

Escenarios-PNACC 2017: Nueva colección de escenarios de cambio climático regionalizados del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC)

Coordinado por:

Ernesto Rodríguez (AEMET) y José M. Gutiérrez (CSIC-UC)

Índice

Resumen	2
1. Introducción y Contexto Internacional	3
2. Escenarios Climáticos Regionalizados	6
2.1. <i>Regionalización Dinámica: La iniciativa EURO-CORDEX</i>	7
2.2. <i>Regionalización Estadística: La iniciativa VALUE</i>	8
3. El Conjunto de Datos de Escenarios-PNACC 2017	9
4. Problemas Frecuentes en el Uso de Proyecciones Regionales	12
Acceso a los datos.....	12
Condiciones de uso de los datos.....	12
Elección de datos en rejilla o puntuales (por localidades)	12
Corrección de sesgos de los modelos (técnicas de “ <i>bias correction</i> ”).....	13
Selección de un subconjunto representativo de modelos	14
¿Qué son los “runs” de un modelo (por ejemplo “r1p1i1”) ?.....	15
Tratamiento de la incertidumbre: ¿Basta un único escenario?.....	15
5. Contribuciones y Agradecimientos	15
6. Referencias	16

Resumen

El Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC), a través de la iniciativa *Escenarios-PNACC*, recopila la información climática regional para España, tanto del clima actual, como de distintos escenarios futuros de cambio climático para las próximas décadas. El objetivo principal de esta iniciativa es revisar y armonizar las distintas fuentes de información y ponerlas a disposición de la comunidad de impactos y adaptación al cambio climático, tratando de facilitar el acceso a la misma y las buenas prácticas de uso. El primer conjunto de datos (*Escenarios-PNACC*, 2012; Fernández y otros, 2012; Gutiérrez y otros 2012)) se basó en las proyecciones globales del clima usadas en el cuarto informe del IPCC (AR4), basadas en los escenarios de emisiones B1, A1B y A2, y realizadas en el contexto de la iniciativa CMIP3 de inter-comparación de modelos globales del clima (GCMs, según sus siglas en inglés). Estas proyecciones globales sirvieron de base para distintos estudios de regionalización aplicando modelos climáticos regionales (ENSEMBLES, a escala europea y ESCENA, a escala nacional, ambos con una resolución de ~20km) y técnicas estadísticas de regionalización (AEMET y ESTCENA, con información puntual para un subconjunto de estaciones/localidades de la red de AEMET). La información de estos proyectos se armonizó y se puso a disposición pública a través de AEMET (datos mensuales¹) y de los proyectos ESCENA y ESTCENA.

En el presente documento se describe la actualización de *Escenarios-PNACC* realizada a partir de la información disponible en el último informe del IPCC (AR5 - CMIP5, <http://www.ipcc.ch/report/ar5>) y en los proyectos de regionalización dinámica (EURO-CORDEX, continuación de ENSEMBLES) y estadística (AEMET y VALUE, este último una continuación de ESTCENA a escala europea). Las nuevas proyecciones globales se basan en una nueva generación de escenarios de emisiones (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 Y RCP8.5) y las nuevas proyecciones regionales de EURO-CORDEX alcanzan una resolución de ~10km, aunque se restringen principalmente a los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Las proyecciones estadísticas siguen siendo puntuales, para la misma red de localidades de *Escenarios-PNACC 2012*. La información de *Escenarios-PNACC 2017* se distribuye a través de AEMET y del “visor de escenarios de cambio climático de AdapteCCa” (<http://escenarios.adaptecca.es>), que permite visualizar la información de las variables originales (para temperaturas, precipitación, viento y humedad), así como de distintos índices climáticos definidos a partir de ellas, y descargar los datos (proporcionados a escala diaria) en un formato de fácil lectura, facilitando así su acceso y su uso.

El **número especial de CLIVAR Exchanges**² “Special Issue on climate over the Iberian Peninsula: an overview of CLIVAR Spain coordinated science”, No. 73, incluye información detallada sobre evaluación (Montávez y otros, 2017) y proyecciones regionales (Fernández y otros, 2017) de escenarios de cambio climático en la península Ibérica basados en datos del CMIP5, incluyendo la descripción y análisis de los datos de *Escenarios-PNACC 2017*.

¹ http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat

² <http://www.clivar.org/publications/exchanges>

1. Introducción y Contexto Internacional

Para poder estudiar el impacto del cambio climático en los distintos sectores socioeconómicos de interés para un país, y poder tomar medidas de adaptación adecuadas para paliar sus consecuencias, es necesario disponer de información sobre la evolución previsible del clima para las próximas décadas. Una herramienta básica para ello son las denominadas **proyecciones de cambio climático**, que son descripciones plausibles de la evolución futura del clima que se obtienen a partir de simulaciones con modelos climáticos, forzados con distintos **escenarios de emisiones** de gases de efecto invernadero que caracterizan la evolución futura de estos gases durante las próximas décadas. Cada uno de estos escenarios se define a partir de distintas suposiciones acerca del futuro desarrollo demográfico, tecnológico y socio-económico (más o menos sostenible) en el mundo. El procedimiento para obtener escenarios de emisiones se modificó en el último informe del IPCC (AR5), considerando los denominados **Representative Concentration Pathways** (RCPs; Moss y otros, 2010). Estos escenarios se definen a partir de posibles trayectorias futuras de forzamiento radiativo, causados por cambios en la concentración de gases de efecto invernadero y aerosoles, y que caracterizan el cambio en el balance entre la radiación saliente y entrante en la atmósfera (forzamiento). Para tener en cuenta esta fuente de incertidumbre es necesario considerar un conjunto de escenarios que caractericen el rango de variación esperable (por ejemplo, los escenarios RCP2.5, RCP6.0, RCP4.5 y RCP8.5). Como muestra la Figura 1, los modelos globales del clima permiten proyectar el forzamiento radiativo dado por estos escenarios en cambios futuros para las distintas variables del sistema climático (por ejemplo temperatura).

Los **modelos globales del clima (GCMs**, según sus siglas en inglés) constituyen la principal herramienta de que se dispone para simular los procesos que conforman el estado del clima. Los GCMs se basan en una representación matemática de los procesos físico-químicos que tienen lugar en el sistema climático, así como en las interacciones entre sus distintos componentes (atmósfera, hidrosfera, criosfera, litosfera y biosfera). Estos sistemas de ecuaciones se resuelven usando grandes supercomputadores, aplicando técnicas numéricas apropiadas que proporcionan los sucesivos estados del sistema en intervalos temporales discretos (por ejemplo, hora a hora) que caracterizan la evolución futura del sistema climático. Este proceso requiere dividir el espacio ocupado por la atmósfera y el océano en celdillas tridimensionales en las que se calculan los valores de las variables que caracterizan el estado de la atmósfera y el océano, como temperatura, densidad, etc. El tamaño de las celdillas (resolución del GCM) debe estar en concordancia con la resolución temporal a la que se resuelve el sistema. Por ejemplo, los modelos del **CMIP5** utilizados en el último informe del IPCC (AR5) han sido resueltos con una **resolución horizontal típica de 200 km** ($\sim 2^\circ$) y con 30 niveles verticales en la atmósfera (ver Tabla 1).

