

Análisis del cambio en las aportaciones hidrológicas en la cuenca del río Júcar a partir de 1980 y sus causas

Changes in Surface runoff in the Jucar River basin 80 effect and their causes

Hernández-Bedolla, J. ^{a1}, Solera, A. ^{a2}, Paredes-Arquiola, J. ^{a3} y Roblero-Escobar, C.X. ^{a4}

^{a1}Instituto Universitario de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, Universitat Politècnica de València, Campus de Vera s/n. 46022. Valencia, España. E-mail: ^{a1}joeherbe@upvnet.upv.es, ^{a2}asolera@upvnet.upv.es, ^{a3}jparedea@upvnet.upv.es, ^{a4}claudiaxre21@hotmail.com.

Recibido: 03/08/2018

Aceptado: 02/03/2019

Publicado: 30/04/2019

Citar como: Hernández-Bedolla, J., Solera, A., Paredes-Arquiola, J., Roblero-Escobar, C.X. (2019). Changes in Surface runoff in the Jucar River basin 80 effect and their causes. *Ingeniería del agua*, 23(2), 141-155. <https://doi.org/10.4995/la.2019.10582>

RESUMEN

La disponibilidad del recurso hídrico es de vital importancia para la planificación hidrológica, este depende de múltiples causas como la variabilidad climática y la cobertura vegetal. La precipitación, temperatura y evapotranspiración han sufrido cambios en diferentes partes de España. Para la cuenca del río Júcar además de otras cuencas en España se ha producido un significativo cambio en el valor promedio de las aportaciones hidrológicas desde 1980. El presente estudio se centra en analizar cómo han afectado los cambios en las variables climáticas a las aportaciones hidrológicas y en qué grado explican las reducciones registradas en las mismas. Adicionalmente se considera la posibilidad de que otros factores como cambios en la cobertura vegetal también puedan haber influido en la reducción de escorrentía. Para modelar la hidrología de la cuenca del Júcar se utilizó el modelo lluvia-escorrentía HBV. El modelo fue calibrado para periodo anterior a la fecha de cambio considerada (1950-1979) y se simuló y adaptó para los años posteriores a 1980 (1980-2007) ajustando parámetros que puedan ser explicados por cambios en las condiciones de la cuenca. La zona más susceptible es la cabecera del Júcar donde se genera la mayor cantidad del recurso hídrico y se presenta la mayor disminución en las aportaciones. En la cuenca media del Júcar se presenta una menor disminución en las aportaciones, sin embargo en la cuenca baja del Júcar se registra un incremento en las aportaciones. Los cambios en las variables hidrológicas (precipitación y temperatura) explican una parte de los cambios en las aportaciones. Otras causas posibles como los cambios en la cobertura vegetal pueden completar la explicación del cambio en las aportaciones. Para probarlo se ha recalibrado el modelo hidrológico alterando solo uno o dos parámetros relacionados con esta condición.

Palabras clave | disponibilidad hídrica; cambio climático; planificación hidrológica; efecto 80; tendencias.

ABSTRACT

The availability of the water resource is important for hydrological planning, the availability depends of many causes such as climate variability and plant cover. The rainfall, temperature and evapotranspiration have changed in different parts of Spain. For the Jucar river basin and other water basins in Spain has been a change the surface runoff in 1980. This study will focus to analyze the climatic conditions and their effect in surface runoff moreover, and explain the degree of surface runoff reduction since 1980. In addition we considered the possibility like changes in plant cover could have influenced the reduction of surface runoff. The HBV model was used to determine the surface runoff in the Jucar river basin. The HBV model was calibrated for the years before of the 1980 (1950-1979) and re-calibrated for the years after of 1980 (1980-2007). The area more susceptible is the uplands of the Jucar river basin where the major amount of water is generated and major reduction in the surface runoff (1980-2007). In the middle basin of the Jucar less runoff was presented, however in the lower Jucar river basin an increase in surface runoff was determined. The hydrological changes can explain a part of decrease runoff. Other causes which justify the decrease of surface runoff are changes in plant cover, evapotranspiration and infiltration, therefore, this changes are able to explain the results in the Jucar river basin.

Key words | water availability; climate change; hydrological planning; 80 effect; trends.

INTRODUCCIÓN

En las últimas dos décadas el análisis de los recursos hídricos ha estado recibiendo atención a escala mundial a los cambios en las variables climáticas e hidrológicas (Pasini *et al.*, 2012). Evaluar las tendencias climáticas en precipitación, temperatura, evapotranspiración, aportaciones u otros aspectos hidrológicos se ha vuelto imprescindible (Changnon *et al.*, 1998). La precipitación ha registrado una reducción en diferentes zonas de España así como su distribución en el año. Fenómenos de sequía son recurrentes en las cuencas del mediterráneo, se indican reducciones principalmente de invierno a verano, pero incrementos en otoño (Tejedor *et al.*, 2015).

En el caso de la cuenca hidrográfica del Júcar los cambios en las condiciones climáticas han ocasionado una reducción en las aportaciones en los principales embalses en la cuenca del Júcar. El análisis visual de los datos resalta momento de cambio drástico desde el año 1979/80, el cual es denominado como “el efecto 80” (Pérez-Martín *et al.*, 2013). La precipitación ha disminuido ocasionando diferentes episodios de sequías a partir de 1950, de acuerdo a la CHJ (2007) en la cuenca del Júcar se han identificado diferentes episodios de sequías meteorológicas de las cuales solamente una se presenta antes del efecto 80 (1952/53-1954/55). A partir del 80 se han presentado cuatro periodos de sequía, el episodio de mayor duración y severidad se presentó en 1982/1983-1986/1987 después de cuatro años hidrológicos se vuelven a presentar dos periodos de sequía (1991/92-1994/95 y 1997/98-1999/2000) y el último periodo de sequía entre los años 2004/05-2005/06 con un grado de sequía severa. De acuerdo al documento CHJ (2015) la precipitación se ha reducido a partir de 1980 en la cuenca alta de la cuenca del Júcar e incrementado en la cuenca baja. Además la temperatura también se ha incrementado en los últimos años.

La reducción de la precipitación es un factor determinante en toda la cuenca del Júcar, los usos principales de suelo para el año 2000 eran bosques y zonas semi-naturales (50%), las zonas agrícolas de secano (36%) y las zonas agrícolas de regadío (CHJ, 2007). Las zonas agrícolas de secano se ven afectadas principalmente por las sequías meteorológicas, en tanto que las zonas agrícolas de regadío se ven afectadas debido a la reducción de aportaciones, las cuales pueden ser explicadas en un 33% de las debido al cambio en la temperatura y precipitación (Pérez-Martín *et al.*, 2013). De acuerdo a (Agroseguro, 2015) la superficie cultivada en España era de 20.5×10^6 ha antes de 1980 y se ha ido reduciendo hasta 16981300 ha en 2013. Esto fue causado por el desplazamiento de la población del sector agrícola al sector industrial, siendo más importante en la década de los 80s y más significativo en zonas del interior de la península como la cabecera del Júcar. Debido a ello el uso del suelo se ve afectado condicionando la humedad del suelo y la evapotranspiración natural, por lo tanto es necesario considerar que además de la variabilidad climática hay cambios en la cobertura vegetal. Para España la escorrentía se han reducido anualmente, en invierno y en verano debido a la reducción de la precipitación y el incremento de las evapotranspiraciones (Lorenzo-Lacruz *et al.*, 2012).

