentes de las simulaciones del modelo climático (Hewitson y Crane, 1996). Aunque existen muchos modelos y técnicas SD diferentes (por ejemplo, Wilby et al., 2004; Giorgi et al., 2001; Wigley y Wilby, 2000; Hewitson y Crane, 1996), todos comparten este marco conceptual básico. Dentro de la bibliografía especializada existe una serie de documentos disponibles para consultar el trabajo sobre *downscaling* y discutir las ventajas y limitaciones

1 Centro Internacional de Física Teórica "Abdus Salam", Trieste (Italia)

2 Centro Rossby, Instituto Meteorológico e Hidrológico de Suecia, Norrköping (Suecia)

3 Director del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas, OMM

relativas de las diferentes técnicas (Laprise et al., 2008; Schmidli et al., 2007; Giorgi, 2006; Wang et al., 2004; Leung et al., 2003; Mearns et al., 2003; Murphy, 1999; Giorgi y Mearns, 1999, 1991; McGregor, 1997), a los que se remite al lector.

Las herramientas de *downscaling* tanto dinámico como estadístico, a las cuales hacemos referencia como *downscaling* climático regional (RCD) han venido utilizándose cada vez más para abordar una serie de aspectos relacionados con el cambio climático, y en la actualidad se han convertido en un método importante en la investigación sobre el cambio climático (Huntingford y Gash, 2005). Concretamente en el último decenio, el desarrollo y la utilización de modelos RCD se ha elevado sobremedida, tal y como puso de manifiesto el incremento casi exponencial en el número de publicaciones revisadas por pares sobre esta materia (por ejemplo, los resultados del criterio de búsqueda "modelo climático regional" en las interfaces del sistema de información (ISI) pasaron de menos de cinco entradas al año hasta 1994 a más de 150 en 2008).

Una pregunta razonable que procede plantearse es si este gran desarrollo ha desembocado en un mayor uso de productos basados en el RCD para la evaluación del impacto que puede provocar el cambio climático. Salvo algunas excepciones, este no es el caso. Por ejemplo, la mayor parte del material relativo al cambio climático regional presentado en el cuarto Informe de evaluación del Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC) y empleado en trabajos de evaluación de impactos sigue estando basado en simulaciones MCGAO con una resolución relativamente gruesa (por ejemplo, Christensen et al., 2007).

¿Cuál es el motivo para que exista una infrutilización de los productos derivados del RCD? Creemos que uno de los motivos principales es la falta de un marco coordinado para evaluar las técnicas basadas en el RCD y para generar proyecciones por conjuntos de una calidad suficiente que permita determinar las incertidumbres subyacentes a las proyecciones del cambio climático regional. Estos marcos sí están dis-

ponibles para el caso de los modelos globales, como por ejemplo el Proyecto de intercomparación de modelos atmosféricos (AMIP) o el Proyecto de intercomparación de los modelos acoplados 1-3 (CMIP1-3). La comunidad internacional de modelización se ha beneficiado en gran medida de estas actividades de coordinación en términos de comprensión del proceso, evaluación del modelo y generación de proyecciones del cambio climático. En cambio, la mayor parte de los estudios de RCD han quedado aislados y atados a intereses específicos definidos, con lo cual, en la actualidad no se dispone de una imagen exhaustiva de las proyecciones del cambio climático a escala regional basadas en los experimentos de RCD.

Admitiendo esta limitación, el PMIC ha creado recientemente el Grupo especial sobre *downscaling* climático regional (TFRCD), cuyos objetivos son:

- Desarrollar un marco destinado a evaluar y posiblemente mejorar las técnicas de RCD de forma que puedan emplearse en las proyecciones climáticas de *downscaling* a nivel global.
- Fomentar un esfuerzo coordinado a nivel internacional en aras de producir una mejor información multimodelo sobre el cambio climático, de alta resolución y basada en el RCD para todas las regiones del mundo, con objeto de su aportación a los trabajos sobre impactos o adaptación y para su inclusión en el Quinto Informe de evaluación del IPCC (AR5).
- Promover una mayor interacción y comunicación entre los responsables de la elaboración de los modelos climáticos globales, la comunidad dedicada al *downscaling* y los usuarios finales, a fin de apoyar mejor las actividades relacionadas con impactos o adaptación.

Como resultado de las primeras actividades del TFRCD, y tras obtener el máximo consenso posible con la comunidad científica, se creó el denominado marco CORDEX (Experimento regional coordinado sobre *downscaling* climático). En este ar-

tículo describimos la situación del CORDEX y sus planes de futuro, la mayor parte de ellos obtenidos de un seminario celebrado en Toulouse (Francia), del 11 al 13 de febrero de 2009 (<http://wcrp.ipsl.jussieu.fr/Workshops/Downscaling/DirectionVenue.html>) y de los debates posteriores.

Generación de proyecciones climáticas regionales e incertidumbres asociadas

En este artículo emplearemos el término "regional" en un sentido amplio de la palabra para indicar el ámbito total de escalas espaciales de menos de (aprox.) 10 000 km². Con esta definición, la tarea de generar proyecciones climáticas fiables a escala regional es extremadamente complicada, puesto que la señal del cambio climático regional está afectada por procesos que tienen lugar en un amplio abanico de escalas espaciales, desde la planetaria hasta la sinóptica y mesoescalar. Por ejemplo, el efecto del incremento en la concentración de gases de efecto invernadero afectará a la circulación general de la atmósfera y a la estructura de los sistemas dinámicos de la escala planetaria. Posteriormente, esta marca climática a gran escala se modula al nivel regional y local a través de una multiplicidad de forzamientos, entre los que se incluyen la presencia de una topografía compleja, las líneas costeras y la distribución de los aerosoles.