Esta discretización del sistema impide que puedan modelarse y resolverse procesos atmosféricos u oceánicos con escalas espaciales o temporales menores que la resolución del modelo, por ejemplo, nubes individuales en los modelos atmosféricos o remolinos de escala intermedia en los modelos

oceánicos. El efecto de estos procesos sub-rejilla debe calcularse en paralelo a la resolución dinámica mediante una representación paramétrica en función de valores de las variables básicas resueltas por el modelo. Este procedimiento se llama parametrización y supone la principal fuente de **incertidumbre en el proceso de modelización** del sistema climático, ya que existen diferentes parametrizaciones para un mismo proceso, desarrolladas en distintos centros internacionales de modelización numérica del clima. Por ello, el proceso de generación de escenarios de cambio climático deber considerar distintos GCMs que permitan muestrear esta fuente de incertidumbre. En la Tabla 1 se muestran las características de los GCMs que participaron en el CMIP5 y la disponibilidad actual de datos para los distintos escenarios de emisión.

Estas **proyecciones multi-modelo multi-escenario** constituyen el punto de partida para el proceso de regionalización, conducente a refinar la resolución de esta información sobre regiones geográficas específicas.

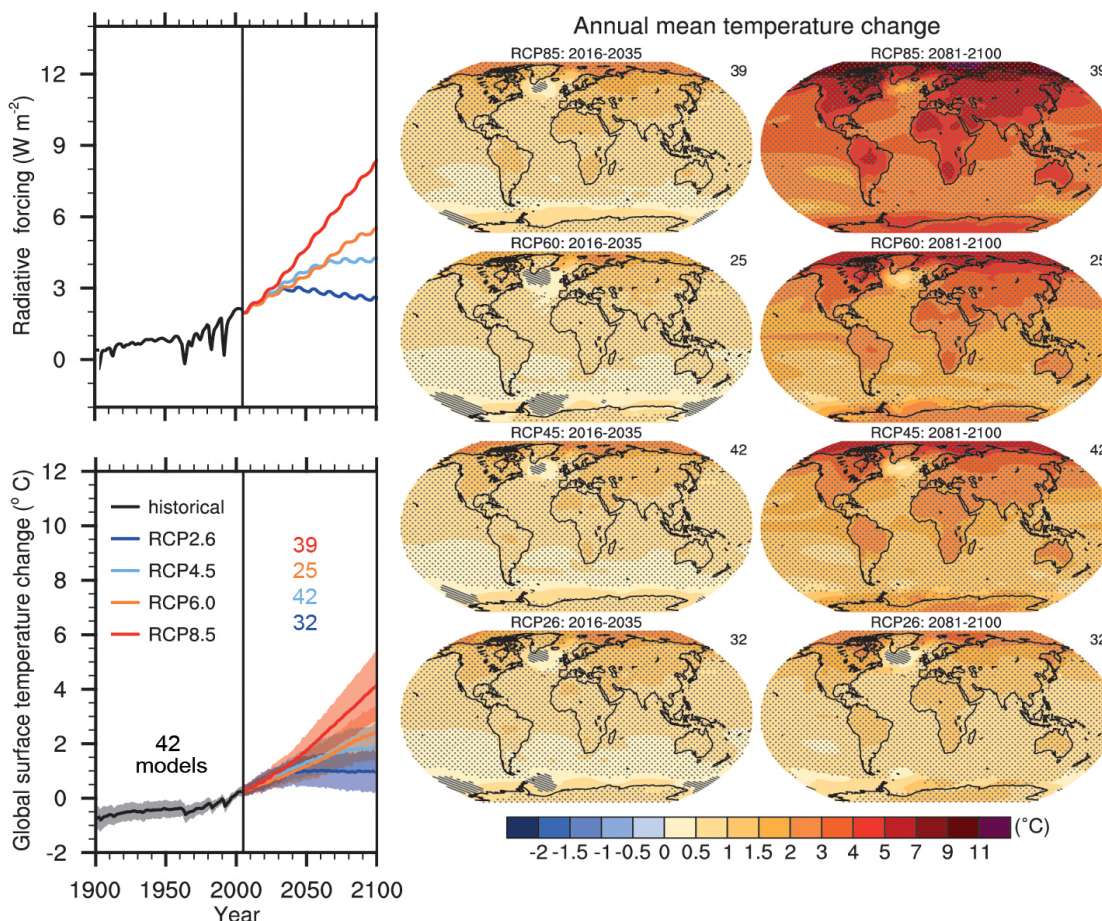


Figura 1. Forzamiento de los distintos escenarios RCP (arriba) y cambio (incremento) proyectado en la temperatura media global (abajo) y para las distintas regiones del globo (derecha) a principios y finales de siglo (en columnas) para los distintos escenarios (en filas). FUENTE: Adaptado del IPCC-AR5.

