

Análisis de la asignación sectorial y espacial del agua en la Cuenca del Ebro: impactos de la escasez y las sequías

DANIEL CRESPO (*)

JOSÉ ALBIAC (*)

TAHER KAHIL (**)

ENCARNA ESTEBAN (***)

1. INTRODUCCIÓN

La presión sobre los recursos hídricos en muchas cuencas del mundo está aumentando por el crecimiento de la población y la intensificación de las actividades económicas. Es especialmente preocupante el estado de las cuencas en regiones áridas y semiáridas donde la escasez de agua se está convirtiendo en un serio problema, que previsiblemente se verá agravado por los impactos del cambio climático. A nivel global, las extracciones de agua se han multiplicado por seis en los últimos cien años, lo que casi duplica el crecimiento de la población (Shiklomanov 1999, WWC 2000, Biemans et al. 2011). En la actualidad, alrededor de un 35 por cien de la población habita en zonas con severa escasez de agua y más del 65 por cien de los ríos y ecosistemas acuáticos experimentan una degradación entre moderada y severa (Alcamo et al., 2000, Vörösmarty et al., 2010). En este contexto, la gestión de los recursos hídricos se ha convertido en una política medioambiental fundamental y necesaria, no solo para una

(*) Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria-IA2, Zaragoza.

(**) International Institute for Applied Systems Analysis-IA2, Viena.

(***) Facultad de Ciencias Sociales y Humanas. Universidad de Zaragoza-IA2, Teruel.

- Revista Española de Estudios Agrosociales y Pesqueros, n.º 250, 2018 (127-159).

Recibido noviembre 2017. Revisión final aceptada febrero 2018.

correcta gestión de estos recursos, sino para la adaptación de los mismos a las futuras presiones que el cambio climático va a imponer.

La gestión de los recursos hídricos en las zonas áridas y semiáridas es una tarea compleja en especial durante los períodos de sequía, donde se provocan fuertes impactos económicos y ambientales. Las decisiones de gestión sobre las políticas de agua se deberían tomar dentro del marco de la acción colectiva con la participación de los grupos de interés involucrados e incluyendo aspectos sociales, económicos y medioambientales. Además, para afrontar las sequías es fundamental la incorporación de información sobre el coste de oportunidad de las asignaciones de agua que permita una evaluación del impacto de las políticas de gestión de estos eventos (Ward, 2014).

La modelización hidroeconómica es una herramienta importante para la gestión del agua en cuenca ya que permite analizar la asignación del agua y el coste de oportunidad del recurso ante los distintos usos. Los modelos hidroeconómicos sirven para analizar la asignación de recursos hídricos entre múltiples usuarios de tal manera que se optimiza el valor económico del uso del agua (Brouwer y Hofkes, 2008). Estos modelos integran los aspectos hidrológicos, económicos y medioambientales de una cuenca, y permiten capturar las distintas interacciones entre estos elementos. Estos modelos facilitan el diseño de políticas para lograr una gestión más sostenible de los recursos hídricos (McKinney *et al.*, 1999; Cai *et al.*, 2003; Booker *et al.*, 2005; Pulido *et al.*, 2008; Harou *et al.*, 2009).

En este trabajo se plantea un modelo hidroeconómico de la cuenca del Ebro para analizar las actuales asignaciones de agua entre los distintos usos y usuarios. El modelo incluye un escenario donde se simula el impacto que tiene la sequía en las asignaciones de agua, así como el establecimiento de distintos caudales ecológicos para preservar los ecosistemas de la cuenca. El modelo hidroeconómico está formado por un componente hidrológico, un componente económico y un componente medioambiental. El componente hidrológico es una forma simplificada de la hidrología de la cuenca (Cai *et al.*, 2003) y consiste en una red que conecta nodos de entradas y salidas de agua. Los nodos pueden ser de oferta de agua (ríos o pantanos) o de demanda (polígonos de riego, redes urbanas o ecosistemas acuáticos). El componente económico está formado por las actividades de

regadío y las actividades urbana e industrial de la cuenca. Finalmente, el componente medioambiental representa los ecosistemas acuáticos a través del establecimiento de caudales ecológicos. La función objetivo maximiza los beneficios económicos y medioambientales de la asignación del agua de la cuenca, bajo distintos escenarios de disponibilidad de agua.

La contribución fundamental de este estudio es la elaboración de un modelo hidroeconómico de la cuenca del Ebro para analizar la distribución espacial y sectorial del impacto sobre la renta de la escasez de agua. Aunque existen trabajos previos con un enfoque de modelización hidrológica en esta cuenca (Graveline et al., 2014), se trata de modelos locales que solo evalúan el impacto económico del cambio climático y la modernización del regadío en un polígono de riego específico, sin analizar las interacciones espaciales y sectoriales del resto de usos de la cuenca. Otra contribución de este trabajo es la incorporación en el modelo del coste económico para los agricultores de la implantación de los caudales ecológicos.

2. LOS MODELOS HIDROECONÓMICOS

Los modelos hidroeconómicos representan de forma simplificada las relaciones entre los recursos hídricos, y los usos económicos y medioambientales. Estos modelos representan los nodos de demanda y oferta de agua, y su conexión mediante la hidrología de la cuenca. Por otro lado, el componente económico representa las actividades económicas de los usos agrario, urbano e industrial. Finalmente, el componente medioambiental representa los servicios que proveen los ecosistemas. Estos modelos constituyen una herramienta esencial para el análisis de la escasez de agua, las sequías y el cambio climático.

La representación del componente hidrológico de una cuenca es una tarea compleja que requiere información detallada tanto hidrológica como biofísica a nivel desagregado. Uno de los principales problemas es que esta información no está generalmente disponible. Un enfoque alternativo es la utilización de datos históricos de gestión de agua y/o datos simulados de la red, que permiten construir una forma reducida del modelo hidrológico para cualquier cuenca en estudio (Cai *et al.*, 2003). La cuenca se representa como una red de nodos de agua entrelazados que se determi-

nan mediante ecuaciones hidrológicas simplificadas del balance de masas de agua o con ecuaciones de regresión (Labadie, 2004). Este enfoque de modelización ha sido ampliamente utilizado en la literatura para analizar el impacto de distintas regulaciones sobre la asignación de los recursos hídricos, los costes del recurso y los beneficios de los usuarios (McKinney *et al.*, 1999; Cai *et al.*, 2003; Booker *et al.*, 2005; Gilmour *et al.*, 2005; Ward y Pulido, 2008; Connor *et al.*, 2013; Dinar y Nigatu, 2013; Kahil *et al.*, 2015).

Los beneficios económicos de la utilización del agua en el regadío se determinan conjuntamente a partir de modelos de programación matemática positiva. Los modelos examinan el comportamiento óptimo del regadío bajo un conjunto de restricciones técnicas y económicas y de disponibilidad de recursos. El beneficio económico del uso urbano se estima mediante funciones de oferta y demanda de agua urbana que relacionan el uso del agua con el precio y otras variables explicativas como la renta, el clima o la estructura de los hogares (Young y Loomis, 2014).

Finalmente, los beneficios de los servicios de los ecosistemas acuáticos se puede representar mediante modelos de respuesta de los ecosistemas a la asignación de agua junto con estudios de valoración económica de los servicios de los ecosistemas (Keeler *et al.*, 2012). Cuando la información de valoración medioambiental y de indicadores del estado de los ecosistemas no está disponible, el uso medioambiental del agua se puede representar mediante restricciones de caudal ecológico mínimo (Mombloch *et al.*, 2016).

La literatura recoge un buen número de modelos hidroeconómicos que analizan la distribución de los recursos hídricos en distintas cuencas. En estos trabajos se estudia el impacto de distintas medidas de política de agua en la gestión de los recursos hídricos. Algunos trabajos incluyen simulaciones sobre elementos relacionados con el cultivo como la variabilidad del regadío y las decisiones de riego de los agricultores o bajo distintos escenarios climáticos (Kuhn *et al.*, 2016; Torres *et al.*, 2016). En otros modelos hidroeconómicos se analiza la efectividad y el impacto de medidas de oferta como la construcción de embalses o canales (Bhaduri *et al.*, 2016; Bekchanov *et al.*, 2017). Algunos trabajos incluyen la utilización del agua subterránea, analizando el impacto del vaciado de acuíferos y las estrategias

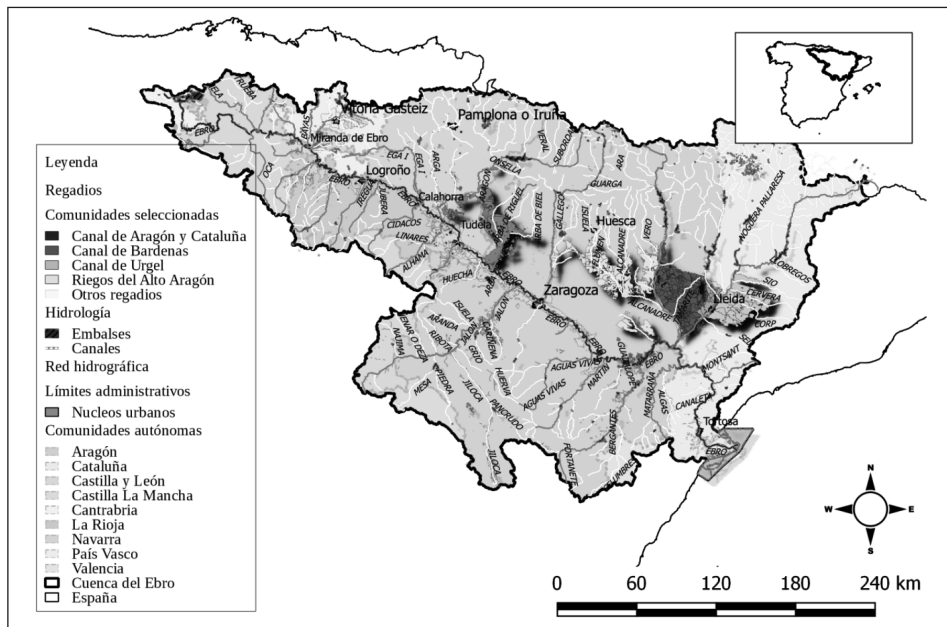
de recuperación (Graveline, 2016; MacEwan *et al.*, 2017; Kahil *et al.*, 2016). También hay trabajos que examinan la adopción de nuevas tecnologías de riego para incrementar la producción de los cultivos y reducir el uso del agua (Medellin-Azuara *et al.*, 2012; Bekchanov *et al.*, 2016).

