

El valor de uso del agua en el regadío de la cuenca del Segura y en las zonas regables del trasvase Tajo-Segura

Javier Calatrava¹ y David Martínez-Granados¹

RESUMEN: Este trabajo analiza el valor económico de uso del agua en la agricultura de regadío de la Cuenca del Segura y en las zonas regables que utilizan recursos procedentes del trasvase Tajo-Segura, para lo que se emplea un modelo de programación matemática no lineal que asigna los recursos hídricos y la superficie regable entre los cultivos de cada una de las 64 Unidades de Demanda Agraria de la cuenca. Los valores marginal y medio del agua obtenidos para el conjunto de la cuenca son 0,52 €/m³ y 0,81 €/m³ respectivamente, si bien existen notables diferencias entre zonas. El regadío de la cuenca genera una rentabilidad media privada, medida en términos de margen neto de las explotaciones, de 879 millones de €/año, mientras que el valor de la aportación media anual de los recursos trasvasados desde la cabecera del Tajo se ha estimado en 169 millones de euros.

PALABRAS CLAVES: Economía del agua, valoración económica del agua, uso agrario del agua, programación matemática positiva.

Clasificación JEL: Q25, C61.

DOI: 10.7201/earn.2012.01.01.

The use value of water in the irrigated agriculture of the Segura basin and in the irrigated areas of the Tajo-Segura transfer (SE Spain)

ABSTRACT: This study calculates the use value of water in the irrigated agriculture of the Segura basin and in the irrigated areas served from the Tajo-Segura transfer. Water is valued using a non-linear mathematical programming model that allocates water and irrigated land among crop activities in each of the 64 Water Demand Units of the basin. The marginal and average value of water for the basin are 0,52 €/m³ and 0,81 €/m³ respectively, with marked differences between areas. Irrigation in the Segura basin generates an average annual farm net margin of 879 million €/year, whereas the average annual value of resources transferred from the Tajo basin has been conservatively estimated at 169 million Euros.

KEYWORDS: Water economics, economic valuation of water, agricultural water use, positive mathematical programming.

JEL classification: Q25, C61.

DOI: 10.7201/earn.2012.01.01.

¹ Departamento de Economía de la Empresa, ETSIA, Universidad Politécnica de Cartagena.

Agradecimientos: Los autores agradecen sus valiosos comentarios a dos revisores anónimos. Parte de la información técnico-económica utilizada en el modelo ha sido financiada a través del Proyecto con referencia AGL2006-12293-C02-02/AGR. Durante parte de la realización de esta investigación, David Martínez Granados disfrutó de una beca pre-doctoral financiada con cargo al proyecto europeo IRRIVAL (STREP FOOD-023120).

Dirigir correspondencia a: Javier Calatrava Leyva. E-mail: j.calatrava@upct.es.

Recibido en febrero de 2011. Aceptado en septiembre de 2011.

1. Introducción

El regadío es un factor clave para la producción agraria en muchas zonas del país, especialmente en aquellas con climas semiáridos, caso de la cuenca del Segura, donde la escasez de agua para riego es especialmente severa. A lo reducido de sus precipitaciones se añade una fuerte demanda de agua para la producción de cultivos hortofrutícolas de elevada rentabilidad, así como un notable crecimiento de la población y del sector turístico. La expansión de la agricultura intensiva de regadío durante las últimas tres décadas, en las que la superficie de regadío se ha multiplicado por dos, ha generado una importante presión sobre los recursos hídricos, exacerbando la tradicional situación de escasez de la cuenca, y generando un importante problema de sobreexplotación en muchos acuíferos.

En un contexto de creciente escasez, y existiendo un mayor grado de sensibilización hacia la conservación de los recursos hídricos y los ecosistemas dependientes de los mismos, el reparto del agua genera importantes conflictos entre diferentes usuarios y administraciones autonómicas, conflictos que se agravan durante los frecuentes episodios periódicos de sequía. Además, los escenarios previstos de cambio climático pueden empeorar esta situación en el futuro. La evaluación de posibles alternativas de gestión de los recursos hídricos requiere conocer su impacto económico, especialmente sobre el regadío que es el sector más vulnerable a la escasez, para lo que es esencial la valoración económica de los usos del agua.

