

Análisis de incertidumbre de las proyecciones climáticas en relación a las aportaciones históricas en la Cuenca del Júcar

Uncertainty analysis of climate projections in relation to historical contributions in the Júcar River Basin

Suárez-Almiñana, S. ^{a1}, Solera, A. ^{a2}, Andreu, J. ^{a3}, García-Romero, L. ^{a4}

^{a1}Instituto universitario de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), Universitat Politècnica de València (UPV), Camino de Vera s/n, CP: 46022, Valencia, España.

E-mail: ^{a1} sasual@upv.es, ^{a2} asolera@upv.es, ^{a3} ximoand@upv.es, ^{a4} ligarro@doctor.upv.es

Recibido: 30/07/2019

Aceptado: 27/02/2020

Publicado: 30/04/2020

Citar como: Suárez-Almiñana, S., Solera, A., Andreu, J., García-Romero, L. (2020). Uncertainty analysis of climate projections in relation to historical contributions in the Júcar River Basin. *Ingeniería del agua*, 24(2), 89-99. <https://doi.org/10.4995/la.2020.12149>

RESUMEN

En este estudio se pretende evaluar el efecto del cambio climático en las aportaciones futuras de la Cuenca del Júcar (este de España) y la incertidumbre asociada a ellas, entendiendo como tal la relacionada con la toma de decisiones en el manejo de las proyecciones climáticas durante todo el proceso evaluado. Para ello se seleccionaron variables meteorológicas de 9 proyecciones climáticas pertenecientes a los escenarios de emisión 4.5 y 8.5, se corrigió el sesgo y se introdujeron en un modelo hidrológico para la simulación de caudales. Finalmente, se evaluó el impacto mediante la comparación de los caudales futuros con el periodo histórico. Dependiendo de los datos históricos que manejemos, el cambio de los caudales futuros puede oscilar de media entre -8% y -28% para final de siglo. Sin embargo, si se tiene en cuenta la posibilidad de comparar con un periodo que represente la situación actual de la cuenca, este cambio se estima entre a un -8% y -13%, permitiendo así obtener conclusiones más concretas sobre el futuro de los recursos hídricos en esta cuenca.

Palabras clave | Cuenca del Júcar; cambio climático; incertidumbre; aportaciones futuras; modelo hidrológico.

ABSTRACT

The aim of this study is to evaluate the effect of climate change on the future contributions of the Júcar River Basin (eastern Spain) and the uncertainty associated to them, which in this case is referred to that derived from the decision taken in the handling of climate projections during the entire evaluation process. For this purpose, meteorological variables were selected from 9 Regional Climate Models belonging to the Representative Concentration Pathways 4.5 and 8.5. Then, they were bias corrected and introduced into a hydrological model for the simulation of flows. Finally, the effect of climate change was evaluated by comparing future flows with those of the historical period. Depending on the historical data we manage, the change in future flows can range from an average of -8% to -28% by the end of the century. However, if the possibility of comparing them with a period that represents the current situation of the basin is considered, this change is estimated between -8% and -13%, thus allowing more concrete conclusions about the future of water resources in this basin.

Key words | Júcar River Basin; climate change; uncertainty; future contributions; hydrological model.

INTRODUCCIÓN

Los estudios sobre los impactos del cambio climático han ido cobrando fuerza en las últimas décadas hasta ser incluidos en la legislación española, como ha ocurrido en el caso de la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH) (MARM, 2008), donde se dice que los Planes Hidrológicos de Cuenca (PHC) se revisen cada 6 años e incluyan el posible efecto del cambio climático sobre los recursos hídricos de cada demarcación hidrográfica, teniendo en cuenta varios horizontes futuros.

Uno de los datos clave para la estimación de los impactos del cambio climático en las cuencas es el escenario hidrológico al que éstas se van a enfrentar en el futuro. Estos datos son aparentemente cada vez más asequibles debido a la mayor disponibilidad e información acerca de proyecciones climáticas proporcionadas por los servicios climáticos. Uno de los más conocidos es CORDEX (*Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*), una base de datos internacional donde se pueden obtener proyecciones climáticas de todo el mundo y que también dispone de un dominio europeo (EURO-CORDEX). Sin embargo, la cantidad de proyecciones y variables disponibles es ingente, por lo que se han creado algunos portales a nivel europeo que simplifican su búsqueda (p.ej. IS-ENES Climate4Impact) o disponen de una interfaz gráfica en la que se pueden observar los cambios de las variables e indicadores climáticos (en mapas y gráficos) dependiendo de los horizontes futuros y la escala espacial seleccionada (p.ej. EdGE Copernicus Project).

Una mezcla entre estas dos opciones y dedicado a los recursos hídricos es SWICCA (*Service for Water Indicators in Climate Change Adaptation, Copernicus project*), un portal desarrollado a escala europea por el SMHI (*Swedish Meteorological and Hydrological Institute*) junto con otros colaboradores, entre los que se encuentra el IIAMA-UPV (Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente de la Universitat Politècnica de València), que dispone de predicciones estacionales y de cambio climático, tanto para descargar como para visualizar a través de mapas y gráficos interactivos. Además, disponen de gran variedad de indicadores relacionados con la cantidad y calidad del agua, el aire, la temperatura y escenarios socioeconómicos. La variedad de escalas espaciales disponibles y la facilidad de descarga en un formato ampliamente utilizado (.xlsx) también son aspectos a tener en cuenta para elegir este tipo de portales.

También hay servicios climáticos regionalizados para España, como la base de datos proporcionada por AEMET (Agencia Estatal de Meteorología) que fue utilizada en el informe del CEDEX (2017) sobre el impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en las cuencas más importantes de España. Las proyecciones usadas en este informe provienen de los modelos globales utilizados en el 5º informe de evaluación (AR5) del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2014), uno de los documentos de referencia a nivel mundial, en el que se estima una disminución de precipitaciones y aumento de temperaturas en el sur de Europa.