Aunque los MCGAO se han revelado como elementos que dan buenos resultados a la hora de reproducir las principales características de la circulación general (IPCC, 2007), no representan de forma adecuada los efectos de los forzamientos que tienen lugar a escalas de regionales a locales. Asimismo y por regla general, su rendimiento suele deteriorarse al pasar de unos estadísticos climáticos de orden inferior hasta otros de orden superior, como ocurre, por ejemplo, con la variabilidad, los extremos y los regímenes meteorológicos. Además, la variabilidad climática natural tiende a elevarse a medi-

da que se afina la escala, lo que hace que la identificación de la señal del cambio climático a partir del ruido subyacente resulte más complicada.

A pesar de que las técnicas de RCD pueden mejorar la información que proporcionan los MCGAO en escalas finas si se tienen en cuenta los efectos de los forzamientos regionales, siguen viéndose afectadas por errores sistemáticos de los datos de entrada de la escala gruesa procedentes de los MCGAO. Por ejemplo, el posicionamiento de la trayectoria de un temporal en un MCGAO se propagará hasta el dominio interior de un MCR anidado. La imperfección, tanto de nuestro conocimiento como de la descripción de los procesos físicos realizada por el modelo, supone una fuente importante de incertidumbre a la hora de llevar a cabo proyecciones climáticas, lo que tiende a aumentar a medida que la escala de interés se vuelve más fina. Por regla general, como consecuencia de esta incertidumbre diferentes modelos producirán diferentes respuestas ante el mismo forzamiento climático (por ejemplo, concentración de gases de efecto invernadero). Esta incertidumbre, a la que se hace referencia como “configuración de modelo”, es una de las principales fuentes de incertidumbre en las proyecciones climáticas, y se extiende directamente desde las simulaciones de modelos globales hasta las técnicas de RCD. Se asocia con otras fuentes de incertidumbre, como por ejemplo las debidas a los escenarios de concentración y emisión de gases de efecto invernadero, la variabilidad interna y la no linealidad en el sistema climático y, en el caso del problema del *downscaling*, la elección del método de RCD (Giorgi, 2005). Ciertos estudios han puesto de relieve que las incertidumbres asociadas a la configuración y al escenario del MCG representen las principales fuentes de incertidumbre en las proyecciones del cambio climático, especialmente en escalas temporales más largas, como las centenarias. La elección de la técnica de RCD también puede ser importante, mientras que la incertidumbre relacionada con la variabilidad climática interna es importante generalmente en escalas temporales más cortas (por ejemplo, para simular el clima de 2020-2030) y para estadísticos de orden superior.

Regiones de incertidumbre en las proyecciones climáticas regionales basadas en el RCD

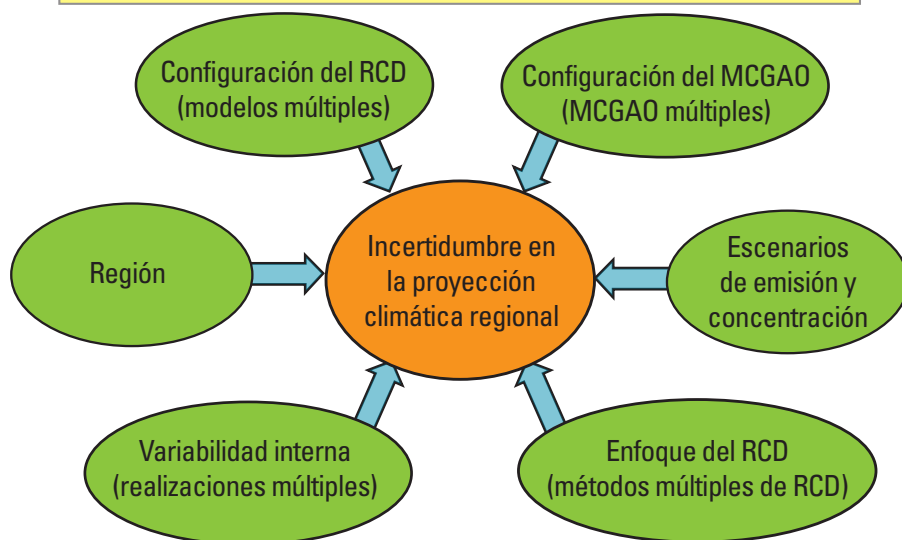


Figura 1 — Representación esquemática de las principales incertidumbres en la proyección del cambio climático regional

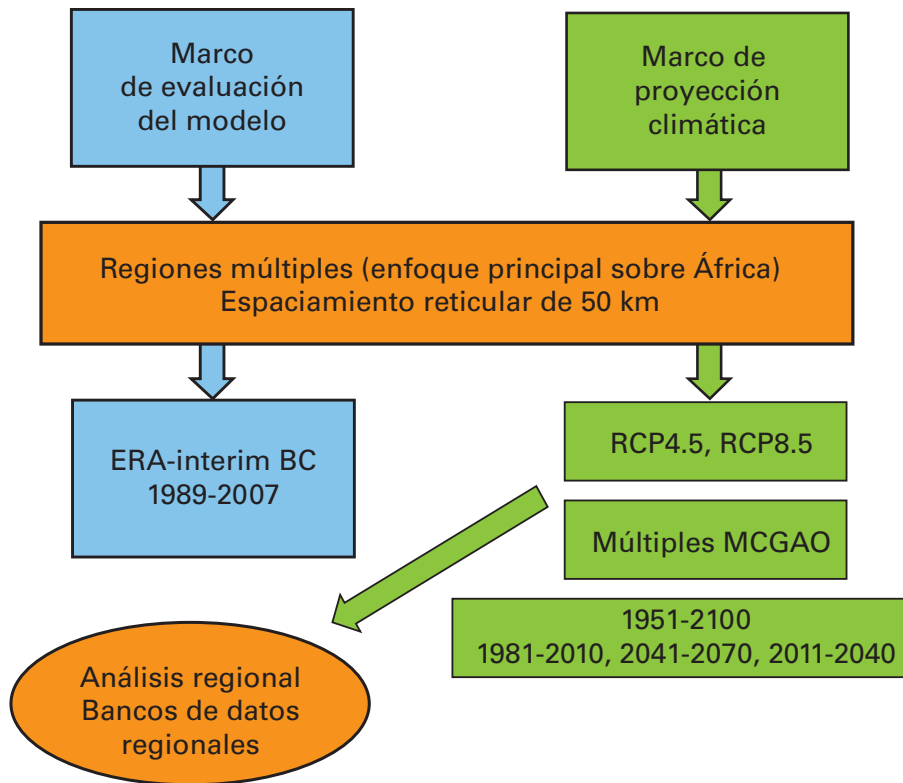
Con el fin de ofrecer información útil de cara a los estudios de evaluación de impactos, tienen que determinarse íntegramente las incertidumbres asociadas a las proyecciones del cambio climático a escala regional y, en los casos en los que sea posible, reducirse. Esto requiere la generación de conjuntos de simulaciones que analicen todas las dimensiones de la incertidumbre que procedan. El objetivo final de este proceso es la generación de información probabilística acerca del cambio climático para las variables climáticas de interés en forma de funciones de densidad de probabilidad (FDP). La amplitud de la FDP ofrece una medida de la incertidumbre: cuanto más grande sea el conjunto, mejor se podrán obtener y analizar muestras del espacio de incertidumbre. Sin embargo, un análisis completo del espacio de incertidumbre representa una tarea de enormes proporciones, puesto que requiere elaborar una matriz multidimensional de experimentos, cuyo número puede adquirir unas dimensiones gigantescas en muy poco tiempo (Giorgi et al., 2008). La Figura 1 resume el conjunto de áreas de incertidumbre que deben abarcarse a la hora de generar proyecciones del cambio climático regional basadas en productos de RCD:

- 1 Escenarios de emisión de GEI
- 2 Configuración del MCGAO
- 3 Variabilidad interna del MCGAO
- 4 Configuración del RCD
- 5 Variabilidad interna del RCD
- 6 Método de RCD
- 7 Región de interés

La fuente 1 puede analizarse simulando diferentes escenarios de emisión de gases de efecto invernadero; las fuentes 2 y 4, utilizando diferentes modelos MCGAO y RCD o, dentro del mismo sistema de modelización, empleando diferentes configuraciones de modelo (por ejemplo, parámetros físicos); las fuentes 3 y 5, llevando a cabo diferentes realizaciones del mismo escenario, usando para cada una condiciones iniciales distintas (de forma más importante para los componentes lentos del sistema climático, como las condiciones oceánicas y de la vegetación); la fuente 6, mediante el uso de diferentes métodos de RCD (por ejemplo, MCR y modelos de SD); y la fuente 7, aplicando los modelos de RCD en diferentes regiones.

Además, la fiabilidad de las proyecciones del cambio climático tiene que evaluarse a la vista de la credibilidad de los modelos. Esto, a su vez, puede medirse por el rendimiento del

Fase I del CORDEX – Diseño del experimento



dimiento del modelo y establecer un punto de referencia sobre el mismo (marco de evaluación del modelo) y, por otra, diseñar un conjunto de experimentos destinados a generar proyecciones climáticas para su utilización en estudios de impacto y de adaptación (marco de proyección climática). Estas funciones se esbozan de forma esquemática en la Figura 2, y se describen en los apartados siguientes.

Dominios y resolución del modelo

La elección de dominios de RCD comunes supone un requisito previo para el desarrollo de los marcos de evaluación del modelo y de proyección climática. El objetivo del CORDEX no es otro que ofrecer un marco accesible para una amplia comunidad científica que logre una utilización máxima de los resultados. Así pues, los dominios del CORDEX abarcan la mayor parte de las zonas terrestres del mundo. La Figura 3 muestra una primera selección de dominios comunes (actualmente aún bajo discusión), en la que estos deberían interpretarse como dominios de análisis interior, por ejemplo

Figura 2 — Representación esquemática de la configuración del experimento CORDEX en su primera fase

modelo a la hora de reproducir las condiciones climáticas observadas o los diferentes estados del clima observados en el pasado. Por tanto, el proceso de generar proyecciones del cambio climático no puede esclarecerse a partir del proceso de evaluación del rendimiento de los modelos. Así pues, lo que se requiere es un marco de gran alcance que, por una parte, ofrezca un punto de referencia para evaluar y, posiblemente, mejorar los modelos y, por otra, un conjunto de experimentos que nos permita analizar, en la mayor medida posible, la aportación de las diferentes fuentes de incertidumbre. El programa CORDEX tiene como objetivo ofrecer un marco con estas características.

El marco CORDEX

Fundamentalmente, el CORDEX tiene el doble propósito de, por una parte, ofrecer un marco para evaluar el ren-

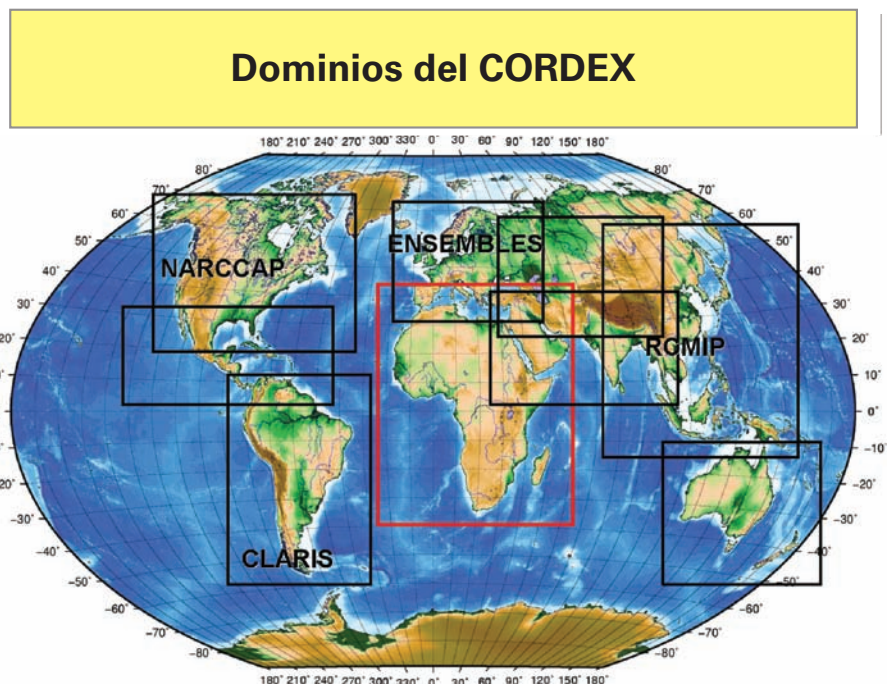


Figura 3 — Dominios regionales previstos para los experimentos del CORDEX (algunos aún en proceso de discusión); también se señalan los proyectos existentes que hacen uso del dominio correspondiente