En la actualidad hay múltiples modelos informáticos de balance lluvia-escorrentía que son utilizados para conocer la respuesta hidrológica de una cuenca a partir de las precipitaciones, entre los que se distingue modelos agregados, distribuidos o semidistribuidos (Cabezas, 2015). También hay diferentes modelos matemáticos que han sido utilizados para este fin como Témez, HBV, Sacramento, GR4J, GR2M, AWBM (Paredes-Arquiola *et al.*, 2013). El modelo utilizado para el presente trabajo es el HBV que es un modelo agregado de pocos parámetros adecuado para la simulación en escala temporal diaria. Este modelo ha sido ampliamente usado (Hernández-Bedolla *et al.*, 2017; Marcos-García y Pulido-Velazquez, 2017; Momblanch *et al.*, 2017; Steele-Dunne *et al.*, 2008; Suárez-Almiñana *et al.*, 2017).

Las aportaciones en régimen natural de la cuenca se han obtenido del Plan Hidrológico de Cuenca del Júcar (CHJ, 2015), el cual las obtiene por restitución basada en datos aforados. En este Plan se distingue entre los dos periodos de tiempo indicados, refiriéndose a la serie larga (1940/41-2008/09) y la serie corta (1980/81-2008/09). Estas aportaciones fueron publicadas en el Plan Hidrológico del Júcar 2009-2015 (CHJ, 2015), y posteriormente fueron ampliadas en el Plan Hidrológico 2015-2021 del Júcar (CHJ, 2015).

El objetivo del presente trabajo fue analizar los cambios en la escorrentía tanto espacial como temporal y sus posibles causas. Las causas consideradas han sido dos: en primer lugar el cambio en las variables climáticas (Evapotranspiración y precipitación) que se comprueban directamente con solo prolongar el modelo hidrológico; y en segundo lugar el cambio en la cobertura vegetal que condiciona la infiltración, el cual ha sido considerado mediante el parámetro que afecta la evapotranspiración potencial y el parámetro que condiciona la tasa de infiltración.

MATERIALES Y MÉTODOS

Variables climáticas

Se considera las series de precipitación, evapotranspiración y aportaciones en dos periodos, antes de 1980 y después de 1980. Las series de precipitación y temperaturas fueron utilizadas a escala diaria, mientras que para los caudales se realizó una acumulación en escala mensual y anual, además se determinaron los estadísticos básicos de las series: media, desviación estándar y el sesgo de las diferentes series en escala mensual y anual. Para la determinación de la evapotranspiración diferentes autores han propuesto ecuaciones con base en diferentes variables climáticas. Uno de los métodos más utilizados para la determinación de la evapotranspiración es FAO-56 Penman-Monteith (FAO56PM) (Allen *et al.*, 1998). Este método tiene la ventaja de no requerir calibración debido a que se trata de una formulación con base física cuyos parámetros pueden ser deducidos de las condiciones ambientales (Allen *et al.*, 1998), además puede ser usado para diferentes climas y escenarios de cambio climático (Darshana *et al.*, 2013). Debido a que requiere de información muy detallada diferentes autores han desarrollado métodos alternativos y comparados con el método FAO56PM (Djaman *et al.*, 2015; Espadafor *et al.*, 2011; Pandey *et al.*, 2016). Espadafor *et al.* (2011) determinó la evapotranspiración para 8 estaciones climáticas en España mediante el método FAO56PM y métodos alternativos: Hargreaves, Blaney-Criddle, Radiation y Priestley-Taylor. Espadafor concluyó que el método de Hargreaves representa valores muy similares al método de FAO56PM. Por lo tanto para determinar la evapotranspiración potencial de referencia se optó por la fórmula de Hargreaves (Hargreaves y Allen 2003), por ser más adecuada a la información disponible. El método de Hargreaves se basa en las temperaturas de las cuales se tienen amplios registros y la radiación solar.

$$Et_o = 0.0135(t_{med} + 17.78)R_s \quad (1)$$

Donde Et_o es la evapotranspiración potencial diaria de referencia (mm/día), t_{med} es la temperatura media (°C) y R_s es la radiación solar incidente (mm/día). Para obtener la radiación solar incidente (R_s) se utilizó la fórmula propuesta por Samani (2000).

$$R_s = R_o KT(t_{max} - t_{min})^{0.5} \quad (2)$$

Donde R_o es la radiación solar extraterrestre la cual depende de la latitud y del mes en análisis, los valores mensuales de R_o se obtuvieron de acuerdo a Allen *et al.*, (1998). KT es un coeficiente empírico que se recomienda de 0.162 para regiones en el interior y 0.19 para regiones costeras. Finalmente t_{max} y t_{min} son las temperaturas diarias máxima y mínima respectivamente (°C).

Modelo hidrológico

A partir de la precipitación diaria y la evapotranspiración se determinaron las aportaciones mediante el modelo conceptual Hydrologiska Byråns Vattenbalans-avdelning (HBV) (Bergström, 1976). Este modelo ha sido incorporado junto a otros modelos en el programa EVALUACIÓN del recurso HÍDRICOS (EVALHID) desarrollado por Paredes-Arquiola *et al.*, (2013) en la Universidad Politécnica de Valencia. El modelo HBV es un modelo conceptual en el cual para determinar el escurrimiento se considera el flujo en el suelo dividido en tres celdas, las cuales son: suelo, celda subsuperficial y celda subterránea. De acuerdo a Paredes-Arquiola *et al.*, (2013) el suelo es el principal factor donde se genera la escorrentía directa con base en tres parámetros que son la capacidad de campo (FC), el coeficiente de forma para la infiltración (β) y el punto de marchitez permanente de la vegetación (PWP). La celda subsuperficial se divide en dos subceldas las cuales generan escorrentía de descarga rápida y lenta. La escorrentía de descarga rápida se activa en la celda subsuperficial superior cuando el almacenamiento del suelo supera un mínimo la cual depende del coeficiente de descarga rápida (k_0) y hasta el umbral máximo de descarga rápida (L_{max}). Por otro lado una descarga lenta se presenta en la celda subsuperficial inferior la cual depende del almacenamiento de agua en el suelo y el coeficiente de recesión (k_1). K_0 ha de tener un valor de un orden de magnitud superior al de k_1 para que esta consideración tenga sentido. Una parte del volumen de la celda subsuperficial se infiltra hacia la celda subterránea, la cual depende de un coeficiente de percolación (k_{perc}). por último las salidas de la celda subterránea dependen del coeficiente de recesión (k_2).

Los distintos modelos fueron calibrados para el periodo 1950-1979 mediante el algoritmo del Hipercubo Latino y Rosenbrock (LHR) (Belda, 2016) y simulados para el periodo 1980-2007. La cuenca se consideró dividida en las cinco zonas de estudio todas restituidas a régimen natural. Para conocer la bondad de ajuste de las calibraciones realizadas por el LHS se utilizó el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) (Nash y Sutcliffe, 1970), el logaritmo del coeficiente de Nash-Sutcliffe (LNSE), el coeficiente de correlación de Pearson (R) y la simetría de ambas series (A).