País	Centro	Modelo	Resolución	His	2.6	4.5	6.0	8.5
Australia	CSIRO-BOM	ACCESS1.0	1.9° × 1.2°					
		ACCESS1.3	1.9° × 1.2°					
Canada	CCCma	CanESM2	2.8° × 2.8°					
		CanCM4	2.8° × 2.8°					
USA	NCAR	CCSM4	1.2° × 1.0°					
Italy	CMCC	CMCC-CESM	3.7° × 3.4°					
		CMCC-CM	0.7° × 0.7°					
		CMCC-CMS	1.9° × 1.9°					
France	CNRM-CERFACS	CNRM-CM5	1.4° × 1.4°					
Australia	CSIRO	CSIRO-Mk3.6.0	1.9° × 1.9°					
		CSIRO-Mk3L-1-2	1.9° × 1.9°					
Intern.	ICHEC	EC-EARTH	1.1° × 1.1°					
China	LASG-IAP	FGOALS-s2	1.6° × 2.8°					
		FGOALS-g2	4.5° × 5.0°					
USA	NASA-GSFC	GEOSCCM	2.5° × 2.0°					
USA	NOAA-GFDL	GFDL-CM2.1	2.5° × 2.0°					
		GFDL-CM3	2.5° × 2.0°					
		GFDL-ESM2G	2.5° × 2.0°					
		GFDL-ESM2M	2.5° × 2.0°					
USA	NASA-GISS	GISS-E2-H-CC	2.5° × 2.0°					
		GISS-E2-H	2.5° × 2.0°					
		GISS-E2-R-CC	2.5° × 2.0°					
		GISS-E2-R	2.5° × 2.0°					
UK	MOHC	HadGEM3	1.9° × 1.2°					
		HadGEM2-CC	1.9° × 1.2°					
		HadGEM2-AO	1.9° × 1.2°					
		HadGEM2-ES	1.9° × 1.2°					
Russia	INM	INM-CM4	2.0° × 1.5°					
France	IPSL	IPSL-CM5A-LR	3.7° × 1.9°					
		IPSL-CM5A-MR	2.5° × 1.2°					
		IPSL-CM5B-LR	3.7° × 1.9°					
Japan	MIROC	MIROC-ESM-	2.8° × 1.8°					
		MIROC-ESM	2.8° × 1.8°					
		MIROC5	1.4° × 1.4°					
		MIROC4h	2.8° × 2.8°					
Germany	MPI-M	MPI-ESM-LR	1.9° × 1.9°					
		MPI-ESM-MR	1.9° × 1.9°					
Japan	MRI	MRI-CGCM3	1.1° × 1.1°					
		MRI-ESM1	1.1° × 1.1°					
Norway	NCC, NMI	NorESM1-M	2.5° × 1.9°					
		NorESM1-ME	2.5° × 1.9°					

Tabla 1. Las columnas indican el país y el nombre del centro de modelado (acrónimo), el nombre y la versión del modelo y la resolución horizontal aproximada del componente atmosférico (lon x lat). Las últimas cinco columnas indican los escenarios simulados: histórico, RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5. Según datos del ESGF en marzo de 2018 (<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip5/>; véase Sec. 4, "acceso a los datos").

Los modelos marcados en rojo son modelos de última generación: "Earth System Models" (ESMs), nuevos en el CMIP5 y que incorporan nuevos componentes del sistema climático, como la interacción con el uso del suelo y la vegetación, química atmosférica, aerosoles y el ciclo del carbono (más detalles en Taylor y otros, 2012). Las condiciones de uso se describen en <https://cmip.llnl.gov/cmip5/availability.html>

2. Escenarios Climáticos Regionalizados

La resolución típica de los GCMs utilizados para generar proyecciones globales de cambio climático (~200 km) no permite modelar ni simular procesos locales inducidos, por ejemplo, por la orografía de la región o la frontera y contraste tierra-mar. Por otra parte, esta resolución no es adecuada para poder analizar los posibles impactos del cambio climático a escala regional o local en distintos sectores socioeconómicos (ecosistemas, agricultura, hidrología, energía, infraestructuras, costa, etc.), ya que dicha resolución no permite resolver las heterogeneidades regionales determinantes para estos sectores. Los **escenarios regionalizados de cambio climático** son proyecciones del clima futuro sobre una región geográfica o territorio determinado, elaboradas con una resolución espacial adecuada para tener en cuenta la heterogeneidad climática de la región de interés. Estas proyecciones regionales se obtienen a partir de las proyecciones globales de cambio climático, realizando un paso adicional llamado **regionalización (o downscaling)**, que permita proyectar a escala local los cambios simulados por el modelo a escala global (véase Gaertner y otros, 2012, para una descripción breve de las metodologías de proyección regional de cambio climático).

Una de las técnicas estándar para aumentar la resolución de los modelos climáticos globales es la **regionalización dinámica**, que está basada en el uso de **modelos climáticos regionales (RCM, del inglés Regional Climate Model)**, con resoluciones típicas de decenas de kilómetros, los cuales se “anidan” a un modelo global en la zona de interés, tomando como condiciones de contorno los valores del modelo global a lo largo de toda la integración y resolviendo las ecuaciones de la atmósfera a una mayor resolución, incluyendo por tanto procesos regionales. A nivel global, estas actividades están amparadas bajo la iniciativa **CORDEX** (del Inglés COordinated Regional Downscaling Experiment), basada en los modelos globales y escenarios del último informe AR5 del IPCC. En el ámbito Europeo, las proyecciones regionales de cambio climático han sido producidas y actualizadas en distintos proyectos Europeos de investigación: PRUDENCE (2001-2004; 50km), ENSEMBLES (2004-2009; 25km), y actualmente **EURO-CORDEX** (Jacob y otros, 2014), que se basa en los modelos globales utilizados en el último informe AR5 del IPCC y ofrece simulaciones para un dominio que cubre Europa a 10 km de resolución.

Por otro lado, las técnicas de **regionalización estadística** establecen relaciones empíricas entre los valores de los modelos globales (predictores) y los valores observados de las variables de interés (predictandos, por ejemplo, precipitación, temperatura o velocidad del viento) en las localidades en las que se desea obtener las proyecciones. Estas técnicas son menos costosas computacionalmente que la regionalización dinámica, por lo que es posible realizar un gran número de realizaciones/simulaciones con diferentes métodos y distintos GCM y escenarios, que cubran todas las posibles combinaciones y permitan analizar separadamente de forma adecuada las distintas fuentes de incertidumbre: escenarios, modelos globales, y técnicas de regionalización (véase, por ejemplo, San Martín y otros, 2017). Sin embargo, es necesario utilizar una metodología adecuada que garantice que las proyecciones obtenidas no

están contaminadas por artefactos estadísticos del proceso de downscaling (predictores inadecuados, problemas de extrapolación, consistencia entre el reanálisis y los GCMs, etc.), dando lugar a proyecciones no plausibles. Aunque existen distintas guías^{3,4}, con indicaciones e instrucciones para la preparación y uso de escenarios regionales, existen numerosos aspectos todavía no resueltos (capacidad de extrapolación de las técnicas, etc.) que hacen necesaria una gran experiencia en este campo para poder aplicar las metodologías de validación más actuales que permitan minimizar el impacto de estos problemas (descartando técnicas sospechosas; véase Gutiérrez y otros 2018 para una descripción de la metodología adoptada en proyecto VALUE).

2.1. Regionalización Dinámica: La iniciativa EURO-CORDEX

La iniciativa CORDEX (del Inglés Coordinated Regional Downscaling Experiment; Giorgi y otros, 2009) persigue generar proyecciones regionales a nivel mundial, así como fomentar el intercambio de conocimiento con la comunidad que utiliza información climática regional. Es una iniciativa del World Climate Research Programme (WRCP) donde se han definido dominios específicos basados en el criterio de expertos y que comparten la misma malla geográfica y condiciones de contorno para todos los modelos regionales. La mayoría de experimentos se llevaron a cabo en una malla de 0.44°; sin embargo, en algunos experimentos como el realizado para Europa (EURO-CORDEX, Figura 2), la resolución estándar es de 0.11° (Jacob y otros, 2014; Casanueva y otros, 2015).