sin incluir la zona lateral de relajación en los MCR. Esta selección se basa, por una parte, en consideraciones físicas (o sea, la inclusión de procesos importantes para diferentes regiones), por otra en consideraciones de recursos necesarios para realizar las simulaciones y, por último, en la disponibilidad de los programas en curso.

La Figura 3 muestra cinco dominios que abarcan la totalidad de los continentes de África, Australia, América del Sur, América del Norte y Europa. Los tres últimos son básicamente los mismos dominios empleados en los proyectos CLARIS (www.claris-eu.org), NARCCAP (www.narccap.ucar.edu) y ENSEMBLES (ensembles-eu.metoffice.com) respectivamente. Uno de los dominios también comprende América Central junto con la región ecuatorial de las regiones del Atlántico occidental y del Pacífico oriental, donde las proyecciones actuales indican grandes cambios y posibles efectos sobre los ciclones tropicales. El continente asiático está dividido en tres dominios: uno centrado en el monzón del Índico, un segundo en la zona de Asia oriental y un tercero encuadrado en Asia central. También se incluirán los dominios panártico y antártico, teniendo en cuenta la experiencia obtenida a partir de las respectivas comunidades polares de modelización (no se muestran en la figura).

Con el fin de posibilitar una gran participación, el TFRCD, tras un amplio consenso con la comunidad, decidió que la resolución horizontal estándar de las simulaciones de la primera fase del CORDEX fuera de alrededor de 50 km (ó 0,5 grados). Hoy en día, muchos grupos están ejecutando MCR con un espaciado reticular considerablemente más elevado que el citado (hasta unos 10 km), y se les anima a analizar los beneficios de una mejora en la resolución de los MCR en el seno del marco CORDEX. Sin embargo, se tenía la intuición de que una resolución estándar, que permitiría contar con la aportación de muchos grupos, aumentaría el sentido de propiedad del proyecto CORDEX por parte de la comunidad, a la vez que incrementaría el tamaño de cualquier escenario MCR posterior establecido a efectos de análisis y comparación.

Marco de evaluación del modelo

Con el fin de valorar el rendimiento de los modelos DD y SD va a desarrollarse una serie de lo que ha venido a denominarse experimentos bajo "condiciones límite perfectas" para los dominios seleccionados. Estos experimentos utilizan análisis de observaciones para generar campos destinados a conducir los modelos de RCD, como por ejemplo las condiciones límite laterales y de superficie. Aunque todavía provienen de modelos (imperfectos), los análisis de las observaciones incluyen información obtenida a partir de un conjunto variado de sistemas de observación (superficie, atmósfera y teledetección), ofreciendo así las mejores condiciones disponibles para gobernar el funcionamiento de los modelos de RCD.

El marco CORDEX utilizará inicialmente el reanálisis ERA-Interim (Uppala et al., 2008) del Centro europeo de predicción meteorológica a medio plazo (CEPMMP), que comprende el período 1989-2007 y mejora algunos de los problemas que se encontraron en los productos de reanálisis previos, especialmente los relacionados con el ciclo hidrológico en las regiones tropicales. En la actualidad se están desarrollando varios intentos encaminados a actualizar los productos derivados del reanálisis en diferentes centros, que se emplearán cuando estén disponibles.

De cara a la evaluación de los modelos se constituirá una serie de equipos de diagnóstico para cada una de las regiones simuladas, cuya tarea será diseñar un conjunto de métricas de referencia regional para la evaluación del modelo. Para cada región tendrán que obtenerse o recopilarse los conjuntos de datos de observación de forma que puedan utilizarse en el proceso de evaluación del modelo. Esta tarea resulta particularmente delicada, puesto que el proceso de evaluación tiene que llevarse a cabo con arreglo a escalas espaciales finas, para las cuales no siempre existe disponibilidad de conjuntos de datos adecuados. Por ello, será importante explorar

los recursos y experiencia locales en aras de mejorar los conjuntos de datos obtenidos a partir de la observación en la medida que sea posible.

Marco de proyección climática

El marco de proyección climática en el seno del CORDEX está basado en el conjunto de nuevas simulaciones de modelos previstas a nivel global como apoyo al quinto Informe de evaluación del IPCC (a las que se hará referencia como CMIP5). Este conjunto de simulaciones incluye una larga lista de experimentos, que van desde nuevas simulaciones de escenarios de emisión de gases de efecto invernadero para el siglo XXI hasta experimentos de predicción decenal, pasando por otros que incluyen el ciclo del carbono y experimentos dirigidos a investigar los mecanismos de retroalimentación individual (Taylor et al., 2009).

De cara a sus actividades iniciales, el CORDEX se centrará en las simulaciones de escenarios. Esta última generación de simulaciones de escenario, diferente a las ejecuciones empleadas en el ciclo correspondiente a la cuarta evaluación del IPCC que estaban basadas en los escenarios de emisión de GEI del informe especial sobre escenarios de emisión (SRES; IPCC, 2000), se basará en lo que ha venido a denominarse vías de concentración de referencia (RCP), es decir, vías recomendadas sobre concentración de gases de efecto invernadero a lo largo del siglo XXI que se corresponden con diferentes niveles de estabilización del forzamiento radiativo de cara al año 2100. Se han seleccionado cuatro RCP, con niveles de estabilización situados en 2,9, 4,5, 8,5 y 11,2 W/m² (a los que se hará referencia como RCP2.9, RCP4.5, RCP8.5 y RCP11.2 respectivamente). Dentro del CMIP5, se han seleccionado las simulaciones correspondientes al modelo global con mayor prioridad para que sean el RCP4.5 y el RCP8.5, que se corresponden de forma aproximada con los escenarios respectivos de emisión B1 y A1B del SRES del

IPCC. Así pues, se ha previsto que los mismos escenarios sean las simulaciones de mayor prioridad del CORDEX (Figura 3).