El cambio en las variables históricas de precipitación y temperatura es capaz de representar una parte de la disminución de las aportaciones (1980-2007). Sin embargo no se explica toda la disminución solo con los cambios de variables climáticas (Pérez-Martín *et al.*, 2013). Por tales motivos se evaluó otros posibles factores de cambio en las diferentes subcuencas, como los cambios en la cobertura vegetal que tendría como consecuencia cambios en la evapotranspiración potencial y en la infiltración. De acuerdo al modelo conceptual HBV se revisó para el periodo 1980-2007 los parámetros que pueden verse alterados debido a estas condiciones dejando fijos el resto. Estos parámetros son el coeficiente de forma de la infiltración que afecta principalmente la humedad del suelo, infiltración y evapotranspiración y el coeficiente de cultivo que modifica la evapotranspiración potencial de referencia.

ZONA DE ESTUDIO

El ámbito territorial de la cuenca del río Júcar es gestionado por la Confederación Hidrográfica de Júcar (CHJ); se ubica en la parte oriental de la Península Ibérica. La cuenca del río Júcar tiene un área de 22291 km², la cuenca cuenta un complejo sistema de explotación, principalmente cuenca media y baja (Molinar, Tous y Huerto Mulet). La información de datos vectoriales como masas de agua, subcuencas hidrográficas y embalses se obtuvo del sitio web oficial de la confederación (www.chj.es). Para efectos del presente estudio la cuenca del río Júcar se dividió en cinco zonas representativas con el objetivo de conocer las condiciones de toda la cuenca. Estas zonas se dividieron con base en diferentes embalses donde convergen los escurrimientos. Se tienen dos zonas de Cabecera: aguas arriba de Alarcón y Contreras, la cuenca media aforada en la presa de Molinar y en la presa de Tous y la cuenca baja en la estación de aforos Huerto Mulet (Figura 1). La zona Alarcón se encuentra en la cabecera de la cuenca y tiene un área de 2999 km², recibe escurrimientos de ríos de montaña mediterránea calcárea hasta el embalse Alarcón que tiene una capacidad útil de 1088 hm³. La subcuenca de Contreras también es cabecera de la cuenca, junto a la zona Alarcón recibe escurrimientos de ríos de montaña mediterránea calcárea y hasta desembocar en el embalse Contreras, el cual tiene una capacidad útil de uno 430 hm³. La zona Molinar es una cuenca intermedia que comienza después del embalse Alarcón y recibe escurrimientos de diferentes afluentes y principalmente del acuífero de la Mancha Oriental. Finaliza en el embalse Molinar. La subcuenca Tous comienza aguas abajo del embalse Contreras y aguas abajo del embalse Molinar el cual (al igual que otros no considerados aquí) tiene uso hidroeléctrico por lo que se considera una capacidad útil de 0 para la regulación mensual. Esta cuenca recibe escurrimientos de ríos mineralizados de baja montaña y finaliza en el embalse Tous que tiene una capacidad útil de 356 hm³. La cuenca baja denominada Huerto Mulet recibe escurrimientos de los afluentes del Júcar entre la presa de Tous y la estación de Aforo Huerto Mulet.

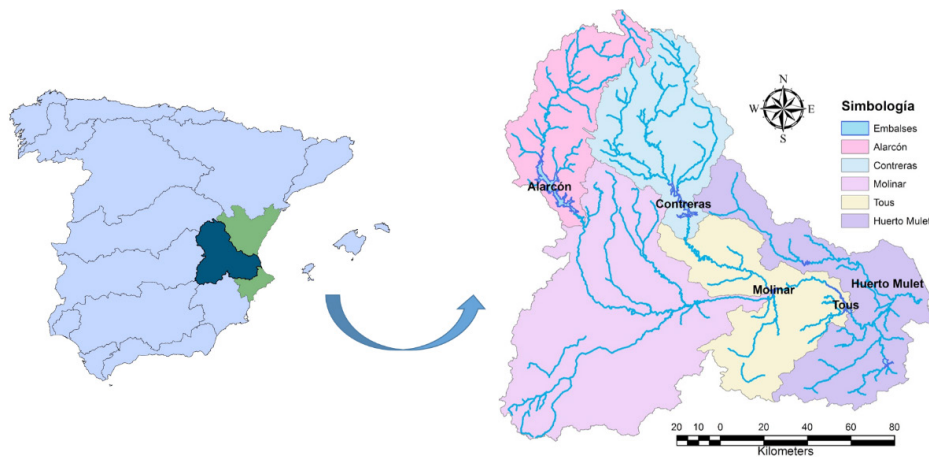


Figura 1 | Ubicación de las zonas de estudio de la cuenca del río Júcar (Elaboración propia a partir de datos de la CHJ).

Para este trabajo se ha obtenido series de datos de precipitación, temperatura media y temperaturas máxima y mínima en escala diaria obtenidos de la base de datos Spain 02 (Herrera *et al.*, 2012). Esta proporciona una malla de datos regular de 0.2° (~ 20 km) para toda España. De esta malla se ha promediado los datos dentro de cada zona de estudio considerada. La información de precipitación y temperaturas utilizada es la que comprende entre los años 1950 hasta 2007. Se realizó un promedio de las diferentes variables climáticas seleccionando cuatro puntos representativos para cada una de las cinco subcuencas en estudio. Para delimitar un día con precipitación se utilizó un umbral de precipitación de 0.1 mm, posteriormente se realizaron las acumulaciones mensuales y anuales por cada subcuenca. De acuerdo a la precipitación se pueden identificar dos tendencias en la climatología, la primera afecta a la cabecera del Júcar (Alarcón y Contreras), la segunda la cuenca media y baja (Molinar, Tous y Huerto Mulet). En la cabecera del Júcar la precipitación se ha disminuido en el periodo 1980-2007 en 39.2 mm/año, en la cuenca media y baja se ha incrementado la precipitación en 26.1 mm/año (Figura 2). De acuerdo a la temperatura se han tenido incrementos en toda la cuenca en el periodo 1980-2007 para todos los meses (hasta -0.5°C) excepto abril y mayo donde se tiene un decremento de la temperatura de hasta -0.3°C .