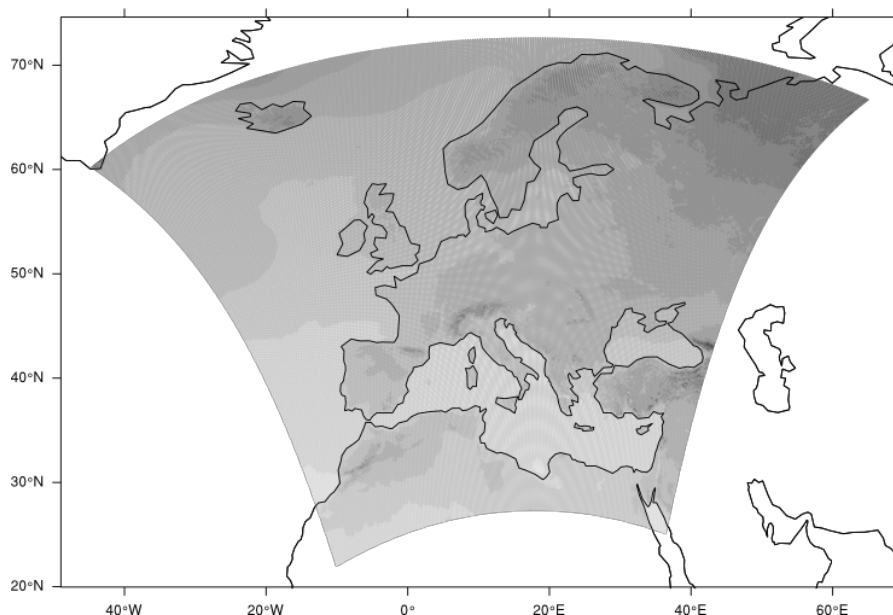


Figura 2. Dominio de simulación de los RCM enmarcados en EURO-CORDEX.

³ IPCC-TGCI, 2003: Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Regional Climate Model Experiments. L. O. Mearns , F. Giorgi , P. Whetton , D. Pabon , M. Hulme , M. Lal.

⁴ IPCC-TGICA, 2007: General Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment. Version 2. T.R. Carter.

En concreto, EURO-CORDEX proporciona en la actualidad proyecciones con distintos modelos climáticos regionales (RCMs), anidados a distintos modelos climáticos globales del CMIP5 (ver Tabla 1), para el escenario histórico (historical) y los escenarios de emisiones RCP4.5 y RCP8.5, según se muestra en la Tabla 2.

#	GCM	RCM	Institución
1	CNRM-CM5_rli1p1	CCLM4-8-17_v1	CLMcom
2	CNRM-CM5_rli1p1	ALADIN53_v1	CNRM
3	CNRM-CM5_rli1p1	RCA4_v1	SMHI
4	EC-EARTH_r12i1p1	CCLM4-8-17_v1	CLMcom
5	EC-EARTH_r12i1p1	RCA4_v1	SMHI
6	EC-EARTH_rli1p1	RACMO22E_v1	KNMI
7	EC-EARTH_r3i1p1	HIRHAM5_v1	DMI
8	CM5A-MR_rli1p1	WRF331F_v1	IPSL-INERIS
9	CM5A-MR_rli1p1	RCA4_v1	SMHI
10	HadGEM2-ES_rli1p1	CCLM4-8-17_v1	CLMcom
11	HadGEM2-ES_rli1p1	RACMO22E_v1	KNMI
12	HadGEM2-ES_rli1p1	RCA4_v1	SMHI
13	MPI-ESM-LR_rli1p1	CCLM4-8-17_v1	CLMcom
14	MPI-ESM-LR_rli1p1	RCA4_v1	SMHI
15	MPI-ESM-LR_rli1p1	REMO2009	MPI
16	NorESM1-M	HIRHAM5_v1	DMI

Tabla 2. Proyecciones regionales obtenidas con distintos acoplamientos de modelos globales (GCMs, ver Tabla 1), y regionales (RCMs) de la iniciativa EURO-CORDEX con una resolución de 0.11° y proyecciones para RCP4.5 y RCP8.5.

Por otra parte, los datos observacionales representativos del clima regional en España se han tomado de Spain02_v5, un conjunto de datos observacionales interpolados en rejilla generados en el marco de EURO-CORDEX (Herrera et al. 2016; disponible en <http://www.meteo.unican.es/datasets/spain02>). Esta fuente de información proporciona datos diarios de precipitación y temperatura entre 1971-2015 en la misma rejilla de 0.11° que utilizan los modelos de EURO-CORDEX.

Los periodos considerados son 1971-2000 para el clima observado y el histórico simulado por los RCM y 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100 para los periodos futuros correspondientes a las proyecciones de los RCMs según los escenarios de emisiones RCP4.5 y RCP8.5.

2.2. Regionalización Estadística: La iniciativa VALUE

Las distintas técnicas de regionalización estadística (SDMs, según sus siglas en inglés) que se han propuesto en la literatura se suelen clasificar en dos familias (ver, e.g. Gutiérrez y otros 2018):

- **Funciones de transferencia**, basadas en modelos de **regresión** lineal o no lineal (p. ej. redes neuronales) para inferir las relaciones entre los predictandos locales y los predictores de larga escala. Estos métodos son "generativos", en el sentido de que las predicciones se derivan de un

modelo estadístico, que se obtiene a partir de los datos. En ocasiones se utilizan técnicas espaciales para reducir la dimensión del problema (Componentes Principales, etc.).

- **Tipos de tiempo y métodos de análogos**, basados en algoritmos de vecinos cercanos (k-NN) y/o en una preclasificación en un número finito de grupos (tipos de tiempo) obtenidos acorde a la similitud a gran escala de los campos atmosféricos; normalmente estos métodos son no generativos, pues se basan en un procedimiento algorítmico para obtener la proyección. El método más popular de este grupo es el método de **análogos**, basado en usar días del pasado similares a los días futuros para obtener una proyección.

