

Nueva evaluación del impacto futuro del cambio climático en los recursos hídricos en España

A New Assessment of the Future Effect of Climate Change on Water Resources in Spain

L.M. Barranco^{1*}, M. Dimas², A. Jiménez³ y F. Estrada⁴

Resumen

Se presenta una nueva evaluación del impacto futuro del cambio climático en los recursos hídricos en España. La escorrentía se ha calculado mediante un modelo hidrológico precipitación-aportación que ha utilizado como valores de entrada los resultados de doce diferentes simulaciones climáticas (combinaciones de modelos climáticos globales, escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero y algoritmos de regionalización), cuya variabilidad refleja la incertidumbre del clima futuro. La resolución espacial y temporal de los cálculos es de 1 km² y un mes respectivamente. El impacto se ha evaluado comparando los valores del periodo de control, 1961-2000, con los de cada uno de los tres periodos de 30 años del siglo XXI, 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100, valores de los cuatro periodos estimados a partir de series simuladas de precipitación y temperatura. A pesar de la incertidumbre, mostrada por el sesgo de los valores de entrada y por las discrepancias entre las doce simulaciones, se estima una disminución de recursos hídricos. Los cambios de escorrentía para España están en el rango de +20% a -14% en 2010-2040, +9% a -29% en 2040-2070, y +4% a -43% en 2071-2100. La media de esos cambios para los RCP 4.5 y 8.5 son respectivamente -3% y -7% en 2010-2040, -11% y -14% en 2040-2070, y -13% y -24% en 2071-2100. Se prevé que la reducción de escorrentía sea más intensa hacia el sur de España.

Palabras clave: cambio climático, modelo hidrológico, recursos hídricos, España.

Abstract

A new assessment of the potential effect of climate change on runoff in Spain in the 21st century has been conducted. Runoff depths were calculated with a precipitation runoff model that used as input twelve different climate simulations (i.e., combinations of a Global Climate Model, a greenhouse gas emissions scenario and a downscaling algorithm), whose variability reflects the uncertainty over the future climate. The spatial and temporal resolution of the calculations was one square kilometer and one month, respectively. The assessment consisted of comparing runoff values of the baseline period, 1961-2000, with those of three 21st century periods, 2010-2040, 2040-2070 and 2070-2100, all estimated with simulated temperature and precipitation time series. In spite of the uncertainty showed by the bias of the input values and the discrepancies among the 12 climate simulations, a decline in runoff is to be expected throughout the country. Runoff depths are expected to change in the range of +20% to -14% in 2010-2040, +9% to -29% in 2040-2070, and +4% to -43% in 2071-2100. The average of those changes for Spain and the RCP 4.5 and 8.5 are respectively -3% and -7% in 2010-2040, -11% and -14% in 2040-2070, and -13% and -24% in 2071-2100. Runoff reduction is expected to be more intense towards the south.

Keywords: climate change, hydrological model, water resources, Spain.

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este artículo es presentar los principales resultados del último trabajo realizado en el CEDEX para evaluar el impacto futuro del cambio climático en los recursos hídricos en España (CEDEX 2017). Dicho trabajo fue encargado por la Oficina Española de Cambio Climático

(OECC) y supone una actualización de otro anterior de la misma temática y ámbito (CEDEX 2010), utilizando para ello los valores climáticos de los recientes modelos y escenarios de emisiones referidos en el 5º y último informe de evaluación (AR5) del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC 2013).

Para evaluar el impacto futuro del cambio climático se precisa disponer de hipotéticos escenarios climáticos futuros. Un escenario climático se obtiene simulando el clima global con un modelo de circulación general al cual se le ha dado una hipótesis determinada de escenario de emisiones de gases de efecto invernadero. Un conjunto de escenarios climáticos elaborados a escala global por diferentes organismos están a disposición pública. No obstante, la resolución de esos escenarios climáticos globales es muy baja para ser utilizada en los estudios de impacto, por lo que es necesario proceder a su regionalización. De ese modo se obtienen los denominados escenarios

* Autor de contacto: luis.m.barranco@cedex.es

¹ Doctor en Ciencias Geológicas. Centro de Estudios Hidrográficos (CEH), del CEDEX.

² Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Centro de Estudios Hidrográficos (CEH), del CEDEX.

³ Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Centro de Estudios Hidrográficos (CEH), del CEDEX.

⁴ Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Director del Centro de Estudios Hidrográficos (CEH), del CEDEX.

climáticos regionalizados (denominados proyecciones climáticas en este trabajo). Con las técnicas de regionalización se pasa de tener un valor simulado en grandes celdas tridimensionales del todo el planeta a tener un valor en pequeñas celdas (métodos de regionalización dinámicos) o en la ubicación de estaciones meteorológicas (métodos de regionalización estadísticos), en ambos casos para un territorio más restringido, como España por ejemplo. La Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) o las Universidades son las que han venido haciendo esos procesos de regionalización para España.

Para el AR5 se trabajó con un conjunto de nuevos modelos de circulación general, denominados ESM (del inglés, Earth System Models), más completos que incluyen la representación de varios ciclos bioquímicos como aquéllos implicados en el ciclo del carbono, del azufre o del ozono.

También para el AR5 se han definido cuatro nuevos escenarios de emisiones, las denominadas Sendas Representativas de Concentración (RCP, por sus siglas en inglés). Éstas se identifican por su forzamiento radiativo máximo para el año 2100 que varía desde 2.6 a 8.5 W/m². Los cuatro RCP son: RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5. Los RCP suponen un avance con respecto a los escenarios de emisiones utilizados en anteriores informes del IPCC (denominados SRES) ya que los nuevos RCP pueden contemplar los efectos de las políticas orientadas a limitar el cambio climático del siglo XXI.

Según el AR5, se pronostica un aumento de los recursos hídricos en las zonas de La Tierra de latitudes altas y tropicales y un descenso en latitudes intermedias, como en el área mediterránea. Hay una gran dispersión de resultados según los estudios y una gran variabilidad regional y estacional; sin embargo, hay consenso en pronosticar un gradiente norte-sur para Europa, con aumento de escorrentía (ESC) en el norte y descenso en el sur. La mayoría de las proyecciones para España indican una disminución de la precipitación (PRE) y un aumento de la temperatura (TEM), lo que implicaría una disminución de los recursos hídricos. Los patrones de cambio para España son muy diversos, siendo las más comunes las polaridades norte-sur, con mayores reducciones hacia el sur (Arnell 2003, Jiménez Cisneros et al. 2014).

Los antecedentes de estudios del impacto sobre recursos hídricos centrados en España son muy variados, tanto en la metodología, como en los supuestos climáticos de partida, en los periodos analizados y en el ámbito territorial estudiado (escala de trabajo), por lo que los resultados son muy dispares y de difícil comparación.

Los estudios sobre el impacto de recursos hídricos en España de ámbito nacional, comienzan a partir del momento en que el Instituto Nacional de Meteorología (ahora AEMET) publica los resultados del modelo de circulación general HadCM2 (INM 1995), forzado con el escenario de emisiones IS92a. Con los resultados climáticos de esa única proyección, Ayala (1996) estima el impacto para el horizonte de año 2060 con relación al periodo 1940-85 mediante un modelo hidrológico agregado de paso anual. El impacto para el año 2060 se cifraba en una reducción de recursos hídricos en España de un 17%, como consecuencia de un incremento de TEM anual de 2,5°C y un descenso de PRE anual de 8% para ese horizonte temporal. El descenso de ESC pronosticado era más acusado hacia el sur de España, llegando al 34% en el Guadalquivir.

Como parte de los trabajos del Libro Blanco del Agua en España (MIMAM 2000), el CEDEX realiza una primera

evaluación del impacto que causaría el cambio climático en los recursos hídricos. Se consideraban dos escenarios climáticos para el horizonte 2030. El escenario 1 implicaba un aumento de 1°C en la TEM anual, mientras que en el escenario 2 había además una disminución de un 5% en la PRE anual. Se utilizó el modelo hidrológico SIMPA (Sistema Integrado para la Modelización Precipitación Aportación) para el cálculo de los recursos hídricos en el periodo de control (1940-95) y el modelo hidrológico simplificado de Schreiber-Budyko (Budyko 1974) para la simulación en los dos escenarios de impacto. Se concluía que se estimaban descensos de aportación hídrica para España que oscilaban entre un 5% para el escenario 1, hasta el 14% para el escenario 2. La disminución sería más acusada en el SE peninsular, la cuenca del Guadiana, el valle del Ebro y la España insular. Esta disminución vendría acompañada con una mayor variabilidad anual y estacional. Los resultados para el escenario 1 son los que posteriormente se incluyen en la instrucción de planificación hidrológica (MARM 2008), con el objeto de que se aplicaran de forma provisional en los planes hidrológicos para el horizonte del año 2027, hasta el momento en que se actualizaran esas cifras de impacto.

Cabezas (2004) utilizó un conjunto de proyecciones y modelos para concluir que la ESC para el conjunto de España en la década 2050-60 disminuiría de media un 9% para el escenario de emisiones SRES A2 y un 6% para el SRES A1.

En un posterior estudio, Garrote et al. (2007) pronosticaron que la ESC para el periodo 2071-2100 experimentaría una reducción media del 35% según la media de 12 proyecciones del SRES A2, siendo el impacto mayor en la mitad meridional peninsular, y un aumento del 15% según la media de las 4 proyecciones del SRES B2.

En el año 2008, se ponen a disposición pública un conjunto de escenarios climáticos regionalizados, o proyecciones, para España a partir de los resultados de modelos de circulación general del 3^{er} informe de evaluación del IPCC (AEMET, 2008). Doce de esas proyecciones fueron los valores de partida del estudio antecesor de este artículo (CEDEX 2010, Barranco et al. 2014). Se simuló con el modelo hidrológico de SIMPA en cada una de las celdas de 1000 x 1000 m en las que se reticuló España, mientras que la aportación hídrica se acumuló en celdas de 500 x 500 m. Los resultados indicaban un sesgo notable en la PRE de las proyecciones de partida y una gran disparidad de resultados entre las proyecciones. Promediando los resultados de las proyecciones, se estimaba una disminución media de la ESC para el conjunto de España, con cambios del -8% para el periodo 2011-2040, -11% (SRES B2) y -16% (SRES A2) para el 2041-2070 y -14% (SRES B2) y -28% (SRES A2) para el 2071-2100, siendo las disminuciones más acusadas hacia el SO de España y Canarias. Los descensos serían porcentualmente mayores en invierno que en verano.

Se han elaborado además diferentes estudios para evaluar el impacto hidrológico futuro del cambio climático en pequeñas cuencas dispersas por España (Fernández 2002), en la Demarcación Hidrográfica (DH) del Júcar (Hernández 2007, Chirivella 2010, Marcos-García y Pulido-Velázquez 2017), en Cataluña (Ortuño et al. 2009, Delgado et al. 2010, Manzano 2010, Martínez 2010, Candela et al. 2012, Pascual et al. 2014, Calbó et al. 2016, Mas-Pla et al. 2016), en Extremadura (Corzo et al. 2013), en Andalucía (Junta de Andalucía 2012), en cuencas pequeñas del Ebro y Navarra (Samper y Álvarez 2005, López Moreno et al. 2009, Martínez 2010, Zambrano et

al. 2011, Bovolo et al. 2011, Quiroga et al. 2011). En general, se estiman reducciones de recursos hídricos, si bien hay discrepancias entre los resultados de las proyecciones analizadas, siendo ambos efectos más acusados cuanto más lejano es el horizonte temporal para el que se estima el impacto.

2. PROYECCIONES CLIMÁTICAS DE PARTIDA

Debido al gran número de proyecciones climáticas disponibles hoy día, es necesario efectuar una selección representativa de las mismas para poder realizar estudios de impacto. La elección de las proyecciones climáticas que van a ser utilizadas es vital, pues condicionan los resultados del análisis del impacto hidrológico del cambio climático.

La selección de las proyecciones climáticas que se utilizan en este estudio se ha basado en la información disponible y las recomendaciones y criterios que han sido transmitidos por la OECC y AEMET. La OECC recomendó que se eligieran proyecciones para el RCP 4.5 y el RCP 8.5. AEMET recomendó que se utilizaran aquellas proyecciones regionalizadas para España según el método de *Análogos_AEMET*, sugirió descartar alguna y, en el caso de varias proyecciones elaboradas por el mismo centro climático, propuso utilizar aquélla del MCG de mayor complejidad con valores de todas las variables requeridas.

De ese modo, se utilizaron las 12 proyecciones climáticas que se indican en la tabla 1.

Tabla 1. Proyecciones climáticas utilizadas

Sigla	Sigla	Escenario RCP	Modelo
FA	F4A	4.5	CNRM-CM5 (Francia)
	F8A	8.5	
MA	M4A	4.5	MPI.ESM.MR (Alemania)
	M8A	8.5	
NA	N4A	4.5	inmcm4 (Rusia)
	N8A	8.5	
QA	Q4A	4.5	bcc-csm1-1 (China)
	Q8A	8.5	
RA	R4A	4.5	MIROC.ESM (Japón)
	R8A	8.5	
UA	U4A	4.5	MRI.CGCM3 (Japón)
	U8A	8.5	

Estas proyecciones son fruto de regionalizar mediante la técnica de *análogos* el resultado de forzar los modelos de circulación general bcc-csm1-1, CNRM-CM5, inmcm4, MIROC.ESM, MPI.ESM.MR y MRI.CGCM3 con cada uno de los dos escenarios de emisiones RCP 4.5 y RCP 8.5. El escenario de emisiones RCP 8.5 es el más negativo ya que supone los niveles más altos de CO₂ equivalente en la atmósfera para el siglo XXI, no sólo con relación a los demás escenarios RCP sino también con relación a los escenarios de emisiones SRES B2 y A2, utilizados en el informe CEDEX (2010). El RCP 8.5 podría equiparse al SRES A2, si bien aquél supone niveles de CO₂ superiores. El escenario de emisiones RCP 4.5 es más moderado y, a priori, presentará un menor impacto sobre el ciclo hidrológico que el RCP 8.5. El RCP 4.5 supone niveles de CO₂ similares a los del escenario SRES B2, salvo para finales del siglo XXI que son inferiores.

Los valores de partida que caracterizan cada proyección climática consisten en 6138 ficheros en formato ASCII que se han descargado de la página web de AEMET. Cada fichero contiene valores diarios de PRE, temperatura máxima (TMX) o mínima (TMN) simulados para todos los días del periodo 1960-2000, denominado periodo de control (PC), o del periodo 2010-2100 en la ubicación de una serie de estaciones meteorológicas. La distribución espacial de las estaciones donde se ha simulado se muestra en la figura 1. Destaca la menor densidad de estaciones con valores de PRE en las Demarcaciones Hidrográficas (DDHH) Galicia Costa y Guadalete y Barbate.

No se detectan valores simulados anómalos de PRE, siendo los más altos de unos 200 mm/d. Con relación a las temperaturas, se detectan anomalías en todas las proyecciones ya que tienen valores simulados de TMX que llegan a sobrepasar los 60 °C e incluso los 70 °C, valores excesivamente altos, en el caso de N8A y R8A.

Se ha realizado el contraste de las series simuladas comparándolas con las series observadas en las mismas estaciones durante el PC. Para ello, se seleccionaron aquellas estaciones que tienen al menos 35 años completos de datos observados de PRE, TMN y TMX durante el PC en la base de datos HIDRO del CEDEX (Quintas 1996), donde se almacena la información climática observada en las estaciones de AEMET.

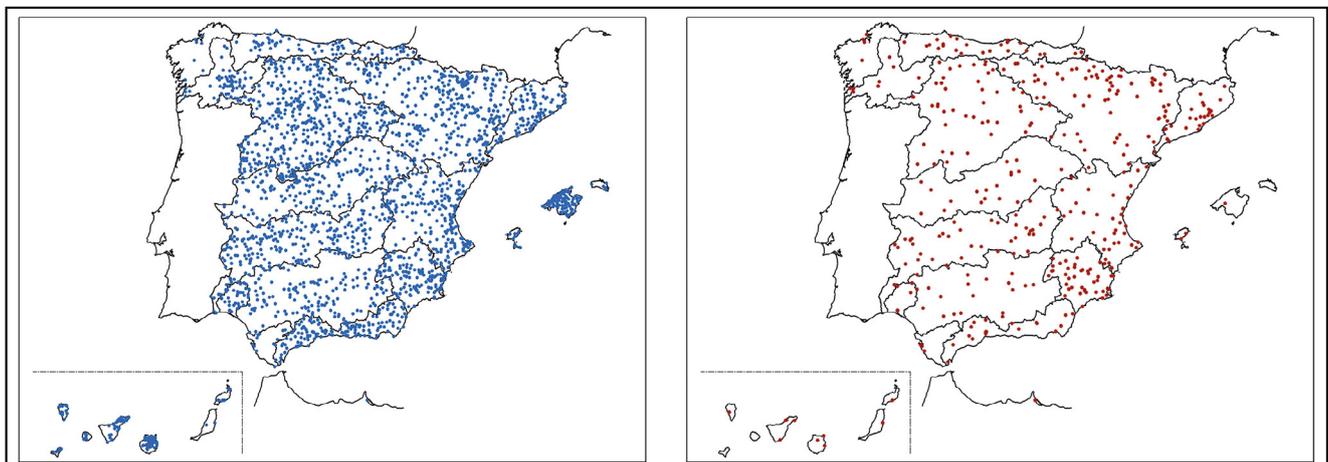


Figura 1. Localización de las 2321 y 374 estaciones donde se han simulado respectivamente la PRE (izda) y las TMN y TMX (dcha) según cada proyección climática.

