

ESCENARIOS-PNACC 2012: DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE REGIONALIZACIÓN ESTADÍSTICA

José M. GUTIÉRREZ¹, Jaime RIBALAYGUA², Carmen LLASAT³,
Romualdo ROMERO⁴, Jesús ABAURREA⁵, Ernesto RODRÍGUEZ-CAMINO⁶

¹*Instituto de Física de Cantabria. CSIC-Universidad de Cantabria*

²*Fundación para la Investigación del Clima (FIC)*

³*Dpto. de Astronomía y Meteorología. Univ. de Barcelona*

⁴*Dpto. de Física. Univ. de las Islas Baleares*

⁵*Dpto. de Métodos Estadísticos. Univ. de Zaragoza*

⁶*Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)*

gutierjm@unican.es, fic@ficlima.org, Carmell@am.ub.es,

Romu.Romero@uib.es, abaurrea@unizar.es, erodriguezc@aemet.es

RESUMEN

Los nuevos escenarios regionales de cambio climático para España, desarrollados en el marco del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) y denominados “Escenarios-PNACC 2012”, incorporan distintas proyecciones realizadas de forma coordinada con técnicas dinámicas y estadísticas, a partir de los escenarios globales de cambio climático del IPCC-AR4 (CMIP3). En particular, las proyecciones estadísticas han sido realizadas utilizando tanto datos interpolados en rejilla (considerando la rejilla de observaciones *Spain02*, de 20km de resolución), como datos puntuales en cientos de localidades de la red de observatorios de AEMET. Estas proyecciones, así como las diversas metodologías aplicadas, han sido desarrolladas por distintos grupos en el marco del proyecto ESTCENA (acción estratégica del Ministerio de Medio Ambiente, 2009-2011), e incluyen también algunas de las proyecciones realizadas por AEMET. El resultado es un conjunto homogéneo de datos con formato común que recoge las distintas fuentes de incertidumbre (escenarios, modelos globales, y técnicas de regionalización) que es necesario considerar en los distintos estudios de impacto que se lleven a cabo. En este trabajo, se describe el conjunto de escenarios resultante y se presenta un primer análisis de resultados.

Palabras clave: Downscaling estadístico, escenarios regionales de cambio climático.

ABSTRACT

A new set of regional climate change scenarios for Spain “Escenarios-PNACC 2012” has been developed in the framework of the coordinated program “Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC)”. This dataset includes regional projections produced applying both statistical and dynamical techniques to the global simulations from IPCC-AR4 (CMIP3). In particular, the projections with statistical downscaling techniques have been produced using grids of interpolated observation (*Spain02*, at a 20km resolution) as well as local observations in a network of hundreds of stations from AEMET. These projections and methodologies have been developed by different national research groups within the project ESTCENA (acción estratégica del Ministerio de Medio Ambiente, 2009-

2011), including also some of the projections developed by AEMET. The result is a homogeneous dataset which sample the different sources of uncertainty (scenarios, global models, ad statistical downscaling techniques), allowing for an appropriate analysis of impacts. In this work we describe the resulting ensemble and show a preliminary analysis of the results.

Key words: Statistical downscaling, regional climate change scenarios.

1. INTRODUCCIÓN

Los escenarios globales de cambio climático son la principal fuente de información disponible para llevar a cabo estudios de impacto en los distintos sectores socio-económicos afectados por este problema (recursos hídricos, cultivos, energía, turismo, flora, fauna, etc.). Estos escenarios se elaboran utilizando modelos físico-matemáticos del clima (modelos de circulación general, *GCMs* por sus siglas en inglés), que simulan la dinámica conjunta del sistema climático sometido al forzamiento de distintos escenarios hipotéticos de emisión de gases de efecto invernadero en el futuro (por ejemplo, a lo largo del siglo XXI). Estas proyecciones globales se llevan a cabo periódicamente (cada cinco años aproximadamente) de forma coordinada, contando con la participación de decenas de centros internacionales de modelización numérica del clima, cada uno de los cuales aporta su propio GCM (ver IPCC, 2007). Así, actualmente se dispone de una gran cantidad de datos que proporcionan una descripción consistente y plausible de la evolución futura del clima para cada uno de los escenarios típicos (por ejemplo, los escenarios del SRES, B1, A1B y A2, en orden creciente de emisión; ver Nakicenovic et al. 2001 para más detalles). Estas simulaciones caracterizan la evolución diaria (o incluso intra-diaria) de numerosas variables climáticas de interés (presión, temperatura, humedad, etc.), tanto en superficie, como en distintos niveles verticales de la atmósfera. La disponibilidad de varios escenarios y varios GCMs (un ensemble multi-modelo y multi-escenario) permite analizar la variabilidad de los resultados ante estas dos fuentes de incertidumbre y obtener no sólo una estimación del cambio, sino del grado de consenso del mismo entre los distintos modelos y escenarios (ver Tebaldi et al. 2011 para más detalles).