3. LA CUENCA DEL EBRO

La cuenca del Ebro está situada en el noreste de la Península Ibérica y tiene una extensión de 85.660 km² que incluye nueve comunidades autónomas (Figura 1). La población en la cuenca alcanza los 3,2 millones de habitantes con una densidad de población de 38 habitantes/km². Las principales actividades económicas son el sector servicios (63% del Valor Añadido Bruto), el sector industrial (25%), la construcción (9%), y el sector agrario (3%).

Figura 1

CUENCA DEL EBRO Y POLÍGONOS DE RIEGO SELECCIONADOS



Fuente: CHE (2017).

Los recursos hídricos renovables de la cuenca del Ebro se estiman en unos 14.600 hm³/año (1), con unas extracciones de 8.460 hm³ de los que 8.110 hm³ son recursos superficiales (incluyendo el trasvase de 270 hm³ al País Vasco y Cataluña) y 350 hm³ son recursos subterráneos (CHE, 2015). Las extracciones para uso agrario alcanzan los 7.680 hm³ y cubren el regadío de las actuales 710.000 ha de cultivo. Las extracciones para uso urbano son 630 hm³, de los que 360 hm³ abastecen los centros urbanos de la cuenca con una población de 3 millones de habitantes (hogares e industrias conectadas a la red), 200 hm³ abastecen la red urbana de Bilbao y 70 hm³ abastecen la red urbana de Tarragona y de otras poblaciones del Campo de Tarragona. Las extracciones directas de las industrias alcanzan los 150 hm³, y también hay extracciones no consuntivas para refrigeración de centrales (3.100 hm³) y para producción hidroeléctrica (38.000 hm³). En la cuenca del Ebro la presión sobre la cantidad de agua responde fundamentalmente al uso agrícola, aunque la presión es mucho menor que en las cuencas del centro y sur peninsular. La presión sobre la calidad de agua deriva de los usos industriales y urbanos en forma de contaminación puntual y difusa, y de la contaminación difusa por nutrientes y salinidad que proviene de las actividades agrarias.

Los afluentes más importantes del río Ebro son el Aragón, Gállego, Cinca y Segre. Estos afluentes aportan aproximadamente el 65 por cien del agua disponible en la cuenca y alimentan los canales de los principales polígonos de riego. Los canales más importantes en estas subcuencas son el Canal del Bardenas, el Canal de Monegros, el Canal del Cinca, el Canal de Aragón y Cataluña y el Canal de Urgel. El sector agrícola demanda el 91 por cien del agua de la cuenca y la producción depende de la disponibilidad de agua. Los principales cultivos de regadío en la cuenca son alfalfa, maíz, cebada, trigo y arroz, y las zonas de regadío con mayor demanda de agua son Riegos del Alto Aragón, Canal de Aragón y Cataluña, Canal de Bardenas, y Canal de Urgel.

La producción ganadera en la cuenca del Ebro tiene una gran importancia, con un censo de animales de 11,0 millones de cabeza en porcino, 1,4 millones en vacuno, 4,4 millones en ovino, y 82,4 millones en aves. El

(1) Media para el periodo 1980-2005, que es inferior a la media de 16.400 hm³ del periodo 1940-2005.

valor de esta producción ganadera es de unos 7.000 millones de Euros frente a un valor de producción de los cultivos en regadío de unos 2.000 millones de Euros. El valor de la producción de cereales y forrajes en regadío alcanza unos 1.000 Millones de Euros y buena parte se destina a la alimentación del ganado en la cuenca. El uso de agua por la ganadería alcanza los 57 hm³, lo que representa una fracción mínima de las extracciones de agua (0,7%). El suministro de agua a la ganadería intensiva en periodos de escasez de agua está garantizado porque una parte significativa de las explotaciones está conectada a redes urbanas con prioridad de suministro, y porque los ganaderos podrían transportar agua desde las redes urbanas a las explotaciones no conectadas en caso de necesidad. La producción ganadera supone un problema serio de contaminación de los recursos hídricos, que podría remediarse con una mayor integración de los estiércoles en la fertilización de los cultivos (2).

La cuenca del Ebro cuenta con una gran variedad de ecosistemas acuáticos, riparios, esteparios, fluviales de montaña y ecosistemas en desembocadura. La cuenca incluye seis zonas húmedas incluidas en el convenio RAMSAR, ciento cuatro Zonas de Especial Protección para Aves (ZEPA) y doscientos setenta y seis Lugares de Importancia Comunitaria (LIC). También hay varios Espacios Naturales Protegidos y Reservas de la Biosfera (CHE, 2007b). Estos espacios son el hábitat para muchos ecosistemas dependientes del agua. La presión sobre los recursos hídricos en la cuenca y las sequías entrañan una amenaza para la supervivencia de estos ecosistemas. Uno de los ecosistemas más importantes de la cuenca es el Delta del Ebro, que es el mayor delta de la península y uno de los más importantes del Mediterráneo.

La gestión hídrica en la cuenca del Ebro mantiene la cultura del agua del país, donde existe una fuerte tradición de cooperación entre los grupos de usuarios organizada en el marco de las confederaciones hidrográficas. Este enfoque institucional sirve para que los grupos de usuarios participen

(2) Este problema de contaminación existe en toda la Unión Europea, y la Directiva de Nitratos no ha conseguido mejorar la situación en los últimos decenios. En la UE los estiércoles contienen 7 millones tN, lo que podría sustituir buena parte de los 11 millones tN de los fertilizantes minerales. Los excedentes de nitrógeno provocan una entrada de 6 millones tN del sector agrario en los cursos de agua (Leip et al. 2011), contribuyendo de forma sustancial a la carga de 4 millones tN de contaminación que los ríos vierten en las aguas costeras (Seitzinger et al. 2010).

en el diseño, aplicación y cumplimiento de las reglas y la gestión. La lógica de este enfoque se deriva de los distintos tipos de bienes y servicios que proporciona el agua y que pueden clasificarse en bienes privados, bienes comunales, y bienes públicos. El agua potable de las redes urbanas se aproxima a un bien privado (rivalidad y exclusión), el agua de riego de los cursos superficiales y acuíferos se aproxima a un bien comunal (rivalidad y no exclusión), y el agua que sostiene a los ecosistemas se aproxima a un bien público (no rivalidad y no exclusión) (Booker *et al.*, 2012). Las características de bien comunal y bien público son una razón importante para este enfoque institucional basado en las confederaciones para lograr la acción colectiva de los grupos de usuarios.

La gestión de los recursos hídricos en el Ebro y en el resto de cuencas se caracteriza por un alto grado de descentralización con la intervención de los grupos de usuarios y otros grupos de interés en la toma de decisiones y su cumplimiento. El Plan Hidrológico de la Cuenca del Ebro establece la estrategia de gestión del agua a medio plazo. El actual Plan Hidrológico del Ebro 2015-2021 sigue los objetivos de satisfacción de la demanda de agua, el desarrollo regional y sectorial y protección del medio ambiente.

La protección de los ecosistemas se lleva a cabo mediante el establecimiento de caudales ecológicos. El Plan Hidrológico del Ebro 2015-2021 define el caudal ecológico como el régimen que permite mantener de forma sostenible la funcionalidad y estructura de los ecosistemas acuáticos y de los ecosistemas terrestres asociados. Los regímenes de caudales ecológicos se establecen bajo el principio de unidad de cuenca y teniendo en cuenta los usos y demandas actualmente reconocidas. Durante los períodos de sequía prolongada los caudales ecológicos pueden ser menos exigentes, pero esta excepción no se aplica en las zonas de protección de la Red Natura 2000 o de los humedales RAMSAR.