Además de estos estudios de referencia, también se han publicado varios trabajos y artículos que recogen metodologías de evaluación del impacto del cambio climático en la hidrología y sistemas de recursos hídricos de algunas cuencas españolas, sobre todo en aquellas más problemáticas desde el punto de vista de la escasez hídrica, tal como la Cuenca del Júcar (Hernández, 2007; Marcos-García et al., 2017; Suárez-Almiñana et al., 2017). Esta cuenca fue seleccionada como zona de estudio debido a su gran variabilidad hidrológica, lo que la lleva a hacer frente a sequías recurrentes que duran varios años. Además, si tenemos en cuenta que estos eventos pueden ser más frecuentes e intensos en el futuro (CEDEX, 2017), es de esperar que los problemas de escasez se incrementarán y será necesaria una toma de decisiones temprana guiada por una evaluación de impacto más acertada.

Sin embargo, en la mayoría de los estudios citados anteriormente, se hace referencia a la gran incertidumbre que llevan asociadas estas proyecciones y los métodos para trabajar con ellas, aunque se intenta disminuir aplicando métodos como la bajada de escala y la corrección del sesgo. A pesar de ser técnicas ampliamente utilizadas también tienen sus detractores y no garantizan la fiabilidad de los resultados, ya que en ciertas zonas (como la mediterránea) la calidad de estos datos no es muy buena y lograr su ajuste resulta complicado (Suárez-Almiñana et al., 2017; Barranco et al., 2018). Además, hay otras fuentes de incertidumbre que se suman en el proceso, como la asociada a los modelos que se utilizan en la zona de estudio (Marcos-García y Pulido-Velazquez, 2017) y la forma de trabajar con las proyecciones climáticas. Aunque lo más extendido en la literatura es trabajar con el ensamblado de los Modelos Climáticos Regionales (MCR) seleccionados, ya sea con la media de todos ellos o la de los pertenecientes a cada Senda Representativa de Concentración (SRC), algunos autores escogen trabajar con un solo modelo o con el conjunto de los que más se aproximen a los datos observados en su periodo de referencia. Sin embargo, no se recomienda trabajar con un solo modelo

ya que puede dar lugar a resultados con comportamientos alejados de la realidad (Collados-Lara et al., 2018). Todos estos aspectos son abordados en este estudio.

El principal objetivo de este trabajo es poner de manifiesto la incertidumbre asociada al manejo de las proyecciones climáticas mediante la toma de decisiones (acertadas o no) asociadas al proceso de evaluación de impacto de los caudales futuros en la Cuenca del Júcar e intentar reducirla.

Para ello, en el siguiente apartado se presenta la metodología propuesta, prestando atención a cada paso y teniendo en cuenta las características de la zona de estudio. Posteriormente, los resultados y la discusión se ofrecen en un único apartado, finalizando con el capítulo de las conclusiones obtenidas de este análisis.

MATERIAL Y MÉTODOS

En este apartado se explica una metodología muy sencilla desarrollada para evaluar el efecto del cambio climático en las aportaciones futuras de la Cuenca del Júcar. Para ello, como se indica en la Figura 1, se necesitan datos de proyecciones climáticas de precipitación (P) y temperatura (T) y de datos históricos (observados), esto con el objetivo de poder comparar un periodo de referencia y analizar si pueden considerarse estadísticamente similares. Si no es así, una corrección del sesgo es aconsejable. En ese caso, se corrige el periodo de referencia de las proyecciones y se extiende a los periodos futuros. Una vez los datos han sido corregidos, se introducen en el modelo hidrológico para obtener tanto las aportaciones del periodo de referencia como las futuras. Por último, para evaluar el posible impacto del cambio climático, se comparan los periodos futuros con el periodo de referencia y se muestra este resultado en forma de porcentaje, dejando ver así la tendencia que siguen los caudales futuros.

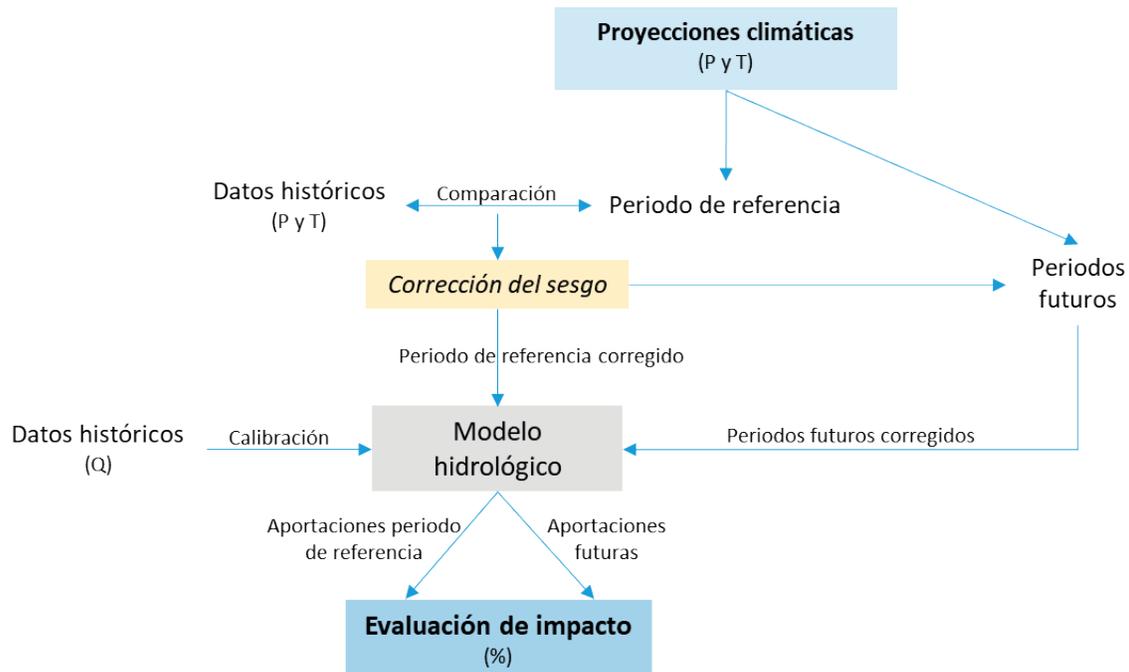


Figura 1 | Metodología para evaluar el impacto del cambio climático en las aportaciones futuras a partir de proyecciones climáticas corregidas e introducidas en un modelo hidrológico.