Lo ideal sería que todas las simulaciones de modelos regionales abarcaran el período comprendido entre 1951 y 2100, con el fin de poder incluir un período histórico reciente, más la totalidad del siglo XXI. Sin embargo, para muchos grupos podría resultar demasiado exigente a efectos de cálculo informático llevar a cabo simulaciones CORDEX para todo este margen de tiempo. Por esta razón, el período comprendido entre 1951 y 2100 se ha dividido en tres intervalos de tiempo de 30 años cada uno, y se ha solicitado a los grupos participantes una simulación de los intervalos temporales en el siguiente orden de prioridad: 1981-2010, 2041-2070, 2011-2040, 2071-2100 y 1951-1980. El primero de estos intervalos (1981-2010) representa el período de referencia para la evaluación de modelos y para el cálculo de los cambios climáticos. El segundo intervalo temporal en orden de prioridad, que cubre un período de tiempo futuro, se seleccionó como un compromiso entre las necesidades de la comunidad de impactos en términos de horizonte temporal futuro y la necesidad de obtener una señal de cambio sólida. Se ha solicitado que todos los grupos participantes, al menos, desarrollen estos dos intervalos de tiempo, de forma que se cuente con un conjunto razonable de simulaciones para proceder a su análisis e intercomparación.

En la fase inicial de CORDEX se ha previsto simular una realización para cada uno de los escenarios RCP seleccionados a través de la utilización de datos impulsores, obtenidos a partir de múltiples modelos a escala global. En este sentido, CORDEX analizará la incertidumbre asociada a la configuración de los modelos, pero no la correspondiente a la variabilidad interna. Como ya se ha mencionado antes, esto no debería representar un inconveniente importante, puesto que la experiencia previa ha demostrado que la primera es una fuente de incertidumbre mucho más importante a la hora de tomar en consideración las escalas temporales prolongadas. El muestreo de la variabilidad interna mediante múltiples realizaciones se deja pen-

diente para las siguientes fases del CORDEX.

Enfoque inicial sobre África

El objetivo del CORDEX es generar un marco válido para múltiples dominios a lo largo y ancho del planeta. Sin embargo, la tarea de completar un gran conjunto de simulaciones multidecenales para la totalidad de la serie de regiones que se muestran en la Figura 3 es de extraordinaria magnitud y requerirá una inversión considerable en forma de tiempo y recursos. Además, resulta útil comprobar el marco correspondiente a una región, con el fin de valorar sus puntos fuertes y débiles antes de aplicarlo a nivel mundial, motivo por el cual se decidió seleccionar una región inicial de prioridad, que esperamos que permita la generación de una matriz útil de escenarios basados en el RCD dentro del marco temporal correspondiente al AR5 del IPCC.

África fue seleccionada como la primera región objetivo por varios motivos. En primer lugar, África es especialmente vulnerable al cambio climático debido a la dependencia de la variabilidad climática de muchos sectores fundamentales (como

la agricultura, la gestión del agua, la salud, etc.) y a causa de la capacidad de adaptación relativamente baja de sus diferentes economías. En segundo lugar, el cambio climático puede tener un impacto importante sobre los patrones térmicos y de precipitación sobre África, los cuales, a su vez, pueden interactuar con otros factores de estrés ambiental, como el cambio en la utilización del suelo, la desertización y las emisiones de aerosoles. Finalmente, hasta la fecha, tan solo se dispone de algunas simulaciones basadas en herramientas RCD para África, con lo cual esta región se beneficiará especialmente del marco CORDEX desde las perspectivas de investigación y de aplicación. Así pues, el dominio que se muestra en un rectángulo rojo en la Figura 3 será el enfoque inicial de los experimentos CORDEX.

Se da gran importancia al hecho de que muchos grupos de *downscaling* sean partidarios de simular su dominio "doméstico" en primer lugar, y estas proyecciones regionales también son bienvenidas en el marco CORDEX. El enfoque sobre África tiene la intención principal de animar a los grupos que puedan llevar a cabo múltiples proyecciones climáticas a escala regional a que, inicialmente, den prioridad a África y obtengan un

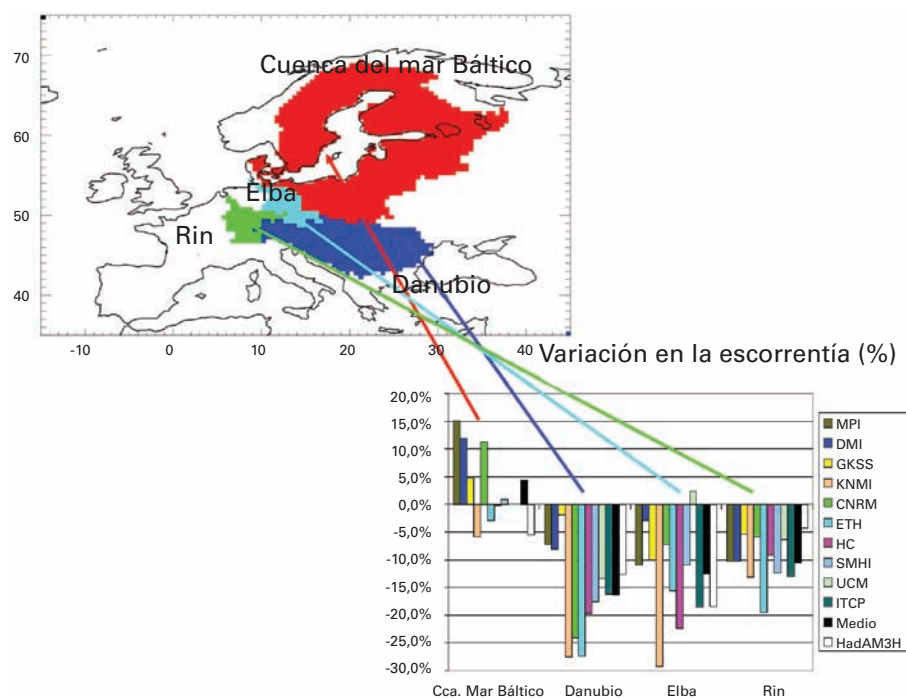


Figura 4 — Variación en la escorrentía (%), 2071-2100 menos 1961-1990, escenario A2) calculada para cuatro cuencas hidrográficas europeas a través del conjunto MCR multimodelo del proyecto PRUDENCE (de Hagemann y Jacob, 2007)