La principal limitación de los escenarios globales de cambio climático es su escasa resolución espacial (cientos de kilómetros). Por tanto, la tarea de regionalizar estos escenarios, teniendo en cuenta la variabilidad regional del clima en la zona de estudio, es clave para poder llevar a cabo estudios de impacto y adaptación a nivel regional. Por ello, la regionalización (o *downscaling*, en inglés) es actualmente un objetivo prioritario de todos los programas internacionales y nacionales de cambio climático (por ejemplo, las iniciativas internacionales CORDEX: <http://cordex.dmi.dk> y VALUE: <http://www.value-cost.eu>). Las dos metodologías que se utilizan en este problema son (ver Gutiérrez et al. 2004, Gaertner et al. 2012, para más detalles):

- La regionalización dinámica, basada en el uso de modelos regionales del clima con una resolución mayor (decenas de kilómetros), que incorporan los procesos físicos relevantes a esta escala, y corren acoplados a un GCM que proporciona las condiciones de contorno.
- La regionalización estadística, basada en el uso de modelos estadísticos que relacionan de forma empírica las variables de circulación atmosférica a gran escala (dadas por un GCM) con las variables locales/regionales observadas en superficie, relacionadas con el fenómeno de estudio (típicamente, la temperatura y la precipitación).

Cada una de estas dos metodologías tiene sus ventajas y sus limitaciones, pero ambas resultan complementarias para los estudios de regionalización (Winkler et al. 2011); por ejemplo, en la

literatura existen numerosos casos de estudio en los que se muestra, utilizando medidas de validación en clima presente, que ninguna de estas metodologías tiene un comportamiento superior a la otra, sino que en cada caso unas técnicas son más apropiadas que otras (para un estudio en Europa ver, por ejemplo, Murphy, 1999).

Esta filosofía de complementariedad ha sido la seguida en el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC), uno de cuyos objetivos ha sido generar escenarios de cambio climático regionalizados para el territorio español, utilizando todas las técnicas disponibles, y ponerlos a disposición de la sociedad en general. La fase inicial de este trabajo, desarrollada en 2008 aplicando un número limitado de técnicas, se materializó en una primera colección de escenarios regionales, puesta a disposición de los usuarios a través de la página Web de AEMET (<http://escenarios.amet.es>), basada en los escenarios globales del IPCC-AR3 y que, hasta la fecha, han sido los que se han utilizado en trabajos e investigaciones sobre impactos del cambio climático en diversos sectores del PNACC (recursos hídricos, zonas costeras, biodiversidad, etc.). La segunda fase (2009-2011) se ha basado en los escenarios globales del IPCC-AR4 y ha contado con la participación de los distintos grupos de investigación e instituciones con experiencia en estos temas, organizados en dos acciones estratégicas del Plan Nacional de I+D+i 2008-11 para regionalización estadística (ESTCENA) y dinámica (ESCENA), junto con los proyectos de regionalización llevados a cabo en AEMET.

En esta comunicación se describen los resultados alcanzados en el proyecto ESTCENA, que junto con los resultados de regionalización estadística llevados a cabo por AEMET forman parte de la nueva versión de escenarios regionales del PNACC denominados: Escenarios-PNACC 2012. Entre las actividades realizadas destacan: 1) la selección adecuada del reanálisis y los modelos globales que se han utilizado para realizar las proyecciones y 2) la selección de métodos de downscaling estadístico robustos. En cada uno de estas actividades se han desarrollado nuevas metodologías de validación que suponen un avance en el conocimiento de este problema, tal como se describe en las siguientes secciones.

2. SELECCIÓN DE OBSERVACIONES Y MODELOS GLOBALES (GCMS).

El objetivo del proyecto ESTCENA ha sido obtener proyecciones regionales de cambio climático para temperaturas extremas (máxima y mínima diaria) y para precipitación. Para ello se consideraron tanto datos puntuales en un subconjunto de estaciones seleccionadas de la red secundaria de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, ver Figura 1), como los datos interpolados en una rejilla regular de 0.2° (aprox. 20km; ver Herrera 2011, Herrera et al. 2012), trabajando a escala diaria en el período de análisis 1961-2000 en ambos casos.