Existen numerosos precedentes de análisis económicos del uso agrario del agua en España, desde los más básicos a nivel de cultivo hasta otros que estiman el valor económico del agua a nivel de zonas regables, comarcas, comunidades autónomas, etc. Algún trabajo realiza incluso estimaciones a nivel de cuenca hidrográfica (Berbel y Mesa, 2007, en el Guadalquivir). A nivel nacional, el Grupo de Estudios Económicos del Ministerio de Medio Ambiente realizó una estimación del Margen Neto medio por m³ de agua en todas las comarcas españolas (Maestu y Gómez, 2008), mientras que el estudio de Gil *et al.* (2009) aborda el análisis econométrico de la productividad del uso agrario del agua por provincias. Muchos de los trabajos existentes a nivel nacional estiman funciones de demanda del agua para zonas regables con el objeto de analizar el impacto de políticas tarifarias o de mercados de agua (Albiac *et al.*, 2006 y 2008; Arriaza *et al.*, 2002 y 2003; Ballesteros *et al.*, 2002; Garrido, 2000; Calatrava y Garrido, 2001, 2005 y 2006; Gómez-Limón y Martínez, 2006; Gómez-Limón y Riesgo, 2004; Riesgo y Gómez-Limón, 2005). Otros trabajos realizan estimaciones puntuales de la productividad aparente o del valor medio del agua de riego (Colino y Martínez-Paz, 2007; Maeztu y Gómez, 2008; Berbel *et al.*, 2011).

Sin embargo, y frente a otras zonas como el Guadalquivir o el Duero que han sido objeto de numerosos estudios durante los últimos 15 años, no existen muchos trabajos que estimen el valor del agua en el regadío de la cuenca del Segura. Además, ninguno de ellos realiza un análisis considerando la totalidad de la cuenca. En primer lugar, Alcalá y Sancho (2002) realizan un análisis econométrico del impacto de la disponibilidad de agua sobre el Valor Añadido Bruto (VAB) agrícola en la Región de Murcia utilizando datos provenientes de estadísticas oficiales para el período 1976-

1998. El valor marginal del agua estimado, medido en términos de VAB, oscila entre los 0,32 y los 0,37 €/m³ según los modelos estimados. Puesto que la especificación de los modelos estimados es lineal con respecto a la variable agua, el valor marginal del agua obtenido es constante.

Por su parte, Colino y Martínez-Paz (2007) realizan una estimación de los valores medios de productividad, margen y beneficio neto del agua para los cultivos hortícolas de la Región de Murcia a partir de los datos contenidos en AMOPA (2000). Asimismo, obtienen una disposición media a pagar por el agua de riego de 0,43 €/m³ a partir de las respuestas a una encuesta a invernaderos de la Región de Murcia realizada en 2004/2005. De manera similar al trabajo de Alcalá y Sancho (2002), el valor marginal del agua estimado no depende de la disponibilidad de agua.

Ballestero *et al.* (2002) estiman una curva de valor marginal del agua de riego en la zona regable de Lorca. Finalmente, Albiac *et al.* (2008) proporcionan una estimación, con valores de 2001, de la productividad aparente y del valor medio y marginal del agua de riego (medido en términos de Renta) para aquellas comarcas de las provincias de Alicante y Murcia que pertenecen a la cuenca del Segura, pero no para la totalidad de la cuenca. La productividad aparente estimada oscila entre los 0,75 €/m³ de la Vega del Segura y del Baix Segura y los 3,12 €/m³ del Campo de Cartagena, mientras que el valor medio del agua oscila entre los 0,37 €/m³ de la comarca alicantina del Baix Segura y los 1,40 €/m³ del Campo de Cartagena. Los valores marginales obtenidos por Albiac *et al.* (2008) para el agua de riego en las comarcas de la cuenca del Segura analizadas están en el rango 0,11-0,24 €/m³, valores que son inferiores a los obtenidos en otros trabajos debido a que las disponibilidades de agua consideradas en el análisis son las teóricas contempladas en CHS (1998) y MMA (2001).

El objetivo de este trabajo es valorar económicamente el agua utilizada en el regadío de la cuenca del Segura, así como en las zonas regables que utilizan recursos procedentes del trasvase Tajo-Segura. El uso de un modelo de programación no lineal calibrado permite analizar el impacto de diferentes escenarios de disponibilidad de agua.