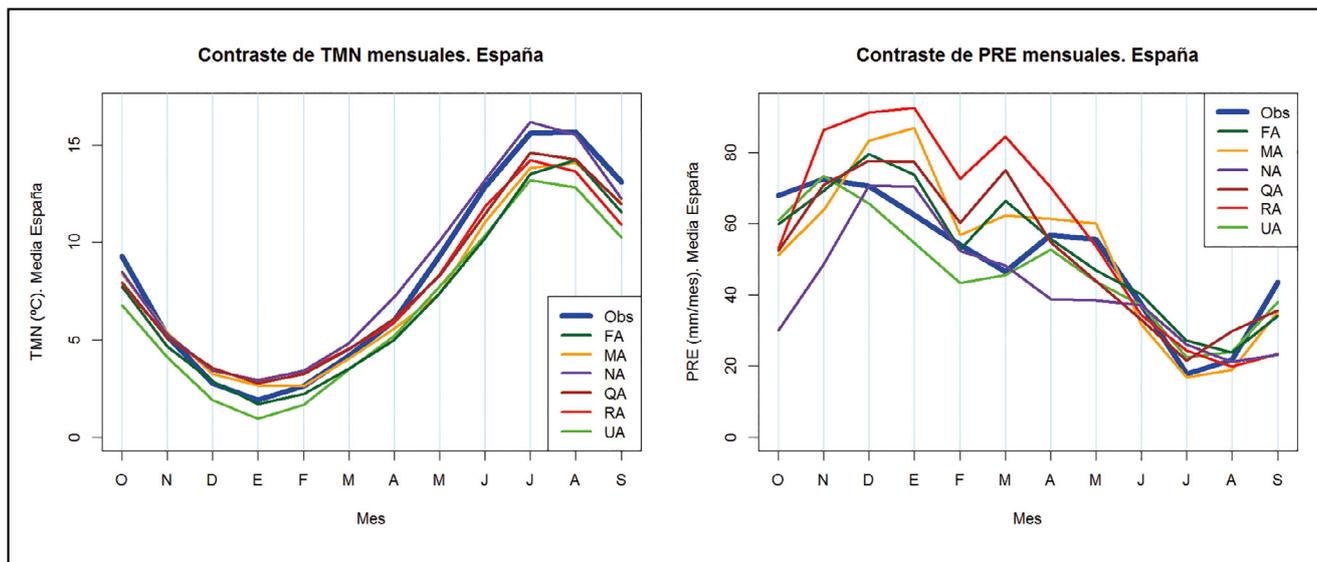


Figura 2. Distribución mensual de la TMN y PRE observada y simulada para el conjunto de España según valores en estaciones.

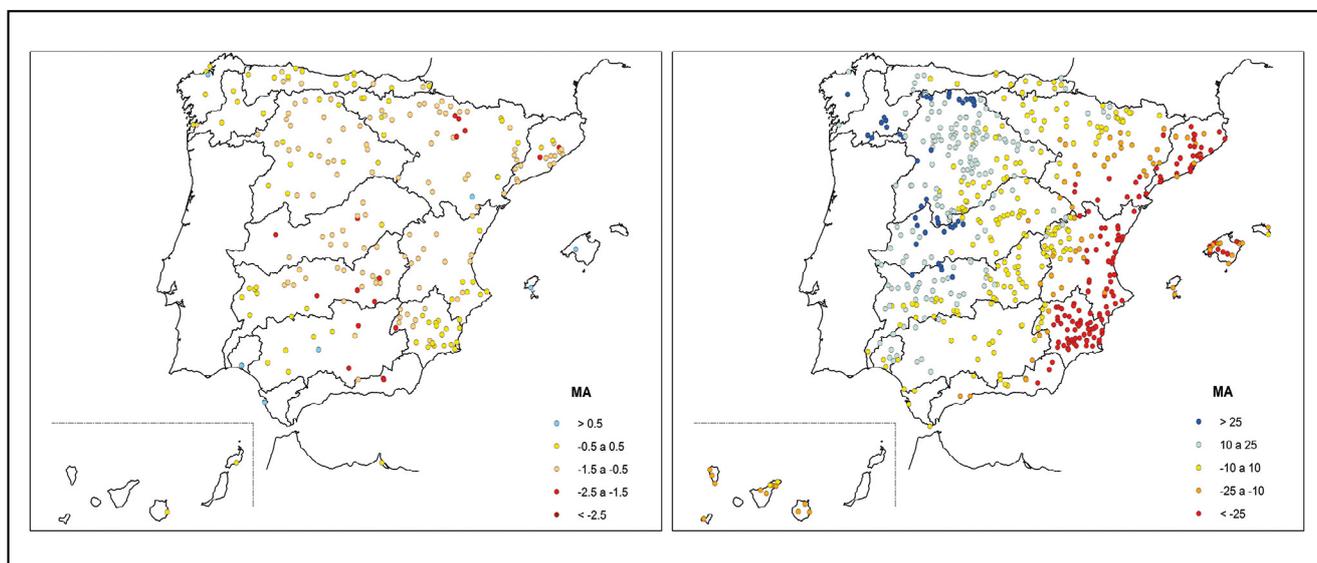


Figura 3. Mapa con el exceso de TMN media anual (°C) (izquierda) y PRE anual (%) (derecha) simuladas por MA en las estaciones meteorológicas donde se ha realizado el contraste.

En general, los modelos ajustan relativamente bien las temperaturas. Se reproducen razonablemente bien los valores medios anuales de las TMN y TMX observadas, así como su distribución espacial y estacional, tal como ocurre con el ciclo anual de las TMN mensuales para España (figuras 2 y 3).

Sin embargo, hay mayores desajustes con la PRE, tal como se observa en el ciclo anual (figura 2). El patrón del ciclo anual de la PRE se recoge a grandes rasgos, marcando bien el mínimo estival pero dando en general más PRE en el resto del año. El sesgo de las simulaciones en la estimación de la PRE anual para España oscila entre -16% y +17% y sólo FA, MA y QA tienen igualdad estadística de medias y varianzas según el test t de student y de Fischer-Snedecor respectivamente (tabla 2). Es importante observar que ningún modelo reproduce la tendencia negativa de la PRE observada, tal como indica el p-valor del test de Mann Kendall. El sesgo está polarizado espacialmente, de este a oeste, con notables diferencias entre zonas así como entre modelos, tal como se aprecia en la figura 3 para MA. La mayoría de los modelos sobreestiman la PRE en las grandes cuencas atlánticas. Por otro lado, infravaloran la PRE en las cuencas

de la vertiente mediterránea y en los archipiélagos. El ciclo anual se reproduce peor en las cuencas mediterráneas lo que, añadido a la infravaloración de la PRE, incide en la incertidumbre de los resultados en esas cuencas.

Tabla 2. Estadísticos de la PRE anual observada (Obs) y simulada el PC. Δ (%) se refiere a la diferencia porcentual con respecto a la media de los valores observados. DT es la desviación típica. t se refiere al test de student. F al test de Fisher-Snedecor. MK al test de Mann Kendall. En negrita: pvalor inferior al 10%

	PRE 1961-00	Obs	FA	MA	NA	QA	RA	UA
Media (mm)		608	630	629	506	629	707	560
Δ (%)			3	3	-17	3	16	-8
pvalor t			0.26	0.28	0	0.27	0	0.01
DT (mm)		93	79	83	58	73	115	69
pvalor F			0.33	0.48	0	0.14	0.18	0.06
pendiente (mm/a)		-2.14	-1.2	-0.45	0.33	-0.41	-0.67	0.13
Pvalor MK		0.04	0.31	0.85	0.68	0.7	0.72	0.65

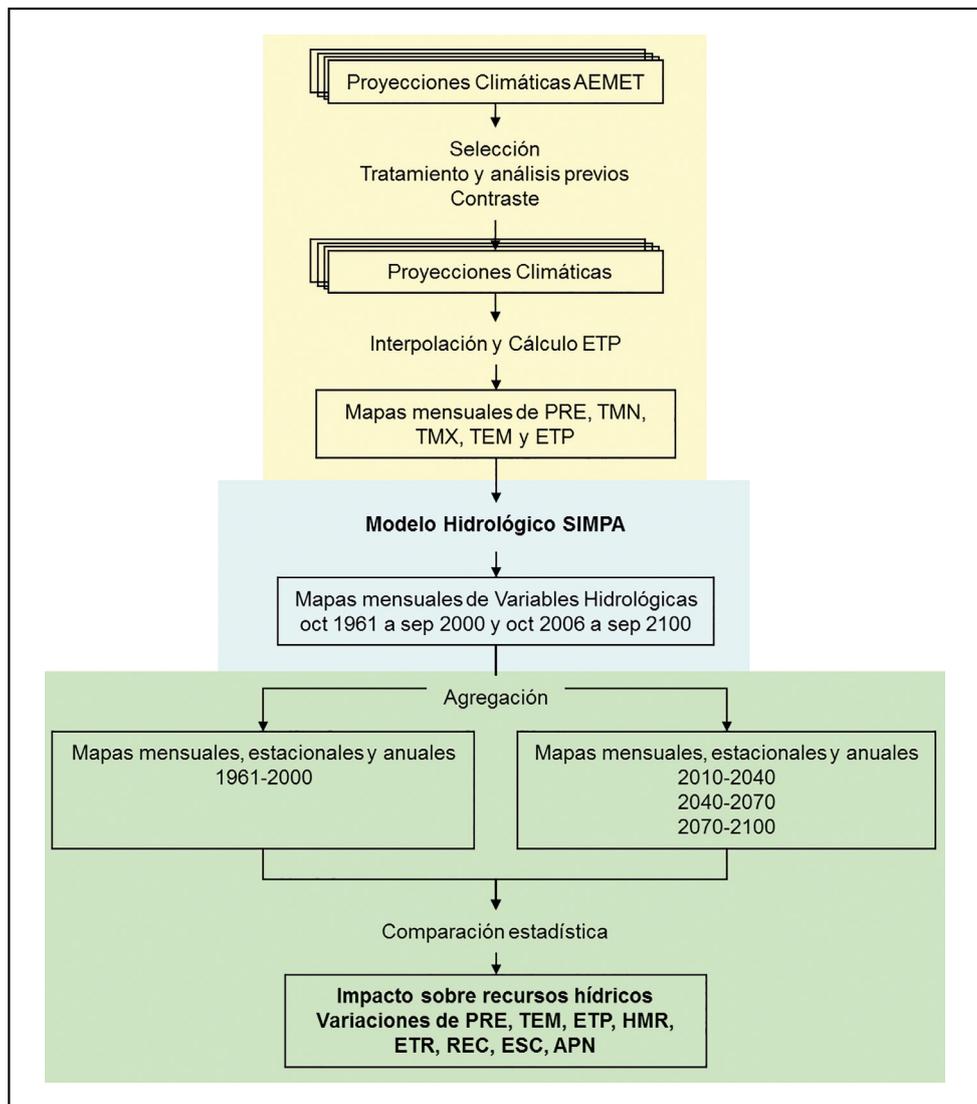


Figura 4. Metodología del trabajo.

3. METODOLOGÍA

La metodología del trabajo viene esquematizada en la figura 4. Hay 3 etapas en la metodología, identificadas con fondos de colores en dicha figura:

- Preparación de los mapas mensuales de PRE y evapotranspiración potencial (ETP) que alimentan el modelo hidrológico.
- Modelización hidrológica para generar mapas mensuales de recursos hídricos.
- Evaluación del impacto sobre los recursos hídricos.

Preparación de los mapas mensuales que alimentan el modelo hidrológico

El desajuste, o sesgo, observado en la PRE de las simulaciones climáticas de partida condiciona en gran medida la simulación hidrológica y, por lo tanto, la evaluación del impacto. Este sesgo de la PRE simulada tiene unas importantes connotaciones en la evaluación de los recursos hídricos por la relación no lineal que existe entre la PRE y la ESC, sobre todo en zonas con baja PRE y donde ésta se infravalora, como es el caso del Levante peninsular y archipiélagos, por lo que sus resultados allí obtenidos son más inciertos.

Es habitual encontrar sesgos en las proyecciones climáticas, especialmente en el caso de la PRE. Este hecho se debe a que, tal como indica el IPCC, los modelos de circulación general simulan bien la TEM global, pero tienen más dificultades en simular bien la PRE. Además, los modelos no suelen contemplar las incertidumbres naturales, lo que puede afectar a su credibilidad (Koutsoyiannis 2013). De hecho, el que un modelo climático simule mal los datos observados en el PC puede ser un argumento para invalidar la proyección, aunque lo contrario tampoco asegura su fiabilidad. Estos sesgos pueden invalidar el uso del método directo, que consiste en comparar los resultados de alimentar el modelo hidrológico con valores climáticos futuros simulados y con datos climáticos observados. Con objeto de evitar los problemas hidrológicos derivados de utilizar los valores de la simulación, se han propuesto diferentes métodos de corregir ese sesgo, desde simples correcciones lineales a otras más sofisticadas que están basadas en las distribuciones de frecuencias (Berg et al. 2012, Teutschbein y Seibert 2012, Maraun et al. 2017). No obstante, la corrección del sesgo puede tener una fuerte influencia en la estimación de los cambios hidrológicos, ya que modifica la señal de cambio al alterar la consistencia espacio-temporal del modelo climático. Las correcciones según el factor delta o escalado directo son habituales en evaluaciones del

impacto del cambio climático en los recursos hídricos. Éstas realizan correcciones mensuales de los valores climáticos que pueden alterar los resultados de manera artificiosa y no representar la influencia de la señal climática (Barranco 2011). Además, no está claro que los métodos de corrección del sesgo sean estacionarios en el tiempo en un marco de cambio de las condiciones climáticas (Ehret et al. 2012).

Por lo tanto, no se ha llevado a cabo ninguna modificación de los valores de la proyección climática para este estudio. Así, el impacto del cambio climático en los recursos hídricos en España se ha evaluado comparando los resultados de alimentar el modelo hidrológico con valores climáticos simulados en el futuro con los resultados de alimentarlo con valores climáticos simulados en el PC. Con este método, se asume que el sesgo de la proyección climática es similar en el futuro y en el PC y por tanto que se compensa al comparar ambos periodos. De ese modo, las diferencias entre el futuro y el PC podrán ser asociadas sólo a la señal de cambio inherente a la proyección y no a las técnicas de corrección del sesgo.

Una vez establecidos los valores climáticos mensuales simulados en las estaciones, se procede a su interpolación para obtener mapas de España con resolución de celdas de 1 km de lado. Los valores simulados en estaciones se han interpolado por el método de residuos basados en patrones mensuales de PRE y TMX y TMN (Álvarez-Rodríguez 2011). La interpolación por residuos pretende solucionar el problema de la mala representatividad de los valores climáticos en algunas áreas sin medidas registradas, especialmente en altas cotas.

A partir de los mapas mensuales de TMN y TMX se han obtenido, como semisuma de los anteriores, los correspondientes mapas de temperaturas medias para cada mes y cada proyección climática.

La ETP se ha calculado utilizando de manera combinada los métodos de Hargreaves y de Penman Monteith (Hargreaves y Allen 2003, Allen et al. 2006). Se ha calculado la ETP por el método de Hargreaves en cada celda de España a partir de los mapas de temperaturas interpolados en el paso anterior. Cada mapa de ETP según Hargreaves se multiplica por los mapas de coeficientes de corrección Penman-Monteith/Hargreaves, obtenidos a partir de las ETP calculadas por ambos métodos en las estaciones completas. Finalmente, la ETP obtenida es corregida en función de los coeficientes de cultivo obtenidos a partir del CORINE LAND COVER (IGN 2000).

Modelización hidrológica para generar mapas mensuales de recursos hídricos

Los recursos hídricos se han calculado mediante el modelo hidrológico integrado en SIMPA, desarrollado en el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (Estrela y Quintas 1996, Álvarez-Rodríguez et al. 2005). La simulación hidrológica con SIMPA se ha llevado a cabo en régimen natural, sin considerar las alteraciones antrópicas tales como tomas de agua de un río, extracciones de acuíferos, regulación en embalses, trasvases, etc.