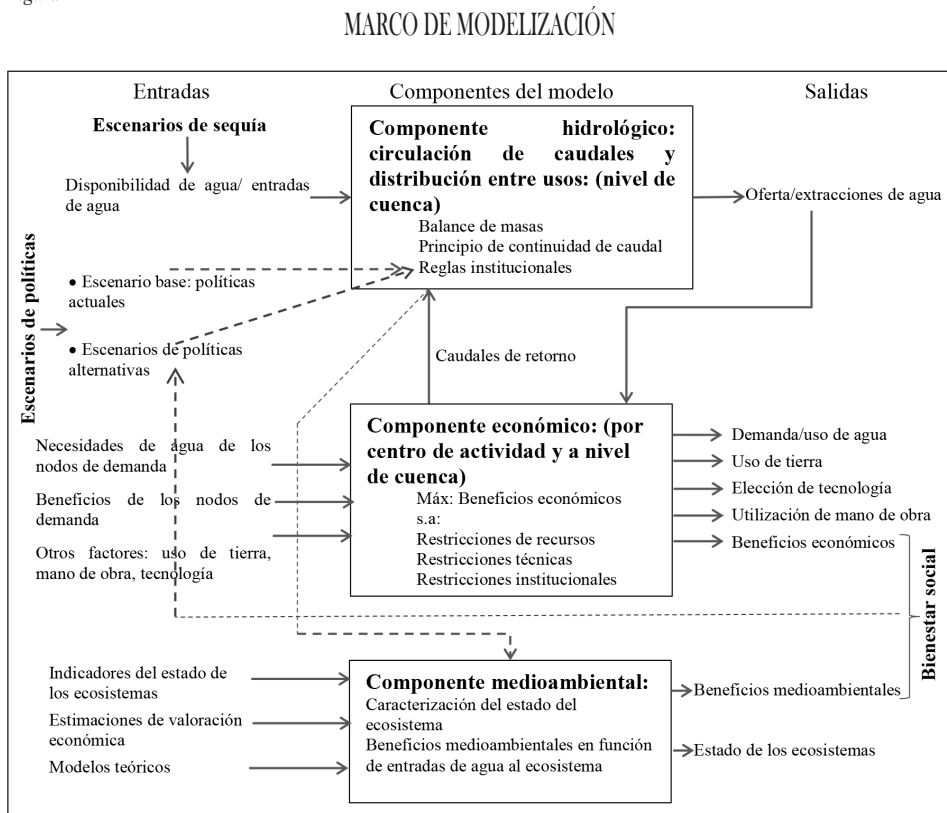
Las sequías están incluidas en la planificación al ser eventos normales y recurrentes del clima mediterráneo. La gestión de las sequías en la cuenca del Ebro se realiza mediante el Plan de Sequía aprobado en 2007 y que se ha incorporado al Plan de Cuenca. El Plan de Sequía tiene como objetivo minimizar los impactos negativos de las sequías en el medio ambiente, la economía y la sociedad. Este plan se basa en indicadores de sequía, programas de medidas, y en la gestión y el control de las sequías

(CHE, 2007a). En función de la severidad de sequía (normalidad, pre-alerta, alerta y emergencia) se establece la combinación de medidas necesarias.

4. MODELO HIDROECONÓMICO DEL EBRO

El modelo hidroeconómico de la cuenca del Ebro está formado por tres componentes: el componente hidrológico en forma reducida, el componente de economía regional y el componente medioambiental. La estructura de modelo hidroeconómico se muestra en la figura 2, junto a las interacciones de flujos de agua entre componentes. Las características de cada componente y la determinación de los coeficientes técnicos y económicos se describen a continuación.

Figura 2



4.1. Componente hidrológico en forma reducida

El componente hidrológico en forma reducida de la cuenca se ha elaborado a partir de información de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE 2007a, 2015). La calibración del componente hidrológico se ha realizado utilizando los datos de caudal y las asignaciones a los usos de agua en condiciones climatológicas normales. El componente hidrológico es una red de nodos conectados en la que los nodos representan unidades físicas del flujo y los enlaces representan la conexión entre nodos. Los nodos pueden ser de oferta como ríos, presas o canales, y de demanda como polígonos de riego o redes urbanas. En el movimiento de flujos de agua entre nodos se utilizan los conceptos básicos de hidrología de las ecuaciones de balance de masas y de continuidad de los ríos. El componente hidrológico permite estimar el volumen de agua disponible que puede utilizarse en las actividades económicas después de considerar las restricciones medioambientales.

La formulación matemática del modelo en forma reducida es la siguiente:

$$A_{sal_d} = A_{ent_d} - A_{per_d} - Ext_d^{RI} - Ext_d^{URB} \quad (1)$$

$$A_{ent_{d+1}} = A_{sal_d} + r_d^{RI} \cdot (Ext_d^{RI}) + r_d^{URB} \cdot (Ext_d^{URB}) + AP_{d+1} \quad (2)$$

$$A_{sal_d} \geq E_d^{min} \quad (3)$$

La ecuación (1) es la ecuación de balance de masas, y determina que el flujo de salida de agua A_{ent_d} en el tramo del río d , es igual al flujo de entrada de agua A_{sal_d} , menos las pérdidas de agua A_{per_d} , la captación de agua para regadío Ext_d^{RI} y la captación para uso urbano e industrial Ext_d^{URB} . La ecuación (2) garantiza la continuidad del flujo del río, donde el flujo de entrada de agua en el siguiente tramo del río $A_{ent_{d+1}}$ es la suma del flujo de salida de agua del tramo anterior A_{sal_d} , los flujos de retorno de los polígonos de riego previos [$r_d^{RI} \cdot (Ext_d^{RI})$], los flujos de retorno urbanos [$r_d^{URB} \cdot (Ext_d^{URB})$], y el caudal que entra en este tramo de los afluentes AP_{d+1} . La ecuación (3) establece que el flujo de salida de agua A_{sal_d} en el tramo de río d debe ser mayor o igual que el caudal mínimo o caudal ecológico en el tramo del río.

La calibración del modelo hidroeconómico se ha realizado estableciendo un conjunto de variables de holgura para cada tramo del río, de tal forma que el modelo replica lo observado en la realidad. La calibración permite que se cumpla la ecuación de balance de masas, ya que existen flujos de entrada y de salida de agua del sistema que no se observan (por ejemplo los flujos subterráneos, la evaporación o algunos retornos). La calibración empleada para cerrar el balance de masas consiste en incluir los flujos no observados, que son la diferencia entre los flujos estimados con el modelo y los flujos medidos en las estaciones de aforo (3).

Las entradas de agua son las aportaciones de los afluentes del Ebro, aguas abajo del río Aragón, y el flujo de entrada del Ebro aguas arriba del río Aragón (disponible descontando los consumos de las entradas en la parte alta del Ebro). La cantidad total de agua disponible en el sistema es 13.200 hm³. El agua asignada a los polígonos de riego y a los usos urbano e industrial depende de las reglas de reparto que establece la confederación en función de las condiciones climáticas y de las reservas de agua en los pantanos de la cuenca. Los datos de entradas de agua al sistema, aforos en el río, en afluentes y en canales se han tomado de las de bases de datos e informes de la Confederación Hidrográfica del Ebro y del Ministerio de Agricultura (CHE 2009, CEDEX 2016).

4.2. Componente económico regional

El componente económico regional está formado por un modelo de optimización de las actividades agrarias y un modelo de uso urbano. El modelo de las actividades agrarias representa la producción en los polígonos de riego más importantes de la cuenca del Ebro: Canal de Bárcenas (CB), Riegos del Alto Aragón (RAA), Canal de Aragón y Cataluña (CAC) y Canal de Urgel (CU) (4). El modelo de uso urbano incluye las ciudades de Zaragoza, Lérida y Huesca.

(3) Una vez estimados los flujos no observados se mantienen para todos los escenarios y simulaciones climáticas del modelo.

(4) El agua que entra en estos polígonos de riego también se utiliza en algunos casos para el abastecimiento de la demanda urbana y ganadera, pero no se ha tenido en cuenta ya que representa una pequeña fracción del volumen de agua utilizado.

El modelo de explotación agraria se ha elaborado para cada polígono de riego y maximiza el beneficio privado de los agricultores de la producción de cultivos sujeta a las restricciones técnicas y de recursos. En el modelo se asume que las funciones de rendimiento son lineales y decrecientes, y que los precios de los factores y los productos son constantes (agricultores precio-aceptantes). La formulación del problema de optimización es la siguiente:

$$\text{Max}(B_k^{RI}) = \sum_{ij} C'_{ijk} X_{ijk} \quad (4)$$

s.a.

$$\sum_i X_{ijk} \leq T_{tierra_{kj}}; j = inundación, aspersión, goteo \quad (5)$$

$$\sum_{ij} A_{ijk} X_{ijk} \leq T_{agua_k} \quad (6)$$

$$\sum_{ij} M_{ijk} X_{ijk} \leq T_{mo_k} \quad (7)$$

$$X_{ijk} \geq 0 \quad (8)$$

donde el B_k^{RI} es el beneficio privado en el polígono de riego k , y C'_{ijk} es la renta neta por hectárea del cultivo i utilizando la tecnología de riego j . La variable de decisión del problema de optimización es X_{ijk} , que es la superficie del cultivo i bajo la tecnología de riego j . La ecuación (5) representa la restricción de tierra $T_{tierra_{kj}}$ disponible en el polígono de riego k equipada con el sistema de riego j . El agua disponible T_{agua_k} en el polígono de riego k viene dada por la ecuación (6), donde A_{ijk} es la necesidad de agua por hectárea del cultivo i con tecnología j . El nivel de agua disponible es la variable que conecta el modelo de optimización de los polígonos de riego y el componente hidrológico. La restricción de mano de obra (7) representa la disponibilidad de trabajo T_{mo_k} en el polígono k , donde M_{ijk} es la necesidad de mano de obra por hectárea del cultivo i en el sistema de riego j .

En este modelo de optimización se incluyen los cultivos más importantes de cada polígono de riego. Los sistemas de riego para los herbáceos son inundación y aspersión, y para los leñosos y hortalizas son goteo

e inundación. La renta neta por hectárea C'_{ijk} es la diferencia entre ingresos y costes directos e indirectos de los cultivos, y viene dada por $C'_{ijk} = P_i Y_{ijk} - CP_i$, donde P_i es el precio del cultivo i , Y_{ijk} es el rendimiento del cultivo bajo la tecnología en el polígono k , y CP son los costes directos e indirectos del cultivo i .