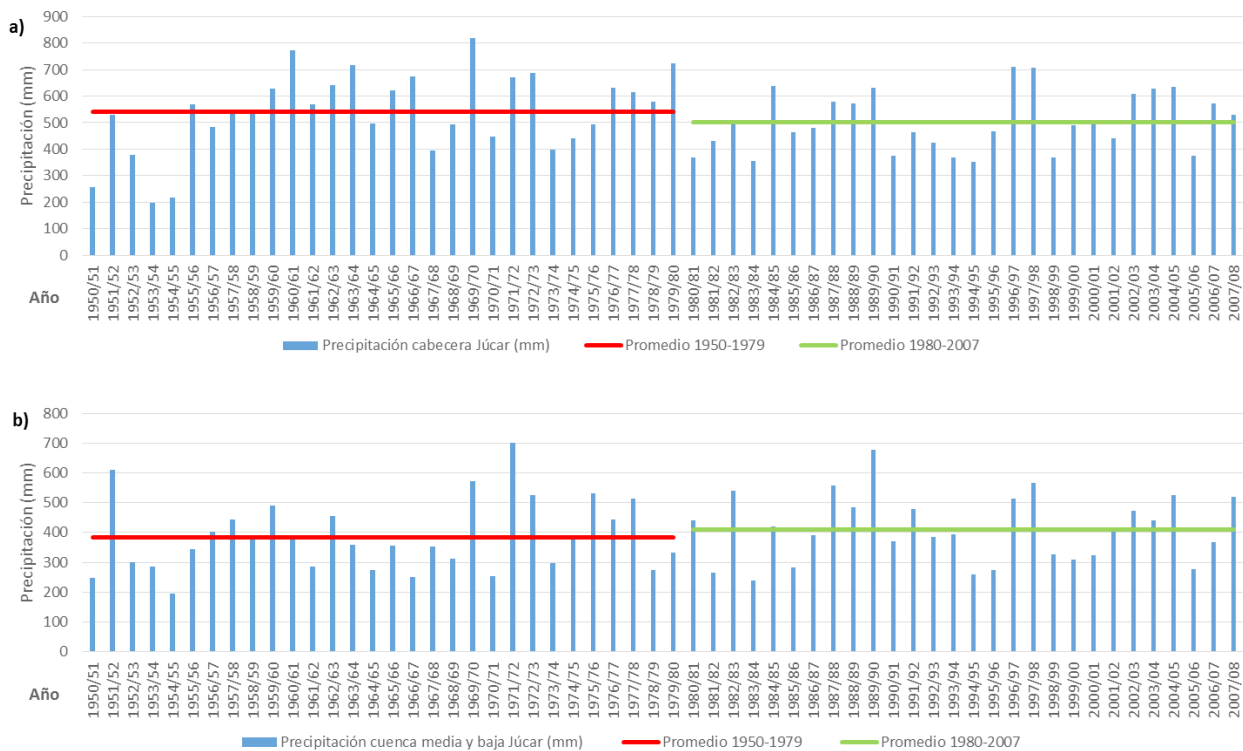


Figura 2 | Precipitaciones anuales para la cuenca del Júcar; a) cabecera de la cuenca; b) cuenca media y baja. Elaboración propia a partir de datos obtenidos de Spain02 versión 2.

Por otro lado se tiene información de las aportaciones restituidas a régimen natural en el periodo 1940-2012 (Pérez-Martín *et al.*, 2013) y utilizadas en diferentes estudios (Pedro-Monzonis *et al.*, 2015; Suárez-Almiñana *et al.*, 2017). Además ha sido utilizada en el Plan Hidrológico del Júcar (CHJ, 2014). La caracterización de las aportaciones indica una reducción después de 1980, en promedio se ha presentado una disminución de $529 \text{ hm}^3/\text{año}$ en los últimos años (1980-2012). Con base en las restituciones a régimen natural se pueden identificar distintos periodos de sequía 1952/53-1957/58, comienza un cambio en la tendencia a partir de 1973/74-1979/80, a partir de 1980/81 se tienen diferentes periodos de sequía, pudiéndose identificar 1980/81-1986/87, 1991/92-1995/96, 1998/99-1999/00 y 2004/05-2007/08.

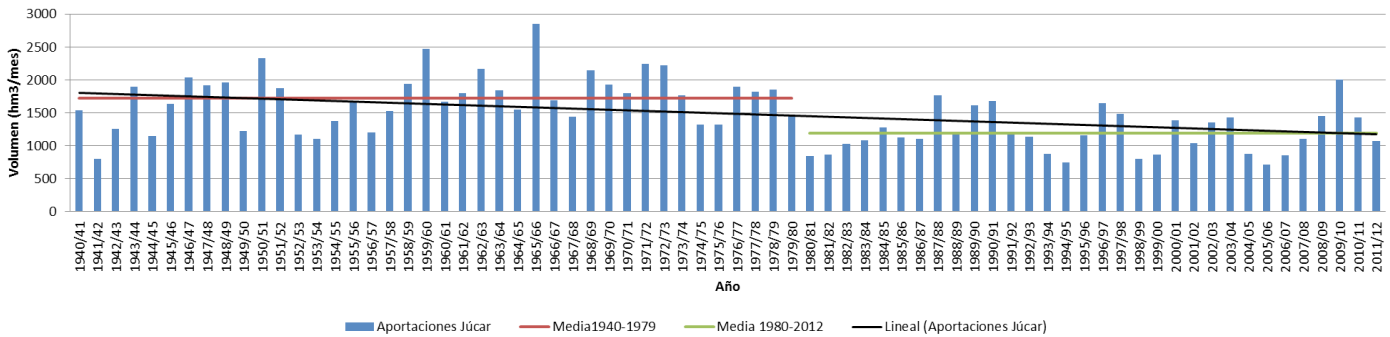


Figura 3 | Aportaciones anuales para toda la cuenca del Júcar (Pérez-Martín *et al.*, 2013)

RESULTADOS

Calibración de modelos precipitación-aportación en el Periodo 1950-1979

Para obtener estos resultados se realizaron diversas calibraciones mediante el algoritmo SCE-UA e Hipercubo latino, este se eligió debido a su trayectoria de resultados eficientes probado en otros trabajos. El periodo seleccionado para calibración fue 1950-1979 para las cinco subcuencas y para el presente estudio se presentan la serie anual calibrada, así como el año medio (Figura 4). El modelo HBV así como el algoritmo de Hipercubo latino fue capaz de ajustarse a las diferentes subcuencas analizadas. En la Tabla 1 se presentan los 8 parámetros calibrados en el periodo 1950-1979. Para las subcuencas de Alarcón, Contreras y Huerto Mulet se tienen buenas calibraciones mensuales mediante los diferentes coeficientes de bondad de ajuste (Tabla 2). Para el caso de las subcuencas Molinar y Tous que se encuentran en la cuenca media se realizó una calibración anual debido a que las aportaciones en esta zona proceden en mayor medida de escorrentía subterránea con una gran inercia temporal lo que no se reflejaba adecuadamente mediante la calibración mensual (Tabla 2).

Las aportaciones para el periodo 1950-1979 se encuentran distribuidos de la siguiente manera en la cuenca del Júcar, en la cabecera se tiene 29% en Alarcón, 25.68% en Contreras, la cuenca media 18.89% en Molinar y 15.50% en Tous, finalmente la cuenca baja representa un 10.93% en Huerto Mulet. Las diferentes calibraciones anuales y mensuales se presentan en la Figura 4 para las diferentes subcuencas donde se tiene una buena aproximación en las diferentes calibraciones.

Tabla 1 | Parámetros calibrados para las diferentes subcuencas en el periodo 1950-1979.

Subcuenca	β	FC (mm)	PWP (mm)	L_{max} (mm)	k_0	k_1	k_2	K_{perc}
Alarcón ¹	1.10	371	206	26	0.055	0.020	0.00112	0.006
Contreras ¹	1.00	472	237	44	0.464	0.021	0.00146	0.016
Molinar ²	1.00	137	27	500	0.800	0.040	0.00030	0.600
Tous ²	1.59	137	74	88	0.118	0.037	0.00176	0.083
Huerto Mulet ¹	1.00	279	187	2	0.352	0.351	0.00276	0.281

¹Calibración mensual ²calibración anual

Tabla 2 | Bondad de ajuste para las diferentes subcuencas para el periodo 1950-1979

Calibración	Subcuenca	% Aportación natural	HBV			
			NSE	LNSE	R	A
1950-1979	Alarcón ¹	29.00	0.79	0.70	0.90	0.99
	Contreras ¹	25.68	0.63	0.66	0.80	0.99
	Molinar ²	18.89	0.10	0.14	0.48	0.99
	Tous ²	15.50	0.35	0.28	0.60	0.99
	Huerto Mulet ¹	10.93	0.61	0.62	0.78	0.99