A escala europea, el proyecto VALUE (<http://www.value-cost.eu>) ha realizado durante los últimos años estudios comparativos de las distintas técnicas de regionalización estadísticas antes mencionadas, analizando distintos aspectos, como la representación de extremos (Hertig y otros, 2018), de aspectos temporales (Maraun y otros, 2018) y espaciales (Widmann y otros, 2018), o la representatividad de procesos atmosféricos relevantes para el clima de Europa (por ejemplo, la NAO o situaciones de bloqueo; Soares y otros, 2018). Este proyecto ha contado con la participación del Grupo de Meteorología de Santander (CSIC-UC) y de AEMET, que han contribuido con distintas técnicas basadas en funciones de transferencia y en análogos, cubriendo así un amplio espectro de métodos. Uno de los resultados principales de estos proyectos es que ninguna técnica es superior al resto, sino que para distintos aspectos (temporales, extremos, etc.) unas técnicas son mejores que otras. Por tanto, es necesario considerar un conjunto de técnicas estadísticas de regionalización (y no una única técnica) para poder representar adecuadamente esta fuente adicional de incertidumbre (véase Gutiérrez y otros 2018 para una descripción de las metodologías y resultados de VALUE).

Tres de las técnicas analizadas en este proyecto, junto con una técnica adicional de AEMET basada en análogos, han sido aplicadas para generar proyecciones para Escenarios-PNACC 2017 sobre la Península y Baleares.

3. El Conjunto de Datos de Escenarios-PNACC 2017

La Tabla 3 muestra las proyecciones regionales disponibles en Escenarios-PNACC 2017, que incluye dos fuentes complementarias de información:

- **Proyecciones en rejilla**, provenientes de las regionalizaciones dinámicas (RCMs), generadas en la iniciativa EURO-CORDEX (véase Sec. 2.1). Esta información se distribuye a través del Earth System Grid Federation (ESGF, <http://cordex.org/data-access/esgf>; véanse las condiciones de uso de estos datos⁵), usando los siguientes criterios de filtrado: *Project=CORDEX, Domain=EUR-11*.

⁵ http://is-enes-data.github.io/CORDEX_RCMs_info.html

- **Proyecciones puntuales**, obtenidas aplicando técnicas estadísticas de regionalización (SDMs) a los datos de una serie de localidades de la red de estaciones de AEMET⁶ (ver Sec. 2.2). Las proyecciones disponibles provienen dos fuentes:
 - Servicios climáticos de AEMET⁷ (Proyecciones climáticas para el Siglo XXI, Regionalización estadística, AR5-IPCC, Métodos de Análogos y SDSM).
 - El servicio de datos climáticos de la Universidad de Cantabria⁸ (métodos ANALOG, GLM, MLR).

Adicionalmente, se consideran dos fuentes de datos diarios que son utilizadas como referencia para los datos anteriores: la red de estaciones de AEMET utilizada para la calibración de las técnicas de regionalización estadística y la rejilla de observaciones Spain02_v5⁹ (basado en la misma rejilla de EURO-CORDEX; Herrera y otros, 2016), en ambos casos para temperatura mínima, máxima y precipitación).

Esta información está accesible en el visor de escenarios de cambio climático de AdapteCCa (<http://escenarios.adaptecca.es>), donde se pueden visualizar los resultados en mapas o series temporales (con distintas opciones de agregación geográfica), y también descargar la información a escala diaria. La Figura 3 muestra algunos ejemplos de mapas para ilustrar la resolución espacial (para datos en rejilla) y las localidades disponibles (para datos puntuales).

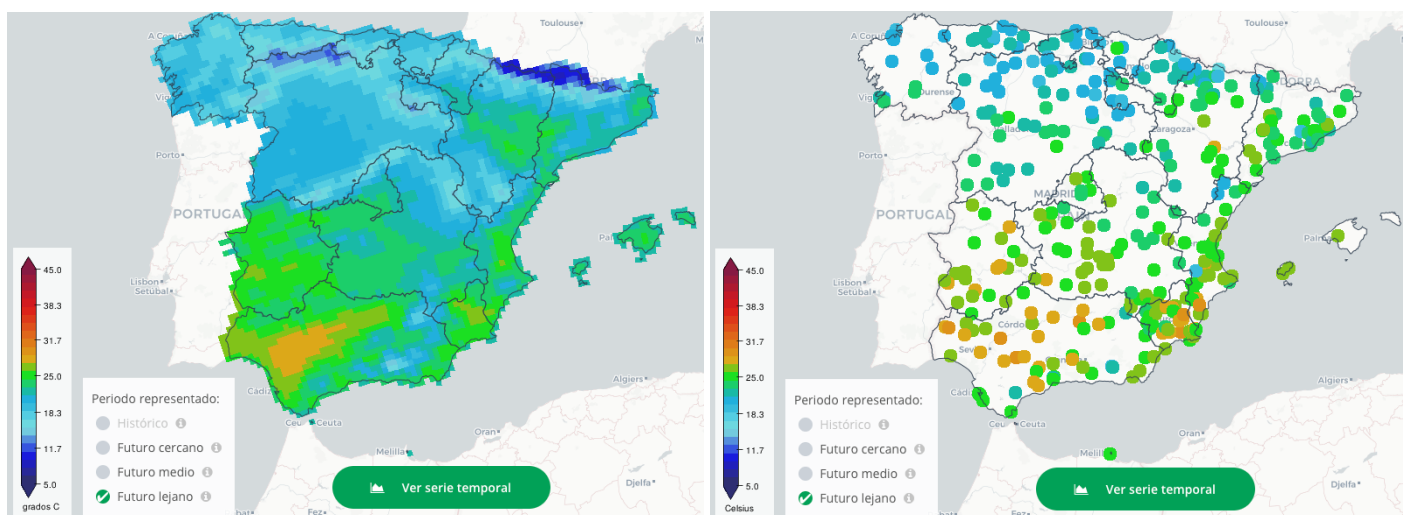


Figura 3. Ejemplos de visualización de la información en rejilla (izquierda) y puntual (derecha) de Escenarios-PNACC 2017 con el visor de escenarios de cambio climático de AdapteCCa para un ejemplo ilustrativo (proyecciones de temperatura máxima a finales de siglo, 2071-2100).

⁶ http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/datos_mensuales/ayuda

⁷ http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/datos_diarios

⁸ <http://meteo.unican.es/udg-wiki>

⁹ <http://www.meteo.unican.es/datasets/spain02>

Para las proyecciones en rejilla (RCMs) existe información para un gran número de variables (en ESCENARIOS-PNACC 2017 se incluye información diaria de temperatura mínima y máxima, precipitación, viento y humedad en superficie). Para las proyecciones puntuales, debido a la falta de observaciones representativas y suficientemente densas para otras variables, sólo se dispone de temperatura mínima y máxima, y precipitación.