La valoración económica del agua de riego se realiza considerando un escenario de disponibilidad de agua en la cuenca más realista que el contemplado en los datos oficiales. Los datos oficiales de disponibilidad de agua en la cuenca son los elaborados en el marco del proceso de planificación hidrológica. Además de basarse en las aportaciones medias anuales de recursos propios de la cuenca desde 1940, se asume que el trasvase Tajo-Segura transfiere anualmente la máxima cantidad establecida legalmente, algo que raramente ocurre. Por ese motivo, se ha considerado un escenario alternativo basado en las aportaciones medias de la cuenca desde 1980 y en el volumen medio trasvasado desde la cuenca del Tajo en los últimos diez años. Este escenario permite una estimación más realista del valor del agua de riego en las diferentes zonas de la cuenca.

Un valor adicional de este trabajo reside en el hecho de que los valores marginal y medio del agua se calculan tanto en términos de disponibilidad de agua en alta (dotaciones brutas) como en cabecera de redes secundarias (de dotaciones netas), lo que permite la interpretación y el uso de los resultados obtenidos tanto a nivel de cuenca como a nivel del uso del agua en las explotaciones.

2. Descripción de la Cuenca del Segura

La Demarcación Hidrográfica del Segura se encuentra en la parte sureste de la península ibérica, tiene una superficie aproximada de 18.870 km², un 3,7% del territorio nacional, y comprende a cuatro comunidades autónomas (Murcia, Andalucía, Castilla-La Mancha y Comunidad Valenciana). El relieve de la cuenca presenta una rica variedad topográfica, en la que se encuentran desde las zonas montañosas de la cabecera en la Sierra del Segura, las llanuras litorales, extensas altiplanicies y los valles y llanuras de los ríos. La mayoría de los recursos superficiales provienen de la cabecera de la cuenca a través del Río Segura, el único río principal de la cuenca, mientras que los afluentes de la margen derecha (Moratalla, Argos, Quipar, Mula y Guadalentín) son ríos de poco caudal (CHS, 2007). En la margen izquierda del Segura predominan las ramblas con caudales discontinuos, escasos y generalmente torrenciales. Una parte importante de los recursos hídricos de la cuenca provienen de los numerosos acuíferos existentes.

La cuenca tiene un clima Mediterráneo caracterizado por un verano muy seco y caluroso y un otoño con lluvias esporádicas y de tipo torrencial. Según zonas, el clima es de tipo Mediterráneo continental, subtropical, subtropical semiárido o subtropical árido. La precipitación media anual es de 400 mm, presentando una fuerte variabilidad temporal y espacial, mientras que la temperatura media oscila entre los 10 y los 18 °C.

El 52,1% de la superficie de la cuenca del Segura corresponde a tierras de cultivo, tanto cultivadas como no cultivadas, mientras que el 45,2% es terreno forestal, el 2,1% son superficies artificiales, el 0,4% masas de agua y el 0,2% humedales (CHS, 2007). La superficie agrícola en la Demarcación Hidrográfica del Segura asciende a 679.976 hectáreas, mientras que la superficie regable es de 389.256 hectáreas, de las que 269.022 hectáreas constituyen la superficie neta efectivamente regada (CHS, 2007).

La agricultura tiene una gran importancia en la economía de la cuenca, tanto en términos del valor de la producción como del empleo y la actividad exportadora. El valor total de la producción agrícola de la Cuenca del Segura depende fundamentalmente del sector hortofrutícola, y por tanto del regadío. Por ejemplo, Albiac *et al.* (2008) estiman la importancia económica del regadío en la parte de la cuenca correspondiente a las provincias de Alicante, Almería y Murcia en 1.070 millones de €/año de ingresos para los agricultores y 536 millones de €/año de renta neta.

3. Oferta y demanda de agua en la cuenca del Segura

En el Cuadro 1 se resumen las estimaciones oficiales más recientes de los recursos utilizados y las demandas de agua en la cuenca del Segura. La media de las aportaciones al régimen natural en el período 1940-2005 es de 823 hm³/año, cifra que incluye tanto los recursos superficiales como los subterráneos renovables. Los recursos subterráneos disponibles se estiman en 534 hm³/año, de los cuales 184 hm³/año corres-

ponden a extracciones no renovables. Los recursos procedentes de la reutilización del agua (retornos de riego y depuración de aguas residuales) son aproximadamente 146 hm³/año, mientras que los procedentes de desalación son 83 hm³/año (CHS, 2007).