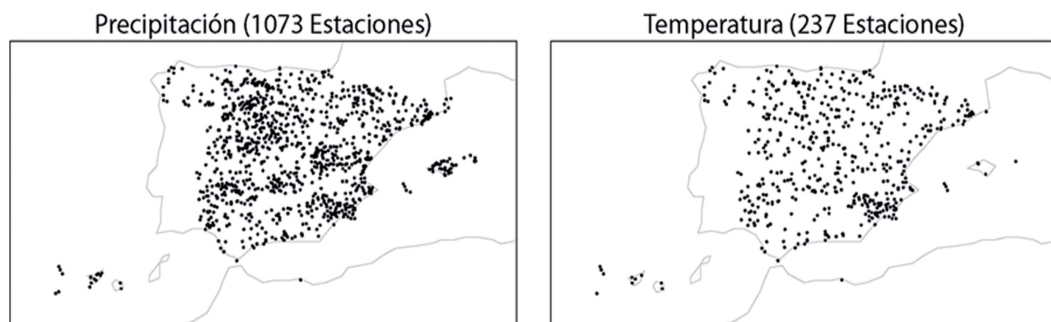


FIG. 1: Estaciones de AEMET seleccionadas para el proyecto ESTCENA (con más de 40 años con un porcentaje de datos superior al 90% en el período 1950-2003).

Asimismo, para poder establecer modelos empíricos adecuados, se consideró un conjunto homogéneo de variables, tanto de reanálisis como de GCMs, que fuesen buenos predictores de la precipitación y la temperatura en superficie. Para ello, se realizó un rastreo bibliográfico y se consideraron los predictores potenciales utilizados previamente en estudios similares de regionalización (ver Tabla 1). Una vez mostrado que los distintos reanálisis eran coincidentes para estos predictores sobre la región de estudio (aunque no sobre otras regiones del globo; ver Brands, 2012), se consideraron los datos del reanálisis ERA-40 del ECMWF; por otra parte, para los GCMs, se consideraron inicialmente los datos disponibles en el repositorio del IPCC-AR4 para los distintos escenarios de cambio climático (B1, A1B y A2); sin embargo, se comprobó que, a diferencia de los datos agregados mensualmente (más demandados y utilizados), los datos diarios no estaban homogeneizados, hallándose discordancia de variables disponibles y unidades entre distintos modelos, e incluso errores en los datos. Por ello, se decidió utilizar los escenarios globales de cambio climático almacenados en el marco del proyecto europeo ENSEMBLES (van der Linden and Mitchell, 2009), con una mayor homogeneidad y disponibilidad de variables. Por una parte se consideraron los modelos europeos del IPCC-AR4, disponibles también en este repositorio y, por otra, las nuevas simulaciones, con versiones actualizadas de los modelos, realizadas en el marco de este proyecto. Toda esta información se sometió a un proceso de evaluación, como se describe a continuación, resultando finalmente los modelos que se muestran en la Tabla 2. Las variables finales, así como los niveles y la agregación temporal para las distintas variables (ver Tabla 1) se eligieron como un compromiso entre los datos disponibles y la idoneidad para llevar a cabo las proyecciones (las variables en *italica* se han utilizado sólo para fines de comparación).

Código	Nombre	Nivel	Tiempo	Unidades
Z	Geopotencial	3D	00	m ² /s ²
T	Temperatura	3D	00	K
Q	Humedad específica	3D	00	kg/kg
U	Componente U del viento	3D	00	m/s
V	Componente V del viento	3D	00	m/s
W	Velocidad vertical	3D	00	Pa/s
RV	Vorticidad relativa	3D	00	m/s
SLP	Presión a nivel del mar	2D	DM	Pa
2T	Temperatura a 2 metros	2D	DM	K
<i>TP</i>	<i>Precipitación</i>	<i>2D</i>	<i>D</i>	<i>mm</i>
<i>Tx</i>	<i>Temperatura máxima</i>	<i>2D</i>	<i>D</i>	<i>K</i>
<i>Tn</i>	<i>Temperatura mínima</i>	<i>2D</i>	<i>D</i>	<i>K</i>

TABLA 1: *Predictores utilizados en el proyecto escena. las variables “3D” contienen información de los niveles 850, 700 y 500 HPA; las “2D” se refieren a datos de superficie. “00” son valores instantáneos a las 00UTC; “DM” son medias diarias y “D” son valores diarios (extremos o acumulados, según corresponda).*