¹Calibración mensual ²calibración anual

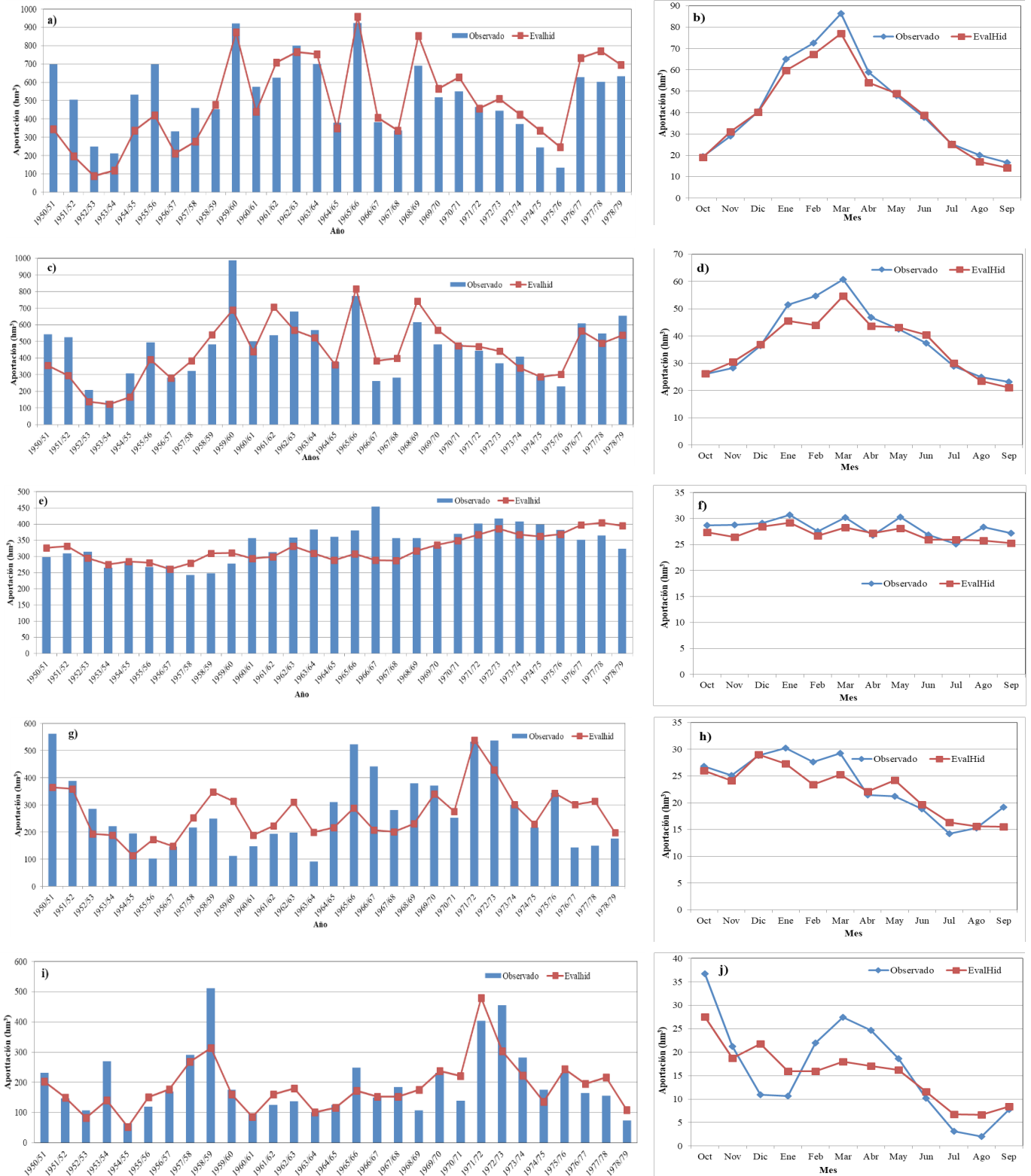


Figura 4 | Calibración para el periodo 1950-1979 para las subcuencas a) Alarcón anual; b) Alarcón media mensual; c) Contreras anual; d) Contreras media mensual; e) Molinar anual; f) Molinar media mensual; g) Tous anual; h) Tous media mensual; i) Huerto Mulet anual y j) Huerto Mulet media mensual

Simulación del Periodo 1980-2007 y análisis de la variación en aportaciones

La segunda fase del trabajo consiste en aplicar los parámetros obtenidos de las calibraciones realizadas en el periodo 1950-1979 al periodo posterior 1980-2007. Los resultados representan correctamente las tendencias, sin embargo los cambios en las condiciones climáticas no explican suficientemente el decremento de las aportaciones; a excepción de Huerto Mulet que presentó buenos resultados tanto en el primer periodo como en el segundo. En las subcuencas Alarcón, Contreras, Molinar y Tous se realizaron re-calibraciones con el objetivo de encontrar mediante el modelo hidrológico explicación a las diferencias observadas. Para ello se procedió a modificar únicamente el coeficiente de infiltración (β) y el de evapotranspiración potencial de la vegetación. Se seleccionaron estos dos parámetros considerando la hipótesis de que a lo largo de los años anteriores y posteriores se ha producido un cambio en los usos del suelo en cabeceras, que han pasado de agricultura de secano a vegetación natural debido a la migración de la población rural a las ciudades. Esto se traduciría en los parámetros del modelo HBV en una reducción de la retención de agua en el suelo (parámetro β) por el cese en la roturación de suelos y un aumento de la evapotranspiración por el crecimiento de vegetación natural donde antes el suelo quedaba desnudo por las actividades agrícolas (aumento del coeficiente de cultivo en la ETP. Los parámetros resultantes se presentan en la Tabla 3.

El escurrimiento a régimen natural se ve reducido en un porcentaje considerable donde los cambios en la variabilidad climática explican parte del decremento en los escurrimientos. En la cabecera de la cuenca (Alarcón y Contreras) se tiene disminución en la precipitación en un 14% en promedio con respecto al periodo (1950-1979). En la cuenca media (Molinar y Tous) con un 8%, los cambios no son significativamente diferentes. En la cuenca baja (Huerto Mulet) se presentaron incrementos en las precipitaciones.

En el caso de las subcuencas de Molinar y Tous se comprobó que el cambio en la aportación no era explicable del mismo modo que para las cuencas anteriores. Los datos registran un cambio brusco en la aportación registrada, que al proceder del almacenamiento subterráneo anterior no se ve alterada al afectar los parámetros de comportamiento del agua en el suelo. En este caso solo se puede ajustar los resultados mediante un cambio en las condiciones iniciales (1980) del almacenamiento subterráneo. Una posible explicación a esta corrección podría deberse a un error en los datos con los que fueron restituidas las aportaciones al régimen natural, ya que coincide con el periodo de desarrollo de los regadíos con aguas subterráneas en el acuífero de La Mancha. La restitución a régimen natural consideraba una estimación indirecta de las extracciones del acuífero que por la ausencia de datos podría haber sido infravalorada para los primeros años.

En el caso específico de la subcuenca Huerto Mulet el incremento de las aportaciones es explicado adecuadamente por el aumento en las precipitaciones.

Las re-calibraciones mejoran de manera significativa el ajuste con los cambios en β , almacenamiento subterráneo y evapotranspiración (Tabla 4).

En la subcuenca Alarcón el escurrimiento medio restituido a régimen natural se reduce de 519.6 hm³/año (1950-1979) a 293.8 hm³/año (1980-2007), esto es un 43%. Los cambios en la precipitación explican decremento en los escurrimientos del 19%, posteriormente con los cambios que podrían ser debidos a la infiltración y la evapotranspiración. Al considerar un incremento de β en 0.41 (1.61) y un incremento en la evapotranspiración del 10% ocasiona una reducción de la aportación en un 43% lo que da un buen ajuste con los datos de caudales en este periodo histórico. Con dichos cambios la distribución interanual se ha reproducido de manera satisfactoria para ambos periodos de tiempo, ya que es diferente para el periodo 1950-1979 y para el periodo 1980-2007 (Figura 5).