Esta metodología se puede considerar como una mejora de la primera parte de la metodología desarrollada por Suárez-Almiñana et al. (2017), en la que se intentó integrar las proyecciones climáticas en el proceso de planificación de los recursos hídricos.

Por otro lado, para la selección del modelo hidrológico se utilizó el módulo EVALHID (Paredes-Arquiola et al., 2012) integrado dentro del software de Sistema de Soporte a la Decisión (SSD) AQUATOOL (Andreu et al., 1996, 2009). Este programa se caracteriza por integrar varios módulos en una misma herramienta que cubren la mayoría de los problemas relacionados con la evaluación y gestión de los recursos hídricos en sistemas de explotación simples y complejos. También cuenta con una interfaz muy intuitiva y su uso se ha extendido tanto a nivel nacional (incluido en los PHC) como internacional.

Desde la interfaz de inicio se puede acceder a todos los módulos y dibujar el sistema de explotación con todos sus elementos principales (embalses, aportaciones, demandas, retornos, acuíferos, canales, etc.). Aquí es donde está integrado EVALHID, que dispone de varios modelos hidrológicos del tipo precipitación-escorrentía para evaluar la cantidad de recursos hídricos generados en la cuenca. Para más información sobre AQUATOOL SSD y sus módulos se puede visitar su portal de internet oficial: <https://aquatool.webs.upv.es/aqt/>.

A lo largo de esta sección, se describen de forma detallada los pasos representados en la Figura 1, además de las características de la zona de estudio.

Zona de estudio

La Cuenca del Júcar (Figura 2) fue elegida como un caso representativo de aplicación, ya que al estar bajo la influencia del clima mediterráneo su variabilidad hidrológica es muy acusada, sumado a la presión a la que se encuentra sometida por la cantidad de demandas a las que tiene que hacer frente. Además, debido a estas condiciones hidrológicas, los periodos de sequía son muy recurrentes y duran varios años, como, por ejemplo, las registradas en los periodos 1981-1986, 1992-1995 y 2005-2008.

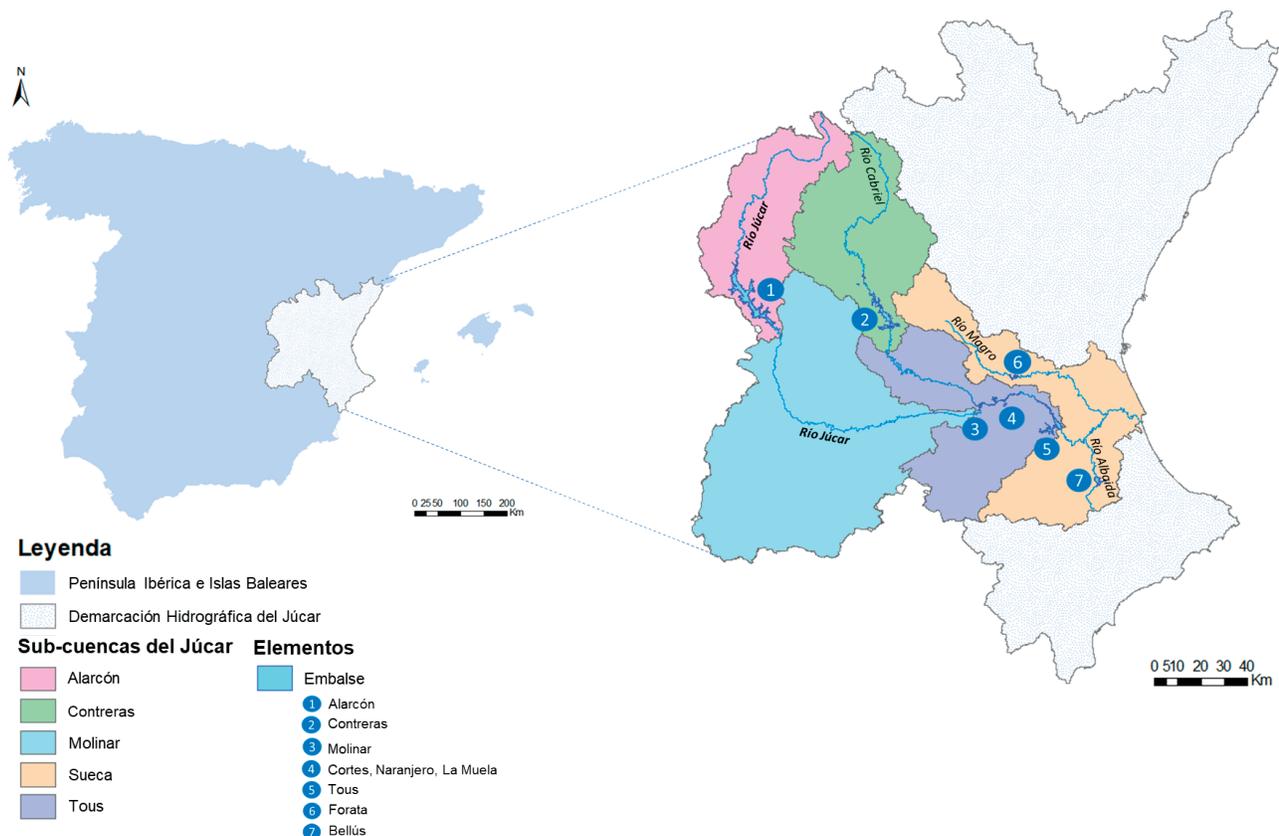


Figura 2 | Ubicación de la Cuenca del Júcar dividida en sub-cuencas de aportación con sus principales ríos y embalses en la Demarcación Hidrográfica del Júcar y en la Península Ibérica.