Dado el elevado número de modelos disponibles en el proyecto ENSEMBLES, incluyendo distintas versiones de algunos de ellos, resultó necesario establecer alguna medida de calidad mínima para descartar aquellos modelos con claras deficiencias en la zona de estudio, que podrían introducir una falsa incertidumbre en las proyecciones; por otra parte, también resulta necesario seleccionar las versiones más adecuadas de los modelos, evitando duplicidades que redundarían en un tratamiento no equiprobable de la incertidumbre. Para ello, se determinó si las distribuciones de valores simulados por el GCM (para

los distintos predictores potenciales en cada punto de rejilla), eran similares a las distribuciones cuasi-observadas proporcionadas por el reanálisis, considerando un período común de control (1961-2000, con el escenario 20C3M para los GCMs). Para determinar esta similitud se consideraron medidas como el PDF-score y el test de Kolmogorov-Smirnov, analizando las distintas dimensiones de los resultados obtenidos (estacionalidad, efecto del bias sistemático de los modelos, ver Brands et al. 2011 para más detalles de esta validación). Este trabajo permitió identificar los modelos que tenían una calidad mínima para ser utilizados en el proyecto ESTCENA, que se muestran en la Tabla 2. Nótese que otros estudios de validación de GCMs (como, por ejemplo, Casado et al. 2008) aportan un información adicional que puede ser tomada en cuenta a la hora de abordar un estudio concreto con estos datos.

Acrónimo	Atmósfera	Resolución	Niv.	Océano	Resolución	Niv.
MPEH5 ³	ECHAM5	1.875°	31	MPI-OM	1.5°	40
CNCM3 ¹	ARPEGE V3	2.8°	45	OPA8.1	0.5x2°	31
BCM2 ¹	ARPEGE V3	2.8°	31	MICOM 2.8	2.4°	35
HadCM3-Q3 ¹	HadAM3	2.75x3.75°	19	HadGOM1	1.25°	20
<i>HadGEM2¹</i>	<i>HadGAM1</i>	<i>1.25x1.875°</i>	<i>38</i>	<i>HadGOM1</i>	<i>0.33x1°</i>	<i>40</i>
<i>IPCM4v2¹</i>	<i>LMDZ4</i>	<i>2.5x3.75°</i>	<i>19</i>	<i>OPA8.2</i>	<i>0.5-2°</i>	<i>31</i>

TABLA 2: Resumen de las características de los modelos globales seleccionados, del IPCC-AR4 y nuevas versiones del proyecto ensembles (cursiva). El superíndice indica el RUN utilizado.

Por ejemplo, la Fig. 2 muestra los PDF-scores de estos modelos para invierno (DJF) y verano (JJA), considerando tanto la similitud de los datos originales, como la de los datos sin sesgo (o *unbiased*, obtenidos eliminando la media climática mensual, punto de rejilla a punto de rejilla). El PDF-score se puede interpretar intuitivamente como el porcentaje de área común de las dos PDFs; así, un valor cercano a uno (en rojo) indica similitud de las distribuciones, mientras que un valor cercano a 0.5 (en azul) indicaría un alto grado de discordancia.

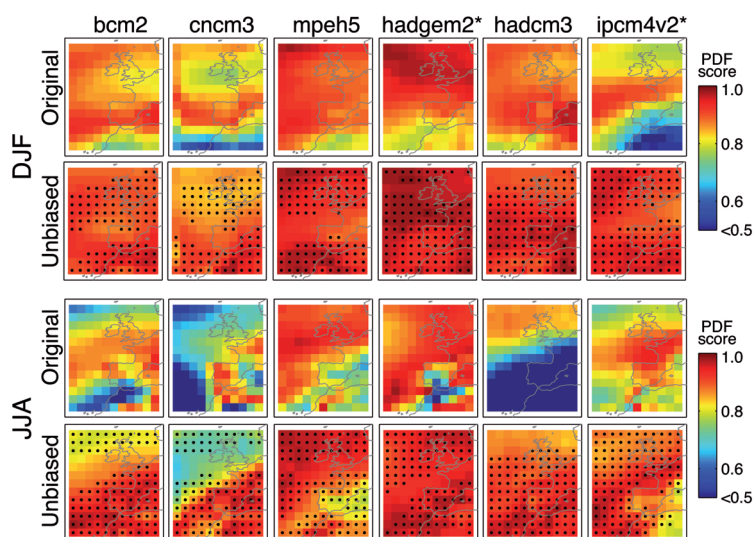


FIG. 2: PDF-scores de la SLP (Tabla 1) para los distintos GCMs (Tabla 2) sobre el dominio de influencia de la península Ibérica, para un período de control (1961-2000).