En la subcuenca Contreras el escurrimiento medio restituido a régimen natural se reduce de 461.7 hm³/año (1950-1979) a 246.1 hm³/año (1980-2007), esto es un 47%. Los cambios en la precipitación explican decremento en los escurrimientos del 23% y un incremento en el coeficiente de forma de la infiltración de 0.34 y del 10% de la evapotranspiración explica la disminución en las aportaciones en un 23%. Sumado el efecto de la variación climática más el cambio de la cobertura vegetal e infiltración se tiene que hay una reducción del 46% similar que en periodo histórico (Figura 5). Al igual que en Alarcón la distribución interanual es bien representada haciendo las consideraciones anteriores.

En el caso Molinar después de la mencionada corrección en el dato de reservas en el acuífero, todavía no se obtiene una aproximación aceptable. Dada la evolución del uso del suelo en esta zona, que pasó de agricultura de secano a regadío. Para la re-calibración se consideró un cambio en el parámetro de forma de la infiltración (β) de 0.25 y un incremento en la evapotranspiración del 10%. El escurrimiento medio restituído a régimen natural se reduce de 339.38 hm³/año (1950-1979) a 237.64 hm³/año (1980-2007), esto es un 30%. El incremento en la evapotranspiración, volumen inicial del acuífero y el coeficiente de forma de la infiltración indican una disminución en las aportaciones del 29% en el periodo 1980-2007 (Figura 5).

En el caso de la subcuenca Tous se produce una importante alteración en los escurrimientos. El escurrimiento medio restituído a régimen natural se reduce de 278.2 hm³/año (1950-1979) a 167.7 hm³/año (1980-2007), esto es un 40% (restituído). El incremento de temperatura no explica la disminución en las aportaciones. Se consideró un incremento en el parámetro de forma de la infiltración de 0.4 y un 10% de incremento en el coeficiente de cultivo para la evapotranspiración. Con estos cambios mediante la re-calibración el modelo HBV se reduce la aportación en un 40%. Como singularidad al margen de lo anterior, indicar que en la calibración se ha ignorado los resultados para los años 1987-1990 ya que la diferencia entre el volumen simulado y medido es muy alta. El motivo podría estar entre los cambios sucedidos en el río durante estos años: el sistema hidroeléctrico de Cortes II se terminó de construir en 1988, también se encontraba en marcha la construcción de la presa de Tous.

Finalmente para Huerto Mulet a diferencia de las otras subcuencas y a pesar de que el régimen natural sufre muchas alteraciones, los datos indican un incremento de precipitación lo cual explica el incremento en las aportaciones para esta zona. Específicamente para Huerto Mulet se realizó una modelación sin necesidad de recalibrar el modelo ya que los parámetros calibrados han reflejado una buena aproximación tanto para el periodo 1950-1979, como para el periodo 1980-2007. El escurrimiento medio restituído a régimen natural se incrementa a diferencia de los otros casos de 195.30 hm³/año (1950-1979) a 224.09 hm³/año (1980-2007), esto es un 14.7% (restituído). El incremento en la precipitación de acuerdo a los parámetros calibrados explica el incremento del escurrimiento 14.3%, muy aproximado a los datos restituídos (Figura 5). Para este caso la distribución interanual no es bien representada, posibles causas pueden ser los embalses presentes en la zona. El embalse Forata con un volumen útil de 23 hm³ construido en 1969 y el embalse Bellús construido en 1995 el cual tiene una capacidad útil de 69.2 hm³, los cuales almacenan agua a partir de octubre y hasta el mes de febrero.

Tabla 3 | Parámetros recalibrados para las diferentes subcuencas en el periodo 1980-2007.

Subcuenca	β	FC (mm)	PWP (mm)	L_{max} (mm)	k_0	k_1	k_2	K_{perc}
Alarcón	1.61	371	206	26	0.055	0.020	0.00112	0.006
Contreras	1.34	472	237	44	0.464	0.021	0.00146	0.016
Molinar	1.25	137	27	500	0.800	0.040	0.00030	0.600
Tous	1.99	137	74	88	0.118	0.037	0.00176	0.083
Huerto Mulet	1.00	279	187	2	0.352	0.351	0.00276	0.281

Tabla 4 | Bondad de ajuste para las diferentes subcuencas para el periodo 1980-2007.

Calibración	Subcuenca	% Aportación natural	HBV			
			NSE	LNSE	R	A
1980-2007	Alarcón ¹	24.95	0.75	0.79	0.72	0.99
	Contreras ¹	20.98	0.86	0.86	0.82	0.83
	Molinar ²	20.18	0.10	0.11	0.33	0.99
	Tous ²	14.35	0.22	0.43	0.60	0.83
	Huerto Mulet ¹	19.54	0.40	0.46	0.72	0.99

¹Calibración mensual ²calibración anual



Figura 5 | Calibración para el periodo 1980-2007 para las subcuencas a) Alarcón anual; b) Alarcón media mensual; c) Contreras anual; d) Contreras media mensual; e) Molinar anual; f) Molinar media mensual; g) Tous anual; h) Tous media mensual; i) Huerto Mulet anual y j) Huerto Mulet media mensual.

A continuación se muestra una comparación de la calibración (C1) y re-calibración (C2) para los años 1980-2007 a partir de la cual se puede concluir que la re-calibración presenta un volumen similar al del periodo al restituído, la tendencia de ambas calibraciones es la misma, sin embargo la C1 sobre-estima los escurrimientos para toda la cuenca. En promedio anual se tiene una aportación restituída de 1154.24 hm³/año, la calibración C1 estima una aportación de 1678.33 hm³/año y la calibración C2 estima un volumen de 1204.52 hm³/año. En la Figura 6 se presentan las diferentes calibraciones, así como el volumen restituído para la cuenca del Júcar.

Para toda la cuenca del Júcar se analizaron las dos calibraciones, la primera C1 calibrada para el periodo 1950-1979 y su re-calibración C2 para adaptarla a los años 1980-2007. La calibración C1 sobrevalora los aportes para los años 1980-2007 lo cual motiva y la re-calibración del modelo justificada por los cambios en el uso del suelo. También se comprueba que han cambiado las condiciones climáticas, pero su efecto en las aportaciones es inferior a lo observado. En la Figura 7 se presenta la serie anual para la cuenca del Júcar donde se aprecia claramente la disminución en las aportaciones a partir de 1980, así como la aproximación lograda con la calibración y re-calibración descritas.