Es un modelo hidrológico conceptual, de simulación continua de cuenca, cuasi distribuido, diseñado para evaluar los recursos hídricos, que utiliza el SIG GRASS 6.4 y basado conceptualmente en el modelo agregado de Témez

(Témez 1977). El modelo funciona realizando balances hídricos con paso mensual en cada celda en la que se divide el territorio. Para utilizar el modelo hidrológico en este trabajo, el territorio de España se ha reticulado en celdas de 1 km x 1 km, con lo que se han realizado balances hídricos en cada una de las aproximadamente 500000 celdas resultantes. El balance hídrico se lleva a cabo mediante unas ecuaciones que de modo progresivo modelizan los procesos que tienen lugar en una cuenca desde que se produce la PRE hasta que se obtiene la aportación en el punto de desagüe de la cuenca. Las entradas al modelo son los mapas de PRE y ETP de los meses para los que se va a realizar la simulación. El modelo es sencillo ya que cuenta sólo con 2 almacenamientos (suelo y acuífero) y 4 parámetros relacionados con dichos almacenamientos y que se derivan de las características fisiográficas y geológicas del terreno. Primeramente, el modelo calcula el agua que va al suelo y cuyo destino será la evaporación en el mes de cálculo o los siguientes. Para ello se precisa cuantificar los parámetros *humedad máxima del suelo* y el *coeficiente de excedente*. Posteriormente, el modelo calcula el agua que se infiltra al acuífero, condicionado por el parámetro *infiltración máxima*, y la escorrentía directa. Finalmente, el modelo cuantifica el agua descargada por el acuífero, escorrentía subterránea, en función del parámetro *coeficiente de agotamiento*, único proceso del modelo que se realiza de manera agregada para el conjunto del acuífero. Para este trabajo se utilizaron los valores de los parámetros calibrados para la última evaluación de recursos hídricos para el conjunto de España realizada por el CEDEX.

Por último, el modelo hidrológico estima los caudales circulantes por cada celda del territorio integrando los datos de aquellas celdas que le vierten agua, obteniéndose los caudales (m^3/s) o las aportaciones hídricas (hm^3/mes) que pasan por cada celda. Para ello, se utiliza un mapa de direcciones de flujo generado a partir del modelo digital del terreno. Para este último paso, se ha aumentado el detalle hasta una resolución mayor de celda, de 500 x 500 m. De ese modo, se ha calculado la aportación en unas 2000000 celdas en las que se ha reticulado el territorio español. Al ser la resolución temporal de un mes, se puede obviar la simulación de un gran número de almacenamientos intermedios y la propagación del flujo en la cuenca.

Evaluación del impacto sobre los recursos hídricos

El impacto se ha evaluado en 3 periodos futuros de 30 años hidrológicos, denominados periodos de impacto (PI), con respecto al PC 1961-2000. Los 3 PI son los siguientes: 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100. En lo sucesivo en este artículo, los periodos corresponden a años hidrológicos y se indican con el primer y último año natural, por lo que 1961-2000 abarcaría desde el 1 de octubre de 1961 al 30 de septiembre de 2000, lo que equivaldría a la notación habitual 1961/62-1999/00.

La consideración de periodos de 30 años como mínimo viene motivada por el hecho de que el tiempo meteorológico es cambiante. El clima es el conjunto de características meteorológicas de una zona y tiene una alta variabilidad natural. Un año concreto puede ser inusualmente cálido o frío, o seco o húmedo, y por lo tanto no sería un punto de referencia para medir el clima. Por ello, la determinación

del clima precisa conocer la variación meteorológica durante un periodo suficientemente dilatado, no inferior a 30 años, tal como indica la Organización Meteorológica Mundial (Trewin 2007).

La extracción de esos 3 PI se ha realizado teniendo en cuenta la información de los datos de partida. Se ha adoptado un PC lo más amplio posible, abarcando al máximo los valores disponibles, para reflejar mejor las características climáticas de referencia.

Los mapas mensuales de cada variable hidrológica se agregaron en cada uno de estos periodos. Se obtuvieron mapas anuales (suma de 12 mensuales), mapas trimestrales para cada año (suma de 3 mensuales), mapas anuales para todo un periodo (media de los 39 o 30 mapas anuales), mapas mensuales para todo un periodo (media de los 39 o 30 mapas mensuales de cada año) y mapas trimestrales para todo un periodo (media de los 39 o 30 mapas trimestrales de cada año).

El impacto se expresa como cambio en los valores medios estadísticos de cada variable hidrológica de interés en los PI según cada una de las 12 proyecciones climáticas. La propiedad estadística cuyos cambios se han analizado exhaustivamente es la media anual, si bien también se han analizado los cambios en su variabilidad. Además, el impacto también se muestra como tendencias de evolución anual en el periodo 2010-2100 y como cambios en el ciclo anual de las variables hidrológicas para cada uno de los PI con relación al PC según cada proyección. El impacto se ha calculado tanto para España como para las Demarcaciones Hidrográficas.

Para llevar a cabo este trabajo se han utilizado principalmente dos paquetes informáticos de libre difusión: el programa estadístico R (R Development Core Team 2015) y el sistema de información geográfica GRASS (GRASS Development Team 2015) que ha permitido la elaboración y gestión de unos 300000 mapas resultantes.

Las tendencias de las series temporales, tanto para el contraste como para la caracterización del impacto se

han analizado mediante el test de Mann-Kendall (Kendall 1975). El test se ha efectuado en R con el comando `MannKendall` del paquete estadístico denominado `KENDALL`, que permite obtener el p-valor de la muestra. Este comando sólo permite la aplicación bilateral; no obstante, se ha aplicado unilateralmente aceptando tendencias crecientes cuando $p\text{-valor} > 0.10$ y $z > 0$, lo que correspondería a un p-valor de 0.05 si se aplicara unilateralmente. Al ser un test paramétrico, los resultados de su aplicación no difieren si se aplican a series de valores absolutos de un PI o a series de cambios para el PI respecto a un valor medio del PC puesto que el test opera con la posición en las series ordenadas y no con valores absolutos. Además, también se ha contemplado la pendiente de la serie original, obtenida mediante regresión lineal por mínimos cuadrados.

4. RESULTADOS

La mayoría de las proyecciones apuntan a un descenso de la PRE y un aumento de las TEM, lo que implica un aumento de la ETP y una disminución de recursos hídricos.

Los cambios hidrológicos pronosticados para el conjunto de España en los tres PI se muestran en la figura 5.

Se estiman mayoritariamente descensos de PRE, siendo mayores estos descensos en el cuadrante SO de la Península y en los archipiélagos. Destaca el amplio rango de los cambios en la PRE para 2010-2040 y el RCP 4.5 motivado por el aumento de PRE estimada por U4A. Para el conjunto de España, la media de los cambios para los RCP 4.5 y 8.5 son respectivamente del -2% y -4% para 2010-2040, -6% y -8% para 2040-2070 y -7% y -14% para 2070-2100.

Los cambios en la ETP responden a los cambios de TEM. Se estiman aumentos de ETP en todos los ámbitos y estaciones climáticas según todas las proyecciones, con muy contadas excepciones. Los rangos de variación de los resultados de cambio de PRE son mayores que los de la ETP, lo que indica la mayor incertidumbre en la estimación futura de la PRE que en la de TEM, que es de donde se

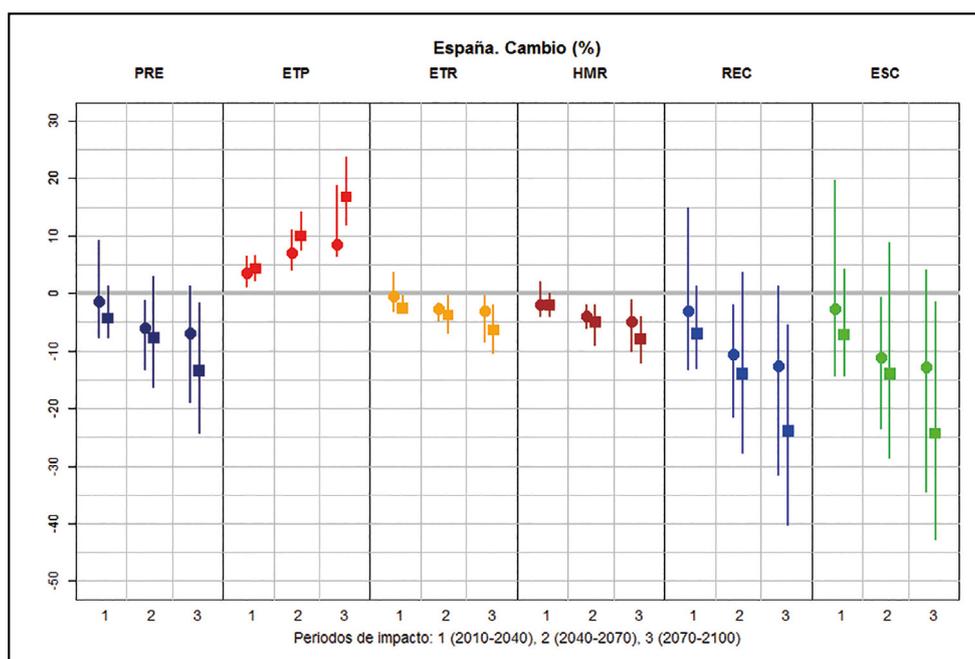


Figura 5. Cambio en las principales variables hidrológicas en los tres PI respecto al PC para el conjunto de España. Rango y media para RCP 4.5 (círculo) y RCP 8.5 (cuadrado).

obtiene la ETP. Los aumentos serían menores en las zonas de costa que en las de interior. Para el conjunto de España, la media de los cambios para los RCP 4.5 y 8.5 son respectivamente del 3% y 4% para 2010-2040, 7% y 10% para 2040-2070 y 9% y 17% para 2070-2100.

Los cambios en la evapotranspiración real (ETR) responden a los cambios de ETP, pero sobre todo a los de PRE, que determina el agua disponible para ser evaporada. Por ello, los rangos de variación de la ETR son pequeños, con aumentos en el norte húmedo y zonas montañosas de las divisorias de aguas y descensos generalizados en el resto de España. Para el conjunto de España, la media de los cambios para los RCP 4.5 y 8.5 son respectivamente del -1% y -3% para 2010-2040, -3% y -4% para 2040-2070 y -3% y -6% para 2070-2100.

Los cambios en la humedad del suelo (HMR) responden en gran medida a los cambios de PRE y a la disponibilidad de agua. Los mayores descensos se pronostican para el invierno y zonas húmedas Atlánticas del norte y de divisorias de aguas. Por el contrario, se estiman pocos descensos en verano y en la España seca (Canarias, Levante). Para el conjunto de España, la media de los cambios con relación al contenido máximo de agua en el suelo para los RCP 4.5 y 8.5 son respectivamente del -2% y -2% para 2010-2040, -4% y -5% para 2040-2070 y -5% y -8% para 2070-2100.

Los cambios en la recarga de los acuíferos (REC) responden en gran medida a los cambios de PRE, pero agudizándolos. De ese modo, se estiman descensos generalizados en la REC para el siglo XXI, si bien hay grandes discrepancias entre las estimaciones según la proyección climática. Las disminuciones son más acusadas hacia el sur y sobre todo en los archipiélagos. Son menos acusadas, incluso con aumentos, en el norte y NE de la Península. Para el conjunto de España, la media de los cambios para los RCP 4.5 y 8.5 son respectivamente del -3% y -7% para 2010-2040, -11% y -14% para 2040-2070 y -13% y -24% para 2070-2100.

La ESC es la variable que mejor caracteriza los recursos hídricos de una zona y cuyos resultados de impacto tienen mayor aplicación práctica.

La variación de ESC sigue las pautas de la variación de PRE, modelada por la ETR y la estacionalidad. Eso sí, las variaciones porcentuales de PRE se acentúan en la ESC, de manera que el rango de cambio de la PRE está entre -24% a +9% durante todo el siglo XXI y se traduce en un rango de ESC entre -43% y +20% (figura 5). Los rangos de variación de ESC aumentan tanto del RCP 4.5 al RCP 8.5 como hacia finales de siglo, indicativo de una mayor incertidumbre en la estimación del impacto del cambio climático cuanto más nos alejamos en el tiempo y más altas son las emisiones de gases de efecto invernadero. La excepción la constituye el amplio rango en 2010-40 y RCP 4.5, motivado por el fuerte incremento de ESC según la proyección U4A (figura 6 izquierda). Como norma general, la proyección R8A es la que da las mayores disminuciones y la U4A suele dar los mayores aumentos o menores descensos. Promediando los resultados de las proyecciones, se estiman siempre descensos de ESC, más acusados en el RCP 8.5 y cuanto más avanza el siglo XXI. La diferencia entre ambos RCP se hace más patente conforme se avanza en el siglo XXI. Los cambios medios para España indican siempre reducción de ESC. Para los RCP 4.5 y 8.5 son respectivamente del -3% y -7% para 2010-2040, -11% y -14% para 2040-2070 y -13% y -24% para 2070-2100.

Los cambios de la variabilidad de ESC anual para España en cada PI se muestran de manera gráfica en la figura 6 derecha. Las proyecciones RA son las que dan los mayores descensos de ESC anual y además las que dan un mayor descenso de su variabilidad. En el lado contrario, QA, FA y UA muestran un aumento de variabilidad de la ESC anual en los tres PI respecto al PC. No hay un patrón común de cambio respecto a su comportamiento conforme avanza el siglo XXI ni tampoco respecto a la relación entre la variabilidad y el RCP.

Los mapas de cambio de ESC anual para los PI revelan las diferencias entre las distintas proyecciones, tal como se muestra en la figura 7 para el periodo 2010-2040. En estos mapas de cambio, hay celdas en las que la ESC es prácticamente cero durante todo un periodo (PC o PI) y a las que se les ha asignado un valor de cero de cambio porcentual,

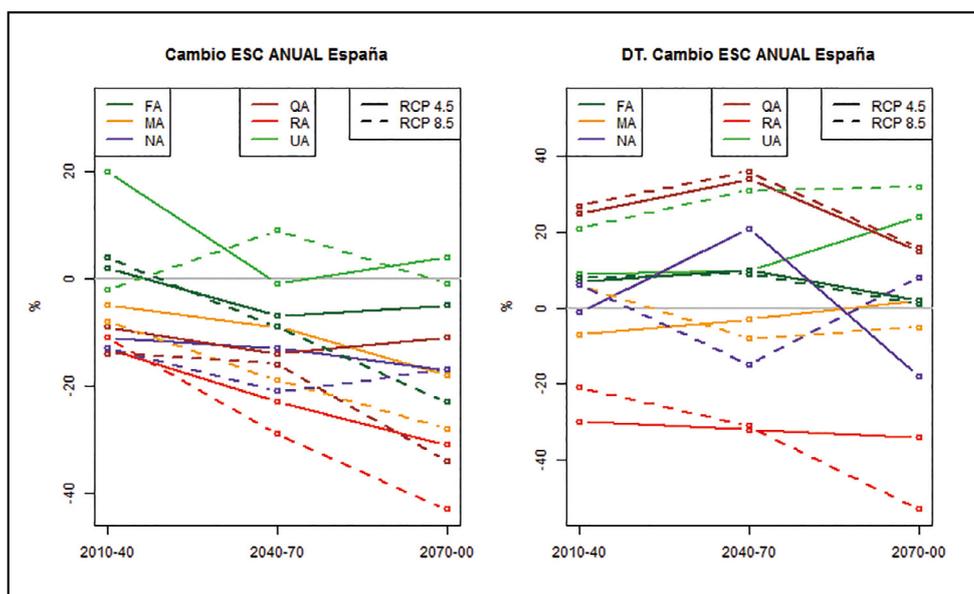


Figura 6. Cambio (%) de ESC en cada PI. Izquierda: valores medios anuales. Derecha: DT de los valores anuales.

tal como sucede en la parte central del valle del Ebro, típicamente Los Monegros. Para el RCP 4.5, U4A da aumentos generalizados, más patentes en los tres cuartos occidentales y en Canarias, con leves descensos en Levante; F4A muestra un patrón similar pero menos acusado. Por otro lado, M4A, N4A y Q4A dan descensos en la parte central y occidental y aumentos en zonas de Levante. R4A muestra descensos generalizados. Los patrones de cambio son similares para el RCP 8.5, siendo la mayor diferencia la mostrada por proyección U8A que reduce considerablemente la

zona de aumento de ESC respecto al RCP 4.5. Los patrones de cambios son similares para el resto de PI, si bien la reducción de ESC se agudiza cuanto más alejado está el PI.