En la figura anterior se puede observar que algunos modelos (por ejemplo en CNCM3) presentan claras irregularidades, pero que éstas se corrigen cuando se consideran los datos sin sesgo. Este ha sido el criterio adoptado en el proyecto ESTCENA.

3. SELECCIÓN DE TÉCNICAS DE DOWNSCALING

En el marco del proyecto ESTCENA se analizaron distintas técnicas de downscaling estadístico llevando a cabo un rastreo bibliográfico exhaustivo para identificar aquellas idóneas para la proyección de escenarios de cambio climático. De esta manera se generó un conjunto de técnicas estadísticas lo más general posible, que permitiese muestrear de forma apropiada la incertidumbre debida al método de regionalización. Como resultado de este estudio se identificaron 7 grupos distintos de técnicas, según el tipo de método y predictando al que se aplican (precipitación y/o temperatura en este caso):

M1: Métodos de análogos.

M2: Análogos basados en tipos de tiempo (por ejemplo, k-medias).

M3: Regresión lineal (+ regresión logística para ocurrencia de precipitación).

M4: Modelos lineales generalizados (GLMs).

M5: Regresión lineal condicionada a tipos de tiempo.

M6: GLM condicionados a tipos de tiempo.

M7: Generadores de tiempo (normal/gamma) condicionados.

También se contó con tres técnicas específicas más sofisticadas, basadas en combinaciones de las técnicas anteriores y que incluyen algún tipo de calibración ad hoc de las predicciones. M8: método de la FIC (ver Ribalaygua et al. 2012), M9: método UIB y M10: método de AEMET. Esta última técnica no ha sido validada en el marco del proyecto ESTCENA, sino por AEMET, pero ha sido uniformizada con el resto para tener un conjunto de datos común.

Para las familias M1-M7 se realizaron distintos estudios de sensibilidad para determinar las configuraciones óptimas de los distintos métodos para la región de estudio. Por ejemplo, se probaron distintos dominios geográficos para capturar el patrón atmosférico adecuado para cada predictando, así como distintos conjuntos de predictores y distintas configuraciones de los métodos (número de análogos, número de tipos de tiempo, opciones en la regresión, etc.). El factor más influyente fue el conjunto de predictores, con combinaciones óptimas que incluyen la temperatura y la circulación en superficie (para temperaturas; por ejemplo 2T y SLP) y humedad y temperatura en la troposfera media y circulación en la alta (para precipitación; por ejemplo, T y Q en 850hPa y U y V en 500hPa). En cuanto a los dominios, los mejores resultados se obtuvieron para dominios pequeños, abarcando la zona de estudio, considerando patrones atmosféricos dinámicos, que incluyen el valor de los predictores en los instantes de tiempo que limitan el período de observación (por ejemplo, datos a las 00UTC y las 00UTC del día siguiente). Las configuraciones de los métodos que fueron finalmente analizadas se muestran en la Tabla 3. Es destacable señalar que este *ensemble* de técnicas de downscaling estadístico supone el mayor conjunto de métodos utilizados hasta la fecha en un mismo estudio comparativo.

Para cuantificar los resultados se utilizaron tanto medidas de “asociación”, como medidas de “consistencia de distribuciones” observadas y predichas. El primer tipo de medidas incluye la correlación, el error medio, el error cuadrático medio, y cuantifican la capacidad del método de downscaling para reproducir los valores observados día a día. El segundo tipo de medidas incluye el

PDF-score o el test de Kolmogorov-Smirnov, y cuantifican la similitud climática (las distribuciones) de los valores proyectados y observados. De esta manera se tienen en cuenta dos de los aspectos relevantes para evaluar la adecuación de una técnica de downscaling estadístico al problema del cambio climático. Los métodos que producían distribuciones de valores significativamente distintas de los observadas (a un nivel de significación del 1%), fueron descartados para la generación de proyecciones (marcados con un símbolo “D” en la Tabla 3).