conjunto relativamente amplio para esta región con el fin de mejorar el análisis y la intercomparación de los resultados del modelo.

Gestión de datos

Un aspecto fundamental del programa CORDEX será la gestión de las grandes cantidades de datos de entrada en el modelo que dicho programa necesita, así como de las salidas del modelo y de las intercomparaciones que se generarán. Existen dos componentes: en primer lugar, los MCR requieren que las condiciones límite sean los campos meteorológicos del MCGAO con una resolución temporal fina (cada seis horas). Estos deben almacenarse en un banco de datos central para que la comunidad de modelización del CORDEX tenga facilidad de acceso, y tendrán que encontrarse en un formato normalizado entre los modelos MCGAO (con toda seguridad, siguiendo las directrices de formato del CMIP5). Además, será necesario establecer un procedimiento ágil de transferencia de datos del MCGAO a los grupos de RCD.

En segundo lugar, las salidas de las simulaciones de RCD deberán almacenarse de manera que puedan ser consultadas fácilmente por la comunidad de usuarios finales, y es probable que también tengan que ser sometidas a un proceso de normalización de formatos (adhiriéndose posiblemente a las directrices de formato del CMIP5). Esta tarea puede ser de enormes dimensiones a la vista de las grandes cantidades de datos generados por los modelos climáticos de escala fina. Se está valorando una propuesta de creación de una red distribuida de bancos de datos regionales que se ajusten al mismo formato y a las mismas normas de cara al archivo y distribución de las salidas del RCD, y que podría estar localizada en varios continentes o regiones. Este tema aún se está estudiando.

Afrontando el desafío

Dada la naturaleza compleja y orientada a múltiples facetas del proyecto CORDEX, resulta completamente

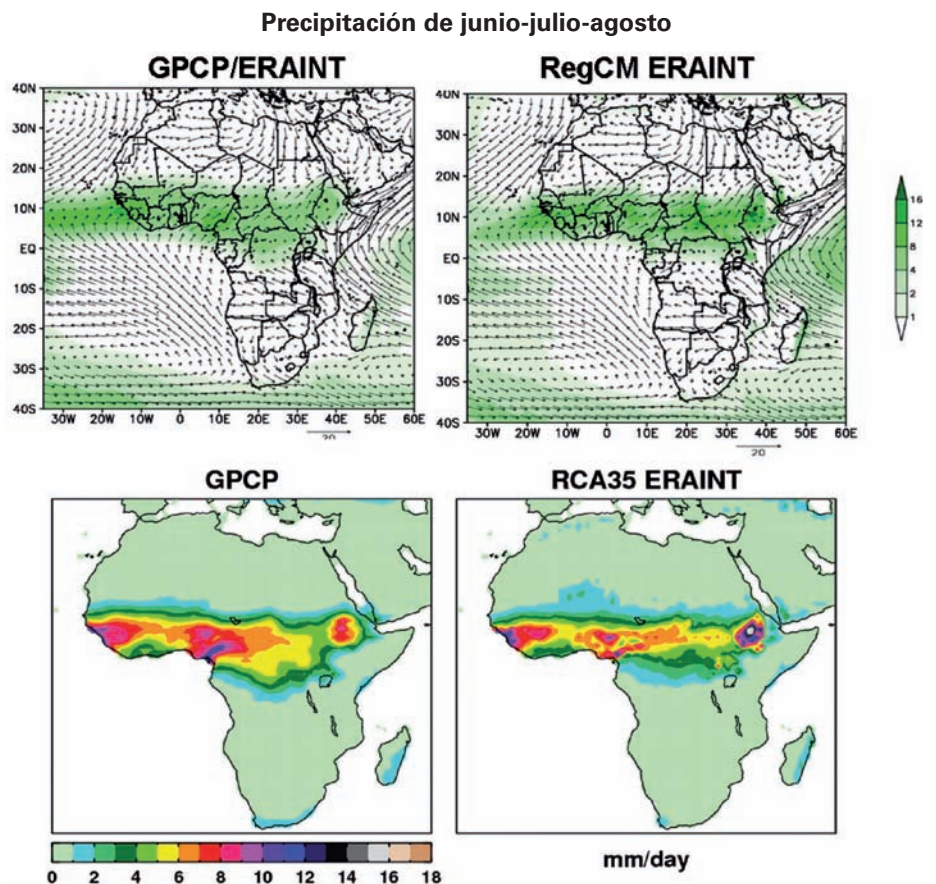


Figura 5 — Media de la precipitación (1989-2005), en mm/día, de junio-julio-agosto sobre África, según los datos obtenidos a través de la simulación de los modelos MCR RegCM3 (Pal et al., 2007, panel superior derecho) y RCA (Jones et al., 2004, panel inferior derecho) con arreglo a las condiciones límite laterales establecidas por ERA-Interim: las precipitaciones simuladas se comparan con la climatología de la precipitación observada del GPCP (paneles de la izquierda). Los paneles superiores también comparan los vientos medios en niveles bajos (850 hPa) del modelo RegCM3 (panel derecho) con los vientos ERA-Interim (panel izquierdo).

legítimo preguntarse si realmente puede tener éxito a la hora de ofrecer el análisis y la información climática regional necesarios para llevar a cabo evaluaciones de la adaptación, la mitigación y la vulnerabilidad. La experiencia del pasado con proyectos similares (aunque en un ámbito más limitado) puede arrojar cierta luz a este respecto.