Los mapas con la media de los resultados de las distintas proyecciones para cada PI y RCP se muestran en la figura 8. En las zonas más secas apenas se genera ESC, con lo que ínfimos cambios absolutos suelen provocar fuertes cambios porcentuales y, por tanto, bruscas variaciones espaciales de esos cambios porcentuales. Es por ello que hay que interpretar con cautela los resultados en las zonas áridas, sobre todo

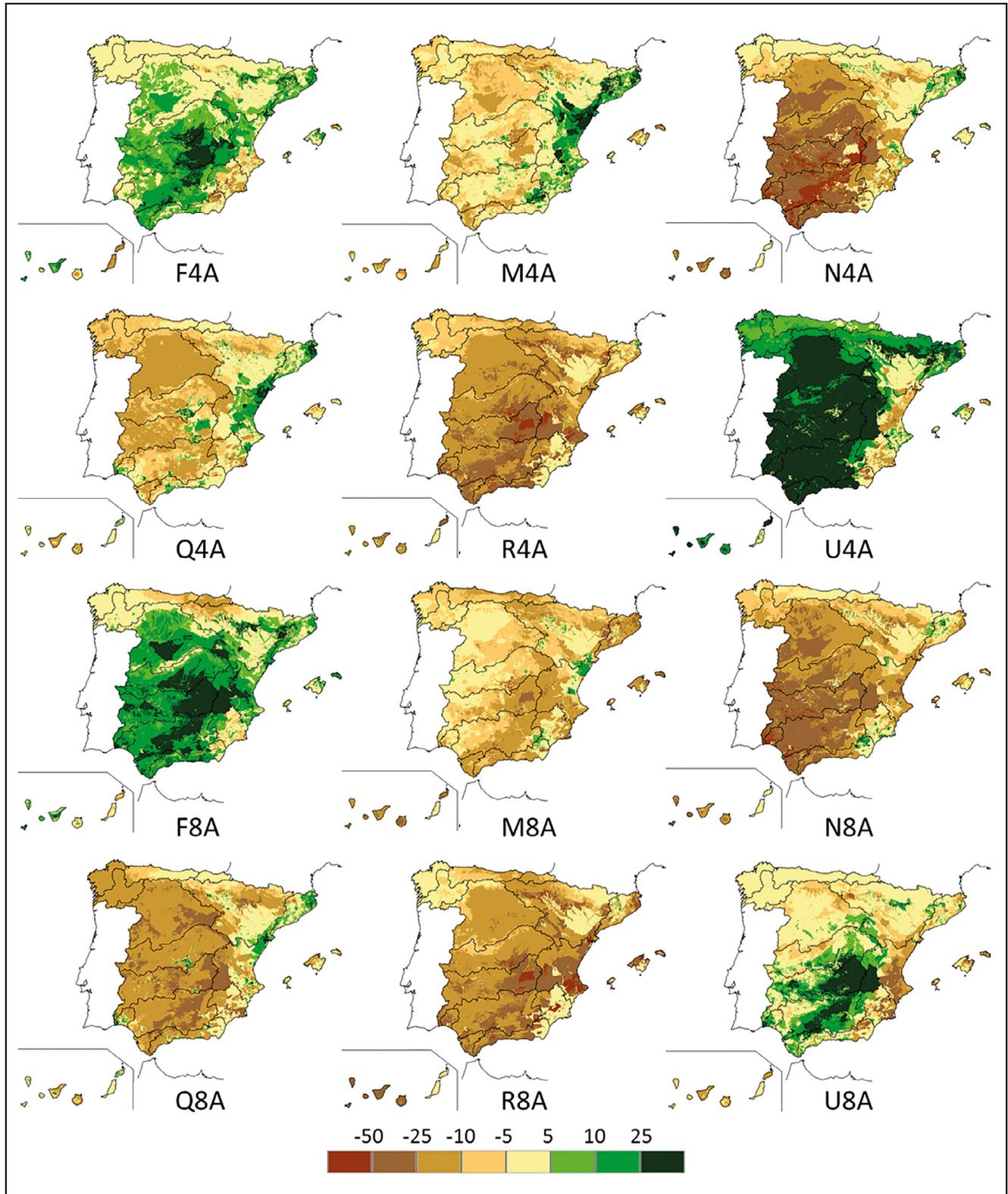


Figura 7. Cambio (%) de ESC anual para 2010-2040.

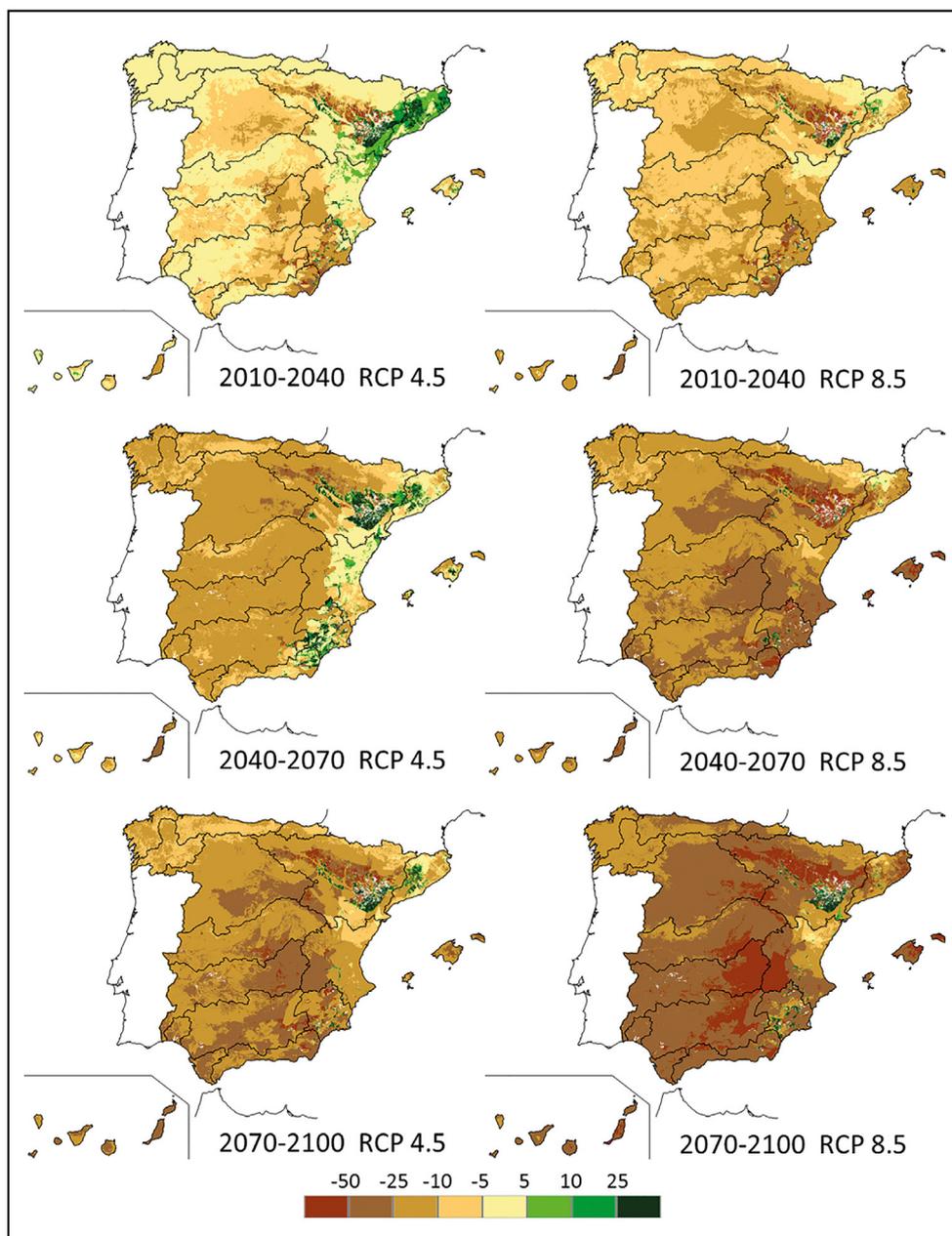


Figura 8. Media de cambios (%) de ESC anual para 2010-2040 (arriba), 2040-2070 (medio) y 2070-2100 (abajo) y RCP 4.5 (izquierda) y 8.5 (derecha).

del SE de España, centro del valle del Ebro y Canarias. Se observa cómo la reducción se va generalizando hacia finales de siglo y cómo es mayor en el RCP 8.5 que en el RCP 4.5. Para 2010-2040 y RCP 4.5 se observan ligeros cambios que consisten en aumentos en el NE, básicamente en todo el ámbito de la Cuencas Internas de Cataluña y desembocadura del Ebro. Los descensos son, en general, inferiores al 10% y los más relevantes se dan en el centro y este de la cuenca del Duero y en las cabeceras de las cuencas del Júcar, Guadiana y Guadalquivir. El hecho de que la disminución de recursos hídricos sea mayor en esas zonas de cabecera que en las partes bajas y medias de las cuencas tiene importancia a la hora de valorar la hipotética repercusión del cambio climático sobre los recursos hídricos en los embalses de zonas tan estratégicas. Según el RCP 8.5, apenas se dan aumentos de ESC, restringiéndose a zonas aisladas del NE con escasa ESC. Los descensos son ya mayoritarios, entre el 5% y el 25%, afectando también a la franja norte de España. Son más acusados en la parte oriental del Duero, hacia el sur y SE de España y en

los dos archipiélagos. La reducción de ESC es más evidente en 2040-2070 y sobre todo en 2070-2100, a la vez que los aumentos se ven ahora muy limitados, tanto en extensión como en intensidad. Los cambios medios para este último periodo y el escenario más desfavorable RCP 8.5 muestran el panorama más extremo, con reducciones de ESC generalizadas e importantes, sobrepasándose el 25% en gran parte de España y el 50% en el este del Duero, valle del Ebro, La Mancha y zonas orientales del Guadalquivir. Las reducciones son más leves, ya que no superan el 25%, en casi toda la franja norte, salvo zonas costeras de Asturias y País Vasco, en el Sistema Central, SE del Ebro y parte oriental de la DH del Júcar.

Los cambios de ESC anual agrupados por DH¹ muestran en primer lugar las grandes diferencias en los resultados de cada proyección (tabla 3). El rango de variación es

¹ Las islas Canarias se han agrupado en un único ámbito. Ceuta y Melilla se integran en las Cuencas Mediterráneas Andaluzas.

mayor hacia el sur de la Península, según el RCP 8.5 y en los PI más lejanos, llegando a oscilar entre -65% (R8A) y 21% (U8A) en Tinto, Odiel y Piedras para 2070-2100 según el RCP 8.5. Las proyecciones U4A, U8A y, en menor medida, F4A y F8A dan ascensos de ESC, superándose aumentos del 40% para 2010-2040 según U4A en DDHH del sur. En el lado contrario, R8A y R4A dan los mayores descensos, llegando a reducirse la ESC en más del 40% para 2070-2100 en todas las DDHH al sur del Duero, además de Baleares, que es donde una proyección pronostica los

mayores descensos para cualquier PI. Resalta que casi todas las proyecciones pronostican un descenso de ESC en Baleares para RCP 4.5 y todas para RCP 8.5, atenuándose el efecto al alza que suelen dar las proyecciones UA y acen tuándose el efecto a la baja de las RA. Se estima que el cambio de ESC para 2010-2040 en Baleares oscilaría desde un aumento del 8% a una disminución del 40%.

Con relación al promedio de cambios de las proyecciones, se ve que hay un descenso de ESC en todos los PI, RCP y ámbitos; con una única excepción: el aumento de ESC del

Tabla 3. Cambio (%) de ESC en cada PI según cada proyección para el conjunto de España y para cada DH. Se indica el promedio (Med) para cada RCP. Los colores reflejan la gradación del cambio

ESC Δ Anual (%)		RCP 4.5							RCP 8.5						
		F4A	M4A	N4A	Q4A	R4A	U4A	Med	F8A	M8A	N8A	Q8A	R8A	U8A	Med
España	2010-2040	2	-5	-11	-9	-13	20	-3	4	-8	-13	-14	-11	-2	-7
	2040-2070	-7	-9	-13	-14	-23	-1	-11	-9	-19	-21	-16	-29	9	-14
	2070-2100	-5	-18	-17	-11	-31	4	-13	-23	-28	-17	-34	-43	-1	-24
Miño-Sil	2010-2040	1	-5	-7	-10	-7	11	-3	2	-6	-10	-14	-5	-3	-6
	2040-2070	-8	-9	-12	-16	-16	-3	-11	-8	-15	-13	-14	-18	4	-11
	2070-2100	-6	-17	-10	-9	-21	4	-10	-18	-25	-13	-29	-29	-2	-19
Galicia Costa	2010-2040	0	-6	-4	-10	-6	10	-3	1	-6	-8	-14	-4	-3	-6
	2040-2070	-8	-10	-11	-16	-16	-4	-11	-8	-17	-11	-15	-17	2	-11
	2070-2100	-8	-17	-10	-9	-19	2	-10	-18	-26	-13	-29	-26	-4	-19
Cantábrico Oriental	2010-2040	-4	-8	2	-3	-10	5	-3	-12	-11	-5	-1	-12	-1	-7
	2040-2070	-8	-18	-12	-10	-14	-7	-12	-10	-18	-11	-12	-21	-6	-13
	2070-2100	-7	-12	-12	-5	-17	-10	-10	-24	-38	-20	-25	-36	-15	-26
Cantábrico Occidental	2010-2040	0	-5	-1	-7	-8	8	-2	-5	-9	-4	-7	-8	-2	-6
	2040-2070	-6	-13	-10	-12	-14	-3	-10	-8	-17	-13	-13	-21	-3	-12
	2070-2100	-4	-14	-12	-7	-18	-4	-10	-21	-34	-17	-27	-32	-9	-23
Duero	2010-2040	2	-7	-15	-12	-14	25	-3	6	-5	-17	-19	-11	-5	-9
	2040-2070	-10	-8	-14	-17	-27	1	-13	-12	-20	-23	-19	-31	15	-15
	2070-2100	-6	-21	-18	-13	-36	9	-14	-23	-28	-15	-40	-46	3	-25
Tajo	2010-2040	5	-4	-22	-10	-17	31	-3	12	-5	-20	-20	-13	-4	-8
	2040-2070	-6	-3	-14	-13	-29	3	-11	-8	-19	-31	-16	-34	19	-15
	2070-2100	-2	-20	-23	-13	-40	12	-14	-23	-23	-18	-41	-51	7	-25
Guadiana	2010-2040	9	-5	-35	-12	-23	46	-3	18	-8	-30	-22	-20	5	-9
	2040-2070	-6	-3	-21	-13	-36	9	-12	-9	-23	-45	-19	-45	33	-18
	2070-2100	1	-25	-37	-15	-50	22	-17	-27	-26	-27	-50	-63	15	-30
Guadalquivir	2010-2040	10	-4	-38	-11	-24	52	-2	18	-10	-30	-22	-21	8	-10
	2040-2070	-3	-2	-22	-10	-37	15	-10	-6	-24	-51	-17	-48	35	-18
	2070-2100	2	-22	-43	-16	-51	18	-19	-30	-27	-32	-49	-67	13	-32
Cuencas Mediterráneas Andaluzas	2010-2040	6	-4	-33	-6	-25	43	-3	12	-11	-25	-18	-23	-1	-11
	2040-2070	-4	-3	-15	-2	-36	11	-8	-5	-25	-47	-17	-46	20	-20
	2070-2100	0	-21	-39	-16	-49	6	-20	-29	-25	-29	-42	-65	4	-31
Guadalete y Barbate	2010-2040	10	-7	-38	-11	-25	48	-4	15	-13	-31	-21	-21	6	-11
	2040-2070	-2	-2	-21	-8	-37	14	-10	-5	-27	-51	-18	-47	31	-20
	2070-2100	1	-24	-43	-16	-52	12	-20	-31	-27	-31	-49	-67	7	-33
Tinto, Odiel y Piedras	2010-2040	1	-4	-36	-8	-21	54	-2	14	-5	-36	-17	-22	-1	-11
	2040-2070	-8	-6	-19	-4	-37	15	-10	-14	-26	-51	-16	-46	34	-20
	2070-2100	-1	-25	-44	-12	-50	25	-18	-26	-24	-35	-48	-65	21	-29
Segura	2010-2040	6	-4	-21	-13	-22	15	-7	12	-13	-19	-23	-19	7	-9
	2040-2070	-1	-7	-10	-18	-32	-1	-11	-10	-17	-37	-23	-48	-3	-23
	2070-2100	-6	-19	-28	-17	-43	-9	-20	-36	-30	-34	-44	-63	-17	-38
Júcar	2010-2040	5	1	-17	-7	-26	21	-4	15	-12	-20	-20	-25	-4	-11
	2040-2070	-6	-4	-7	-11	-34	-8	-12	-12	-21	-34	-22	-49	-7	-24
	2070-2100	-7	-16	-26	-18	-46	-11	-21	-36	-28	-26	-41	-62	-20	-36
Ebro	2010-2040	0	-6	-3	-7	-12	15	-2	-3	-9	-7	-9	-10	-2	-7
	2040-2070	-9	-12	-10	-13	-19	-5	-11	-9	-19	-14	-16	-25	4	-13
	2070-2100	-7	-16	-12	-10	-25	-3	-12	-25	-33	-14	-32	-40	-10	-26
Cuencas Internas de Cataluña	2010-2040	5	7	3	4	-9	24	6	6	-17	-3	0	-8	-4	-4
	2040-2070	-4	-8	1	6	-13	-6	-4	3	-22	-11	-7	-15	4	-8
	2070-2100	3	-15	-10	8	-20	-10	-8	-20	-31	-3	-25	-27	-7	-19
Islas Baleares	2010-2040	1	-15	0	-7	-26	8	-7	-3	-21	-12	-14	-40	-6	-16
	2040-2070	6	-17	-10	-7	-39	-13	-13	-20	-35	-34	-21	-56	-19	-31
	2070-2100	-4	-19	-33	-10	-52	-24	-24	-28	-54	-28	-40	-69	-32	-42
Canarias	2010-2040	6	-10	-27	-9	-18	25	-6	7	-22	-24	-4	-32	-11	-14
	2040-2070	-10	-22	-22	-1	-26	22	-10	-19	-29	-46	-27	-41	14	-25
	2070-2100	-22	-22	-38	-18	-44	-11	-26	-33	-39	-25	-50	-60	3	-34