Tipo	Código	Descripción	A	T	P
M1	M1a	Análogos/vecinos cercanos (1 vecino)		R	X
	M1b	Media de 5 vecinos más cercanos		R	D
	M1c	Un vecino elegido al azar entre los 15 más cercanos	X	R	X
M2	M2a	100 tipos de tiempo (k-medias), media del grupo		R	D
	M2b	100 tipos de tiempo (k-medias), selección aleatoria	X	R	X
M3	M3a	Regresión lineal CPs (95% varianza explicada)		X	
	M3b	Regresión lineal con predictores en gridbox más cercano		D	
	M3c	Regresión lineal con 15CPs + punto cercano		X	
M4	M4a	GLMs con CPs (95% varianza explicada)	X		X
	M4b	GLMs con predictores en gridbox más cercano	X		R
	M4c	GLMs con 15CPs + punto cercano	X		X
M5	M5a	M3c condicionado a 10 tipos de tiempo (k-means)		D	
	M5b	M3b condicionado a 10 tipos de tiempo (k-means)		D	
	M5c	M3b (termo) condicionado a 10 k-means (circulación)		X	
M6	M6a	M4c condicionado a 10 tipos de tiempo (k-means)	X		R
	M6b	M4b condicionado a 10 tipos de tiempo (k-means)	X		X
	M6c	M4b (termo) condicionado a 10 k-means (circulación)	X		X
M7	M7a	simulación gaussiana para 100 tipos de tiempo	X	R	
	M7b	simulación binomial+gamma para 100 tipos de tiempo	X		X
M8	FICa	Análogos de dos etapas + regresión		X	
	FICb	Análogos de dos etapas + calibración CDF			X
M9	UIB	Tipos de tiempo + corrección frecuencias y PDFs	X		R
M10	AEMET	Metodología de análogos de AEMET (AEMET1)		X	X

TABLA 3: Métodos de downscaling estadístico validados en el proyecto estcena.

“A” indica si el método es de carácter estocástico.

“T” y “P” si son aplicables a temperatura y precipitación, respectivamente:

blanco indica que el método no es aplicable, “D” que falla la consistencia,

“R” que falla la robustez, “X” son los métodos válidos.

Finalmente, se analizó también el problema de la posible falta de robustez de las técnicas cuando se aplican a problemas no estacionarios (como el del cambio climático), donde el modelo, aprendido en unas condiciones dadas, se aplica en condiciones distintas pudiendo extrapolar erróneamente los resultados. En ESTCENA se ha propuesto un novedoso test para la detección de robustez basado en la comparación estadística (con un t-test) del sesgo que producen los

métodos de downscaling en un periodo histórico cálido (o seco), frente a periodos normales (dados por muestras aleatorias obtenidas de un *k-fold*). De esta manera se ha podido descartar, por primera vez en un estudio de este tipo, aquellos métodos que podrían estar afectados por este problema (ver Gutiérrez et al. 2012). Los métodos descartados se indican con un símbolo “R” en la Tabla 3.

Aparte de las técnicas descritas en la Tabla 3, en el proyecto también se consideraron un tipo nuevo de técnicas, que combinan ambas técnicas de downscaling, aplicando técnicas estadísticas a la salida de los modelos dinámicos (ver Turco et al. 2011). Esto permite realizar una calibración avanzada de los resultados de los modelos regionales del clima.

4. PROYECCIONES REGIONALES RESULTANTES

Para cada una de las variables seleccionadas (temperatura máxima, mínima y precipitación), el resultado final del proyecto son un conjunto de proyecciones cruzando los GCMs (Tabla 2) y los métodos de downscaling (Tabla 3). Por ejemplo, la Tabla 4 muestra la matriz de proyecciones resultante para la temperatura. Para cada una de estas combinaciones/celdas, se dispone de proyecciones en la rejilla y en la red puntual de estaciones (ver Sec. 2) para los escenarios indicados. El escenario de control (CTRL) es el escenario 20C3M, que abarca el período 1961-2000, mientras que los restantes escenarios cubren de manera continua y a escala diaria el período 2011-2100. tanto Por ejemplo, la Fig. 2 muestra el incremento proyectado para el período 2071-2100 con el escenario A1B (obtenido como la diferencia entre la media de ese período para el escenario A1B y el período 1971-2100 para el escenario de control) para la combinación marcada con un asterisco en la Tabla 4, proyectando tanto sobre datos puntuales como sobre la rejilla (es de destacar el alto grado de consenso que se obtiene en ambos casos).

Escenarios	CGM	ESTCENA				AEMET
		REG-CP (M3a)	REG-NN (M3c)	REG-WT (M5c)	FIC	AEMET1
CTRL,B1,A1B,A2	CNCM3	+	+	+	+	+ ¹
CTRL,B1,A1B,A2	MPEH5	+	+	+	+	+ ¹
CTRL,B1,A1B,A2	BCM2	+	+	+	+	+ ¹
CTRL,A1B	HadCM3-Q3	+	+	+	+	+ ¹
CTRL,A1B	HadGEM2	+ (*)	+	+	+	+ ¹
CTRL,A1B	IPCM4v2	+	+	+	+	+ ¹

TABLA 4: Matriz de proyecciones para temperatura, con los distintos GCMS y métodos de downscaling.¹ sólo datos puntuales.