Se ha utilizado el principio de renta ricardiana de disminución del rendimiento al aumentar la escala de producción. La función de rendimiento es una función lineal con rendimientos decrecientes, que sigue el principio de renta ricardiana en el que las tierras que se utilizan primero son aquellas con mayor rendimiento. La función de rendimiento es una función lineal decreciente que depende de la superficie del cultivo bajo tecnología de riego. Por lo tanto la producción es una función cuadrática de la superficie:

$$Y_{ijk} = \beta_{0ijk} + \beta_{1ijk} X_{ijk} \quad (9)$$

En la calibración del modelo de optimización de los polígonos de riego se utiliza la programación positiva matemática (PMP) que sirve para reproducir los usos del agua y la tierra observados en el escenario base (Hottel 1995). En la calibración se utiliza la variante de PMP de Dagnino y Ward (2012), en la que los parámetros se estiman para una función de rendimiento lineal [Ecuación (9)] basándose en las condiciones de primer orden de la maximización de beneficios. Los datos sobre rendimientos, precios, necesidades de agua de los cultivos, costes de producción, disponibilidad de los recursos agua, tierra y mano de obra, junto con la información de los parámetros biofísicos se han obtenido de bases de datos estadísticas, informes, trabajos previos y consultas con los expertos (MARM, 2010; MAGRAMA, 2015; INE, 2009; DGA, 2009; GC, 2009; GN, 2009).

En el uso urbano del agua, se utiliza un modelo que maximiza el excedente económico, suma de los excedentes del consumidor y del productor, de las principales ciudades de la cuenca. El problema de maximización viene dado por:

$$\text{Max } B_u^{URB} = (a_{du}Q_{du} - \frac{1}{2}b_{du}Q_{du}^2 - a_{su}Q_{su} - \frac{1}{2}b_{su}Q_{su}^2) \quad (10)$$

sujeto a:

$$Q_{du} - Q_{su} \leq 0 \quad (11)$$

$$Q_{du}; Q_{su} \geq 0 \quad (12)$$

donde B_u^{URB} es el excedente del consumidor y del productor de la ciudad u . Las variables Q_{su} y Q_{du} son la oferta y la demanda de agua de la ciudad u , respectivamente. Los parámetros a_{du} y b_{du} son el término independiente y la pendiente de la función inversa de demanda, y los parámetros a_{su} y b_{su} son el término independiente y la pendiente de la función de oferta de agua. La ecuación (11) establece que la oferta tiene que ser igual o mayor que la demanda de agua. La oferta de agua Q_{su} es la variable que conecta el modelo de optimización del uso urbano de agua con el componente hidrológico. Los parámetros de la oferta se han obtenido de las estimaciones de los estudios de Arbués *et al.* (2004) y Arbués *et al.* (2010).

4.3. Componente ambiental

Los humedales proveen una variedad de servicios a la sociedad que incluyen la producción de alimentos, la recarga de agua subterránea, el ciclo de nutrientes, la fijación de carbono, el hábitat para distintas especies, o los usos recreativos (Woodward y Wui, 2001). Los beneficios medioambientales que proveen los ecosistemas acuáticos se pueden representar mediante modelos de respuesta ecológica de estos ecosistemas y junto con estudios disponibles de valoración económica de los servicios ecosistémicos (Keeler *et al.*, 2012).

Ahora bien, la representación de los beneficios medioambientales en los modelos hidroeconómicos es muy limitada como señalan distintos autores (Harou *et al.* 2009, Booker *et al.* 2012, Ward y Pulido-Velázquez 2009). Hay dos razones que explican esta ausencia de representación de los beneficios medioambientales. Una razón es la falta de conocimiento sobre los ecosistemas acuáticos en las cuencas y sus funcionalidades ecológicas, una información que requiere una gran inversión en tiempo y recursos. Otra razón es la escasez de estudios sobre valoración económica

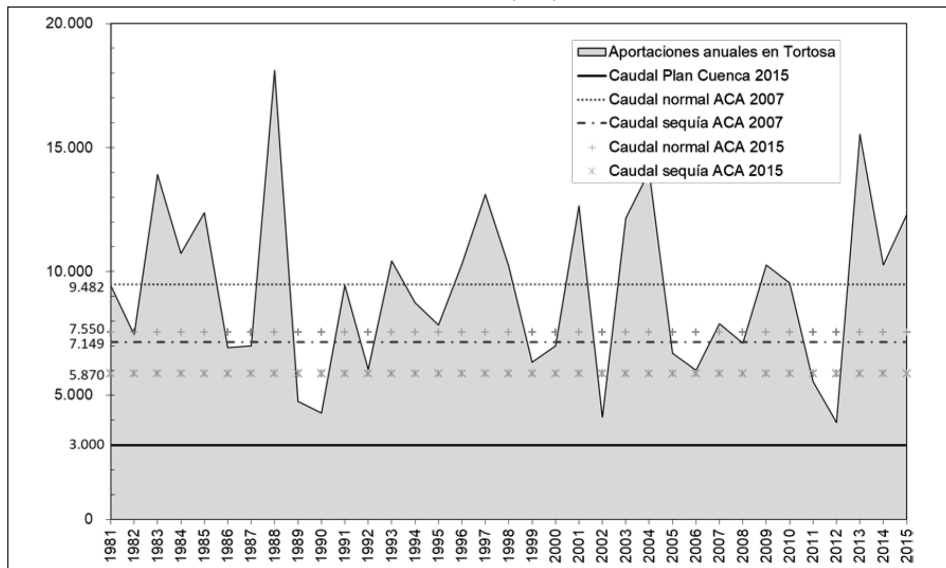
de los servicios medioambientales que proveen los ecosistemas acuáticos en las cuencas.

En ausencia de funciones de respuesta ecológica de los ecosistemas a la cantidad y calidad del agua, que permitan generar indicadores de la salud de los ecosistemas, y de estudios de valoración económica de sus servicios medioambientales, la alternativa es representar los usos medioambientales del agua mediante los denominados caudales ecológicos que son restricciones de caudal mínimo. Este enfoque de caudales mínimos se ha incorporado en el componente medioambiental del modelo ante la falta de información para generar funciones de beneficios medioambientales de los ecosistemas de la cuenca.

Los regímenes de caudales ecológicos en la cuenca se establecen bajo el principio de unidad de cuenca y reconociendo los usos y demandas actualmente existentes. El plan señala que en períodos de sequía prolongada, los caudales ecológicos pueden ser menores. Los caudales ecológicos son restricciones de caudal mínimo en los diferentes puntos del río.

Figura 3

CAUDALES DEL RÍO EBRO EN TORTOSA Y PROPUESTAS DE CAUDALES ECOLÓGICOS DE ACA 2007 Y ACA 2015 (HM³)



Fuente: CHE (2016)

El caudal ecológico en desembocadura es de especial importancia ya que afecta a todos los usuarios de la cuenca, incluidos los ecosistemas. Para analizar el impacto del caudal ecológico en desembocadura se añade una restricción de flujo mínimo en la desembocadura, y esta restricción se modifica para cada escenario de nivel de caudal ecológico. La comparación de los resultados permite analizar el impacto económico que tienen los distintos niveles de caudal ecológico en desembocadura. En este trabajo se toma como referencia el caudal ecológico en vigor en el Plan Hidrológico de 2015, y las propuestas de caudal ecológico de la Agencia Catalana del Agua de 2007 [ACA (2007)] y de 2015 [ACA (2015)]. El caudal ecológico vigente en el Plan del 2015 es un caudal mínimo de 3.000 hm³/año. La propuesta ACA (2007) plantea un caudal mínimo de 9.482 hm³/año en año normal y 7.149 hm³/año en año de sequía. La propuesta ACA (2015) plantea un caudal mínimo de 7.550 hm³/año en año normal y 5.870 hm³/año en año de sequía (Figura 3). Estas propuestas de caudales mínimos en desembocadura se simulan bajo los escenarios de clima normal y sequía.

Hay que señalar que la propuesta de caudal mínimo de la Agencia Catalana del Agua de 2007 es incompatible con la situación hidrológica del Ebro, ya que la propuesta de 9.482 hm³ de caudal mínimo en año normal supera la media de 9.000 hm³ de los caudales anuales observados en desembocadura en los últimos 30 años, lo que supondría reducir las extracciones de agua de las actividades económicas de la cuenca. Los resultados de simulación del modelo hidroeconómico que se presentan a continuación muestran que en condiciones climáticas normales el caudal en desembocadura está ligeramente por encima de la propuesta ACA 2007, pero en condiciones climáticas de sequía la propuesta ACA 2007 supone un enorme impacto negativo sobre las actividades económicas de la cuenca.