Esta cuenca tiene una extensión aproximada de 22187 km² y es el principal sistema de explotación de la Demarcación Hidrográfica del Júcar (DHJ). Su nombre se debe al río Júcar (512 km), cuyos principales afluentes son los ríos Cabriel, Albaida y Magro. Este río atraviesa las provincias de Cuenca, Teruel, Albacete y Valencia y finalmente desemboca en el mar Mediterráneo.

Según la CHJ (2015), la P media de esta cuenca es de 475.2 mm/año, la evapotranspiración potencial (ETP) media de 926.6 mm/año, la T media de 14.2 °C y las aportaciones medias se encuentran en torno a los 1605 hm³/año. Por otro lado, las demandas consuntivas son elevadas (sector agrícola 80% y sector urbano 15%), llegando al orden de 1648 hm³ (2012) (CHJ, 2015). Además, esta cuenca tiene una zona montañosa de interior, una zona intermedia relativamente plana y una zona baja de llanura costera. En estas dos últimas zonas es donde se encuentra la mayor parte del regadío. También es importante destacar que toda esta zona está compuesta por materiales permeables que permiten la infiltración de las precipitaciones a los acuíferos, lo que fomenta la aparición de humedales en la zona costera, como l'Albufera de Valencia que tiene una extensión de 21120 ha, incluyendo una gran extensión de cultivos de arroz.

Por tanto, para hacer frente a estas condiciones tan ajustadas, este sistema cuenta con una importante regulación a través de varios embalses, siendo los más importantes Alarcón (1118 hm³), Contreras (852 hm³) y Tous (378 hm³), además de los acuíferos de La Mancha Oriental (parte media de la cuenca) y La Plana de Valencia (parte baja de la cuenca), lo que permite su uso conjunto a la hora de satisfacer las demandas. La Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ) es el organismo que se encarga de la distribución de los recursos hídricos y de la elaboración del Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar (PHDHJ) (CHJ, 2015) y del Plan Especial de Sequía de la Demarcación Hidrográfica del Júcar (PESDHJ) (CHJ, 2018). En estos planes se encuentran todas las características y formas de proceder frente a fenómenos extremos desde el punto de vista de la gestión y planificación de los recursos hídricos.

Proyecciones climáticas y datos históricos

Las proyecciones climáticas se obtuvieron del portal europeo SWICCA (<http://swicca.eu/>), ya que dispone de una selección fiable de MCR para toda Europa y tenían datos suficientes de las variables necesarias para este análisis a escala diaria y de sub-cuenca (≈215 km²). Además, la información proporcionada sobre estos datos es muy completa y fácil de entender, así como el manejo de la página web y el formato de descarga (.xlsx).

En este caso se descargaron datos de variables meteorológicas (P y T) para 5 sub-cuencas (Figura 2) procedentes de 9 MCR pertenecientes a los escenarios de emisiones o SRC 4.5 y 8.5, cuyo periodo de referencia es 1971-2000 y los periodos futuros se encuentran divididos en intervalos de 30 años entre 2011 y 2100 (Hundechea et al., 2016).

Además, como datos meteorológicos observados o históricos se utilizaron los disponibles en la base de datos Spain02 v4 (Herrera et al., 2016), ya que se han utilizado en otros estudios de esta zona con buenos resultados (Pedro-Monzónis et al., 2016; Suárez-Almiñana et al., 2017; Madrigal et al., 2018; García-Romero et al., 2019). Esta base de datos contiene series de P y T a escala diaria y resolución espacial de 0.11° para el periodo 1971-2010, por lo que se obtuvieron datos para los mismos puntos y el mismo periodo de referencia que en el caso anterior con el objetivo de testar su fiabilidad más adelante.

Por otra parte, también son necesarios datos de caudales para la calibración del modelo hidrológico y validar su uso con los datos descritos anteriormente. Estas series de caudales en régimen natural fueron proporcionadas por la CHJ comprendiendo el periodo 1940-2012 a escala mensual.

Corrección del sesgo

Para la corrección del sesgo de la P y T se utilizó el método del “*quantile mapping*”, ya que es un método relativamente sencillo de aplicar y con buenos resultados, basado en la función de distribución que intenta conservar la media y la desviación estándar de las series de referencia (Teutschbein y Seibert, 2012; Collados-Lara et al., 2018).

Para la aplicación del método se utilizó el software estadístico R (<https://www.r-project.org/>) con el paquete de cálculo “*qmap*” (Gudmundsson et al., 2012; Gudmundsson, 2016) interpolando los cuantiles empíricos de las variables del periodo de referencia a escala diaria. Una vez corregido este periodo la corrección se extendió a las series futuras.

Modelo hidrológico

El modelo hidrológico seleccionado para obtener las series de caudales fue el modelo precipitación-escorrentía HBV (Bergström, 1995), debido a su buen funcionamiento en esta cuenca después de haber sido calibrado y validado por García-Romero et al., 2019 usando dos algoritmos de optimización distintos y datos de caudales restituidos a régimen natural para el periodo 1980-2007, evitando así el llamado “efecto 80” (Pérez-Martín et al., 2013; Hernández et al., 2019) y logrando un mejor ajuste con las características actuales de la cuenca. Este fenómeno se caracteriza por un marcado descenso de las precipitaciones y aportaciones a la cuenca a partir de los años 80, lo que hizo que en la IPH (MARM, 2008) se dispusiera una distinción entre la serie larga (1940-2012) y la serie corta (1980-2012). Esta distinción también está contemplada en el PHDHJ, donde se aconseja el uso de la serie corta para temas relacionados con la gestión del agua.

El modelo HBV necesita como datos de entrada series de P y de ETP, por lo que la T corregida se transformó en ETP con el método de Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985). Una vez están listos los datos de entrada, en este caso corregidos, se simulan los caudales del periodo de referencia y de los periodos futuros divididos entre 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098 (acortado 2 años por falta de datos en dos de los modelos).