Un buen ejemplo lo constituye el proyecto europeo de Predicción de escenarios regionales e incertidumbres para definir los riesgos y los efectos asociados al cambio climático en Europa, PRUDENCE (<http://prudence.dmi.dk>). PRUDENCE era un proyecto integral en el que se utilizaron modelos globales múltiples para lanzar MCR múltiples sobre un dominio europeo teniendo en cuenta el forzamiento procedente de dos

escenarios de emisión de gases de efecto invernadero. Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones de los MCR se emplearon posteriormente en varios estudios sobre evaluación de impactos que abarcaban desde los campos de la hidrología y la agricultura, hasta los de la salud y la economía. En el desarrollo de la estrategia PRUDENCE, la comunicación entre las comunidades de modelización climática y de impactos del clima resultó fundamental. Además, el proyecto complementario de *Downscaling* dinámico estadístico y regional de extremos para las regiones europeas, STARDEX (<http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/>) llevó a cabo experimentos similares con diferentes herramientas SD de cara a la intercomparación con los resultados MCR del proyecto PRUDENCE.

Los principales resultados del programa PRUDENCE se presentaron en un número especial de la revista *Climatic Change*, en mayo de 2007. La Figura 4 (adaptada de Hagemann y Jacob, 2007) muestra un ejemplo de esos resultados, donde se empleó la salida de un conjunto de simulaciones MCR de cara a la evaluación del impacto en términos hidrológicos. La escorrentía en superficie, un indicador del exceso de agua disponible, se calculó para cuatro cuencas hidrográficas europeas (el mar Báltico y los ríos Danubio, Elba y Rin) en un conjunto de simulaciones de referencia (1961-1990) y de futuro (2070-2100, escenario A2), con diez MCR conducidos por un solo modelo a escala global (HadAM3H).

Los 10 MCR muestran una señal constante de baja disponibilidad de agua en las cuencas del Danubio, el Elba y el Rin, aunque también aparecía una señal mixta en el área del mar Báltico. Estos resultados se atribuyen al calentamiento previsto en toda Europa y al correspondiente descenso (incremento) de las precipitaciones sobre la zona del centro y sur (norte) de Europa. Este tipo de señal permanece bastante clara cuando se emplean diferentes MCG para ejecutar el mismo conjunto de modelos regionales. El tipo de información contenido en la Figura 4 representa una importante contribución para orientar la futura gestión y planificación de los recursos hídricos a escala europea, nacional e incluso regional.

La estrategia PRUDENCE puede ampliarse a CORDEX, y la aplicación con enfoque sobre África aportará un importante banco de pruebas inicial. Algunos grupos ya han comenzado a experimentar con el dominio africano en el seno del marco de evaluación de modelos impulsado por el reanálisis ERA-Interim. La Figura 5 muestra ejemplos de estos experimentos. Más concretamente, las precipitaciones de junio, julio y agosto de los dos modelos, RegCM3 del CIFT (Pal et al., 2007) y el RCA del Centro Rossby (Jones et al., 2004), se comparan con las observaciones del Proyecto mundial de climatología de las precipitaciones (GPCP) (Gruber y Levizzani, 2008). Además, los paneles superiores también comparan los vientos simulados y observados

en niveles bajos (ERA-Interim) del modelo RegCM3. Ambos modelos muestran una coincidencia generalmente buena con las observaciones correspondientes al dominio de gran alcance seleccionado.

La bibliografía especializada también dispone de algunos resultados basados en estudios de SD para África, como es el caso de Hewitson y Crane (2006), que emplean modelos de SD para regionalizar los resultados obtenidos a partir de MCGAO múltiples, poniendo de relieve de este modo cómo este enfoque puede realmente reducir la incertidumbre que se genera a partir de las simulaciones de modelos a escala global. De hecho, estos ejemplos indican que un marco basado en el RCD puede ofrecer información valiosa referente al cambio climático para orientar las futuras evaluaciones sobre impacto, adaptación y vulnerabilidad hacia la definición de oportunidades de cara a abordar la variabilidad del clima y el cambio climático a través de África.

Resumen y conclusiones

En este artículo presentamos un nuevo marco para llevar a cabo la modelización y regionalización (*downscaling*) climática regional que recibe el nombre de CORDEX, con el doble objetivo de desarrollar un marco coordinado para evaluar y mejorar las técnicas de RCD y de producir una nueva generación de proyecciones climáticas a escala fina basadas en el RCD para las regiones identificadas a nivel mundial. Creemos que el CORDEX aportará el marco necesario para mejorar la coordinación de las actividades de investigación y modelización relacionadas con el RCD en el seno de las comunidades regionales de modelización y de *downscaling* climáticos. La experiencia del pasado pone de manifiesto que proyectos como AMIP o CMIP tienen un valor incalculable para la comunidad de modelización global, y el CORDEX está estructurado fundamentalmente para desempeñar un papel similar para la comunidad del RCD.

Un papel complementario del CORDEX es estrechar la brecha existente entre la comunidad de modelización climática y los usuarios finales de la

información climática, algo que puede lograrse a través de una mayor comunicación entre ambas comunidades y orientando la estructura de las actividades experimentales y de gestión de datos del CORDEX para facilitar la utilización de normas y formatos comunes que permitan una utilización mejor y más eficaz de la información climática resultante por parte de los usuarios finales.