4.4. Utilización del modelo hidroeconómico del Ebro

El modelo de la cuenca del Ebro optimiza los beneficios de la cuenca sujeto a las restricciones hidrológicas y a las restricciones técnicas y de recursos en cada sector económico y localización. El problema de optimización de la cuenca se define mediante la expresión:

$$\text{Max } \sum_l B_l \quad \forall l = k, u \quad (13)$$

sujeto a las restricciones de las ecuaciones (1)-(3), (5)-(8) y (11)-(12) y a la restricción de disponibilidad de agua en la cuenca:

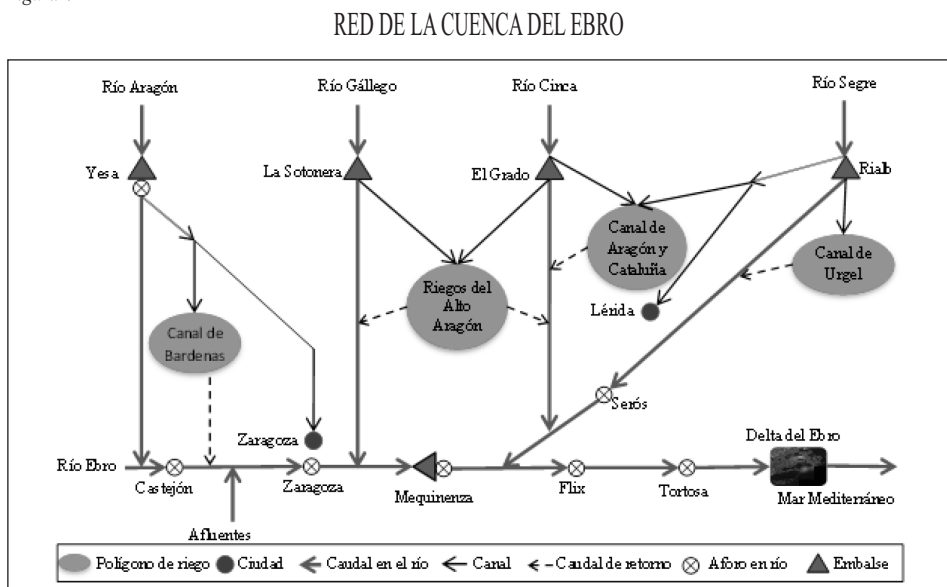
$$\sum_d Ext_d^l \leq \bar{A} \quad \forall l = k, u \quad (14)$$

donde B_l son los beneficios de cada nodo de demanda l . La restricción de la ecuación (14) expresa que la suma de todos los nodos de captación de agua para todos los usos Ext_l^i supera la disponibilidad de agua en la cuenca \bar{A} .

Los nodos de demanda del componente hidrológico son los polígonos de riego, los centros urbanos y los caudales ecológicos. Los nodos de oferta son los ríos y embalses con enlaces entre nodos a través de ríos o canales (Figura 4). El componente económico incluye los polígonos de riego Riegos del Alto Aragón, Canal de Aragón y Cataluña, Canal de Bardenas y Canal de Urgel, y los usos urbanos de las ciudades de Zaragoza, Huesca y Lérida.

El modelo permite analizar el impacto de la implantación de diferentes caudales ecológicos en desembocadura en condiciones climáticas de normalidad y sequía. El agua disponible depende de las condiciones iniciales, y varía en función de las condiciones climáticas. También pueden incorporarse restricciones institucionales para caracterizar las reglas de reparto en la cuenca.

Figura 4



El modelo se simula bajo dos situaciones climatológicas, una situación con condiciones climatológicas normales y una situación de sequía. Los resultados muestran los impactos de la sequía en las asignaciones de agua y los beneficios entre sectores y localización en la cuenca. Las entradas de agua al sistema en condiciones climatológicas normales son las de 2009 y alcanzan los 14.600 hm³. Se ha seleccionado las aportaciones del año 2009 como año normal porque son muy próximas a las aportaciones medidas en régimen natural del período 1981-2006 (CHE, 2015). Descontando el consumo de las subcuencas no incluidas en el modelo, las aportaciones al sistema en condiciones normales son 13.200 hm³/año. Para las condiciones de sequía, las aportaciones se han reducido un 40 por ciento respecto a las condiciones climatológicas normales (5).

5. RESULTADOS DEL MODELO HIDROECONÓMICO DEL EBRO

5.1 Resultados del escenario base de caudales ecológicos

Los resultados del modelo hidroeconómico para la cuenca del Ebro bajo el ‘escenario base’ de caudal ecológico (3.000 hm³), están recogidos en el Cuadro 1. Este cuadro muestra la distribución de agua para la agricultura según cultivo y sistema de riego.

Bajo este escenario, y en condiciones climatológicas normales, los resultados muestran como la superficie de riego es 341.000 ha. Los herbáceos son los cultivos mayoritarios y ocupan 293.000 ha, los leñosos ocupan 43.000 ha y las hortalizas 5.000 ha. La superficie de regadío es 173.000 ha en inundación, 137.000 ha en aspersión y 31.000 ha en goteo. La demanda de agua para regadío es 2.380 hm³ de la que se consumen 1.620 hm³, con una eficiencia de riego del 63% (Cuadro 1). El trabajo empleado en la cuenca es 14.000 UTA, y la renta de los cultivos en regadío alcanza los 347 millones de Euros.

(5) En los anexos se presentan también los impactos en condiciones de sequía moderada, con una reducción de aportaciones del 20%.

Cuadro 1

ASIGNACIONES DE AGUA, USO DE TIERRA Y BENEFICIOS BAJO EL ESCENARIO BASE DE CAUDAL ECOLÓGICO

	Escenario normal	Escenario de sequía
Superficie total (1000 ha)	341	213
herbáceos (1000 ha)	293	173
leñosos (1000 ha)	43	36
hortalizas (1000 ha)	5	4
Mano obra regadío (10 ³ UTA)	14	10
Agua regadío (hm ³)	2.380	1.440
Agua uso urbano (hm ³)	84	84
Retorno (hm ³)	820	510
Beneficio regadío (10 ⁶ €)	347	306
Beneficio uso urbano (10 ⁶ €)	462	462
Precio marginal agua regadío (€/m ³)	0,04	0,13*

*Valor medio (ver Anexo 1, Cuadro A4). El agua de regadío es la aplicada a nivel de parcela, las extracciones para el regadío son 3170 hm³ en condiciones normales y 1890 hm³ en sequía.

El patrón de cultivos y sistemas de riego a nivel de polígono de riego es similar al del nivel agregado. Los herbáceos son el cultivo predominante en todos los polígonos de riego pero existen diferencias en la intensidad de la especialización productiva. Riegos del Alto Aragón es el polígono de riego más especializado en la producción de herbáceos y con mayor dotación de regadío por aspersión. En los polígonos Canal de Aragón y Cataluña y Canal de Urgel destaca la participación de cultivos leñosos respecto al resto de polígonos, y Canal de Bardenas es el polígono con mayor superficie de hortalizas cultivadas. Riegos del Alto Aragón y Canal de Aragón y Cataluña concentran la mayor parte de la superficie de riego por aspersión y goteo, y son los polígonos más tecnificados (6).

En situación de sequía la renta del regadío desciende a 306 millones de Euros, la superficie de regadío baja a 213.000 ha, y la mano de obra disminuye a 10.000 UTA. Esto supone reducciones del 38% en la superficie de regadío, del 28% en la mano de obra, y del 12% en la renta. Las extracciones de agua se reducen a 1.440 hm³ con un consumo de 980 hm³. En condiciones de sequía la superficie no cultivada alcanza las 128.000 ha, y las reducciones se concentran en los cultivos herbáceos y en riego

(6) El Anexo I muestra información detallada de los cultivos y sistemas de riego en los polígonos de riego.

por inundación. Disminuye la producción de arroz y cebada, al ser cultivos con altas necesidades hídricas y bajos rendimientos, mientras que se mantiene la producción de leñosos y hortalizas lo que permite reducir el impacto económico de la sequía. La eficiencia del regadío sube hasta cerca del 70%, porque aumenta la proporción de sistemas de riego más eficientes (Anexo I).

En el escenario base de caudal ecológico en condiciones de sequía, se puede mantener un nivel suficiente de producción en regadío para que las pérdidas de renta de los agricultores sean moderadas y a la vez garantizar el caudal ecológico en desembocadura.

El uso de agua para abastecimiento urbano tiene prioridad sobre los demás usos de agua y sobre las restricciones de caudal ecológico. Las simulaciones del modelo se han realizado fijando las extracciones de agua para cada centro urbano en todos los escenarios de caudal ecológico y situación climática. Se ha estimado que el uso urbano del agua proporciona un excedente social agregado de 462 millones de Euros (Cuadro 2), de los que 326 corresponden a Zaragoza, 103 a Lérida y 33 a Huesca. La mejora de la infraestructura de las redes de abastecimiento y racionalización del uso del agua han provocado una reducción del uso de agua urbana per cápita.

5.2. Resultados de la propuesta de caudales ecológicos ACA 2007

El caudal ecológico en la desembocadura propuesto por la ACA en 2007 es 9.482 hm³ en condiciones normales, y 7.149 hm³ en período de sequía. Este escenario supone asignar a la desembocadura el 65 por cien del caudal de la cuenca en año normal (14.600 hm³). La implantación del caudal ecológico en desembocadura propuesto por la ACA 2007 en condiciones climatológicas normales es compatible con las actividades económicas de la cuenca, ya que el caudal en desembocadura supera a la propuesta de caudal ecológico en 800 Mm³. Pero este estrecho margen de caudal en condiciones normales comprometería el futuro crecimiento y desarrollo económico de los distintos sectores en toda la Cuenca del Ebro.

Cuadro 2

ASIGNACIONES DE AGUA, USO DE TIERRA Y BENEFICIOS BAJO EL ESCENARIO DE CAUDAL ECOLÓGICO ACA 2007

	Escenario normal	Escenario de sequía
Superficie total (1000 ha)	341	0
herbáceos (1000 ha)	293	0
leñosos (1000 ha)	43	0
hortalizas (1000 ha)	5	0
Mano obra regadío (10 ³ UTA)	14	0
Agua regadío (hm ³)	2.380	0
Agua uso urbano (hm ³)	84	84
Retorno (hm ³)	820	59
Beneficio regadío (10 ⁶ €)	347	30
Beneficio uso urbano (10 ⁶ €)	462	462
Precio marginal agua regadío (€/m ³)	0,04	0

*Valor medio (ver Anexo 1, Cuadro A4). El agua de regadío es la aplicada a nivel de parcela, las extracciones para el regadío son 3170 hm³ en condiciones normales.