Después se comparan los caudales de cada periodo futuro con los del periodo de referencia y de ahí se obtiene el efecto del cambio climático sobre las aportaciones futuras, en modo de tasa de cambio estimada en porcentaje.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se han tomado algunas decisiones para intentar disminuir la incertidumbre asociada al grado de disminución de caudales en el futuro, y así poder formular conclusiones más acertadas sobre un futuro incierto que al parecer nos sorprenderá con eventos cada vez más extremos (CEDEX, 2017).

Primero que todo, se optó por reducir el periodo de referencia de los modelos climáticos (1971-2000) a un periodo que representa mejor el estado actual de la cuenca (1980-2000). A pesar de que el periodo propuesto 1980-2000 tiene menos de 30 años (longitud mínima recomendada por la Organización Meteorológica Mundial (Trewin, 2007; Barranco et al., 2018) para garantizar la representatividad estadística de las series), así se evita el exceso de recursos hídricos de los 9 años anteriores debido al "efecto 80" explicado anteriormente. De hecho, utilizar datos de años anteriores podría llevar a reducciones más extremas en el futuro o extender este exceso a los caudales futuros mediante la corrección del sesgo de las variables meteorológicas.

En la Figura 3 se muestran las aportaciones (en régimen natural) de los periodos comprendidos entre 1971-2000 y 1980-2000 en la Cuenca del Júcar, además de la serie larga (1940-2012) y la corta (1980-2012) utilizadas en el PHDHJ. Se observa una gran diferencia de recursos hídricos de la serie larga a la corta, estimada en un 21%. Además, el periodo de referencia aportado por los modelos (1971-2000) también supone un 17% más de recursos hídricos que el de la serie corta. Sin embargo, la serie corta y el periodo 1980-2000 se pueden considerar equivalentes y representativas de la situación actual.

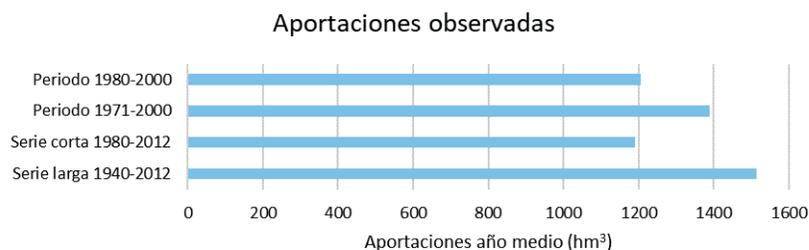


Figura 3 | Aportaciones observadas en régimen natural en la Cuenca del Júcar para varios periodos históricos, la serie larga 1940-2012, la serie corta 1980-2012 y dos periodos de referencia, 1971-2000 y 1980-2000.

Además, hay que tener en cuenta que en este trabajo se optó por trabajar con el conjunto o ensamblado de todos los modelos implicados en el análisis y mostrar los resultados relativos a su media, ya que como se indica en el acuerdo de la cumbre de cambio climático de París de 2015, la SRC más probable sería el 6.0 (Barranco et al., 2018), un escenario intermedio entre los dos usados en este estudio. Así, se ofrecen datos intermedios y más próximos a este escenario, simplificando el proceso y evitando los extremos de ambas SRC.

Por lo tanto, una vez acordado el periodo de referencia (1980-2000), se compararon los de ambas bases de datos y se observó cómo los modelos climáticos subestimaban las precipitaciones y sobreestimaban las temperaturas en la mayoría de los puntos seleccionados (Tabla 1), por lo que se procedió a hacer la corrección de sesgo (mediante “*quantile mapping*”) del periodo de referencia y se extrapoló a las series futuras.

Tabla 1 | Precipitaciones (P, mm) y temperaturas (T, °C) medias anuales por sub-cuenca y de la totalidad de la Cuenca del Júcar, diferenciando entre la serie de datos observados (Spain02), la media del ensamblado sin corregir (Ensamblado) y la media del ensamblado corregido (Ensamblado corregido). En la escala de colores utilizada, los colores rojizos representan los valores bajos de P y altos en T, mientras que los valores blanquecinos representan lo contrario (valores altos de P y bajos de T).

	Periodo	Origen	Sub-cuencas					Cuenca del Júcar
			Alarcón	Contreras	Molinar	Tous	Sueca	
P media anual	1980-2000	Spain02	516	454	332	387	496	437
		Ensamblado	367	387	386	405	382	385
		Ensamblado corregido	560	507	383	441	555	489
T media anual	1980-2000	Spain02	13	12	15	16	16	14
		Ensamblado	14	15	14	17	19	16
		Ensamblado corregido	12	12	14	15	16	14

En la Tabla 1 se puede observar que las mayores subestimaciones de las P por parte del ensamblado se dan en las cuencas de cabecera (Alarcón y Contreras), donde se sitúan los embalses con más capacidad de regulación. Este hecho fue uno de los puntos clave para decidir aplicar la corrección, ya que al transformar los datos sin corregir en caudales la subestimación de los caudales observados no era aceptable, indicando una situación actual mucho más crítica de la real en cuanto a disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca. Sin embargo, al corregir el ensamblado se obtuvieron datos ligeramente más optimistas para la media anual debido a una sobreestimación de las P en primavera. A pesar de esto, la corrección se consideró acertada ya que el ajuste del año medio mejoró sustancialmente en cada sub-cuenca. Por otra parte, la corrección de las T fue bastante satisfactoria, ya que se redujo la sobreestimación de 2 °C en toda la cuenca.

Después de esta corrección, se estimó la ETP con el método de Hargreaves y las series de P y ETP fueron utilizados como datos de entrada para el modelo hidrológico (HBV).

En la Figura 4 se pueden ver las aportaciones medias del conjunto de los MCR obtenidas con el HBV, tanto para los periodos futuros (ensamblados de 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098) como para los periodos históricos (usando las series de Spain02 y el ensamblado del periodo de referencia 1980-2000).