Los datos resultantes de este proyecto, así como un análisis descriptivo de los resultados y una estimación del efecto regional de las distintas fuentes de incertidumbre (escenarios, GCMs, downscaling estadístico) están disponibles en <http://www.meteo.unican.es/estcena>

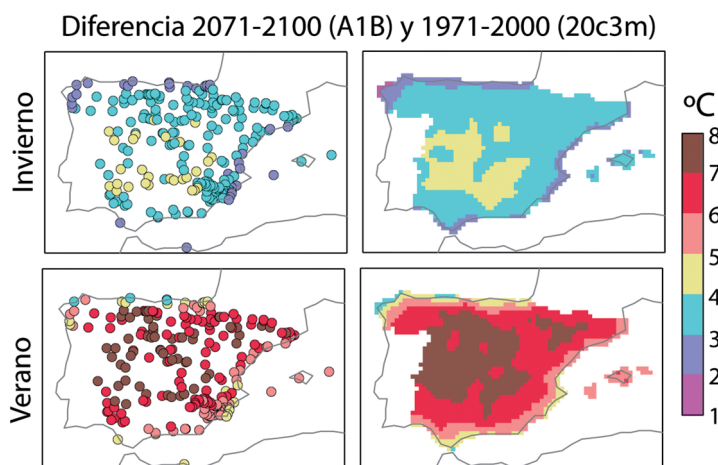


FIG. 2: Incrementos de temperaturas máximas para invierno (primera fila) y verano (segunda) obtenidos aplicando el método M3a al modelo HadGEM2, para la red de estaciones de AEMET (primera columna) y a la rejilla Spain02 (segunda columna).

5. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

Las técnicas de downscaling estadístico ofrecen una serie de ventajas para la regionalización de escenarios de cambio climático. Por una parte, al tener una menor necesidad de cálculo que las técnicas dinámicas, se pueden realizar todos los cruces posibles con los GCMs y escenarios disponibles, permitiendo así un análisis exhaustivo de las incertidumbre y de la contribución de cada una de sus componentes (escenarios, modelos globales, técnicas de regionalización). Por otra parte, estas técnicas permiten trabajar con predictores transformados (por ejemplo, datos estandarizados), que muestran un mayor grado de consistencia entre reanálisis y GCMs (ver Brands et al. 2011), permitiendo así eliminar los errores debidos a los sesgos sistemáticos de los GCMs (nótese que los modelos dinámicos han de trabajar con los datos originales del GCM para garantizar la consistencia de las variables). Otra ventaja de las técnicas de regionalización estadística es que utilizan la climatología real observada de la variable local de interés, durante el período de referencia, por lo que obtienen proyecciones que pueden utilizarse directamente en estudios de impacto, sin necesidad de ser calibradas a posteriori (la calibración es un problema complicado que añade otra fuente de incertidumbre y no estacionariedad a la regionalización dinámica, ver Turco et al. 2011).

Algunos de los factores anteriores también constituyen una limitación para los métodos de downscaling estadístico ya que, por ejemplo, sólo permiten realizar proyecciones para aquellas variables y localidades/regiones en las que se disponga de información histórica. Existen también una serie de problemas que han de ser tenidos en cuenta cuando se aplican estas técnicas a escenarios de cambio climático (ver, por ejemplo, Wilby et al. 2004 y Winkler et al., 2011). El principal de estos problemas es la posible falta de robustez, ya que el modelo aprendido en unas condiciones dadas (clima presente), se aplica en condiciones distintas (clima futuro) donde las relaciones empíricas puede no ser ya válidas (nótese que este problema también es relevante para aquellas parametrizaciones de los modelos dinámicos que son ajustadas de manera empírica a partir de una muestra observada). En el presente proyecto se han desarrollado novedosas metodologías para tener en cuenta este problema, permitiendo estimar la falta de robustez de los métodos de downscaling

estadístico, descartando aquellos métodos que podrían estar afectados por este problema (ver Gutiérrez et al. 2012).