En este artículo hemos descrito el diseño inicial y la fase de desarrollo del CORDEX, haciendo hincapié en los próximos dos a cuatro años (es decir, en la escala temporal establecida por el AR5 del IPCC). Sin embargo, se prevé que el CORDEX ofrezca un marco a más largo plazo para que pueda ser utilizado y apoyado de forma continua por la comunidad del RCD. Aunque el foco inicial se fija en África, tal y como se ha dicho anteriormente, las simulaciones efectuadas sobre otros dominios también serán bienvenidas. Asimismo, aunque el espaciado reticular inicial es de 50 km, para fomentar una amplia participación se anima a los grupos a que analicen los beneficios de una mayor resolución en los modelos en la medida en que sus recursos se lo permitan, pero también de una manera coordinada con respecto a otros participantes interesados. A pesar de que el enfoque inicial del CORDEX recae en las simulaciones de escenarios del siglo XXI, tenemos la intención de ampliar el marco CORDEX en el futuro para abordar también el problema de la predicción decenal, en el momento en el que la investigación en esta área madure lo suficiente dentro de la comunidad de modelización climática global.

Por último, destacamos que es importante que los dominios interiores comunes y los planes de experimentación sean adoptados, en la medida de lo posible, por los grupos participantes de cara a facilitar la intercomparación y el análisis de modelos y técnicas, así como la evaluación de incertidumbres en las proyecciones de cambio climático regional. La coordinación de actividades de RCD se antoja fundamental para comprender mejor las técnicas de RCD y para utilizar de manera más fructífera los productos basados en el RCD de cara a las necesidades sociales.

Referencias

- CHRISTENSEN, J.H., T.R. CARTER, M. RUMMUKAINEN and G. AMANATIDIS, 2007: Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project. *Climatic Change*, 81, 1-6.
- CUBASCH, U. et al., 1995: Regional climate changes as simulated by time-slice experiments. *Climatic Change*, 31, 273-304.
- DEQUE, M. and J.P. PIEDELIEVRE, 1995: High resolution climate simulation over Europe. *Climate Dynamics*, 11, 321-339.
- GIORGI, F., 2006: Regional climate modeling: status and perspectives. *Journal de Physique*, IV, 139, 101-118.
- GIORGI, F. and L.O. MEARNs, 1991: Approaches to the simulation of regional climate change: a review. *Reviews of Geophysics*, 29, 191-216.
- GIORGI, F. and L.O. MEARNs, 1999: Introduction to special section: regional climate modeling revisited. *Journal of Geophysical Research*, 104, 6335-6352.
- GIORGI, F. et al., 2001: Regional climate information—evaluation and projections. En: *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (J.T. Houghton et al., Eds). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 583-638.
- GIORGI, F. et al., 2008: Exploring uncertainties in regional climate change: The regional climate change hypermatrix framework. *EOS*, 89, 445-446.
- GRUBER, A. and V. LEVIZZANI, 2008: Assessment of Global Precipitation Products. A project of the World Climate Research Programme Global Energy and Water Cycle Experiment (GEWEX) radiation panel. WCRP Report No. 128, WMO/TD No. 1430, 50 pp.
- HAGEMANN, S. and D. JACOB, 2007: Gradient in climate change signal of European discharge predicted by a multi-model ensemble. *Climatic Change*, 81, 309-327.
- HEWITSON, B.C. and R.G. CRANE, 1996: Climate downscaling: techniques and application. *Climate Research*, 7, 85-95.
- HEWITSON, B.C. and R.G. CRANE, 2006: Consensus between GCM climate change projections with empirical downscaling: precipitation downscaling over South Africa. *International Journal of Climatology*, 26, 1315-1337.
- HUNTINGFORD, C. and J. GASH, 2005: Climate equity for all. *Science*, 309, 1789.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 2000: Special Report on Emission Scenarios (N. Nakicenovic et al. (Eds)). Cambridge University Press, New York, 599 pp.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report (S. Solomon et al. (Eds)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 940 pp.
- JONES, C.G., U. WILLÉN, A. ULLERSTIG and U. HANSSON, 2004. The Rossby Centre regional atmospheric climate model Part I: Model climatology and performance for the present climate over Europe. *Ambio* 33:4-5, 199-210.
- LAPRISE, R. et al., 2008: Challenging some tenets of regional climate modelling. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 100, 3-22.
- LEUNG, L.R., L.O. MEARNs, F. GIORGI and R.L. WILBY, 2003: Regional climate research: needs and opportunities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82, 89-95.
- MCGREGOR, J.L., 1997: Regional climate modeling. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 63, 105-117.
- MEARNs, L.O. et al., 2003: Guidelines for use of climate scenarios developed from regional climate model experiments. TGCA-IPCC report. <http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/guidelines/RCM6.Guidelines.October03.pdf>, 38 pp.
- MEEHL, G.A. et al., 2007: The WCRP CMIP3 multimodel ensemble—a new era in climate change research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88, 1383-1394.
- MURPHY, J., 1999: An evaluation of statistical and dynamical techniques for downscaling local climate. *Journal of Climate*, 12, 2256-2284.
- PAL, J.S. et al., 2007: Regional climate modeling for the developing world: the ICTP RegCM3 and RegCNET. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88, 1395-1409.
- SCHMIDL, J. et al., 2007: Statistical and dynamical downscaling of precipitation: an evaluation and comparison of scenarios for the European Alps. *Journal of Geophysical Research*, 112, D04105.
- TAYLOR, K.E., R.J. STOFFER and G.E. MEEHL, 2009: A summary of the CMIP5 experiment design. https://cmip.llnl.gov/cmip5/docs/Taylor_CMIP5_design.pdf.
- UPPALA, S., D. DEE, S. KOBAYASHI, P. BERRISFORD and A. SIMMONS, 2008: Towards a climate adapt assimilation system: status update of ERA-Interim, *ECMWF Newsletter*, 115, 12-18.
- WANG, Y. et al., 2004: Regional climate modeling: progress challenges and prospects. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 82, 1599-1628.
- WILBY, R.L. and T.M.L. WIGLEY, 2000: Precipitation predictors for downscaling: observed and general circulation model relationships. *International Journal of Climatol.*, 20, 641-661.
- WILBY, R.L. et al., 2004: Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Statistical Downscaling Methods. IPCC Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Analysis (TGICA), http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/guidelines/StatDown_Guide.pdf.

Agradecimientos

Los autores desean dar las gracias a Stefan Hagemann por proporcionar el material de la Figura 4.