En condiciones de sequía la propuesta ACA supone asignar a la desembocadura el 85 por cien del caudal de la cuenca (8.410 hm³). Este caudal ecológico acarrearía el abandono de todo el regadío de la cuenca, unas enormes pérdidas de renta y trabajo que incluyen las pérdidas de la ganadería asociada a los cultivos en regadío, y la imposibilidad de cualquier tipo de expansión de la demanda de agua de los usos urbanos e industriales en toda la cuenca. Este escenario implica la pérdida total de renta de los agricultores de Riegos del Alto Aragón, Canal de Aragón y Cataluña, Canal de Bardenas y Canal de Urgel, que alcanza los 350 millones de Euros (Anexo D), a lo que hay que añadir la pérdida total de renta de los agricultores del resto de polígonos de regadío en la cuenca no incluidos en el modelo. La satisfacción del caudal ecológico de la propuesta de la ACA 2007 impide cualquier actividad de regadío en periodos de sequía, pero también supone una restricción seria a las inversiones en todos los sectores que no tengan garantizado el suministro de agua en periodos de sequía.

5.3. Resultados de la propuesta de caudales ecológicos ACA 2015

La propuesta de caudal en desembocadura de la ACA de 2015 consiste en un caudal de 7.550 hm³ en año normal y de 5.870 hm³ en año de sequía. La simulación del modelo con esta propuesta muestra que en condiciones climatológicas normales se obtienen los mismos resultados que

bajo el escenario base de caudales (o situación actual), es decir en condiciones climáticas normales hay suficientes recursos hídricos para cubrir todos los usos económicos y el caudal de 7.550 hm³ en desembocadura.

En condiciones de sequía, la propuesta de un caudal de 5.870 hm³ supone respecto al año normal una caída del regadío cercana a la mitad de la superficie, la reducción de la mano de obra, y una pérdida de renta de 66 millones de Euros. Esta pérdida de renta en sequía sería menor (41 millones €) bajo el caudal ecológico de 3.000 hm³ vigente en el Plan de Cuenca. La utilización del agua en regadío cae a la mitad hasta los 1.170 hm³, así como el consumo de agua de los cultivos (820 hm³). En el patrón de cultivos, hay una caída significativa de la superficie de herbáceos y una pequeña reducción en la superficie de leñosos (Anexo I)

Cuadro 3

ASIGNACIONES DE AGUA, USO DE TIERRA Y BENEFICIOS BAJO EL ESCENARIO DE CAUDAL ECOLÓGICO ACA 2015

	Escenario normal	Escenario de sequía
Superficie total (1000 ha)	341	179
herbáceos (1000 ha)	293	141
leñosos (1000 ha)	43	34
hortalizas (1000 ha)	5	4
Mano obra regadío (10 ³ UTA)	14	10
Agua regadío (hm ³)	2.380	1.170
Agua uso urbano (hm ³)	84	84
Retorno (hm ³)	820	410
Beneficio regadío (10 ⁶ €)	347	281
Beneficio uso urbano (10 ⁶ €)	462	462
Precio marginal agua regadío (€/m ³)	0,04	0,20*

*Valor promedio de todos los polígonos de riego (ver Anexo I, Cuadro A4). El agua de regadío es la aplicada a nivel de parcela, las extracciones para el regadío son 3170 hm³ en condiciones normales y 1550 hm³ en sequía.

La implantación de la propuesta de la ACA 2015 respecto al escenario actual de caudales supone pérdidas adicionales para los agricultores en condiciones de sequía. El reparto del agua en la cuenca en condiciones de escasez viene determinado por la rentabilidad de los cultivos y por la eficiencia de los sistemas de riego.

6. CONCLUSIONES

La preocupación por la cada vez mayor escasez de agua en las cuencas y la progresiva degradación del medio ambiente, tiene como consecuencia

que se estén considerando políticas de gestión sostenible de los recursos hídricos. Las medidas de protección del caudal ecológico en los tramos de los ríos incrementan la competencia por los recursos hídricos, en especial en las regiones áridas y semiáridas con problemas de escasez de agua que se agravan durante los períodos de sequía. Este trabajo pretende contribuir al debate sobre la asignación de agua en la cuenca del Ebro, y a la discusión sobre el caudal ecológico en desembocadura. El análisis se ha desarrollado implementando un modelo hidroeconómico de la cuenca del Ebro que incluye los principales polígonos de riego de la cuenca. El modelo hidroeconómico integra los aspectos hidrológicos, económicos, y medioambientales, para poder identificar el impacto económico de la escasez de agua. El modelo se ha utilizado para simular dos escenarios de caudales ecológicos en desembocadura bajo condiciones climáticas normales y de sequía. Los escenarios simulados de caudal ecológico son los de la situación actual y los de las propuestas de la ACA de 2007 y 2015.

Los resultados bajo el escenario de caudal ecológico vigente muestran que en situación de sequía, la pérdida de renta de los agricultores es importante. La adaptación de los polígonos de riego a la sequía consiste en la modificación del patrón de cultivos y de los sistemas de riego, por lo que la producción se concentra en los cultivos de mayor rentabilidad económica. El ajuste a la escasez de agua reduce la producción de cultivos herbáceos en riego por inundación. La capacidad de reacción en condiciones de sequía es mayor en las zonas de regadío con cultivos rentables y tecnologías de riego más eficientes. El caudal ecológico en desembocadura en vigor en el plan de cuenca no restringe las actividades económicas para cualquier situación climática, y permite en el futuro una gestión más flexible del agua en la cuenca.

En condiciones climáticas normales, el caudal ecológico en desembocadura de la propuesta de la Agencia Catalana del Agua de 2007 está muy cerca del caudal en desembocadura que simula el modelo, lo que podría llegar a impedir el mantenimiento de las actividades económicas en el futuro, provocando el abandono del regadío y perjuicios importantes para la ganadería intensiva que tendría que importar piensos del exterior de la cuenca. Además, esta propuesta de caudal ecológico restringe o impide el crecimiento y desarrollo económico futuro de la cuenca. Cualquier ex-

pansión de la demanda en los sectores urbano e industrial estaría supeditada al abandono del regadío y la caída significativa de la renta de los agricultores.

Por otra parte, la media de caudales anuales en desembocadura observados en los últimos 30 años es 9.000 hm^3 , un nivel inferior a la propuesta de un caudal mínimo de 9.482 hm^3 de la ACA (2007) en año normal. Este caudal mínimo de 9.482 hm^3 será incompatible con los caudales esperados en desembocadura de acuerdo con los escenarios de aprovechamiento previstos en el plan de cuenca para los horizontes 2021 y 2027 (CHE 2015). El cumplimiento de este caudal mínimo en los próximos años supondría limitar o eliminar actividades económicas de la cuenca en los territorios aguas arriba de la desembocadura.

En condiciones de sequía, la propuesta ACA 2007 de caudal en desembocadura supone el abandono de todo el regadío en la cuenca con grandes pérdidas de renta y trabajo, perjuicios importantes para la ganadería intensiva, y también la imposibilidad de expansión de los usos urbanos e industriales en la cuenca.

Los resultados de la propuesta de la ACA de 2015 de caudal ecológico en condiciones climatológicas normales no difieren de los resultados de caudal ecológico vigente en el plan de cuenca. Esta propuesta de caudal ecológico en condiciones climáticas normales se aproxima al caudal observado en desembocadura. Esto significa que la propuesta ACA 2015 constituiría una amenaza para cualquier posibilidad de crecimiento económico en la cuenca. En condiciones de sequía, la pérdida de renta de los agricultores bajo la propuesta ACA 2015 es de 66 millones de Euros, lo que supone unas pérdidas adicionales de 25 millones de Euros respecto al caudal ecológico del plan de cuenca vigente.

Una limitación de este trabajo es que solo se analizan los polígonos de riego con mayor demanda de agua. Los resultados pueden tener un mayor interés si se incluyen los regadíos situados en las regiones de Rioja y Navarra. Otra posible mejora es incluir los ecosistemas que afectan al ciclo del agua, como son los bosques y el resto de vegetación. Estos ecosistemas son importantes para determinar los caudales en cuenca, ya que la expansión de los bosques y la revegetación modifican los caudales de

los ríos. Otra limitación del trabajo es que no se analiza la duración, frecuencia y localización espacial de las sequías, lo que contribuiría al análisis espacial y temporal del impacto de la escasez de agua.

El estudio de la cuenca se puede completar con la incorporación del resto de las zonas de regadío, de un mayor detalle de los usos urbanos e industriales, y de los transvases a otras cuencas. También tendría interés incorporar de forma explícita los principales ecosistemas de la cuenca y sus servicios medioambientales, así como introducir la dimensión estocástica de las sequías.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha recibido el apoyo de los siguientes especialistas: María Ángeles Lorenzo y Daniel Isidoro (CITA), Pablo Bruna (CTA), Rogelio Galván y Miguel Ángel García Vera (CHE). El trabajo se ha realizado en el marco del proyecto INIA RTA2014-00050-00-00 del Ministerio de Economía y Competitividad, financiado en parte con fondos FEDER de la Unión Europea, y con fondos de apoyo al grupo de investigación ECOSISTEMAS del Gobierno de Aragón.

BIBLIOGRAFÍA

- AGENCIA CATALANA DEL AGUA (ACA). (2007). Propuesta de caudales ambientales en el tramo final del río Ebro. Documento de discusión preparado para la Comisión de Sostenibilidad de las Tierras del Ebro por encargo de la Agencia Catalana del Agua y el equipo técnico del PIPDE y elaborado por la Unidad de Ecosistemas Acuáticos del IRTA. Generalitat de Catalunya. Barcelona.
- AGENCIA CATALANA DEL AGUA (ACA). (2015). Revisió i actualització de la proposta de règim de cabals ecològics al tram final del riu Ebre, delta i estuari, Comissió tècnica de sostenibilitat de les Terres de l'Ebre (CSTE). Generalitat de Catalunya. Barcelona.
- ALCAMO, J.; HENRICHS, T. RÖSCH, T. (2000). World water in 2025: global modelling and scenario analysis for the world Commission on water for the 21st Century, Kassel World Water Series, Report 2, Center for Environmental System Research. University of Kassel, Kassel.