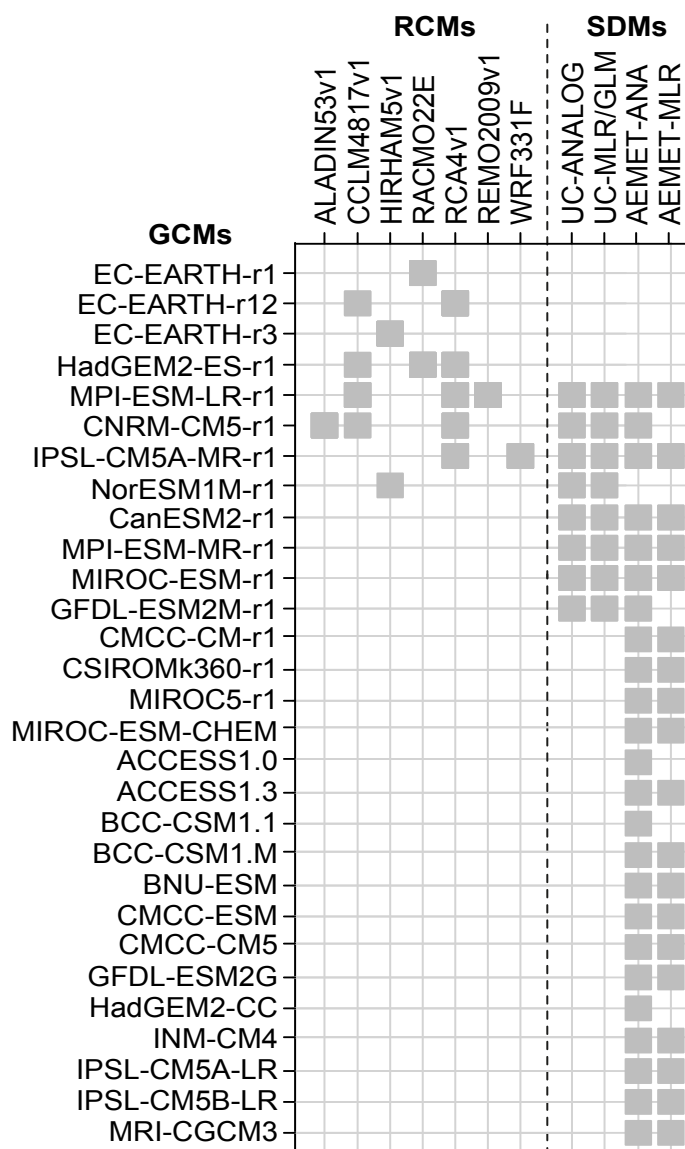


Tabla 3. Escenarios-PNACC 2017: Proyecciones regionales disponibles a partir de métodos dinámicos (RCMs) y estadístico (SDMs) de regionalización (en columnas) a partir de las proyecciones de distintos modelos globales (GCMs, en filas). Los RCMs provienen de EURO-CORDEX y proporcionan resultados en rejilla con una resolución de 0.11°. Los SDMs proporcionan resultados puntuales en una red de estaciones. Todos los métodos proporcionan proyecciones para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 (algunos adicionalmente para otros escenarios, según las proyecciones globales disponibles en la Tabla 1).

4. Problemas Frecuentes en el Uso de Proyecciones Regionales

La complejidad de la información climática regional disponible para llevar a cabo estudios de impacto y adaptación al cambio climático (proyecciones obtenidas con distintos modelos, para distintos escenarios, en rejilla o puntuales), hace que su uso no resulte sencillo en muchos casos y, por tanto, los usuarios de estos datos se suelen encontrar con una serie de problemas típicos. A continuación se trata de dar respuesta a alguno de ellos.

Acceso a los datos

Los datos de proyecciones regionales y globales del clima generados en los distintos proyectos e iniciativas nacionales e internacionales se almacenan normalmente en formatos específicos para datos climáticos (normalmente, en ficheros binarios en formato NetCDF) que son de difícil lectura para los usuarios de otros ámbitos. Por otra parte, el acceso a estos datos se realiza a través de servidores específicos (como el Earth System Grid Federation, ESGF, para los datos de CMIP5 y CORDEX) cuyo uso es complejo para usuarios no iniciados y requiere cierta experiencia previa. Por todo ello, el acceso a los datos necesarios para realizar un cierto estudio es normalmente un proceso que consume una gran cantidad de tiempo y recursos que puede llegar a comprometer los resultados del proyecto.

En *Escenarios-PNACC 2017* se ha tenido en cuenta este problema y, además de los servicios de acceso a los datos proporcionados por AEMET, se ha desarrollado un portal de visualización y acceso a estos datos (<http://escenarios.adaptecca.es>). Este portal está orientado a la comunidad de estudios de impactos y adaptación al cambio climático y permite visualizar y seleccionar fácilmente la información relevante para una cierta región geográfica (una provincia, cuenca hidrográfica, zona LIC, etc.).

Condiciones de uso de los datos

Los datos de proyecciones globales y regionales suelen ser de uso libre (licencia *unrestricted*) para actividades de investigación (por ejemplo, los datos de CMIP5 y CORDEX). Estas licencias suelen incluir unos términos de descarga de responsabilidad e indicaciones para agradecer su uso en publicaciones. Sin embargo, el uso comercial puede estar limitado para algunos modelos (licencia *non-commercial*) por lo que su uso en estudios de consultoría y para otras actividades comerciales estaría limitado, incluso si estos datos se obtienen a través de una tercera parte como *Escenarios-PNACC 2017*. Por ejemplo, los términos de uso de CORDEX se detallan en: http://cordex.dmi.dk/joomla/images/CORDEX/cordex_terms_of_use.pdf

Elección de datos en rejilla o puntuales (por localidades)

Existen dos fuentes principales de información climática regional. Por una parte, la información proveniente de modelos climáticos regionales (por ejemplo, CORDEX) se proporciona en rejillas regulares que cubren toda la región

estudio con una resolución dada (~10 km en CORDEX). Por otra parte, los métodos de regionalización estadística proporcionan información puntual en una serie de puntos o localidades predefinidas en los que los métodos han sido calibrados y aplicados.

Los datos en rejilla tienen una mayor cobertura espacial, pero no son representativos de un punto o localidad particular que pueda ser de interés para un estudio, sino del promedio del área que abarca cada punto de rejilla. Esta característica resulta especialmente problemática en regiones de orografía compleja, donde un mismo punto de rejilla puede comprender una gran variabilidad geográfica que escapa a estos datos "promedio" de rejilla. Un problema adicional es que los datos proporcionados por los modelos climáticos (globales y regionales) suelen incluir sesgos/desviaciones sistemáticas cuando se comparan con valores históricos observados en una zona de interés. Por ello, la representatividad de los datos de rejilla ha de ser cuidadosamente analizada en cada caso, considerando la aplicación de técnicas de post-proceso en aquellos casos en los que la resolución o los sesgos pueden comprometer su aplicación directa. Las técnicas de corrección de sesgo puede ser una buena alternativa en estos casos (este problema se analiza separadamente en el siguiente punto).