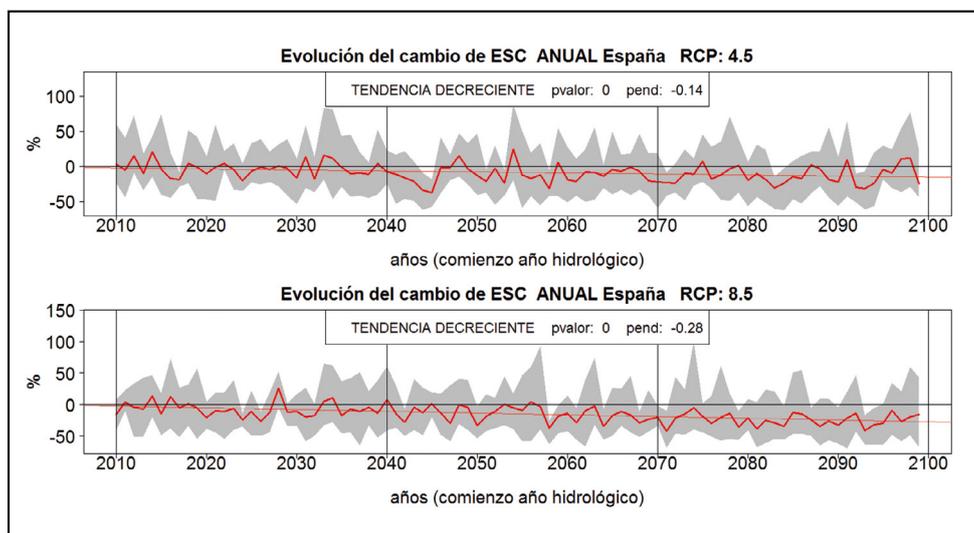


Figura 9. Tendencia del cambio (%) de ESC del año 2010 al 2099 para los RCP 4.5 (arriba) y 8.5 (abajo) para el conjunto de España. La banda gris indica el rango de resultados de las proyecciones. La línea roja gruesa indica su promedio y la recta roja delgada su pendiente. Se indica su p-valor según el test de Mann Kendall.

6% en las Cuencas Internas de Cataluña para 2010-2040 y RCP 4.5. Los descensos son mayores para el RCP 8.5 que el RCP 4.5. Los descensos aumentan hacia finales de siglo, salvo en las DDHH del norte que tienen valores similares para 2040-2070 y 2070-2100 según el RCP 4.5. Las mayores diferencias entre periodos se dan entre 2040-2070 y 2070-2100 según el RCP 8.5, que es cuando más se notaría la diferencia en las emisiones de gases de efecto invernadero.

Los descensos porcentuales son mayores hacia el sur. Para 2010-2040 y RCP 4.5 se estiman descensos mayoritarios del -2% al -4% en la mayor parte de la Península, siendo más notables en Segura y Baleares (-7%) y Canarias (-6%) y con aumentos sólo en las Cuencas Internas de Cataluña (6%). Para 2010-2040 y RCP 8.5 se estiman descensos del -4% al -7% en el norte y del -8% al -11% en el resto, salvo descensos mayores de las islas Baleares (-16%) y Canarias (-14%).

Para el 2040-2070 y RCP 4.5, la media de los cambios de ESC oscilan entre el -8% y el -13%, con los mínimos descensos en las Cuencas Internas de Cataluña (-4%) y no se observa un mayor descenso hacia el sur peninsular. Para el 2040-2070 y RCP 8.5, los descensos van aumentando desde el NO (-11%) hacia el sur (-20%) y sureste (-24%). Destacan el descenso moderado en las Cuencas Internas de Cataluña (-8%) y los fuertes descensos de Canarias (-25%) y sobre todo de Baleares (-31%).

Para el 2070-2100 y RCP 4.5, la medida de los cambios rondan el -10% en el norte, siendo del -8% en Cataluña y -12% en el Ebro, y van acentuándose hacia el sur, rondando el -20% en las DDHH del sur y Levante. En Baleares es -24% y en Canarias -26%. Para el 2070-2100 y RCP 8.5, los descensos medios son muy importantes. Los cambios son el -19% en el NO y NE, rondan el -25% en Cantábrico, Duero, Tajo y Ebro, el -30% en el sur, sobre el -37% en Júcar y Segura, el -34% en Canarias y el -42% en Baleares.

Los cambios de ESC son más acentuados que los cambios en PRE. Este grado de acentuación es menor en las DDHH del norte de España, y es máximo en las DDHH del SE de la Península. Eso indica que una misma reducción de PRE causa una mayor reducción de ESC en el SE que en el

norte. Este hecho se debe a que las DDHH de norte tienen mucha más PRE, efecto que se ve reforzado por el tipo de sesgo de la PRE, ya que las proyecciones simulan preferentemente más PRE de la observada en las DDHH del norte y menos en las del SE. De ese modo, cuanto más baja es la PRE menos lineal es la relación PRE-ESC, menos ESC se genera, más acentuados son los cambios de ESC y por lo tanto, mayor la incertidumbre de los resultados.

Aparte de los cambios por periodos, también se han analizado las tendencias de los cambios anuales hasta finales del siglo XXI con relación a la media del PC. Para el caso de la ESC, resulta una tendencia decreciente según todas las proyecciones y en ambos RCP (figura 9), siendo más acusada en el RCP 8.5. La tendencia decreciente es sólo estadísticamente significativa según el test de Mann-Kendall para una proyección del RCP 4.5 (R4A) y para cuatro del RCP 8.5 (F8A, M8A, Q8A y R8A), mientras que el resto de proyecciones no muestran tendencia significativa alguna. En cualquier caso, el promedio de cambios de las proyecciones da una tendencia decreciente significativa para ambos RCP, tal como reflejan los pvalores del test de Mann Kendall indicados en dicha figura; la proyección R4A determina la tendencia del promedio para RCP 4.5.

Similares tendencias se obtienen para cada una de las DDHH. No hay ninguna proyección que dé tendencia creciente significativa en los cambios de ESC para el siglo XXI en ninguno de los ámbitos territoriales. Las pendientes negativas más acusadas se dan hacia el sur y este, llegando al 0.46 %/año en Segura y Baleares, por lo que se estima una mayor aceleración en la disminución de recursos hídricos durante el siglo XXI para el RCP 8.5 y hacia esas zonas. La banda de incertidumbre es más amplia hacia el Mediterráneo y en Canarias.

Los cambios en el ciclo anual se evalúan con la estandarización de los valores mensuales (figura 10). La estandarización se ha realizado primero calculando la media de los valores absolutos de ESC para cada mes, cada periodo y cada RCP; después se ha dividido el valor absoluto de cada mes entre la media anual y finalmente se ha restado ese valor obtenido para cada PI respecto el obtenido para el PC. De ese modo, se representa la proporción (entre 0 y

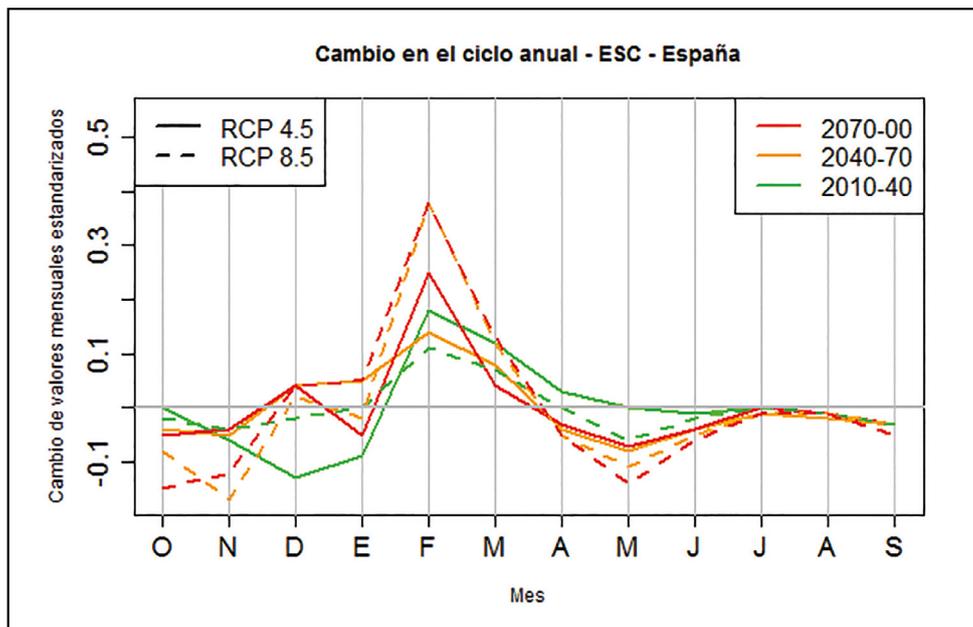


Figura 10. Cambios en el ciclo anual de ESC en España para cada RCP y cada PI según los valores medios estandarizados.

1) de ESC anual que se incrementa en cada mes para cada PI y RCP. Lo más destacado es la tendencia a concentrarse la ESC de España en febrero, y en menor grado en marzo, en todos los PI y RCP, siendo mayor esa tendencia según el RCP 8.5 para 2040-2070 y 2070-2100. En el sentido contrario, hay una pérdida relativa de ESC en los meses de primavera (mayo y en menor medida junio y abril) y finales de verano y principio de otoño (septiembre a noviembre), más acusada en el RCP 8.5 y según avanza el siglo XXI. Fuera de este comportamiento general, destaca la reducción relativa de la ESC en diciembre para 2010-2040 según RCP 4.5, motivada por los fuertes descensos de ESC para ese mes según Q4A y, en menor cuantía, según F4A, M4A y N4A.

La acumulación estacional de nieve en las zonas montañosas es una importante fuente de agua en algunas partes de España, contribuyendo a su laminación en el tiempo. A pesar de las incertidumbres acerca de cómo el incremento de gases de efecto invernadero afectará a las PRE, todos los modelos analizados en este estudio pronostican un incremento de temperaturas a lo largo del siglo XXI, que de media para España es de alrededor de 1 °C para el periodo 2010-40, de 1.6 °C (RCP 4.5) a 2.3 °C (RCP 8.5) para 2040-2070 y de 2.0 °C (RCP 4.5) a 3.9 °C (RCP 8.5) para 2070-2100.

Es previsible que mayores temperaturas supongan varios efectos destacables en la capa de nieve: retrasarán la aparición de la nieve, incrementarán la relación lluvia/nieve, acortarán la época de nieves y adelantarán y acortarán el proceso de fusión, lo que conllevará un cambio en la distribución estacional de la ESC. Además, también se prevén disminuciones de los reducidos glaciares españoles.

Se ha llevado a cabo un análisis orientativo en las zonas peninsulares con cota superior a 1500 m, cuyos resultados han de tomarse con precaución ya que además de heredar todas las incertidumbres de las proyecciones climáticas, tienen las de una simulación hidrológica de paso mensual en las que se han simplificado mucho los procesos de PRE en forma de nieve y su fusión. De hecho, los modelos no reproducen bien los datos observados sobre la acumulación de nieve del proyecto ERHIN (Arenillas et al. 2008), ya que

adelantan los máximos de acumulación, como es notorio sobre todo en el Pirineo. Esto es síntoma de las dificultades que tienen los modelos en simular estos procesos.

Los resultados indican una disminución muy importante del volumen de nieve acumulada y por lo tanto de los recursos hídricos procedentes de su fusión en los 3 PI respecto al PC en las zonas montañosas peninsulares. Esa reducción es mayor en el RCP 8.5 que en el RCP 4.5 y mayor cuanto más nos alejamos en el siglo XXI, de manera que apenas habría recursos hídricos nivales para 2070-2100 según el RCP 8.5. El periodo con nieve acumulada se acorta progresivamente hacia finales de siglo en todas las zonas, atrasándose su inicio y adelantándose su final. Al igual que pasa con la acumulación de nieve, también se acorta el periodo de fusión de nieve. Además, en general se aprecia un adelantamiento del proceso de fusión mayoritaria de nieve, siendo por ejemplo muy notorio en el Sistema Central, donde el pico de fusión se adelanta entre 1 y 2 meses según la proyección. Estos resultados están en la línea con López-Moreno et al. (2009), que evaluaron el impacto en la nieve en el Pirineo para los últimos 30 años del siglo XXI en un adelanto de la fusión en un mes, una disminución de la duración del manto nival de uno a dos meses y una disminución media del manto nival del 64% según el escenario de emisiones SRES A2.

Una variable hidrológica relacionada con la ESC es la aportación hídrica (APN), que indica el volumen de agua que circula por el río en un periodo de tiempo dado. El impacto se ha analizado en aquellas celdas que constituyen los ríos más representativos. Para ello, se han adoptado aquellos ríos que fueron identificados como masas de agua superficiales para la Directiva Marco del Agua. Los criterios seguidos para asignarle el carácter de río a una celda son: celdas en las que la cuenca vertiente es mayor de 10 km² o el caudal medio observado es superior a 100 l/s. De ese modo, el mapa de APN diferencia claramente los cauces de los ríos del resto del territorio. En la figura 11 se muestra el impacto del cambio climático en la APN para el periodo 2040-2070 y el RCP 4.5; para facilitar su visualización se

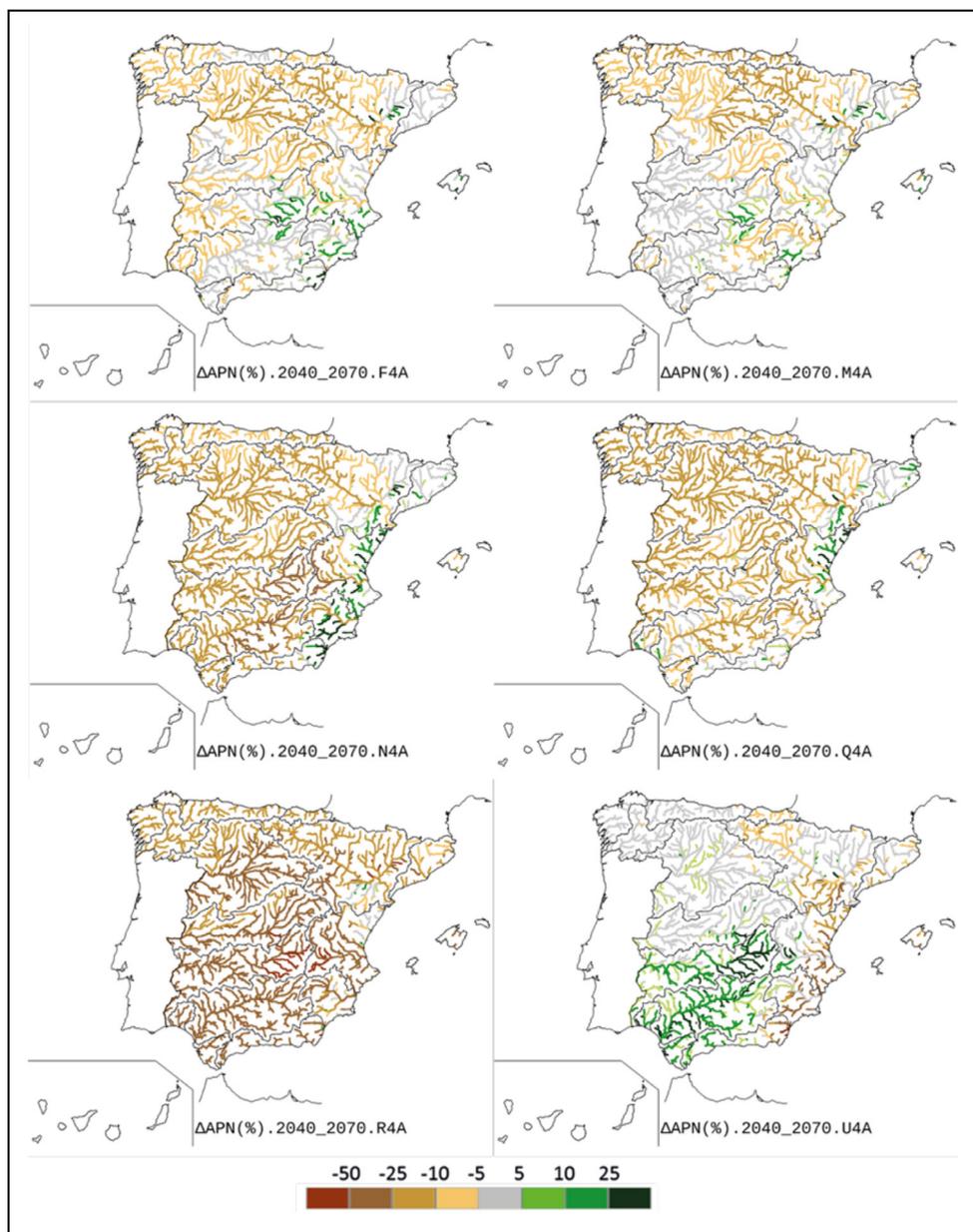


Figura 11. Cambio (%) de APN anual para 2040-2070 según las proyecciones RCP 4.5.

ha hecho una extracción de los ríos, eligiendo celdas en las que la cuenca vertiente es además mayor de 50 km².