- ARBUÉS, F.; BARBERÁN, R.; VILLANÚA, I. (2004). Price impact on urban residential water demand: A dynamic panel data approach. *Water Resources Research*, 40 (11): p. 24-30.
- ARBUÉS, F.; GARCÍA-VALIÑAS, M.; VILLANÚA, I. (2010). Urban Water Demand for Service and Industrial Use: The Case of Zaragoza. *Water Resources Management*, 24 (14): p. 4033-4048.
- BEKCHANOV, M. et al. (2016). Optimizing irrigation efficiency improvements in the Aral Sea Basin. *Water Resources and Economics*, 13: p. 30-45.
- BEKCHANOV, M. et al. (2017). Systematic Review of Water-Economy Modeling Applications. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143 (8).
- BHADURI, A. et al. (2016). Achieving Sustainable Development Goals from a Water Perspective. *Frontiers in Environmental Science*, 4. 64.
- BIEMANS, H. HADDELAND, I., KABAT, P., LUDWIG, F., Hutjes, R., Heinke, J., von Bloh, W., Gerten, D. (2011). Impact of reservoirs on river discharge and irrigation water supply during the 20th century. *Water Resources Research* 47, W03509.
- BOOKER, J.; MICHELSEN, A.; WARD, F. (2005). Economic impact of alternative policy responses to prolonged and severe drought in the Rio Grande Basin. *Water Resources Research*, 41 (2): p. 1-15.
- BOOKER, J. et al. (2012). Economics and the modeling of water resources and policies. *Natural Resource Modeling*, 25 (1): p. 168-218.
- Brouwer, R.; Hofkes, M. (2008). Integrated hydro-economic modelling: Approaches, key issues and future research directions. *Ecological Economics*, 66: p. 16-22.
- CAI X.; MCKINNEY, D.; Lasdon, L. (2003). Integrated Hydrologic-Agronomic-Economic Model for River Basin Management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 129 (1): p. 4-17.
- CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS (CEDEX). (2016). Anuario de Aforos 2013-2014. Dirección General del Agua. MAPAMA. Madrid.
- CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO (CHE). (2007a). Plan Especial de Actuación en Situaciones de Alerta y Eventual Sequía en la Cuenca Hidrográfica del Ebro. Memoria CHE. MIMAM. Zaragoza.
- CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO (CHE), (2007b). Informe de Sostenibilidad ambiental del Plan Especial de Actuación en situaciones de alerta y eventual sequía en la Cuenca Hidrográfica del Ebro. MIMAM. Zaragoza.
- CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO (CHE). (2009). Memoria 2009 Confederación Hidrográfica del Ebro. MARM. Zaragoza.

- CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO (CHE). (2015). Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Ebro. Memoria CHE. MAGRAMA. Zaragoza.
- CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO (CHE) (2016). Prospecto del Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Ebro. MAPAMA. Zaragoza.
- CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO (CHE). (2017). Base de Datos Espacial SITEbro. MAPAMA. Zaragoza.
- CONNOR, J.; KACZAN, D. (2013). Principles for Economically Efficient and Environmentally Sustainable Water Markets: The Australian Experience. En: Schwabe, K., J. Albiac, J. Connor, R. Hassan y L. Meza (Eds.). Drought in Arid and Semi-Arid Regions. Dordrecht: Springer. p. 357-374.
- DAGNINO, M.; WARD, F. (2012). Economics of Agricultural Water Conservation: Empirical Analysis and Policy Implications. *International Journal of Water Resources Development*, 28: p. 577-600.
- DINAR, A.; NIGATU, G. (2013). Distributional considerations of international water resources under externality: The case of Ethiopia, Sudan and Egypt on the Blue Nile. *Water Resources and Economics*, 2-3: p. 1-16.
- GENERALITAT DE CATALUNYA (GC). (2009). Superfícies Municipals Dels Conreus Agrícoles. Any 2009. Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural. Barcelona.
- GILMOUR, J.; LETCHER, R.; JAKEMAN, A. (2005). Analysis of an integrated model for assessing land and water policy options. *Mathematics and Computers in Simulation*, 69: p. 57-77.
- GOBIERNO DE ARAGÓN (DGA). (2009). Base de datos IT de superficies de cultivos por término municipal para El Gobierno de Aragón 2009. Departamento de Desarrollo Rural y Sostenibilidad. Zaragoza.
- GOBIERNO DE NAVARRA (GN). (2009). Base de datos IT de superficies de cultivos por término municipal para el Gobierno de Navarra 2009, Departamento de Desarrollo Rural, Medio Ambiente y Administración Local.
- GRAVELINE, N. (2016). Economic calibrated models for water allocation in agricultural production: A review. *Environmental Modelling & Software*, 81: p. 12-25.
- GRAVELINE, N. et al. (2014). Hydro-economic modeling of water scarcity under global change: an application to the Gállego river basin (Spain). *Regional Environmental Change*, 14: p 119-132.
- HAROU, J. et al. (2009). Hydro-economic models: Concepts, design, applications, and future prospects. *Journal of Hydrology*, 375 (3): p. 627-643.
- Howitt, R. (1995). Positive Mathematical Programming. *American Journal of Agricultural Economics* ,77 (2): p. 329-342.

- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (INE). 2009. Censo Agrario 2009. INE. Madrid.
- Kahil, M.; Dinar, A.; Albiac, J. (2015). Modeling water scarcity and droughts for policy adaptation to climate change in arid and semiarid regions. *Journal of Hydrology*, 522: p. 95-109.
- KAHIL, M. et al. (2016). Hydro-economic modeling with aquifer-river interactions to guide sustainable basin management. *Journal of Hydrology*, 539: p. 510-524.
- KEELER, B. et al. (2012). Linking water quality and well-being for improved assessment and valuation of ecosystem services. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109: p. 18619-18624.
- KUHN, A. et al. (2016). Simulating the viability of water institutions under volatile rainfall conditions - The case of the Lake Naivasha Basin. *Environmental Modelling & Software*, 75: p. 373-387.
- LABADIE, J. (2004). Optimal operation of multireservoir systems: state-of-the-art review. *Journal of water resources planning and management*, 130 (2): p. 93-111.
- LEIP A., ACHERMANN B., BILLEN G. et al. (2011). Integrating nitrogen fluxes at the European scale. En Sutton M., Howard C., Erisman J. et al. (Eds). *The European Nitrogen Assessment*. Cambridge University Press. Cambridge.
- MACÉWAN, D. et al. (2017). Hydroeconomic modeling of sustainable groundwater management. *Water Resources Research*, 53: p. 2384-2403.
- MACIAN-SORRIBES, H.; TILMANT, A.; PULIDO-VELAZQUEZ, M. (2017). Improving operating policies of large-scale surface-groundwater systems through stochastic programming. *Water Resources Research*, 53: p. 1407-1423.
- MANETA, M. et al. (2009). A spatially distributed hydroeconomic model to assess the effects of drought on land use, farm profits, and agricultural employment. *Water Resources Research*, 45: p. 1-19.
- MCKINNEY, D. et al. (1999.) Modeling water resources management at the basin level: review and future directions. SWIM Paper 6. International Water Management Institute. Colombo.
- MEDELLÍN-AZUARA, J.; HOWITT, R.; HAROU, J. (2012). Predicting farmer responses to water pricing, rationing and subsidies assuming profit maximizing investment in irrigation technology. *Agricultural Water Management*, 108: p. 73-82.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y MEDIO AMBIENTE (MAGRAMA). (2015). Anuario de Estadísticas Agrarias. MAGRAMA. Madrid.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, RURAL Y MARINO (MARM). (2010). Análisis de la economía de los sistemas de producción: Resultados técnico-económi-

- cos de explotaciones agrícolas de Aragón en 2009. Subsecretaría de Medio Ambiente, Rural y Marino, MARM. Madrid.
- MOMBLANCH, A. et al. (2016). Using ecosystem services to represent the environment in hydro-economic models. *Journal of Hydrology*, 538: p 293-303.
- PULIDO-VELAZQUEZ, M. et al. (2008). Hydro-economic river basin modelling: The application of a holistic surface-groundwater model to assess opportunity costs of water use in Spain. *Ecological Economics*, 6: p. 51-65.
- SEITZINGER S., MAYORGA E., KROEZE C. et al. (2009). Global river nutrient export trajectories 1970-2050: a Millennium Ecosystem Assessment scenario analysis. *Global Biogeochemical Cycles*. doi: 10.1029/2009GB003587.
- Shiklomanov, I. (1999). *World Water Resources and Water Use: Present Assessment and Outlook for 2025*. State Hydrological Institute. San Petersburgo.
- TORRES, M.; HOWITT, R.; RODRIGUES, N. (2016). Modeling the economic benefits and distributional impacts of supplemental irrigation. *Water Resources and Economics*, 14: p.1-12.
- VÖRÖSMARTY, C. et al. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467: p. 555-561.
- WARD, F. (2014). Economic impacts on irrigated agriculture of water conservation programs in drought. *Journal of Hydrology*, 508: p. 114-127.
- WARD, F.; PULIDO-VELAZQUEZ, M. (2008). Water conservation in irrigation can increase water use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(47): p. 18215-18220.
- WARD, F.; PULIDO-VELAZQUEZ, M. (2009). Incentive pricing and cost recovery at the basinscale. *Journal of Environmental Management*, 90: p. 293-313
- WOODWARD, R.; WUI, Y. (2001). The economic value of wetland services: a meta-analysis. *Ecological economics*, 37: p. 257-270.
- WORLD WATER COUNCIL (2010). *World Water Vision: Making Water Everybody's Business*. Londres: Earthscan.
- YOUNG, R.; LOOMIS, J. (2014). *Determining the economic value of water: concepts and methods*. 2 ed. Oxon: RFF Press and Routledge. 357 p.