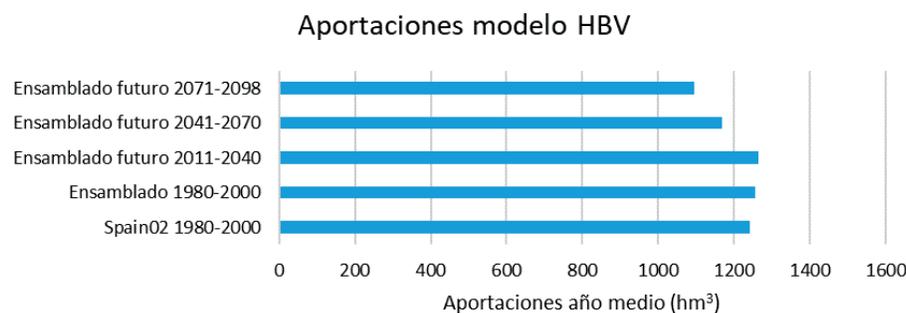


Figura 4 | Aportaciones medias de periodos futuros e históricos obtenidos con el modelo hidrológico HBV a partir de datos de precipitación y ETP provenientes del ensamblado y de Spain02 para la Cuenca del Júcar.

En la figura anterior se observa claramente cómo los recursos hídricos tienden a disminuir a medida que nos acercamos al final del siglo. Si evaluamos el posible impacto del cambio climático comparando el ensamblado futuro de cada periodo (2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098) con el de referencia (1980-2000), en el primer periodo se experimenta un incremento del 1% de media, en el segundo un descenso del -7% y en el tercero del -13%. Esta tendencia decreciente puede suponer un gran reto para la gestión futura de los recursos hídricos en esta cuenca, ya que actualmente la relación entre los recursos generados y las demandas es muy estrecha, cerca del 90% (CHJ, 2015). Sin embargo, estas reducciones pueden parecer muy pequeñas si tenemos en cuenta otros estudios que se han realizado en esta área, como el del CEDEX (2017), en el que de media (SRC 4.5 y 8.5) se estiman unas reducciones de escorrentía del -7%, -18% y -28% para toda la DHJ, aunque se indica que los porcentajes de cambio se pueden aplicar a todos sus puntos (Barranco et al., 2018). Además, en el citado estudio los datos no fueron corregidos a pesar de la infravaloración de la P en la vertiente mediterránea y el periodo de referencia utilizado fue 1960-2000 (Barranco et al., 2018), lo que también puede hacer que el contraste entre futuro y pasado sea aún más extremo.

Sin embargo, en este trabajo se modificó el periodo de referencia y se compararon los periodos futuros respecto a su ensamblado con el objetivo de tener una visión del futuro más acertada respecto de las condiciones actuales, pero se pueden barajar otras opciones de comparación que pueden ser (o no) igual de válidas, ya que no hay ninguna regla establecida para estos casos. En principio existen 4 opciones con las que comparar los ensamblados futuros obtenidos: la serie corta observada (1980-2012), la observada del periodo 1980-2000 y los caudales obtenidos con el modelo HBV (ensamblado 1980-2000 y Spain02 1980-2000). Aunque sigue estando la duda de si la decisión de acortar el periodo de referencia de las proyecciones (1971-2000) es correcta y si se debería tener en cuenta la serie larga como se hace en los PHC. Por esto, en la siguiente figura se pueden ver los posibles efectos del cambio climático (de media) referentes a cada una de estas opciones para esta cuenca.

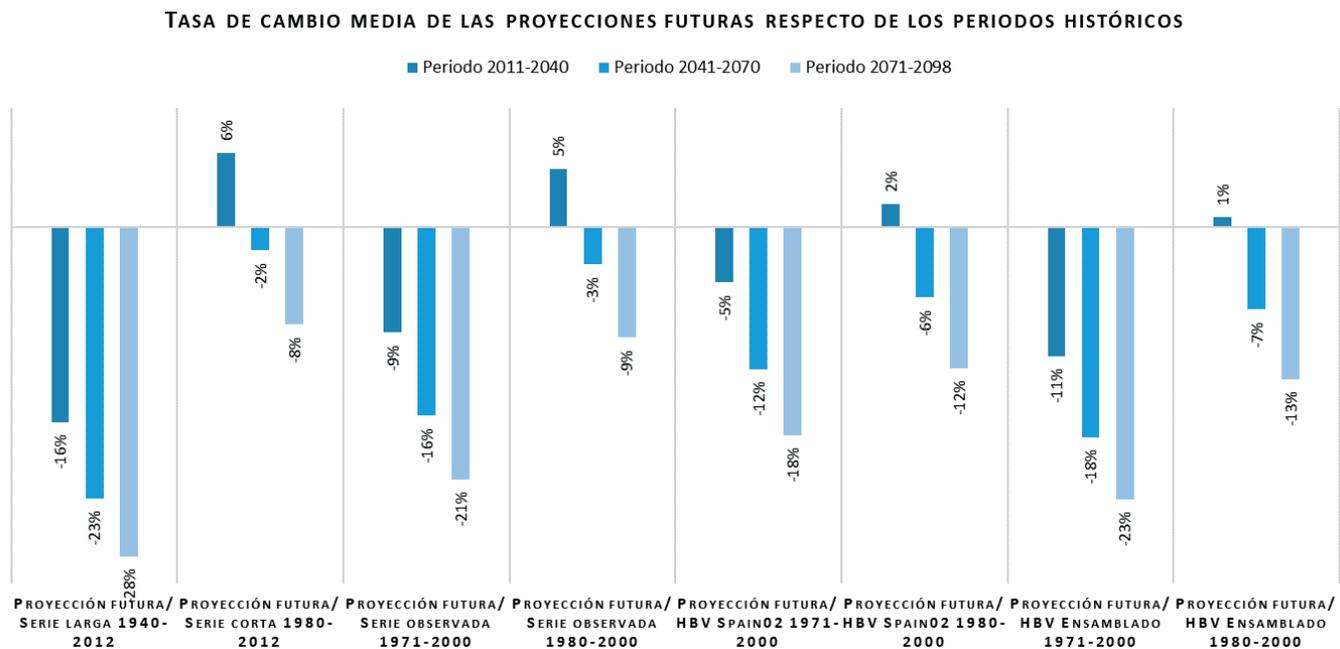


Figura 5 | Tasa de cambio media de las aportaciones futuras (periodos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098) respecto de varios periodos históricos de origen observado (serie larga, serie corta, periodos desde 1971 y 1980 hasta el 2000) y simulados con el HBV (provenientes del ensamblado y Spain02 desde 1971 y 1980 hasta el 2000).