La metodología desarrollada en el proyecto se ha aplicado a un total de 22 métodos de downscaling estadístico, que abarcan las distintas familias utilizadas en estudios similares, proporcionando un conjunto único de proyecciones regionales con el que analizar el efecto del cambio climático, cuantificando adecuadamente su incertidumbre. ESTCENA supone el mayor análisis comparativo de métodos de regionalización estadística realizado hasta la fecha, proporcionando un conjunto de proyecciones idóneo para poder explorar en el futuro distintos aspectos de la regionalización estadística del cambio climático. Estas proyecciones, así como una descripción completa del proyecto y el software y datos necesarios para replicar todos los experimentos están disponibles públicamente en <http://www.meteo.unican.es/estcena>, y forman parte de Escenarios-PNACC 2012, que integra y homogeneiza esta información con las proyecciones dinámicas disponibles (proyectos ESCENA y ENSEMBLES).

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino la financiación recibida para realizar este trabajo (Acción Estratégica Energía y Cambio Climático del Plan Nacional de I+D+i 2008-11, exp200800050084078). También agradecen a la Oficina Española de Cambio Climático (OECC) su coordinación y a AEMET por los datos proporcionados para la realización de este proyecto. Finalmente, los autores agradecen a todos los participantes en ESTCENA de los distintos grupos su implicación en el proyecto.

REFERENCIAS

- Casado, M.J., Pastor, M.A. and Doblas-Reyes, F.J. (2008). Euro-Atlantic circulation types and modes of variability in winter. *Theoretical Applied Climatology*, 96, 17-29.
- Brands, S., S. Herrera, D. San-Martín, J.M. Gutiérrez (2011). Validation of the ENSEMBLES Global Climate Models over southwestern Europe using probability density functions: A downscaling perspective. *Climate Research*, 48, 145-161.
- Brands, S., Gutiérrez, J.M., Herrera, S. y Cofiño A. (2012). On the Use of Reanalysis Data for Downscaling. *Journal of Climate*, 25, 2517–2526.
- Gaertner, M.A., Gutiérrez, J.M. y Castro M. (2012) Escenarios regionales de cambio climático. *Revista Española de Física*, 26-2, 1-8.
- Gutiérrez, J.M., Cano, R., Cofiño, A.S. y C. Sordo (2004) *Redes probabilísticas y neuronales en las ciencias atmosféricas*. Monografías del Instituto Nacional de Meteorología, Madrid.
- Gutiérrez, J.M., San-Martín, D., Brands, S., Manzanas, R. y Herrera, S. (2012). Reassessing statistical downscaling techniques for their robust application under climate change conditions. *Journal of Climate*. In press.
- Herrera, S. (2011) *Desarrollo, validación y aplicaciones de Spain02: Una rejilla de alta resolución de observaciones interpoladas para precipitación y temperatura en España*. Tesis doctoral. Universidad de Cantabria. <http://www.meteo.unican.es/tesis/herrera>.
- Herrera S., J.M. Gutiérrez, R. Ancell, M.R. Pons, M.D. Frías and J. Fernández (2012) Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02). *International Journal of Climatology*. 32, 74-85.
- 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*. Solomon, S. et al. editores. Cambridge University Press.
- Johns, T.C. et al. (2011) Climate change under aggressive mitigation: the ENSEMBLES multi-model experiment. *Climate Dynamics*, 37, 1975-2003.

- Nakicenovic, N. et al. (2001) *IPCC Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge University press. 599 pp.
- Ribalaygua, J., Torres, L., Pórtolés, J., Monjo, R., Gaitán, E. (2012) A two-step analog/regression downscaling method: description and validation. *Theoretical and applied climatology*. En revisión.
- Tebaldi, C., Arblaster, J.M. y Knutti, R. (2011). Mapping model agreement on future climate projections. *Geophysical Research Letters*, 38, L23701.
- Turco, M., P. Quintana Seguí, M. C. Llasat, S. Herrera, and J. M. Gutiérrez (2011), Testing MOS precipitation downscaling for ENSEMBLES regional climate models over Spain, *Journal of Geophysical Research*, 116, D18109.
- Van der Linden P., and J.F.B. Mitchell editores (2009) *ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project*. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK. 160pp. <http://www.ensembles-eu.org/>
- Wilby, R.L., S.P. Charles, E. Zorita, B. Timbal, P. Whetton, L.O. Mearns, (2004): *Guidelines for Use of Climate Scenarios developed from Statistical Downscaling Methods*. Supporting material of the IPCC (TGICA).
- Winkler, J.A., G.S. Guentchev, M. Liszewska, Perdinan and P.N. Tan (2011): Climate Scenario Development and Applications for Local/Regional Climate Change Impact Assessments: An Overview for the Non-Climate Scientist. Part II: Considerations When Using Climate Change Scenarios, *Geography Compass* 5/6, 301–328.