En cuanto a los recursos superficiales provenientes del Trasvase Tajo-Segura, los volúmenes netos a trasvasar se establecieron en 540 hm³/año (600 hm³/año brutos en origen menos las pérdidas en el transporte), de los cuáles solamente 466 hm³/año tienen como destino la cuenca del Segura y 335 hm³/año el regadío de la cuenca. Las zonas regables que utilizan agua del trasvase Tajo-Segura, que incluyen algunas zonas no situadas dentro de la Demarcación Hidrográfica del Segura pero pertenecientes a su ámbito de planificación hidrológica, comprenden un total de 135.643 hectáreas, a las que corresponde un total de 400 hm³/año en origen, si bien en la práctica las aportaciones reales han sido muy inferiores.

Esta disponibilidad de recursos no basta para satisfacer la demanda bruta de agua de la cuenca que se estima en 1.962 hm³/año, de los que 1.662 hm³/año corresponden a los usos agrarios (Cuadro 1). Para el cálculo del balance hídrico de la cuenca no se consideran los recursos no renovables utilizados en la cuenca, por lo que, para una demanda de 1.962 hm³/año y un total de recursos renovables de 1.592 hm³/año, se obtendría un déficit estructural de aproximadamente 370 hm³/año. Este déficit se cubre mediante las extracciones de recursos subterráneos no renovables y mediante una aplicación deficitaria de agua a los cultivos en muchas zonas que se estima en 230 hm³/año. Este déficit se debe principalmente al incremento de la superficie de riego durante las tres últimas décadas causado por las optimistas expectativas iniciales sobre los recursos a trasvasar desde la cabecera del Tajo.

CUADRO 1

Balance hídrico de la cuenca del Segura

Recursos (hm³/año)		Demandas (hm³/año)	
Renovables propios	823	Urbana	217
Aportaciones teóricas del ATS	540	Agraria	1.662
Subterráneos no renovables	184	Industriales	23
Reutilización de recursos	146	Ambientales	60
Desalación (otros renovables)	83		
Otros no renovables	35		
Total recursos	1.811	Total demandas	1.962

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CHS (2005, 2007).

La estimación de los recursos medios disponibles mostrada en el Cuadro 1 constituye un escenario poco realista. Aparte de asumir una situación hidrológica normal, se considera también que el trasvase Tajo-Segura proporciona anualmente la totalidad de los 600 hm³ máximos asignados (MMA, 2001). En la práctica, y como consecuencia de la reducción de las aportaciones en la cabecera del Tajo, las cantidades

anuales efectivamente trasvasadas han sido mucho menores, variables e inciertas. Según datos de la Comisaría de Aguas de la CHS, la media de las aportaciones netas reales para el regadío en el período 1978 a 2009 fue de 193 hm³/año, si bien la media de 1999 a 2009 fue de 241,4 hm³/año. De manera similar, la estimación de los recursos renovables propios ha de ser revisada en base a las cifras más recientes. Si bien la media de las aportaciones al régimen natural en el período 1940-2005 es de 823 hm³/año, la media del período 1980-2005 fue de solo 663 hm³/año (CHS, 2006).

4. Metodología

4.1. Justificación de la metodología utilizada

De los diferentes métodos que pueden utilizarse para valorar el agua de riego (método residual, modelos de programación matemática, estimación econométrica de funciones de demanda de agua, métodos de precios hedónicos, métodos de valoración directa, uso de funciones de producción, etc.), se ha optado por la programación matemática como la opción más adecuada para analizar el valor marginal del agua en el regadío de la cuenca del Segura. La modelización de la producción mediante programación matemática se basa en el uso de modelos de asignación de superficie, agua y otros factores de producción entre distintas actividades de cultivo, siendo posiblemente el método más adecuado para obtener funciones de demanda de agua en sistemas agrícolas con más de un cultivo (Young, 2005). Se trata de una metodología que ha sido aplicada por numerosos autores, siendo con diferencia la más extendida y utilizada, y existiendo numerosas aplicaciones a nivel nacional desde trabajos como el de Varela-Ortega *et al.* (1998). Sirvan como ejemplo los trabajos de Albiac *et al.* (2006, 2008), Arriaza *et al.* (2002; 2003) Calatrava y Garrido (2001, 2005, 2006), Garrido (2000), Gómez-Limón y Riesgo (2004), Gómez-Limón y Martínez (2006), Iglesias *et al.* (2003), Iglesias y Blanco (2004) y Riesgo y Gómez-Limón (2005).