Si comparamos con la serie corta y las referentes al periodo 1980-2000, el cambio podría estar entre 1% y 6% en el periodo 2011-2040 (futuro cercano), entre -2% y -7% en el periodo 2041-2070 (futuro medio) y entre -8% y -13% en el periodo 2071-2098 (futuro lejano). Por otra parte, si solo consideramos la comparación con las series observadas 1980-2000 y 1980-2012 (serie corta) se obtienen incrementos y/o descensos muy reducidos para la mayor parte del siglo XXI, comenzando a notarse sus efectos a partir del último periodo.

Sin embargo, si no se hubiera tenido en cuenta el "efecto 80" acortando el periodo de referencia, los cambios usando las series referentes al periodo 1971-2000 serían de entre -5% y -11% para el futuro cercano, entre -12% y -18% para el futuro medio y entre -18% y -23% para el futuro lejano. Además, si comparáramos con la serie larga, estas disminuciones serían aún más drásticas.

Este patrón descendiente de las aportaciones futuras en toda la cuenca (Figura 5) también se mantiene en todas las sub-cuencas (sobre todo en las de cabecera), aunque en las de Molinar y Tous es menos acusado, sobre todo en el primer periodo en el que incluso se estiman algunos incrementos en Tous. Por esta razón, en la Figura 5 se observan ligeros incrementos del primer periodo en algunas de las comparaciones, que podría deberse al incremento en precipitaciones de las zonas medias de la cuenca observado en los últimos años (Hernández Bedolla et al., 2019) y que parece que continuará hasta mediados de siglo.

Por lo tanto, si tratamos los resultados de la Figura 5 en conjunto, las tasas de cambio van desde -16% hasta el 6% en el primer periodo futuro, desde -23% hasta -2% en el segundo y desde -28% hasta -8% en el tercero. Parece evidente que ante tanta variabilidad hay que decantarse por una opción, por lo que en este estudio lo hicimos por la que está comparada con las series de caudales del ensamblado 1980-2000 (modelo HBV), ya que es la más lógica y extendida, sumado a que los datos parten de un mismo origen, los modelos climáticos.

Si comparamos estas reducciones medias con las del CEDEX (2017), la que más se aproxima son las del periodo de referencia 1971-2000, lo cual tiene sentido, ya que en ambos casos el periodo es similar y los años anteriores a 1980 les aportan un volumen extra de recursos, siendo normal el mayor contraste entre periodos.

Además, si consideráramos los cambios asociados a cada MCR o SRC, los rangos de los cambios se incrementarían aún más, aumentando así la incertidumbre de los resultados.

También hay que tener en cuenta que el principal objetivo de este tipo de evaluaciones es integrar los datos de caudales o las tasas de cambio en los procesos de planificación de recursos hídricos, por lo que hay que intentar ofrecer resultados cada vez más fiables y con una mayor probabilidad de ocurrencia para una toma de decisiones cada vez más acertada.

Por lo tanto, para desarrollar una metodología de integración de modelos climáticos en la planificación de recursos hídricos a nivel de cuenca, hay que tener en cuenta muchos factores, tanto a la hora de analizar como a la hora de informar, ya que una vía de trabajo errónea puede llevar a la alarma o a todo lo contrario en periodos clave. Para ello se necesita un conocimiento exhaustivo de las características de la zona de estudio y especificar qué se entiende como situación actual, además del origen del periodo de referencia utilizado y su motivación.

CONCLUSIONES

En este estudio se ha confirmado una vez más que la posible tendencia futura de los recursos hídricos en una cuenca Mediterránea es decreciente, aunque la incertidumbre asociada a esta afirmación es notable. A pesar de los intentos por reducir esta incertidumbre por medio de ajustes en los datos iniciales al estado actual de la cuenca y la corrección del sesgo de los datos futuros, sigue habiendo dudas razonables sobre la mejor forma de trabajar con las proyecciones climáticas. Sin embargo, a la hora de comparar las aportaciones futuras con las del periodo de referencia se tomó la opción más lógica y extendida, obteniendo una reducción media del -13% para finales de siglo, pero hay otras opciones que se pueden contemplar y que añaden más incertidumbre a los resultados. Dependiendo del periodo de referencia que tomemos, las conclusiones sobre los impactos del cambio climático en los recursos hídricos pueden ser más o menos alarmantes, en este caso oscilando entre un -28% y un -8% de reducción media para final de siglo. Por todo esto, es importante dejar clara la referencia de los cambios, sobre todo si ésta no concuerda con la situación actual de la cuenca, para una correcta toma de decisiones.

Por último, la metodología usada y las decisiones tomadas pueden replicarse fácilmente teniendo en cuenta que todo el proceso de decisión obedece a un profundo conocimiento de la zona de estudio, por lo que su extrapolación a otros casos requiere del conocimiento de expertos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Agencia Estatal de Investigación (MINECO) por financiar el proyecto “ERAS” (CTM2016-77804-P), cofinanciado con Fondos FEDER. Además, también valoramos el apoyo de la Comunidad Europea en la financiación de los proyectos IMPREX (H2020-WATER-2014–2015, 641811) y SWICCA (ECMRWF-Copernicus-FA 2015/ C3S_441-LOT1/SMHI).