A partir de esos mapas de variación de APN, se pueden obtener las APN de los ríos en régimen natural estimadas para los periodos de impacto según las diferentes proyecciones analizadas. Para ello, se aplican esos porcentajes de cambio de los mapas a las APN obtenidas mediante la simulación hidrológica en régimen natural de los datos climáticos observados durante el periodo de control 1961-2000. Hay que recalcar que estos valores del PC se han obtenido sin tener en cuenta las alteraciones del régimen hidrológico de origen humano, tales como presas, canalizaciones, trasvases, bombeos; por lo tanto, son valores que difieren de los aforados. Se han seleccionado una serie de puntos representativos de la hidrología española donde se ha calculado la APN anual en el PC y en los tres PI del siglo XXI. Se han incluido los resultados de aplicar los porcentajes de cambio dados por las 12 proyecciones (figura 12).

De nuevo se hace patente que las variaciones de APN son bastantes diferentes según las proyecciones climáticas.

El margen de variación es acusado en todos los periodos y en todos los casos representados, siendo mayor hacia el sur.

A modo de ejemplo, las APN en régimen natural del río Ebro a su paso por Zaragoza para el periodo 2010-2040 podrían oscilar en un margen alrededor de los 9000 hm³/año actuales, desde unos 7700 hm³/año a los 10100 hm³/año. Para finales de siglo podrían oscilar desde los aproximadamente 8400 hm³/año a descender hasta unos 5000 hm³/año. Lógicamente, esta incertidumbre tiene importantes implicaciones prácticas a la hora de elaborar estrategias de planificación para actuar ante el cambio climático.

En general, se pronostica una reducción de la APN anual, que sería más acusada conforme avanzara el siglo XXI. No obstante, hay proyecciones que darían también aumentos de menor entidad, la mayoría durante 2010-2040, pero también de manera más ocasional durante los periodos posteriores (como por ejemplo en el río Miño en Ourense o el Duero en Zamora). El escenario de emisiones RCP 8.5 da mayores reducciones de recursos hídricos que el RCP 4.5, más patentes hacia finales de siglo.

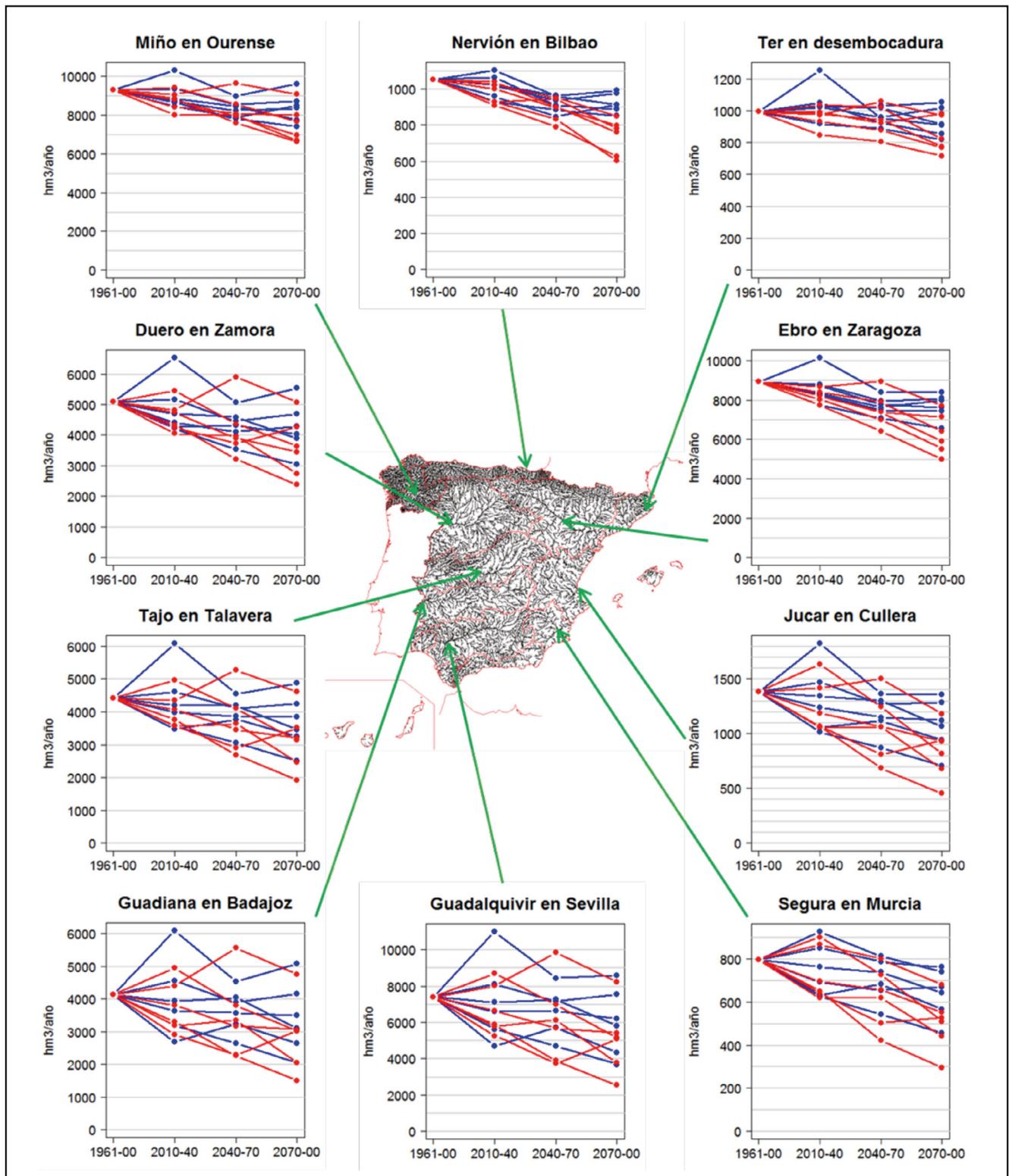


Figura 12. APN anual en algunos puntos fluviales representativos, simulados a partir de datos climáticos observados para el PC y estimados para los tres PI según proyecciones climáticas del RCP 4.5 (azul) y RCP 8.5 (rojo).

5. DISCUSIÓN

Actualización de la evaluación del impacto

Los resultados del presente estudio actualizan los de otro estudio anterior (CEDEX 2010). Las principales diferencias radican en que las proyecciones regionalizadas para España fueron obtenidas a partir de simulaciones con modelos climáticos y escenarios de emisiones del 3^{er} informe de evaluación del IPCC en el primer estudio (CEDEX

2010) y del 5^o, y último, informe de evaluación del IPCC (2013) en el presente estudio.

Los nuevos modelos climáticos son más avanzados, complejos y completos que los del anterior estudio. Por otro lado, los escenarios de emisiones son diferentes. En CEDEX (2010) se utilizaban los SRES A2 y B2, mientras que ahora se utilizan los RCP 4.5 y 8.5. El escenario de emisiones RCP 8.5 puede compararse con SRES A2, si bien RCP 8.5 supone niveles más altos de CO₂ equivalente en la atmósfera. El escenario de emisiones RCP 4.5 es más

moderado y puede compararse con SRES B2, si bien RCP 4.5 supone niveles más bajos de CO₂ para el último tercio del siglo XXI.

Los PI son los mismos en ambos estudios. El PC es diferente, pues es 1961-1990 en CEDEX 2010 y 1961-2000 en el presente estudio. No obstante, esta diferencia del PC no es relevante, puesto que el impacto se ha estimado con relación a los valores simulados del PC y no a los observados. Los valores simulados no recogen ni las tendencias ni los ciclos observados sino que intentan reflejar la situación estadística del clima reciente.

Los cambios medios pronosticados para el conjunto de España son menos acusados en el presente estudio, motivados por una menor reducción de PRE y un menor incremento de TEM (tabla 4). Los cambios medios de ESC son algo menores en el estudio actual con tres diferencias a destacar. La primera es una menor reducción según el presente estudio para el RCP 4.5 durante 2010-2040. El presente estudio estima variaciones que oscilan entre +20% y -13% con media del -3% para 2010-2040 y RCP 4.5. Son valores que difieren de los obtenidos en CEDEX 2010, con valores más bajos, rango más corto y una media inferior, del -8%. La proyección U4A da notables aumentos de PRE y es la que influye en gran medida en esas diferencias. La segunda es una menor reducción según el presente estudio para el 2040-2070 y RCP 8.5. El rango en el presente estudio va del +9% a -29%, con media del -14%, que contrasta con el rango de -8% a -34% del anterior informe y vienen motivados por el incremento de PRE de la proyección U8A. La tercera es una menor reducción según el presente estudio para el RCP 8.5 durante 2070-2100 (reducción del 24% ahora frente al 28% en el estudio anterior).

También se ha realizado la comparación entre los resultados medios para los diferentes ámbitos territoriales de las DDHH (tabla 5). No se incluyen las DDHH de Tinto, Odiel y Piedras y de Guadalete y Barbate ya que no estaban

individualizadas en el estudio anterior al estar juntas esas dos cuencas atlánticas con las cuencas mediterráneas andaluzas. Es por ello, que el ámbito de las Cuencas Andaluzas no es plenamente coincidente en ambos informes, pero se han mantenido para su comparación. También se han equiparado los ámbitos del Cantábrico Occidental con el Cantábrico y los del Cantábrico Oriental con los del País Vasco del informe anterior. Las islas Canarias se han agrupado en un único ámbito. Ceuta y Melilla se integran en las Cuencas Andaluzas.

De la comparación entre ambos estudios se desprenden las siguientes conclusiones con relación a los cambios de ESC (tabla 5):

- Periodo 2010-2040: los cambios del RCP son más similares entre ámbitos que los del SRES. El RCP 4.5 da reducciones mucho menores que su equivalente SRES B2 en todos los ámbitos, salvo en las DDHH del NO peninsular que dan cambios parecidos. El RCP 8.5 da en general similares reducciones que su equivalente SRES A2, salvo en las DDHH cantábricas con menores reducciones para RCP 8.5, y en Júcar, Cuencas Internas de Cataluña y, especialmente, Baleares con mayores reducciones para RCP 8.5. Hay que indicar que el RCP 8.5 es más desfavorable (reducción de ESC más acusada) que el RCP 4.5 en todos los ámbitos territoriales, tal como cabría esperar; sin embargo, eso no ocurre con los SRES ya que el SRES B2 es más desfavorable que el SRES A2 en muchos ámbitos, sobre todo hacia el este y sur.
- Periodo 2040-2070: el RCP 4.5 da, en general, menores reducciones que el SRES B2, especialmente en Canarias, y algo mayores en las DDHH del NO peninsular, Duero y Tajo. El RCP 8.5 da cambios similares al SRES A2 en el norte, Segura y Ebro, menores reducciones en las cuencas del sur (con diferencias muy grandes desde la cuenca del Guadiana hacia el

Tabla 4. Rango y media de cambios en las variables hidroclimáticas en España en cada PI y escenarios de emisiones según el presente estudio y comparación con el de CEDEX 2010

ESPAÑA		Presente Estudio						CEDEX 2010					
		RCP 4.5			RCP 8.5			SRES B2			SRES A2		
		Mx	Med	Mn	Mx	Med	Mn	Max	Med	Min	Max	Med	Min
PRE (%)	2010-2040	9	-2	-8	1	-4	-8	-3	-6	-10	0	-5	-11
	2040-2070	-1	-6	-13	3	-8	-16	-3	-8	-12	-4	-9	-16
	2070-2100	1	-7	-17	-2	-14	-24	-2	-9	-14	2	-17	-28
TEM (°C)	2010-2040	1,5	0,9	0,4	1,6	1,0	0,5	1,9	1,6	1,4	1,8	1,5	1,2
	2040-2070	2,6	1,6	0,9	3,4	2,3	1,7	3,0	2,5	2,0	3,4	2,9	2,5
	2070-2100	3,2	2,0	1,5	5,6	3,9	2,8	4,4	3,6	2,7	5,8	4,8	4,0
ETP (%)	2010-2040	6	3	1	7	4	2	8	7	6	6	6	6
	2040-2070	11	7	4	14	10	8	14	12	10	14	13	12
	2070-2100	14	9	6	24	17	12	19	15	13	28	21	19
ETR (%)	2010-2040	4	-1	-3	0	-3	-3	-3	-5	-8	1	-3	-7
	2040-2070	-2	-3	-5	0	-4	-7	-1	-6	-10	-2	-6	-10
	2070-2100	0	-3	-5	-2	-6	-11	0	-7	-12	2	-12	-24
HMR (%)	2010-2040	2	-2	-3	0	-2	-4	0	-2	-4	0	-2	-4
	2040-2070	-2	-4	-6	-2	-5	-9	-1	-3	-4	-2	-3	-6
	2070-2100	-1	-5	-10	-4	-8	-12	-2	-3	-5	-2	-6	-7
REC (%)	2010-2040	15	-3	-13	1	-7	-13	-2	-8	-15	-2	-8	-18
	2040-2070	-2	-11	-22	4	-14	-28	-5	-12	-18	-8	-15	-27
	2070-2100	1	-13	-28	-6	-24	-40	-8	-16	-24	-3	-27	-41
ESC (%)	2010-2040	20	-3	-13	4	-7	-14	1	-8	-18	-2	-8	-22
	2040-2070	-1	-11	-23	9	-14	-29	-5	-11	-21	-8	-16	-34
	2070-2100	4	-13	-31	-1	-24	-43	-1	-14	-28	0	-28	-40

Tabla 5. Tabla comparativa de cambio (%) de ESC entre CEDEX 2010 (SRES) y el presente estudio (RCP)

Δ ESC (%)	2010-2040				2040-2070				2070-2100			
	RCP		SRES		RCP		SRES		RCP		SRES	
	4.5	B2	8.5	A2	4.5	B2	8.5	A2	4.5	B2	8.5	A2
España	-3	-8	-7	-8	-11	-11	-14	-16	-13	-14	-24	-28
Miño-Sil	-3	-3	-6	-6	-11	-7	-11	-12	-10	-6	-19	-21
Galicia Costa	-3	-3	-6	-6	-11	-8	-11	-12	-10	-5	-19	-19
Cantábrico Oriental	-3	-10	-7	-12	-12	-16	-13	-16	-10	-20	-26	-30
Cantábrico Occidental	-2	-10	-6	-13	-10	-16	-12	-16	-10	-17	-23	-29
Duero	-3	-7	-9	-8	-13	-9	-15	-17	-14	-13	-25	-31
Tajo	-3	-8	-8	-8	-11	-9	-15	-19	-14	-15	-25	-35
Guadiana	-3	-9	-9	-12	-12	-11	-18	-27	-17	-20	-30	-42
Guadalquivir	-2	-13	-10	-11	-10	-12	-18	-28	-19	-24	-32	-43
C Med Andaluzas	-3	-16	-11	-12	-8	-15	-20	-30	-20	-27	-31	-41
Segura	-7	-13	-9	-10	-11	-14	-23	-21	-20	-21	-38	-33
Júcar	-4	-12	-11	-5	-12	-13	-24	-18	-21	-24	-36	-32
Ebro	-2	-9	-7	-9	-11	-13	-13	-14	-12	-16	-26	-28
CCII de Cataluña	6	-7	-4	0	-4	-9	-8	-4	-8	-16	-19	-21
Islas Baleares	-7	-15	-16	-4	-13	-20	-31	-15	-24	-23	-42	-31
Canarias	-6	-25	-14	-18	-10	-28	-25	-32	-26	-34	-34	-41

sur) y mayores en las del Júcar, Cuencas Internas de Cataluña y Baleares.