La principal ventaja de utilizar la programación matemática es que permite introducir gran cantidad de información técnica y económica al nivel de desagregación que se considere apropiado o para el que se disponga de información, así como estimar el impacto sobre el valor marginal del agua de cambios en los parámetros técnicos y económicos utilizados (por ejemplo, cambios en la disponibilidad de agua, en los precios de los cultivos, en las tarifas del agua, mejoras tecnológicas, etc.).

Otra ventaja es que permite desagregar los resultados al nivel para el que se disponga de información (tipos de explotaciones, comunidad de regantes, zona regable, subcuenca, etc.). La mayoría de los trabajos de valoración de los usos agrarios del agua a nivel nacional realizan análisis en una o varias comunidades de regantes que toman como representativa de una determinada zona (Garrido, 2000; Calatrava y Garrido, 2001), y frecuentemente considerando diferentes tipos de explotaciones de una o varias comunidades de regantes (Arriaza *et al.*, 2002 y 2003; Calatrava y Garrido 2005a, 2005b y 2006; Riesgo y Gómez-Limón, 2005; Gómez-Limón y Martínez,

2006). Los trabajos que hacen análisis a nivel regional o de cuenca hidrográfica raramente lo hacen tomando como unidad del mismo la zona regable, sino que trabajan a nivel generalmente comarcal (Albiac *et al.*, 2006 y 2008). Similar enfoque sigue el modelo MODERE elaborado por el Grupo de Análisis Económico del Ministerio de Medio Ambiente (Maestu y Gómez, 2008; Gutiérrez y Gómez, 2009).

En concreto, en este trabajo se ha optado por considerar como unidades del análisis las 64 Unidades de Demanda Agraria (UDA) que considera la Confederación Hidrográfica del Segura en el proceso de planificación hidrológica. Las UDAs son zonas regables que se caracterizan bien por ser una unidad diferenciable de gestión, bien por el origen de sus recursos, por sus condiciones administrativas, por sus características hidrológicas, o por consideraciones estrictamente territoriales (CHS, 2008). Las demandas de agua de cada UDA consideradas en el Plan Hidrológico del Segura se calculan a partir de sus características (superficies de cultivos, necesidades hídricas, retornos, etc.). El análisis a nivel de UDA permite alcanzar un equilibrio óptimo entre nivel de detalle, complejidad del modelo y accesibilidad de la información técnica requerida para el análisis, parte de la cual proviene de la información generada en el proceso de planificación hidrológica. Además, permite una óptima integración de los resultados en el análisis de la gestión hidrológica y su uso en modelos hidro-económicos. Asimismo, las UDAs pueden agregarse para obtener resultados a nivel de zonas hidrológicas, subcuencas o cuenca.

4.2. Estructura del modelo de programación matemática

La agricultura de regadío de la Cuenca del Segura se ha simulado mediante un modelo de asignación de superficie y agua entre cultivos para cada UDA de la cuenca. La función objetivo del modelo es la suma del margen neto de todas las actividades de cultivo de regadío seleccionadas (MN), mientras que las restricciones representan la disponibilidad de superficie y agua de riego de diferentes fuentes de suministro. La función objetivo a maximizar para cada una de las UDAs de la cuenca viene dada por la siguiente expresión:

$$MN = \sum_j s_j [p_j \cdot q_j + sub_j - \alpha_j - \frac{1}{2} \gamma_j s_j] - \sum_o [t_o \cdot w_o] \quad [1]$$