También es importante nombrar al Programa de Apoyo para la Investigación y Desarrollo (PAID-01-17) de la Universitat Politècnica de València por fomentar y facilitar los contratos de formación de personal investigador.

Finalmente, los autores agradecen a AEMET y a la Universidad de Cantabria (UC) los datos aportados para este trabajo (conjunto de datos Spain02 v4, disponibles en <http://www.meteo.unican.es/datasets/spain02>).

REFERENCIAS

- Andreu, J., Capilla, J., Sanchis, E. 1996. AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management. *Journal of Hydrology*, 177(3-4), 269-291. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02963-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02963-X)
- Andreu, J., Ferrer-Polo, J., Pérez, M. A., Solera, A. 2009. Decision support system for drought planning and management in the Júcar river basin, Spain. *Proceedings of the 18th world IMACS / MODSIM Congress*, July 13-17, Cairns, Australia, 3223-3229. http://www.mssanz.org.au/modsim09/I3/andreu_a.pdf
- Barranco, L. M., Dimas, M., Jiménez, A., Estrada, F. 2018. Nueva evaluación del impacto futuro del cambio climático en los recursos hídricos en España. *Ingeniería Civil*, 191/2008, 34-55.
- Bergström, S. 1995. The HBV Model. In: *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, USA, 443-476.
- CEDEX. 2017. Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías de España. Informe técnico para Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid, Spain.
- CHJ. 2015. Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar. Memoria ciclo de planificación hidrológica 2015-2021. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Valencia, Spain.
- CHJ. 2018. Plan Especial de Sequía Demarcación Hidrográfica del Júcar. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. Valencia, Spain.
- Collados-Lara, A. J., Pulido-Velazquez, D., Pardo-Igúzquiza, E. 2018. An integrated statistical method to generate potential future climate scenarios to analyse droughts. *Water*, 10(9), 1224. <https://doi.org/10.3390/w10091224>
- García-Romero, L., Paredes-Arquiola, J., Solera, A., Belda, E., Andreu, J., Sánchez-Quispe, S. T. 2019. Optimization of the multi-start strategy of a direct-search algorithm for the calibration of different rainfall-runoff models for the water resources assessment. *Water*, 11(9), 1876. <https://doi.org/10.3390/w11091876>
- Gudmundsson, L., Bremnes, J. B., Haugen, J. E., Engen-Skaugen, T. 2012. Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations - a comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3383-3390. <http://doi.org/10.5194/hess-16-3383-2012>
- Gudmundsson, L. 2016. qmap: Statistical transformations for post-processing climate model output. R Package Version 1.0-4.
- Hargreaves, G.H., Samani, Z.A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96-99.
- Hernández Bedolla, J., Solera, A., Paredes Arquiola, J., Roblero Escobar, C. X. 2019. Análisis del cambio en las aportaciones hidrológicas en la cuenca del río Júcar a partir de 1980 y sus causas. *Ingeniería del Agua*, 23(2), 141-155. <https://doi.org/10.4995/ia.2019.10582>

- Hernández, L. 2007. *Efectos del cambio climático en los sistemas complejos de recursos hídricos. Aplicación a la cuenca del Júcar*. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de València, Valencia, Spain.
- Herrera, S., Fernández, J., Gutiérrez, J. M. 2016. Update of the Spain02 gridded observational dataset for EURO-CORDEX evaluation: Assessing the effect of the interpolation methodology. *International Journal of Climatology*, 36(2), 900-908. <https://doi.org/10.1002/joc.4391>
- Hundechea, Y., Arheimer, B., Donnelly, C., Pechlivanidis, I. 2016. A regional parameter estimation scheme for a pan-European multi-basin model. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 6, 90-111. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2016.04.002>
- IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- Madrigal, J., Solera, A., Suárez-Almiñana, S., Paredes-Arquiola, J., Andreu, J., Sánchez-Quispe, S. T. 2018. Skill assessment of a seasonal forecast model to predict drought events for water resource systems. *Journal of Hydrology*, 564(February), 574-587. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.07.046>
- Marcos-García, P., Lopez-Nicolas, A., Pulido-Velazquez, M. 2017. Combined use of relative drought indices to analyze climate change impact on meteorological and hydrological droughts in a Mediterranean basin. *Journal of Hydrology*, 554, 292-305. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.028>
- Marcos-García, P., Pulido-Velazquez, 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), 35. <https://doi.org/10.4995/ia.2017.6361>
- MARM. 2008. Instrucción de Planificación Hidrológica. ORDEN ARM/2656/2008, de 10 de septiembre, por la que se aprueba la instrucción de planificación hidrológica., 38472-38582.
- Paredes-Arquiola, J., Solera, A., Andreu, J., Lerma, N. 2012. *Manual técnico de la herramienta EVALHID para la evaluación de recursos hídricos*. Universitat Politècnica de València. Valencia, Spain.
- Pedro-Monzonís, M., Jiménez-Fernández, P., Solera, A., Jiménez-Gavilán, P. 2016. The use of AQUATOOL DSS applied to the System of Environmental-Economic Accounting for Water (SEEA). *Journal of Hydrology*, 533, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.034>
- Pérez-Martín, M., Thurston, W., Estrela, T., del Amo, P. 2013. Cambio en las series hidrológicas de los últimos 30 años y sus causas. El efecto 80. En las *III Jornadas de Ingeniería del Agua (JIA 2013)*. *La protección contra los riesgos hídricos*. October 23-24, Valencia, Spain, 527-534.
- Suárez-Almiñana, S., Pedro-Monzonís, M., Paredes-Arquiola, J., Andreu, J., Solera, A. 2017. Linking Pan-European data to the local scale for decision making for global change and water scarcity within water resources planning and management. *Science of the Total Environment*, 603-604, 126-139. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.259>
- Teutschbein, C., 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, 12-29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052>
- Trewin, B. C. 2007. *Función de las normales climatológicas en un clima cambiante*. (O. Baddour & H. Kontongomde, Eds.), Organización Meteorológica Mundial (Vol. 43). Ginebra.