ANEXO I. RESULTADOS DESAGREGADOS PARA LA CUENCA DEL EBRO

Cuadro A1

USO DE LA TIERRA Y MANO DE OBRA BAJO ESCENARIOS DE CAUDAL ECOLÓGICO Y CLIMA
(10³ HA Y 10³ UTA)

Clima	Normal					Sequía moderada					Sequía extrema				
	RAA	CAC	CB	CU	Cuenca	RAA	CAC	CB	CU	Cuenca	RAA	CAC	CB	CU	Cuenca
Escenario base de caudales ecológicos															
Superficie	108	83	78	72	341	89	66	63	58	278	69	52	47	45	213
Herbáceos	104	60	73	56	293	85	45	59	43	232	66	32	44	31	173
Leñosos	3	23	2	15	43	3	21	2	14	40	2	20	1	13	36
Hortalizas	1	0	3	1	5	1	0	2	1	4	1	0	2	1	4
Inundación	46	15	60	53	173	36	12	47	41	136	26	9	33	30	98
Aspersión	60	48	16	12	137	51	36	14	10	111	41	26	12	8	87
Goteo	3	19	2	7	31	2	18	2	7	29	2	17	2	6	27
Trabajo	2,3	5,8	1,7	4,3	14,0	1,9	5,2	1,4	3,9	12,3	1,5	4,6	1,1	3,4	10,6
Escenario ACA 2007 de caudales ecológicos															
Superficie	108	83	78	72	341	89	66	63	58	278	0	0	0	0	0
Herbáceos	104	60	73	56	293	85	45	59	43	232	0	0	0	0	0
Leñosos	3	23	2	15	43	3	21	2	14	40	0	0	0	0	0
Hortalizas	1	0	3	1	5	1	0	2	1	4	0	0	0	0	0
Inundación	46	15	59	53	173	36	12	47	41	136	0	0	0	0	0
Aspersión	60	49	16	12	137	51	36	14	10	111	0	0	0	0	0
Goteo	3	19	2	7	31	2	18	2	7	29	0	0	0	0	0
Trabajo	2,3	5,8	1,7	4,3	14,0	1,9	5,2	1,4	3,9	12,3	0	0	0	0	0
Escenario ACA 2015 de caudales ecológicos															
Superficie	108	83	78	72	341	89	66	63	58	278	59	49	35	36	179
Herbáceos	104	60	73	56	293	85	45	59	43	232	56	30	32	23	141
Leñosos	3	23	2	15	43	3	21	2	14	40	2	19	1	12	34
Hortalizas	1	0	3	1	5	1	0	2	1	4	1	0	2	1	4
Inundación	46	15	59	53	173	36	12	47	41	136	23	9	23	24	79
Aspersión	60	49	16	12	137	51	36	14	10	111	34	24	10	6	74
Goteo	3	19	2	7	31	2	18	2	7	29	2	16	2	6	26
Trabajo	2,3	5,8	1,7	4,3	14,0	1,9	5,2	1,4	3,9	12,3	1,3	4,5	0,9	3,0	9,7

a: Unidad de trabajo agrario equivalente a 1.826 horas-año. RAA: Riegos del Alto Aragón. CAC: Canal de Aragón y Cataluña. CB: Canal de Bardenas. CU: Canal de Urgel.

Cuadro A2

USO DE AGUA URBANA Y DE REGADÍO BAJO ESCENARIOS DE CAUDAL ECOLÓGICO Y CLIMA (hm³)

Clima	Normal					Sequía moderada					Sequía extrema				
Zona	RAA	CAC	CB	CU	Total	RAA	CAC	CB	CU	Total	RAA	CAC	CB	CU	Total
Escenario base de caudales ecológicos															
Regadío															
Agua aplicada	790	490	550	550	2380	630	390	440	440	1900	470	290	330	330	1440
Retorno	240	120	200	200	760	190	90	160	160	600	140	70	120	120	450
Urbana					84					84					84
Escenario ACA 2007 de caudales ecológicos															
Agua de riego															
Agua aplicada	790	490	550	550	2380	630	390	440	440	1900	0	0	0	0	0
Retorno	240	120	200	200	760	190	90	160	160	600	0	0	0	0	0
Urbana					84					84					84
Escenario ACA 2015 de caudales ecológicos															
Agua de riego															
Agua aplicada	790	490	550	550	2380	630	390	440	440	1900	400	280	230	260	1170
Retorno	240	120	200	200	760	190	90	160	160	600	120	60	80	90	350
Urbana					84					84					84

RAA: Riegos del Alto Aragón. CAC: Canal de Aragón y Cataluña. CB: Canal de Bardenas. CU: Canal de Urgel.

Cuadro A3

BENEFICIO PRIVADOS BAJO ESCENARIOS DE CAUDAL ECOLÓGICO Y CLIMA (10⁶ €)

Clima	Normal			Sequía moderada			Sequía extrema		
	Regadío	Urbano	Total	Regadío	Urbano	Total	Regadío	Urbano	Total
Escenario base de caudales ecológicos									
Beneficios	347	462	809	336	462	798	306	462	768
Escenario ACA 2007 de caudales ecológicos									
Beneficios	347	462	809	336	462	798	0	462	462
Escenario ACA 2015 de caudales ecológicos									
Beneficios	347	462	809	336	462	798	281	462	743

Cuadro A4

**BENEFICIO PRIVADOS Y PRECIO MARGINAL DEL AGUA BAJO ESCENARIOS DE CAUDAL
ECOLÓGICO Y CLIMA (10⁶ € Y €/m³)**

Clima	Sequía moderada				Sequía moderada				Sequía extrema			
Zona	RAA	CAC	CB	CU	RAA	CAC	CB	CU	RAA	CAC	CB	CU
Escenario base de caudales ecológicos												
Beneficios	95	101	63	88	91	98	62	86	82	90	56	78
Precio marginal del agua	0,04	0,04	0,04	0,04	0,08	0,09	0,07	0,09	0,12	0,15	0,11	0,14
Escenario ACA 2007 de caudales ecológicos												
Beneficios	95	101	63	88	91	98	62	86	0	0	0	0
Precio marginal del agua	0,04	0,04	0,04	0,04	0,08	0,09	0,07	0,09				
Escenario ACA 2015 de caudales ecológicos												
Beneficios	95	101	63	88	91	98	62	86	75	89	47	70
Precio marginal del agua	0,04	0,04	0,04	0,04	0,08	0,09	0,07	0,09	0,18	0,19	0,19	0,21

RAA: Riegos del Alto Aragón. CAC: Canal de Aragón y Cataluña. CB: Canal de Bardenas. CU: Canal de Urgel.

RESUMEN

Análisis de la asignación sectorial y espacial del agua en la Cuenca del Ebro: impactos de la escasez y las sequías

La gestión sostenible de los recursos hídricos requiere de nuevas políticas basadas en un mejor conocimiento sobre la asignación de los recursos hídricos entre los sectores económicos y el medio natural, y sobre los beneficios que se generan para la sociedad. Este trabajo analiza la distribución espacial y sectorial del agua en la cuenca del Ebro, los efectos de la escasez de agua, y el debate sobre el caudal ecológico en desembocadura. El estudio examina en detalle las zonas de regadío que absorben la mayor parte de los recursos, y las propuestas de caudal ecológico en desembocadura. En el análisis se utiliza un modelo hidroeconómico que simula el impacto de distintas asignaciones espaciales y sectoriales del agua. La adaptación del regadío a la sequía consiste en cambios hacia producciones de mayor rentabilidad económica y tecnologías de riego eficientes. Los resultados muestran que las propuestas de caudal ecológico de la Agencia Catalana del Agua impiden el mantenimiento de las actividades económicas y restringen el desarrollo económico de la cuenca en el futuro. En condiciones de sequía, la propuesta de caudales ecológicos de la Agencia Catalana del Agua de 2007 impediría toda actividad de regadío y cualquier expansión del resto de las actividades económicas de la cuenca.

PALABRAS CLAVE: modelización hidroeconómica, escasez de agua, sequía, políticas de agua.

CÓDIGOS JEL: Q25, Q54, D78, C61.

ABSTRACT

The distribution of water resources by sector and location in the Ebro Basin: impacts from water scarcity and droughts

Addressing a more sustainable management of water resources involves new policies that require improved knowledge on water allocations and benefits from the economic and environmental uses of water. This study analyzes the spatial allocation of water resources in the Ebro Basin and the distribution by sector, the effects of water scarcity, and the debate on environmental flows in the Ebro mouth. The analysis focus on the irrigated districts using the major share of resources, and on the environmental flows proposals for the River mouth. A hydro-economic model is developed to simulate the effects of different water distribution scenarios by sector and location. Irrigation adaption strategies during drought periods are changes in crop patterns towards more profitable crops and efficient irrigation technologies. Results show that the environmental flow proposals of the Agencia Catalana del Agua hinder the maintenance of economic activities and restrain the economic development of the basin in the future. Under drought conditions, the environmental flow proposal of the Agencia Catalana del Agua 2007 will not only eliminate all irrigation in the basin, but also exclude the expansion of water demand for other economic activities.

KEY WORDS: hydro-economic modeling, water scarcity, droughts, water policies.

JEL CODES: Q25, Q54, D78, C61.