Por otra parte, los datos puntuales son representativos de las localidades para las cuales se dispone de información. El problema es que puede no existir ninguna localidad cercana/representativa para un estudio dado. Si se dispone de información histórica en el punto o puntos de interés (por ejemplo, la serie histórica de precipitaciones en la cabecera de una cuenca para un estudio de hidrología) sería posible aplicar las técnicas estadísticas en estos puntos, para regionalizar las proyecciones globales de cambio climático; sin embargo, esta tarea resulta compleja y requiere la colaboración con algún grupo especializado. Algunos proyectos (como VALUE) han tratado de facilitar esta tarea, haciendo públicos los métodos (por ejemplo el paquete `downscaleR` de regionalización estadística para R; <http://www.meteo.unican.es/climate4r>) y los datos necesarios para realizar estas proyecciones (véase Gutiérrez y otros, 2018).

Estas características hacen que para cada estudio particular resulte más adecuado un tipo de datos u otro.

Corrección de sesgos de los modelos (técnicas de "bias correction")

Los datos de los modelos climáticos globales y regionales no pueden ser utilizados de forma directa para estudios de impacto, ya que contienen sesgos importantes cuando se comparan con las observaciones. En consecuencia, se hace necesario un proceso de calibración antes de utilizar estos datos en aplicaciones reales (ver, por ejemplo, Casanueva y otros 2015, para un análisis de los sesgos de los datos de CORDEX sobre España). Un reciente estudio en el marco de la iniciativa VALUE (véase Gutiérrez y otros 2018; <http://www.value-cost.eu>) ha llevado a cabo una inter-comparación de técnicas de corrección de sesgos sobre Europa considerando las distintas metodologías que han sido propuestas hasta la fecha. En total, se han comparado las ventajas y limitaciones de más de 20 técnicas, que incluyen desde técnicas simples basadas en el método delta (apropiado para datos mensuales o anuales), hasta técnicas más sofisticadas basadas en ajustes de cuantil (quantile-quantile mapping), que resulta apropiado cuando es necesario corregir datos diarios.

El método delta es la más sencilla de estas técnicas y opera mediante el cálculo de incrementos (o disminuciones) de los valores climáticos, y se estima como la diferencia entre el clima futuro (por ejemplo, RCP8.5) y el histórico para un modelo particular. De este modo, se asume que los sesgos son sistemáticos y, por tanto, desaparecen al considerar estas diferencias (o "deltas") de valores simulados por un mismo modelo. Esta hipótesis es aproximada, ya que los sesgos de los modelos están afectados por procesos e interacciones no lineales que podrían variar en un escenario futuro de cambio climático. La "delta" resultante que contiene la señal del cambio climático ha de sumarse posteriormente al conjunto de datos de observaciones de referencia para el problema dado.

Una futura acción de los Escenarios-PNACC es calcular proyecciones regionales con el sesgo corregido usando varias técnicas para los datos en rejilla de Escenarios-PNACC 2017 (EURO-CORDEX) e incluirlos en el visor de escenarios de AdapteCca.

Selección de un subconjunto representativo de modelos

Cuando se llevan a cabo estudios de cambio climático en una región concreta un primer paso suele consistir en la evaluación de los distintos modelos disponibles (ver Tabla 1), en cuanto a su capacidad para representar adecuadamente tanto los procesos atmosféricos relevantes que afectan a la región, como el clima regional para las variables de interés (típicamente precipitación, temperatura o viento). Este proceso de evaluación ha de llevarse a cabo cuidadosamente para no descartar erróneamente ningún modelo. Flato y otros (2013) proporciona una referencia básica para este proceso, tanto en el caso de modelos globales como de técnicas de regionalización (Sec. 9.6). Knutti y otros (2010) describen buenas prácticas para la evaluación y combinación de modelos. A nivel regional, Brands y otros (2013) proporcionan un análisis de los modelos del CMIP5 sobre Europa. Por otra parte, Casanueva y otros (2015) proporcionan una evaluación de los modelos de EURO-CORDEX sobre la península Ibérica.

Por otra parte, dado que el número de proyecciones (realizaciones) que se pueden ejecutar con algunos modelos de impacto (por ejemplo, con modelos hidrológicos) es limitado, resulta necesario seleccionar un subconjunto de modelos representativo de la variabilidad dada por las diferentes combinaciones de GCMs y RCMs (ver Tabla 2) para las variables de interés. Aunque existen técnicas objetivas para la selección de este subconjunto para un problema dado (ver Ruane y otros 2017), puede también optarse por una metodología más simple, que consiste en evitar duplicidades de GCMs y RCMs que puedan sesgar las proyecciones regionales resultantes (Weigel y otros 2010), muestreando de manera equilibrada los modelos existentes (o las familias de modelos). Por ejemplo, el modelo regional RCA aparece en 5 de las 14 simulaciones disponibles. Un subconjunto balanceado lo formarían las simulaciones número 2, 6, 8, 10, 15 16, que incluiría una única copia de los seis GCMs participantes y de los seis RCMs (a excepción del modelo RCA, del cual podría cogerse otra de las proyecciones anidadas a uno de los *runs* de EC-EARTH).

¿Qué son los “runs” de un modelo (por ejemplo “r1p1i1”)?

Para tener en cuenta la variabilidad natural del clima se repiten varias veces las simulaciones variando las condiciones iniciales de forma que se tienen distintas presentaciones igualmente plausibles de la evolución futura del clima proyectada con el modelo. Esto permite caracterizar la incertidumbre debida a la variabilidad natural, pudiendo así acotar el efecto del cambio climático de una manera más eficaz. Cada una de estas simulaciones tiene un código diferente r1, r2, etc., en la codificación estándar “r1p1i1” de los modelos de CMIP5 y CORDEX (‘p’ se refiere a distintas realizaciones con física perturbada e ‘i’ se refiere a la forma de inicialización). Diversos estudios han mostrado que esta fuente de incertidumbre puede ser tan importante como la debida a los escenarios o los modelos, principalmente en horizontes temporales próximos (Deser y otros, 2012; Fig. 11.8, Cap. 11, IPCC-AR5 WGI). Esta fuente de incertidumbre ha comenzado a analizarse como una fuente de incertidumbre adicional del diseño experimental en el CMIP5.

Normalmente no es necesario tener en cuenta esta fuente de incertidumbre cuando se consideran estudios multi-modelo, salvo que quiera considerarse explícitamente la variabilidad natural, y suele considerarse una única realización de cada modelo (típicamente “r1i1p1”).

Tratamiento de la incertidumbre: ¿Basta un único escenario?