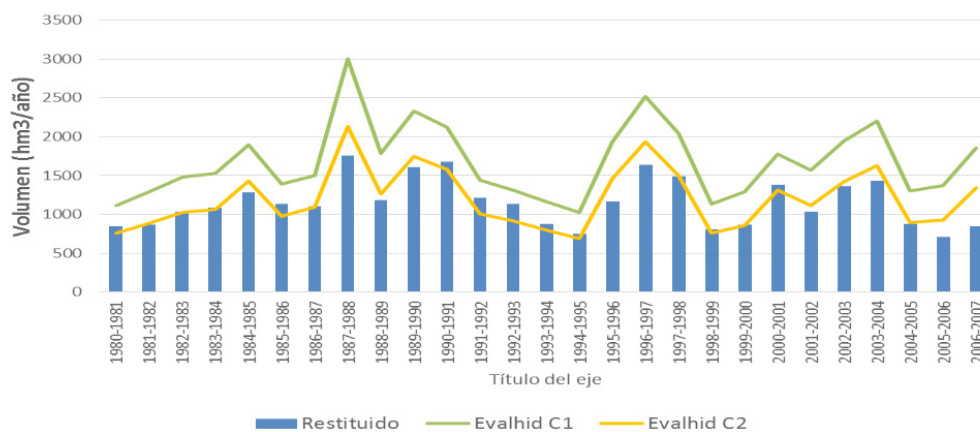


Figura 6 | Calibración (C1) y re-calibración (C2) anual para cuenca del Júcar en el periodo 1980-2007.

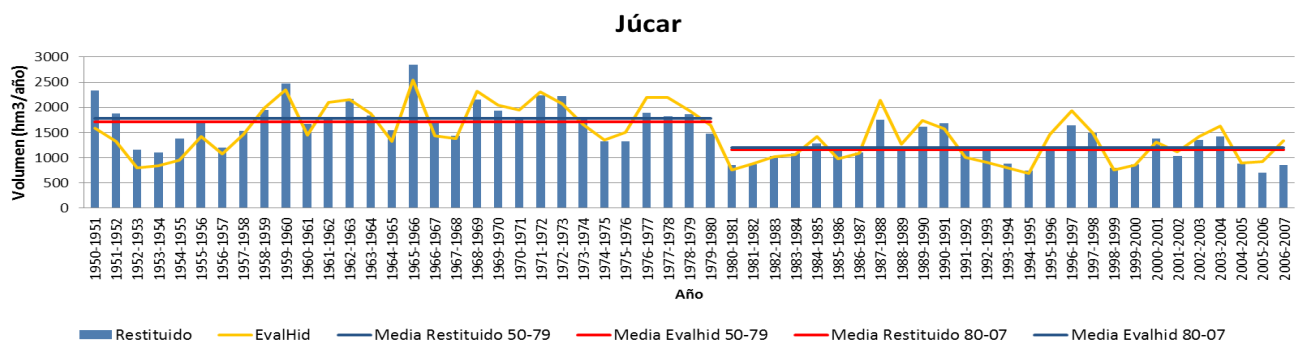


Figura 7 | Aportaciones totales anuales para la cuenca del Júcar restituídas y calibradas para los periodos 1950-1979 y 1980-2007

DISCUSIÓN

Este estudio analiza el descenso de caudal en la cuenca del Río Júcar, durante el periodo 1950-2007, la cual no es explicada totalmente por el descenso en la precipitación recibida y el incremento en la temperatura. Se ha ensayado la corrección de parámetros escogidos del modelo que pudieran ser explicados por alguna circunstancia acaecida en la realidad, como es el cambio en los usos del suelo.

La evaluación asume que la diferencia en caudales para el periodo 1980-2007 es cierta, pero se comprueba que a lo largo del proceso; el cambio climático solo explica un porcentaje de la variación. Debido a ello, en la búsqueda de respuestas que expliquen esta pérdida se ha considerado la influencia de la cubierta vegetal y los cambios en el uso de suelo, puesto que estos contribuyen en la evapotranspiración y a la infiltración de este proceso natural; y son considerados en los modelos hidrológicos como parámetros constantes pero que en realidad cambian debido a muchos factores.

Las consecuencias del cambio de uso de suelo es difícil de cuantificar, puesto que depende de un conjunto de factores tanto naturales como socioeconómicos. Su impacto sobre la escorrentía superficial depende también de muchas variables como la precipitación, el tipo de cobertura vegetal, la práctica del riego, la evapotranspiración, la edafología, entre otros (FAO, 2002). Un cambio en la cubierta del suelo con especies de menor a mayor evapotranspiración conducirá a un descenso en la aportación media. De una revisión de 94 cuencas de recepción experimentales, (Bosch y Hewlett, 1981) concluyeron que el establecimiento de una cubierta forestal en un terreno con núcleos de vegetación aislados reduce la escorrentía superficial de agua, contrariamente, un cambio de una cubierta vegetal de mayor a menor evapotranspiración incrementará la escorrentía superficial media: una reducción en la cubierta forestal incrementa el aporte de agua (Bosch y Hewlett, 1981). El impacto, sin embargo, depende en gran medida de las prácticas de manejo y de los usos de la tierra alternativos. Una explotación forestal cuidadosa y selectiva tiene un efecto limitado sobre el caudal (entendiendo que esto implica impedir que se modifique significativamente la cobertura vegetal).

Los resultados obtenidos y las hipótesis realizadas concuerdan con afirmaciones de otros autores como: FAO (2012) que afirma que los cambios de uso de suelo, la compleja topografía y el cambio climático ocasionan que los impactos sean mayores en la escorrentía. Rico Amorós (2002) indica que el exceso en los bombeos que se han realizado en la cuenca media, han reducido el caudal base en el Júcar por la sobreexplotación del acuífero de la mancha oriental debido a los bombeos para atender nuevos regadíos. Se puede concluir que el modelo desarrollado es capaz de explicar mediante la variación en los parámetros indicados la disminución registrada en el volumen de aportaciones en la cuenca.

Con respecto a la brusca reducción registrada en las aportaciones de la cuenca media se ha planteado como posible explicación que estamos en un periodo en que los bombeos de agua se incrementan sin ningún control directo. Es factible pensar que durante esos años realmente se produjeran extracciones mayores a las estimadas en estudios previos y que son las que se han utilizado en la restitución de las series con las que se contrastaron de la aportación intermedia en el tramo de la Mancha más la construcción de embalses o falla de los mismos, que generan una variación considerable en los caudales y que las fechas en que estos tomaron presencia coinciden con las tendencias que muestran las series.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha comprobado que los cambios en la precipitación y evapotranspiración han influido en las aportaciones naturales de agua en la cuenca del Júcar. Sin embargo no explican la totalidad de la disminución de la escorrentía natural. En el artículo se ha especulado sobre los cambios en el uso del suelo como explicación adicional para alcanzar la reducción registrada en la escorrentía.

El modelo lluvia-escorrentía HBV fue capaz de ajustarse de acuerdo a los cambios en las variables que dependen de las características físicas de la cuenca y de los cambios que se han presentado en los usos del suelo. Los parámetros que se han revisado pueden justificarse por el cambio de la cobertura vegetal, que altera el proceso de infiltración e incrementa la evapotranspiración. A efectos de modelación se ha dividido en dos periodos de tiempo debido al cambio en la hidrología denominado como efecto 80. Evidentemente los cambios en la vegetación no pueden haberse producido en un solo año, pero sí es factible que la percepción de los mismos señale este año en concreto por la coincidencia con otros fenómenos climáticos casuales como el paso de un periodo de mucha lluvia a uno de sequía.

De acuerdo a los resultados obtenidos, los cambios en la cobertura vegetal, la infiltración, evapotranspiración y precipitación de manera conjunta pueden explicar completamente los cambios en la escorrentía natural en la cuenca del Júcar.

Por lo tanto es una conclusión relevante la necesidad de considerar los cambios en las condiciones del territorio, que siempre se consideran constantes, en la formulación de los modelos hidrológicos. Estos factores pueden ser relevantes en el resultado de escorrentía y disponibilidad hídrica.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), La secretaria de Educación Pública (SEP) así como al Ministerio de Economía, industria y competitividad por su financiación en el proyecto ERAS “Estimación del Riesgo Ambiental Frente a las sequías y el Cambio climático” Clave CTM2016-77804-P.