- Periodo 2070-2100: la comparativa es similar a la del periodo anterior. El estudio actual estima en general menores reducciones de ESC para el escenario de emisiones más desfavorable. Así, las reducciones son claramente menores en el RCP 8.5 que en el SRES A2 en las grandes cuencas atlánticas y del sur peninsular. Por el contrario, son mayores en Segura, Júcar y Baleares. Los cambios son más parecidos entre los escenarios menos desfavorables, destacando que el estudio actual da una mayor reducción en las DDHH del NO peninsular y menor en las Cantábricas, las del sur, NE y Canarias.

En general, el estudio actual pronostica una reducción de recursos hídricos más atenuada que el estudio anterior de 2010 y una mayor similitud de los cambios entre diferentes ámbitos territoriales. Las horquillas de variación de los resultados del estudio actual son mayores que los del anterior. Dicho de otro modo, la dispersión de los valores de impacto sobre los recursos hídricos es mayor en el estudio actual. Esto se debe a que el estudio actual ha considerado proyecciones que recogen una mayor variabilidad climática, debido básicamente a que las proyecciones UA dan notables aumentos de PRE.

Tratamiento de la incertidumbre

Los resultados expuestos están sujetos a las incertidumbres propias de los estudios de impacto del cambio climático. Las fuentes de incertidumbre están ligadas a los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero, a los modelos climáticos, a los procesos de regionalización y a los modelos hidrológicos (Mitchell y Hulme, 1999). En gran medida derivan del hecho de que el clima es un sistema caótico no lineal que depende de un elevado número de factores, por lo que es muy difícil su simulación y más todavía su pronóstico teniendo en cuenta diferentes hipótesis de evolución en las emisiones de gases de efecto invernadero. Es por ello que se recomienda considerar varias proyecciones climáticas para recoger en lo posible la variabilidad climática.

La incertidumbre se refleja en tres características de los resultados: el sesgo de las proyecciones climáticas, la disparidad de resultados de las proyecciones y en la falta de continuidad espacial y temporal de los resultados.

Ya se ha visto que hay un sesgo importante en la PRE simulada, lo que tiene unas importantes connotaciones en la evaluación de los recursos hídricos. La influencia en los resultados de impacto es menor en las zonas donde se sobrestima la PRE ya que coincide con una mayor PRE y por lo tanto donde la relación entre la PRE y la ESC es más lineal. Por el contrario, el sesgo influye más en las zonas donde se infravalora la PRE y donde además hay una baja PRE, por lo que una hipotética reducción de PRE en los PI respecto al PC supondría una reducción más acusada de ESC, tanto más acusada cuanto más se infravalorara la PRE. Así pues, este sesgo añade más incertidumbre a los resultados de impacto obtenidos en las zonas del este peninsular y en los archipiélagos.

Por otro lado, destaca la disparidad de resultados, siendo mayor hacia el SO de España. Esa disparidad es con frecuencia mayor que la señal de cambio climático, de manera que encubre esta señal. De hecho, la relación “cambio medio/rango de cambios” es mayor cuanto más nos alejamos en el siglo XXI, debido al aumento del cambio medio, con lo que la señal es más evidente hacia finales de siglo. A este respecto, conviene tener en cuenta que las proyecciones UA y RA dan los resultados más alejados del resto, tanto en media como en variabilidad.

Finalmente, es razonable que los cambios pronosticados tengan una continuidad espacial y temporal, de manera que son sospechosos los fuertes cambios entre zonas cercanas o cambios de distinto signo entre periodos temporales. A este respecto, destaca el quiebro de los cambios de ESC para España dados por U8A, con ligero descenso en 2010-2040, aumento del 10% en 2040-2070 y ligero descenso de nuevo en 2070-2100.

La incertidumbre plantea diferentes retos a la hora de aplicar los resultados. Los resultados de mayor aplicación de este estudio son las variaciones porcentuales de valores estadísticos medios de variables hidroclimáticas pronosticados para cada uno de los PI. Un aspecto crítico es cómo aplicar estas variaciones porcentuales, o cómo trasladar

esas variaciones a porcentajes correctores que tengan en cuenta el cambio climático en el futuro.

Lo más sencillo e intuitivo es aplicar esos porcentajes a los valores obtenidos en la simulación de recursos hídricos que se basa en valores climáticos, físicos e hidrológicos observados (ej.: a las series de APN obtenidas de un modelo hidrológico de precipitación – aportación). De ese modo, se obtendrían unos recursos hídricos corregidos por los porcentajes de cambio debido al cambio climático. No obstante, no es evidente la forma de aplicar esas variaciones porcentuales.

Primeramente hay que decidir cómo tratar el conjunto de las proyecciones climáticas. Las variaciones se han estimado para cada una de las 12 proyecciones. Debido al sesgo de las proyecciones y a su incertidumbre, es conveniente tomar un valor que represente al conjunto de las mismas en vez del de una sola, pero no es evidente qué valor tomar.

Un aspecto controvertido ligado con el amplio rango de resultados es la ponderación de los mismos en función de la incertidumbre de la proyección, de manera que se podría dar más valor a los cambios estimados por aquellas proyecciones que mejor ajusten los datos observados, o cuyos resultados sean menos discrepantes con el resto de proyecciones o que tengan mayor continuidad espacial y temporal. No obstante, el comportamiento es diferente por zonas, de manera que en algunas zonas cuadra mejor una proyección y en otras otra.

Así por ejemplo, y con relación al ajuste, las proyecciones FA son las que tienen menor sesgo en las DDHH mediterráneas, en donde los resultados de impacto están sujetos a una destacada incertidumbre porque las proyecciones infravaloran la ya escasa PRE de esas zonas. En concreto, el cambio medio estimado en la DDHH del Júcar en 2010-2040 es -4% para el RCP 4.5 y -11% para el RCP 8.5, mientras que los estimados por las proyecciones con menos sesgo (FA) son +5% para el RCP 4.5 y +15% para el RCP 8.5. Algo similar ocurre en las Islas Baleares, donde por ejemplo, el incremento para 2010-2040 y RCP 8.5 es del -16% si se considera el promedio de las proyecciones y sólo del -3% según F8A. De ese modo, se podría sugerir dar más peso a aquellas proyecciones que mejor ajustan la PRE y menor a aquellas que tengan un fuerte sesgo, incluso rechazarlas, con lo que los valores de impacto podrían cambiar sustancialmente.

Sin embargo, a falta de métodos validados de ponderación, es habitual considerar que las proyecciones son equiprobables. En estos casos se suele utilizar la media aritmética para evaluar el impacto del conjunto de proyecciones, ya que está empíricamente demostrado que los errores sistemáticos procedentes de las fuentes de incertidumbre tienden a contrarrestarse cuando se promedian los resultados de un amplio conjunto de proyecciones.

Se puede tomar la media del RCP 4.5, del RCP 8.5 o de ambos. Debido a que el RCP 8.5 supone un cambio mayor que se traduce en una reducción mayor de recursos hídricos en España, adoptar el promedio del RCP 8.5 implicaría apostar por el lado de la seguridad, pero podría suponer la realización de medidas más drásticas y costosas. Contrariamente, adoptar el promedio del RCP 4.5 implicaría aceptar un mayor riesgo pero se podrían ejecutar las medidas de adaptación y mitigación más fácilmente. Según el acuerdo de la cumbre de cambio climático de París de 2015, se indicaba que el RCP más probable sería el 6.0, intermedio entre los dos anteriores. Con objeto de simplificar y teniendo en cuenta la incertidumbre en los

pronósticos futuros del cambio climático, otra opción sería aplicar la media de los resultados de ambos RCP, ya que el RCP 8.5 supondría cambios más drásticos que el RCP 6.0 y el RCP 4.5 menos.

Otro aspecto que surge habitualmente es la determinación de los horizontes futuros en los que evaluar el impacto del cambio climático. Habida cuenta de las incertidumbres y de que el tiempo meteorológico es cambiante, no tiene sentido evaluar el impacto para un año futuro concreto, sino para un periodo lo suficientemente largo para poder considerarse representativo, no inferior a 30 años, como se ha indicado anteriormente. De ese modo, la evaluación del impacto de cambio climático para un horizonte futuro no significa tomar los resultados para un año concreto sino los de un periodo amplio de un mínimo de 30 años centrado en ese año u horizonte concreto. Utilizar las medias estadísticas de periodos es lo más sencillo y habitual (California Department of Water Resources 2010, Seattle Public Utilities 2013).

Derivado del sesgo de los valores climáticos de partida surge la duda sobre la representatividad del PC y cómo aplicar los porcentajes de cambio a las series observadas. Para este estudio, el PC se ha establecido en los 39 años hidrológicos que van de 1961 a 2000 intentando abarcar el mayor periodo posible para los que hay valores puestos a disposición pública por AEMET. Los porcentajes de cambio se refieren a cambios sobre ese PC. No obstante, las características climáticas de las proyecciones en ese PC difieren considerablemente, sobre todo en el caso de la PRE, de las características climáticas observadas. En particular, las proyecciones no recogen las tendencias negativas de la PRE observada en dicho periodo ni tampoco los ciclos secos-húmedos. La cuestión radica en qué significa el PC de los valores simulados, si esos valores pueden equipararse a los valores climáticos observados en dicho periodo o más bien representan la situación “actual”, el clima actual. No hay criterios para pensar que los porcentajes de cambio hubieran sido sustancialmente diferentes si el PC en vez de 1961-2000 hubiera sido 1961-1990 o 1951-2000 por ejemplo, ya que dependería de que las series climáticas simuladas recogieran o no la tendencia negativa de las series observadas, básicamente de PRE.

Ello está relacionado con el origen de las tendencias negativas en las series observadas, especialmente si el descenso de PRE o ESC de las últimas décadas está relacionado o no con el cambio climático. Suponer una u otra hipótesis conllevaría diferentes maneras de aplicar los resultados de impacto y por lo tanto tendría implicaciones en la estimación de los valores futuros.

Aplicación de los resultados en la planificación hidrológica

Uno de los campos fundamentales en los que se aplican los resultados de evaluaciones de impacto del cambio climático en los recursos hídricos es la planificación hidrológica. Si bien el conjunto de las variables del ciclo hidrológico caracterizan los recursos hídricos de una zona, son las variables ESC y APN las que mejor los definen y tienen mayor utilidad práctica.

Según la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH) (MARM 2008), los planes hidrológicos de cuenca se

han de revisar cada 6 años. Los siguientes han de aprobarse en 2021 y deberán considerar dos horizontes temporales futuros: 2027 y 2039. La IPH establece que en el análisis del horizonte temporal a largo plazo, correspondiente en los próximos planes al año 2039, debe tenerse en cuenta el posible efecto del cambio climático sobre los recursos hídricos naturales de la DH.

La IPH establece además que las series de recursos hídricos que se deben utilizar en la elaboración de los planes hidrológicos son la serie larga de observaciones del periodo histórico (1940-2006²) y la serie corta del periodo histórico (1980-2006), periodos extendidos hasta donde sea posible en cada revisión de los planes de cuenca. El motivo de esta circunstancia es la tendencia negativa que experimentan los recursos hídricos de la serie larga, por lo que son mayores en promedio que los de la serie corta.

Por otro lado, el impacto evaluado en este estudio se ha expresado como cambios de propiedades estadísticas medias de periodos futuros de 30 años con relación a un PC de 39 años. Habida cuenta de los valores disponibles, se tomaron los periodos futuros de impacto 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100.

En el anterior informe del CEDEX (2010) se equiparó la situación climática del PC de los valores de las proyecciones con la de los datos observados en el mismo PC. Por ello, se dieron porcentajes de cambio para cada DH corregidos según la relación existente entre los recursos hídricos evaluados con datos observados del PC y la serie de recursos hídricos utilizada para los planes hidrológicos de cuenca. Así por ejemplo, un porcentaje de cambio del -8% en ESC para España según SRES B2 para el periodo 2011-2040 respecto al PC 1961-1990, suponía aplicar un cambio del -5% a los recursos hídricos de 1940-2006. Esta menor reducción, -5% frente al -8%, se debe a que el periodo 1961-1990 es ligeramente más húmedo que el 1940-2006.

Al aplicar el mismo procedimiento a los resultados de este estudio, se obtendrían los porcentajes de cambio para el periodo 2010-2040 que figuran en las dos últimas columnas de la tabla 6. Los resultados se diferencian de los que aparecen en la tabla 3 en función de la diferencia de ESC de los datos observados en el periodo 1961-2000 y en el 1940-2006. El periodo 1961-2000 tiene una ESC similar a la del 1940-2006 para el conjunto de España, un poco mayor en las cuencas del Guadiana y de Andalucía y un poco menor en el SE y Canarias. Sorprende Baleares, ya que el periodo 1961-2000 es un 24% más seco que el 1940-2006, lo que unido a las previsiones desfavorables de impacto para el PC da unos porcentajes de cambio muy drásticos, como también ocurría en CEDEX 2010. Hay que tomar con mucha precaución estos porcentajes de cambio en Baleares y Canarias ya que la escasez de datos sobre series de PRE y de caudales en los archipiélagos durante los primeros años de la década de 1940 y los bajos caudales de agua superficial arrojan mucha incertidumbre en los resultados de la interpolación e imposibilitan una fiable calibración de los caudales simulados.

² Tal como ya se ha comentado anteriormente, los periodos temporales considerados en este estudio corresponden a años hidrológicos y se indican con el primer y último año natural, por lo que 1940-2006 sería 1940/41-2005/06.

Tabla 6. Porcentaje de cambio para considerar el efecto del cambio climático según la IPH (horizonte 2027), CEDEX 2010 y el presente estudio (2010-2040 en relación a 1940-2006)

DDHH - Ámbito ³	IPH-LBAE	CEDEX 2010		Presente Estudio	
		SRESB2	SRESA2	RCP 4.5	RCP 8.5
España	-5	-5	-6	-3	-7
Miño-Sil	-3	-2	-5	-4	-7
Galicia Costa	-2	-4	-7	-4	-7
Cantábrico Oriental	-2	-9	-11	-4	-8
Cantábrico Occidental	-2	-8	-11	-2	-6
Duero	-6	-5	-7	-5	-10
Tajo	-7	-7	-7	-5	-10
Guadiana	-11	-2	-6	1	-5
Guadalquivir	-8	-8	-6	0	-7
Cuencas Andaluzas	-7	-7	-4	1	-7
Guadalete y Barbate				3	-4
Tinto, Odiel y Piedras				3	-7
Segura	-11	-8	-5	-8	-11
Júcar	-9	-12	-3	-8	-15
Ebro	-5	-5	-5	-1	-5
Cuencas Internas de Cataluña	-5	-7	0	7	-3
Islas Baleares	-7	-34	-25	-29	-36
Canarias	-10	-28	-20	-12	-20

Por otro lado, en el estudio actual destacan las menores reducciones estimadas para las DDHH cantábricas según los dos RCP, para las DDHH del Guadalquivir y Andaluzas según el RCP 4.5 y para la DH de las Cuencas Internas de Cataluña también según RCP 4.5. En el lado contrario, en el estudio actual se dan reducciones para el RCP 8.5 algo mayores para el Duero y Tajo y, sobre todo, destacan las fuertes reducciones para el Segura y Júcar para el RCP 8.5. Hay que tener en cuenta que en el estudio actual, los porcentajes de cambio para el RCP 8.5 indican reducciones de ESC mayores que para el RCP 4.5, tal como era previsible según las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a ambos RCP. Estos resultados son más coherentes que los del estudio anterior, que no mostraban apenas diferencias entre ambos escenarios de emisiones (caso del Ebro) e incluso se pronosticaban mayores reducciones para el SRES B2 que para el A2 en varias DDHH del sur y este de España (caso del Júcar).

En la tabla 6 aparecen también los porcentajes dados en el estudio en el Libro Blanco del Agua en España (LBAE) para el año 2030 y el escenario 1 (aumento de 1°C en la temperatura media anual), que fueron luego adoptados en la IPH para considerar el efecto del cambio climático en el horizonte de planificación 2027 en las cuencas intercomunitarias.

Como se ha dicho antes, los próximos planes hidrológicos de cuenca que se aprueben para el 2021 deberán tener en cuenta el cambio climático para calcular los recursos hídricos

³ Las actuales DDHH de Guadalete y Barbate y Tinto, Odiel y Piedras no estaban individualizadas en IPH y en CEDEX 2010.

en el horizonte de planificación a largo plazo, del año 2039. Por lo tanto, se considera que lo más adecuado y sencillo es que se adopten los porcentajes intermedios que resultan para el periodo 2010-2040 y el periodo 2040-2070, puesto que el año 2039 está prácticamente en la frontera entre ambos. La incorporación del efecto del cambio climático supone aplicar a las series de ESC 1940-2006 (periodo indicado en la IPH), los porcentajes que se muestran en la tabla 7 (media de los cambios de los periodos 2010-2040 y 2040-2070). Como se ha comentado anteriormente, se pueden aplicar los porcentajes del escenario de emisiones RCP 4.5, del RCP 8.5 o su promedio, en función de los criterios socio-políticos de aceptación del riesgo y de la incertidumbre asociada al mismo por parte de los responsables de la planificación hidrológica.