Tal como muestra la Figura 1, el escenario de emisión es la principal fuente de incertidumbre en la segunda mitad del siglo. Por ello, es necesario analizar varios escenarios (al menos dos, por ejemplo RCP4.5 y RCP8.5, para obtener una horquilla de resultados) para caracterizar adecuadamente la incertidumbre y tener una representación plausible del clima futuro. Hasta mediados de siglo, la incertidumbre que aportan los distintos modelos es similar o incluso superior a la de los escenarios, sobre todo a nivel regional, por lo que algunos estudios se basan en un único escenario. Sin embargo, existe una gran variabilidad de resultados dependiendo de la variable considerada y la región de interés¹⁰ (ver Hawkins y Sutton, 2009 para más detalles), por lo que un tratamiento adecuado de la incertidumbre ha de considerar siempre los resultados de distintos escenarios para poder caracterizar el clima futuro.

5. Contribuciones y Agradecimientos

Agradecemos al World Climate Research Programme (WCRP) y a los grupos participantes en CORDEX por proporcionar sus datos. También agradecemos a la infraestructura del Earth System Grid Federation (ESGF) por albergar y dar acceso a esta información. También agradecemos a AEMET y al Grupo de Meteorología de Santander (Universidad de Cantabria – CSIC; proyecto MULTI-SDM, MINECO/FEDER, CGL2015- 66583-R) por haber contribuido con datos, resultado de técnicas de regionalización estadística.

¹⁰ Un análisis regional para distintas variables puede verse en <http://ncas-climate.nerc.ac.uk/research/uncertainty>

6. Referencias

Brands, S., S. Herrera, J. Fernández, y J. M. Gutiérrez. 2013. "How Well Do CMIP5 Earth System Models Simulate Present Climate Conditions in Europe and Africa?" *Climate Dynamics* 41: 803–817. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1742-8>.

Casanueva, A., Kotlarski, S., Herrera, S., Fernández, J., Gutiérrez, J.M., Boberg, F., Colette, A., Christensen, O.B., Goergen, K., Jacob, D., Keuler, K., Nikulin, G., Teichmann, C. y Vautard, R. (2015): Daily precipitation statistics in a EURO-CORDEX RCM ensemble: added value of raw and bias-corrected high-resolution simulations. *Climate Dynamics*, 47 (3), 719-737.

Deser, C. y otros (2012) Uncertainty in climate change projections: The role of internal variability. *Climate Dynamics* 38(3):527-546

DOI10.1007/s00382-010-0977-x

Fernández J, y otros (2017) "Regional Climate Projections over Spain: Atmosphere. Future Climate Projections", *CLIVAR Exchanges* 73:45-52. Disponible en <http://www.clivar.org/documents/exchanges-73>

Fernández, J. y otros (2012) "Escenarios-PNACC 2012: Resultados de regionalización dinámica. En "Cambio climático: Extremos e Impactos". Publicaciones de la AEC. Serie A, n8, 63-72.

<http://www.meteo.unican.es/node/73108>

Flato, G., J. Marotzke, B. Abiodun, P. Braconnot, S.C. Chou, W. Collins, P. Cox, F. Driouech, S. Emori, V. Eyring, C. Forest, P. Gleckler, E. Guilyardi, C. Jakob, V. Kattsov, C. Reason and M. Rummukainen, 2013: Evaluation of Climate Models. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Gaertner, M.A., Gutiérrez, J.M., y Castro, M. (2012): Escenarios regionales de cambio climático. *Revista Española de Física*, 26 , pp. 34-42

Giorgi F., Jones C. y Asrar G. (2009): Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *WMO Bulletin* 58(3), 175-183.

Herrera, S., J. Fernández, y J. M. Gutiérrez. 2016. Update of the Spain02 Gridded Observational Dataset for EURO-CORDEX Evaluation: Assessing the Effect of the Interpolation Methodology. *International Journal of Climatology*, 36 (2):900–908.

Gutiérrez, J.M. y otros (2012): Escenarios-PNACC 2012: Descripción y Análisis de los Resultados de Regionalización Estadística. En "Cambio climático: Extremos e Impactos". Publicaciones de la AEC. Serie A, n8, 125-134.

<http://www.meteo.unican.es/node/73082>

Gutiérrez JM, Maraun D, Widmann M, y otros (2018). An intercomparison of a large ensemble of statistical downscaling methods over Europe: Results from the

VALUE perfect predictor cross-validation experiment. *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/joc.5462>

Hawkins, E., y R. Sutton. 2009. "The Potential to Narrow Uncertainty in Regional Climate Predictions." *Bulletin of the American Meteorological Society* 90 (8): 1095–1108. <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2607.1>.

Hertig E, y otros (2018) Comparison of statistical downscaling methods with respect to extreme events over Europe: Validation results from the perfect predictor experiment of the COST Action VALUE. *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/joc.5469>

Jacob, D., y otros (2014): EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14(2):563-578.

Knutti, R., G. Abramowitz, M. Collins, V. Eyring, P.J. Gleckler, B. Hewitson, y L. Mearns, 2010: Good Practice Guidance Paper on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections. In: Meeting Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Expert Meeting on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. IPCC Working Group I Technical Support Unit, University of Bern, Bern, Switzerland.

https://wg1.ipcc.ch/guidancepaper/IPCC_EM_MME_GoodPracticeGuidancePaper.pdf

Maraun, D. y otros (2018) The VALUE perfect predictor experiment: evaluation of temporal variability. *International Journal of Climatology*, DOI: 10.1002/joc.5222

Montávez, J.P. (2017) "Regional climate projections over Spain: Atmosphere. Present climate evaluation". *CLIVAR Exchanges*, No. 73, 39-44. Disponible en <http://www.clivar.org/documents/exchanges-73>

Ruane, A.C., y McDermid, S.P. (2017): Selection of a Representative Subset of Global Climate Models That Captures the Profile of Regional Changes for Integrated Climate Impacts Assessment. *Earth Perspectives* 4 (1):1. <https://doi.org/10.1186/s40322-017-0036-4>.

Soares, P.M.M. y otros (2018) Process based evaluation of the VALUE perfect predictor experiment of statistical downscaling methods. *International Journal of Climatology*, in press.

Taylor KE, Stouffer RJ, y Meehl GA (2012) An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull Am Meteorol Soc* 93(4):485–498. doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1

Weigel, A.P., Knutti, R., Liniger, M.A., y Appenzeller, C. (2010): Risks of Model Weighting in Multimodel Climate Projections. *Journal of Climate* 23 (15):4175–4191. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3594.1>.

Widmann, M. y otros (2018) Validation of spatial variability in downscaling results from the VALUE perfect predictor experiment. *International Journal of Climatology*, in press.