REFERENCIAS

- Agroseguro. (2015). *35 Años 1980-2014 El Sistema Español de Seguros Agrarios En Cifras*. Reporte de Agrupación Española de Entidades Aseguradoras de los Seguros Agrarios Combinados, Madrid, España.
- Allen, R. G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith. M. (1998). *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements*. Report of Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO.
- Belda Ibañez, E. (2016). *Desarrollo de Herramientas Para El Análisis y Modelación de Calidad de Aguas En Humedales. Aplicación En El Ámbito Del Parque Natural de La Albufera de Valencia*. Universidad Politecnica de Valencia, Valencia, España. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/63417> (July 13, 2018).
- Bergström, S. (1976). *Development and Application of a Conceptual Runoff Model for Scandinavian Catchments*. Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI) RHO7: 134. Disponible en: <http://www.citeulike.org/group/14742/article/8861475> (June 24, 2018).
- Bosch, J.M, Hewlett, J.D. (1982). A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of hydrology*, 55(1-4), 3-23. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(82\)90117-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(82)90117-2).
- Cabezas Calvo-Rubio, F. (2015). *Análisis estructural de modelos hidrológicos y de sistemas de recursos hídricos en zonas semiáridas*. Universidad de Murcia, Murcia, España. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=128376> (July 15, 2018).
- Changnon, S.A., Fosse, E.R., Lecomte E.L. (1998). Interactions between the Atmospheric Sciences and Insurers in the United States. *Climate Change*, 42, 51-67. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9265-9_7
- CHJ. (2007). *Plan Especial de Alerta y Eventual Sequía En La Confederación Hidrográfica Del Júcar*. Reporte de la Confederación Hidrográfica del Júcar. Valencia, España.
- CHJ. (2014). *Plan Hidrológico De La Demarcación Hidrográfica Del Júcar*. Reporte de la Confederación Hidrográfica del Júcar. Valencia, España.
- CHJ. (2015). *Plan Hidrológico De La Demarcación Hidrográfica Del Júcar*. Reporte de la Confederación Hidrográfica del Júcar. Valencia, España.
- Darshana, Pandey, A., Pandey, R.P. (2013). Analysing Trends in Reference Evapotranspiration and Weather Variables in the Tons River Basin in Central India. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 27(6): 1407-1421. <https://doi.org/10.1007/s00477-012-0677-7>
- Djaman, K., Balde, A. B., Sow, A., Muller, B., Irmak, S., N'Diaye, M. K. Manneh, B., Moukoubi, Y. D., Futakuchi, K., Saito, K. (2015). Evaluation of Sixteen Reference Evapotranspiration Methods under Sahelian Conditions in the Senegal River Valley. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3, 139-159. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.02.002>

- Espadafor, M., Lorite, I.J., Gavilán, P., Berengena J. (2011). An Analysis of the Tendency of Reference Evapotranspiration Estimates and Other Climate Variables during the Last 45 Years in Southern Spain. *Agricultural Water Management*, 98(6), 1045-1061. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.01.015>
- FAO. (2002). *Relaciones Tierra-Agua En Cuencas Hidrográficas Rurales*. Reporte de tierras y aguas de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO. Roma, Italia.
- Hargreaves, G.H., Allen, R.G. (2003). History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(1), 53-63. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(2003\)129:1\(53\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2003)129:1(53))
- Hernández-Bedolla, J., Solera, A., Paredes-Arquiola, J., Pedro-Monzonis, M., Andreu, J., Sánchez-Quispe, S. (2017). The Assessment of Sustainability Indexes and Climate Change Impacts on Integrated Water Resource Management. *Water*, 9(3), 213. <https://doi.org/10.3390/w9030213>
- Herrera, S., Gutiérrez, J.M., Ancell, R., Pons, M.R., Frías, M.D., Fernández, J. (2012). Development and Analysis of a 50-Year High-Resolution Daily Gridded Precipitation Dataset over Spain (Spain02). *International Journal of Climatology*, 32(1): 74-85. <https://doi.org/10.1002/joc.2256>
- Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., Morán-Tejeda, E., Zabalza, J. (2012). Recent Trends in Iberian Streamflows (1945-2005). *Journal of Hydrology*, 414-415, 463-475. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.023>
- De Luis, M., Brunetti, M., González-Hidalgo, J.C., Longares, L.A. (2010). Changes in Seasonal Precipitation in the Iberian Peninsula during 1946-2005. *Global and Planetary Change*, 74(1), 27-33. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.06.006>
- Marcos-García, P., 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), 35-52. <https://doi.org/10.4995/ia.2017.6361>
- Momblanch, A., Paredes-Arquiola, J., Andreu, J. (2017). Improved Modelling of the Freshwater Provisioning Ecosystem Service in Water Scarce River Basins. *Environmental Modelling and Software* 94, 87-99. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.033>
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. (1970). River Flow Forecasting through Conceptual Models Part I - A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Pandey, P.K., Dabral, P.P., Pandey, V. (2016). Evaluation of Reference Evapotranspiration Methods for the Northeastern Region of India. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(1), 56-67. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.02.003>
- Paredes-Arquiola, J., Solera, A., Andreu, J., Lerma, N. (2013). Herramienta EvalHid Para La Evaluación de Recursos Hídricos. https://aquatool.webs.upv.es/files/manuales/aquatool/Manual_Tecnico_EvalHid.pdf (June 20, 2018).
- Pasini, S., Torresan, S., Rizzi, J., Zabeo, A., Critto, A., Marcomini, A. (2012). Climate Change Impact Assessment in Veneto and Friuli Plain Groundwater. Part II: A Spatially Resolved Regional Risk Assessment. *Science of The Total Environment*, 440, 219-235. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.096>
- Pedro-Monzonis, M., Ferrer, J., Solera, A., Estrela, T., Paredes-Arquiola, J. (2015). Key Issues for Determining the Exploitable Water Resources in a Mediterranean River Basin. *Science of the Total Environment*, 503-504, 319-328. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.07.042>
- Pérez-Martín, M.A., Thurston, W., Estrela, T., del Amo, P. (2013). Cambio En Las Series Hidrológicas de Los Últimos 30 Años y Sus Causas. El Efecto 80. *III Jornadas de Ingeniería del Agua (JIA 2013)*. *La protección contra los riesgos hídricos*, (1) 527-534. Valencia. España.
- Rico-Amorós, A.M. (2002). Insuficiencia de recursos hídricos y competencia de usos en la comunidad valenciana. *Boletín de la A.G.E. N.º 33*, 23-50
- Samani, Z. (2000). Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(4), 265-267. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2000\)126:4\(265\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2000)126:4(265))

Steele-Dunne, S., Lynch, P., McGrath, R., Semmler, T., Wang, S., Hanafin, J., Nolan, P. (2008). The Impacts of Climate Change on Hydrology in Ireland. *Journal of Hydrology*, 356(1-2): 28-45. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.03.025>

Suárez-Almiñana, S., Pedro-Monzonis, 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>

Tejedor, E., de Luis, M., Cuadrat, J.M., Esper, J., Saz, M.Á. (2015). Tree-ring-based drought reconstruction in the Iberian Range (east of Spain) since 1694. *International journal of biometeorology*, 60(3), 361-372. <https://doi.org/10.1007/s00484-015-1033-7>