Tabla 7. Porcentaje de cambio a aplicar a las series de ESC 1940-2006 para considerar el efecto del cambio climático en el horizonte 2039

Cambios para 2039 vs. 1940-2006	RCP 4.5	RCP 8.5
España	-7	-11
Miño-Sil	-8	-10
Galicia Costa	-9	-10
Cantábrico Oriental	-8	-11
Cantábrico Occidental	-6	-9
Duero	-9	-13
Tajo	-9	-13
Guadiana	-3	-10
Guadalquivir	-4	-12
Cuencas Mediterráneas Andaluzas	-1	-11
Guadalete y Barbate	0	-9
Tinto, Odiel y Piedras	-1	-11
Segura	-11	-18
Júcar	-12	-21
Ebro	-5	-9
Cuencas Internas de Cataluña	2	-5

Los porcentajes de cambio de series anuales de una DH se pueden aplicar a todos los puntos de la DH, simplificando su uso al considerar la incertidumbre inherente a los estudios de cambio climático. No obstante, podría ser conveniente aplicar diferentes porcentajes cuando haya diferencias relevantes en los cambios estimados en diferentes zonas dentro de una DH, tal como plantean Marcos-García y Pulido-Velázquez (2017) en la DH del Júcar, donde la reducción de recursos hídricos pronosticada en éste y otros estudios sería mayor en cabecera que en las subcuencas mediterráneas. La aplicación informática CAMREC (CEDEX 2017) posibilita la obtención de porcentajes de cambio para aquellas zonas que determine el usuario, de manera que se pueden aplicar los resultados de este estudio también a otras subzonas dentro del ámbito territorial de una DH.

6. CONCLUSIONES

Se ha actualizado la evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en España, según 12 proyecciones climáticas regionalizadas en España por AEMET a partir de resultados de simular con modelos climáticos globales y escenarios de emisiones de gases de efecto

invernadero considerados en el 5º y último informe de evaluación del IPCC.

Los valores de partida ajustan bien las temperaturas observadas en el periodo de control, pero hay un peor ajuste de las precipitaciones. La mayoría de las proyecciones sobreestiman la precipitación en las grandes cuencas atlánticas y la infravaloran en las cuencas de la vertiente mediterránea y en los archipiélagos. El patrón del ciclo anual de la precipitación se recoge a grandes rasgos, salvo en las cuencas mediterráneas lo que, añadido a la infravaloración de la precipitación, incide en la incertidumbre de los resultados en esas cuencas.

Se ha optado por no corregir el sesgo con objeto de no introducir otra fuente de incertidumbre y de no alterar las relaciones entre las variables de partida. En consecuencia, el impacto se ha evaluado comparando los valores hidroclimáticos obtenidos mediante el modelo hidrológico SIMPA usando por un lado la precipitación y temperaturas simuladas futuras y por el otro, la precipitación y temperaturas simuladas en el periodo de control.

Hay una gran disparidad de resultados según las proyecciones, síntoma de la incertidumbre de los resultados. La incertidumbre es mayor en el Levante peninsular y archipiélagos.

Las proyecciones del modelo climático MRI.CGCM3 son las más favorables, ya que son las que pronostican un mayor incremento de recursos hídricos en la mayor parte de España, salvo en Levante. En el lado contrario, las proyecciones del modelo climático MIROC.ESM son muy desfavorables al pronosticar grandes reducciones de recursos hídricos. El resto de proyecciones dan, con carácter general, reducciones de recursos hídricos.

El conjunto de los resultados apunta a una reducción de recursos hídricos que se iría acentuando conforme avanzara el siglo XXI. La reducción sería más notable en el escenario de emisiones RCP 8.5 que en el RCP 4.5, haciéndose más marcada esta diferencia conforme avanzara el siglo XXI. La disparidad de resultados aumenta de norte a sur, al igual que lo hace la reducción de recursos hídricos estimada como promedio de los cambios de las proyecciones. La reducción de recursos hídricos sería más intensa hacia el sur peninsular y en los archipiélagos y menor reducción, o incluso aumento en algunas zonas del este peninsular. Con relación a la estacionalidad, hay una tendencia a concentrarse los recursos hídricos en los meses alrededor de febrero.

Las medias de los cambios proyectados para España según los escenarios RCP 4.5 y 8.5 son respectivamente para la precipitación del -2% y -4% para 2010-2040, -6% y -8% para 2040-2070 y -7% y -14% para 2070-2100; para la ETP del 3% y 4% para 2010-2040, 7% y 10% para 2040-2070 y 9% y 17% para 2070-2100, siendo menor el incremento en las zonas de costa; para la ETR del -1% y -3% para 2010-2040, -3% y -4% para 2040-2070 y -3% y -6% para 2070-2100; para la humedad del suelo en relación con su contenido máximo de agua del -2% y -2% para 2010-2040, -4% y -5% para 2040-2070 y -5% y -8% para 2070-2100 y para la recarga de los acuíferos del -3% y -7% para 2010-2040, -11% y -14% para 2040-2070 y -13% y -24% para 2070-2100.

Los cambios estimados en la escurrentía muestran rangos de variación para el conjunto de España que van del -14% a +20% para 2010-2040, -29% a +9% para 2040-2070 y -43% a +4% para 2070-2100. Promediando los resultados de las proyecciones; los cambios para los RCP 4.5 y 8.5

son respectivamente del -3% y -7% para 2010-2040, -11% y -14% para 2040-2070 y -13% y -24% para 2070-2100.

Esta actualización da resultados más coherentes con los escenarios de emisiones, tienen más continuidad espacial y pronostican, en general, menores reducciones de recursos hídricos para el siglo XXI que los del estudio anterior realizado en el 2010 por el CEDEX con la misma temática y ámbito.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Oficina Española de Cambio Climático el haber impulsado y financiado este trabajo y a Agencia Estatal de Meteorología su asistencia y el suministro de la información climática de partida.

8. BIBLIOGRAFÍA

AEMET (2008). *Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España*. Agencia Estatal de Meteorología. Madrid: Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., y Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Estudio FAO riego y drenaje 56. Roma: FAO.

Álvarez-Rodríguez, J. (2011). *Estimación de la distribución espacial de la precipitación en zonas montañosas mediante métodos geoestadísticos*. Tesis Doctoral. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

Álvarez-Rodríguez, J., Sánchez, A., y Quintas, L. (2005). SIMPA, a GRASS based tool for Hydrological Studies. *International Journal of Geoinformatics*, 1(1). Association for Geoinformation Technology. *Proceedings of the FOSS/GRASS Users Conference, Bangkok, Tailandia, 12-14 September 2004*.

Arenillas, M., Cobos, G., y Navarro, J. (2008). Datos sobre la nieve y los glaciares en las cordilleras españolas. El programa EHRIN (1984-2008). Dirección General del Agua, Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. http://www.mapama.gob.es/es/agua/publicaciones/Libro_ERHIN_tcm7-190926.pdf (acceso 5-6-2017).

Arnell, N.W. (2003). Effects of IPCC SRES* emissions scenarios on river runoff: a global perspective. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7(5): pp. 619-641.

Ayala, F.J. (1996). Reducción de los Recursos Hídricos en España por el posible Cambio Climático. *Tecnoambiente*, 64, pp. 43-48.

Barranco, L.M. (2011). *Evaluación del impacto hidrológico del cambio climático en España. Valoración de las proyecciones climáticas*. Tesis Doctoral. Madrid: Universidad Complutense de Madrid (UCM).

Barranco, L.M., Álvarez-Rodríguez, J., Olivera, F., Potenciano, Á., Quintas, L., y Estrada, F. (2014). Assessment of the expected runoff change in Spain using climate simulations. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(7): pp. 1481-1490.

Berg, P., Feldmann, H., y Panitz, H.J. (2012). Bias correction of high resolution regional climate model data. *Journal of Hydrology*, 448-449, pp. 80-92.

Bovolo, C.I. et al. (2011). Climate Change, Water Resources and Pollution in the Ebro Basin: Towards an Integrated Approach. *The Handbook of Environmental Chemistry*, 13/2011 (The Ebro Basin): pp. 295-329. Doi: 10.1007/698_2010_86

Budyko, M.I. (1974). *Climate and Life*. San Diego (CA/USA): Academic Press.

Cabezas, F. (2004). Cambio climático y recursos hídricos en la planificación hidrológica. *Ingeniería y territorio*, 68, pp. 10-15.

Calbó et al. (2016). Projeccions climàtiques i escenaris de futur. En: *Tercer informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*. Institut d'Estudis Catalans, Generalitat de Catalunya, pp. 113-133.

California Department of Water Resources (2010). *Climate Change Characterization and Analysis in California Water Resources Planning Studies. Final Report*. http://www.water.ca.gov/climatechange/docs/DWR_CCCStudy_FinalReport_Dec23.pdf (acceso 4-05-2017).

Candela, L., Tamoh, K., y Olivares, G. (2012). Modelling impacts of climate change on water resources in ungauged and data-scarce watersheds. Application to the Siurana catchment (NE Spain). *Science of the Total Environment*, 440, pp. 253-260.

CEDEX (2010). *Estudio de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos y las masas de agua. Ficha 1: Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural*. Informe Técnico Centro de Estudios Hidrográficos - CEDEX, Tomo único, clave CEDEX 42-407-1-001. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento. http://www.mapama.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/ImpactoCCRecursosHidricos_tcm30-98559.pdf (acceso 03-04-2018).

CEDEX (2017). *Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España*. Informe Técnico Centro de Estudios Hidrográficos - CEDEX, Tomo único, clave CEDEX 42-415-0-001. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento. http://www.cedex.es/CEDEX/LANG_CASTELLANO/ORGANISMO/CENTYLAB/CEH/Documentos_Descargas/ (acceso 03-04-2018).

Corzo, F., Bastos, M., Domínguez, J.A., y González, F. (2013). *Plan de Adaptación al Cambio Climático de Extremadura del Sector Recursos Hídricos*. Badajoz: Consejería de Agricultura, Desarrollo Rural, Medio Ambiente y Energía (Gobierno de Extremadura).

Chirivella, V. (2010). *Caracterización de los futuros escenarios climáticos en la Comunidad Valenciana: propuestas de mejora para la evaluación de la oferta y demanda de recursos hídricos*. Tesis Doctoral. Valencia: ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Valencia (UPV).

Delgado, J. et al. (2010). Modelling the hydrological response of a Mediterranean medium-sized headwater basin subject to land cover change: The Cardener River basin. *Journal of Hydrology*, 383(1-2): pp. 125-134.

Ehret, U., Zehe, E., Wulfmeyer, V., Warrach-Sagi, K. y Liebert, J. (2012). Should we apply bias correction to global and regional climate model data? *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9): pp. 3391-3404.

Estrela, T., y Quintas, L. (1996). El Sistema Integrado de Modelización Precipitación Aportación, SIMPA. *Ingeniería Civil*, 104, pp. 43-52.

Fernández, P. (2002). *Estudio del impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos: Aplicación en diecinueve pequeñas cuencas en España*. Tesis Doctoral. Madrid: ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

Garrote, L., de Lama, B., y Martín, F. (2007). Previsiones para España según los últimos estudios de cambio climático. En: *El Cambio Climático y sus consecuencias en el Sector del Agua*. Madrid: Ed. Univ. Rey Juan Carlos-Aqualia, pp. 3-15.

GRASS Development Team (2015). Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software. Open Source Geospatial Foundation Project. <https://grass.osgeo.org> (acceso 26-04-2018).

Hargreaves, G.H., y Allen, R.G. (2003). History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(1): pp. 53-63.

Hernández, L. (2007). *Efectos del cambio climático en los sistemas complejos de recursos hídricos. Aplicación a la cuenca del Júcar*. Tesis Doctoral. Valencia: ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Valencia (UPV).

IGN (2000). *Image & CORINE Land Cover 2000*. Ministerio de Fomento. <http://www.ign.es/ign/layoutIn/corineLandCover.do> (acceso 14-02-2011).

INM (1995). *Informe de España sobre el Cambio Climático. Convenio Marco sobre el Cambio Climático de Naciones Unidas*. Madrid: Agencia Estatal de Meteorología. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.

IPCC (2013). *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. et al. (eds.)]. Nueva York (NY/USA): Cambridge University Press.

Jiménez Cisneros, B.E. et al. (2014). Freshwater resources. En: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B. et al. (eds.)]. Nueva York (NY/USA): Cambridge University Press, pp. 229-269.

Junta de Andalucía (2012). *Estudio Básico de Adaptación al Cambio Climático Sector Recursos Hídricos*. Sevilla: Consejería de Medio Ambiente.

Kendall, M.G. (1975). *Rank Correlation Methods*. Londres: Charles Griffin & Co. Ltd.

Koutsoyiannis, D. (2013). Hydrology and change. *Hydrological Sciences Journal*, 58(6): pp. 1177-1197.

López-Moreno, J.L., Goyette, S., y Beniston, M. (2009). Impact of climate change on snowpack in the Pyrenees: Horizontal spatial variability and vertical gradients. *Journal of Hydrology*, 374(3-4): pp. 384-396.

Manzano, A. (2010). Ejemplos de modelización hidrológica del régimen medio de los ríos catalanes en escenarios futuros. En: *Agua y Cambio Climático. Diagnóstico de los impactos previstos en Cataluña*. Agencia Catalana del Agua, Generalidad de Cataluña, pp. 127-141.

Maraun, D. et al (2017). Towards process-informed bias correction of climate change simulations. *Nature climate change*, 7, pp. 764-773.

Marcos-García, P., y Pulido-Velázquez, M. (2017). Cambio climático y planificación hidrológica: ¿es adecuado asumir un porcentaje único de reducción de aportaciones para toda la demarcación? *Ingeniería del Agua*, 21(1): pp. 35-52.

MARM (2008). ORDEN ARM/2656/2008 del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, de 10 de septiembre, por la que se aprueba la instrucción de planificación hidrológica. BOE, 22 de septiembre de 2008, nº 229: 38472-38582. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.

Martínez, E. (2010). Evaluación del impacto producido por el cambio climático sobre los recursos hídricos de varias cuencas piloto catalanas y navarras. *Tecniberia*, 26, pp. 49-51.

Mas-Pla et al. (2016). Recursos hidrológicos. En: *Tercer informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*. Institut d'Estudis Catalans, Generalitat de Catalunya, pp. 161-187.

MIMAM (2000). *Libro Blanco del Agua en España*. Madrid: Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.

Mitchell, T.D., y Hulme, M. (1999). Predicting regional climate change: living with uncertainty. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 23(1): pp. 57-78.

Ortuño, F., Jódar, J., y Carrera, J. (2009). Canvi climàtic i recàrrega d'aqüífers a Catalunya. En: *Aigua i canvi climàtic. Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya*. Agència Catalana de l'Aigua, Generalitat de Catalunya, pp. 143-152.

Pascual, D. et al. (2014). Impacts of climate change on water resources in the Mediterranean Basin: a case study in Catalonia, Spain. *Hydrological Sciences Journal*, 60(12): pp. 2132-2147. Doi: 10.1080/02626667.2014.947290

Quintas, L. (1996). La base de datos hidrológicos HIDRO del CEDEX. *Ingeniería Civil*, 104, pp. 117-126.

Quiroga, S. et al. (2010). The economic value of drought information for water Management under climate change: a case study in the Ebro basin. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(3): pp. 643-657. Doi: 10.5194/nhess-11-643-2011

R Development Core Team (2018). *R: A language and environment for statistical computing*. Viena (Austria): R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org> (acceso 26-04-2018).

Samper, J., y Álvares, D. (2005). *Evaluación de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos del río Ebro*. Oficina de Planificación Hidrológica de la Confederación Hidrográfica del Ebro, Dirección General del Agua, Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.

Seattle Public Utilities (2013). *2013 Water System Plan: Our Water. Our Future. Vol 1*. <http://www.seattle.gov/util/MyServices/Water/AbouttheWaterSystem/Plans/WaterSystemPlan/index.htm> (acceso 4-05-2017).

Témez, J.R. (1977). *Modelo matemático de transformación "precipitación-aportación"*. Madrid: ASINEL.

Teutschbein, C., y Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, 456-457, pp. 12-29.

Trewin, B.C. (2007). *Función de las normales climatológicas en un clima cambiante*. OMM, nº 43. [Baddour, O., y Kontongomde, H. (eds.)]. Ginebra: OMM.

Zambrano-Bigiarini, M., Majone, B., Bellin, A., Bovolo, C.I., Blenkinsop, S., y Fowler, H.J. (2011). Hydrological Impacts of Climate Change on the Ebro River Basin. *The Handbook of Environmental Chemistry, 13/2011 (The Ebro Basin)*: 47-75. Doi: 10.1007/698_2010_85