La función objetivo está sujeta a las siguientes restricciones:

$$\sum_j s_j \leq SUP \quad (\text{Ocupación de la tierra}) \quad [2]$$

$$w_o \leq D_o \quad \forall o \quad (\text{Disponibilidad de agua por origen}) \quad [3]$$

$$\sum_j (s_j \cdot a_j) \leq \sum_o w_o \quad (\text{Disponibilidad de agua total}) \quad [4]$$

$$s_j \geq 0, w_o \geq 0 \quad \forall j, o \quad (\text{No negatividad}) \quad [5]$$

donde: j es cultivo j -ésimo; o es el o -ésimo origen del recurso hídrico; s_j es la superficie asignada al cultivo j (hectáreas); p_j es el precio medio del producto j (€/kg, €/unidad); q_j es el rendimiento medio del cultivo j (kg/ha, unidades/ha); a_j es la cantidad de agua de riego aplicada por hectárea al cultivo j (m³/ha); α_j y γ_j son los coeficientes de una función de costes cuadrática del cultivo j , costes que no incluyen el pago del agua de riego (€/ha); sub_j es la subvención del cultivo j (€/ha); w_o es la cantidad de agua utilizada del origen o en cada UDA (m³); D_o es la dotación neta de agua por origen del recurso (m³); t_o es el precio del agua en cada UDA según su origen (€/m³); SUP es la superficie de cada UDA (ha). Las variables de decisión del modelo son s_j y w_o .

La restricción [2] impide que en una UDA se cultive más superficie de la disponible. El conjunto de restricciones definidas por la expresión [3] representan la disponibilidad de agua de cada origen del recurso que existe en cada UDA, e impiden que se utilice más agua procedente de una determinada fuente de suministro que la disponible de esa fuente. La restricción [4] representa la limitación existente en la disponibilidad total de agua para cada UDA, e impide que la suma del agua utilizada en todos los cultivos supere a la suma de las disponibilidades de agua para todos los orígenes del recurso. Las restricciones de no negatividad representadas por la expresión [5] impiden que el modelo asigne valores negativos a las variables de superficie de cada cultivo y de uso de agua de cada fuente de suministro. El modelo determina, para cada una de las UDAs de la Cuenca del Segura, y en función de las disponibilidades de agua, los valores de superficie asignada a cada cultivo considerado y la cantidad utilizada de cada fuente de suministro de agua.

El modelo se ha calibrado mediante Programación Matemática Positiva (PMP), el enfoque de calibración más utilizado en el ámbito de la Economía Agraria. La PMP se basa en el uso de información previamente disponible sobre la selección de actividades realizada por los agricultores. Permite obtener un modelo calibrado que incluye una serie de funciones no lineales para cada cultivo, bien de costes o de rendimientos, que dependen de los valores de las actividades del modelo. El proceso de calibración del modelo se comenta en más detalle en el anexo.

El modelo ya calibrado calcula para cada escenario de disponibilidad de recursos hídricos el valor del margen neto obtenido en cada UDA, así como los valores marginal y medio del agua de riego. Los valores medios y marginales del agua se han calculado tanto para las dotaciones netas a pie de parcela como para las dotaciones brutas en alta. Puesto que, debido a las pérdidas de las redes de conducción y distribución del agua, una dotación de un m³ de agua bruta equivale a menos de un m³ de agua neta, el valor marginal de un m³ bruto de agua será inferior que el de un m³ neto. Para ello se ha utilizado el coeficiente de eficiencia técnica de cada UDA tomado de CHS (2008).

4.3. Zonas de la cuenca consideradas

Si bien el nivel de desagregación considerado en el modelo corresponde al de las 64 UDAs de la Cuenca del Segura, para simplificar su exposición y análisis, los resultados se han agregado considerando una serie de grandes zonas hidrológicas que se muestran en el Mapa 1.

La producción hortícola se localiza principalmente en las zonas litorales y el Valle del Río Guadalentín que se nutren en gran medida de recursos subterráneos y del trasvase Tajo-Segura. Se trata de sistemas de producción temprana orientados principalmente a la exportación y basados en un uso intensivo de capital y mano de obra. La producción frutícola, principalmente cítricos, frutales de hueso y frutales de pepita, se lleva a cabo tanto en los regadíos tradicionales de la Vega del Río Segura y sus afluentes como en los nuevos regadíos surgidos a raíz del Trasvase Tajo-Segura. En los regadíos tradicionales predominan las explotaciones de menor tamaño, mientras que en los nuevos regadíos las explotaciones presentan una mayor dimensión, grado de capitalización y nivel tecnológico. En general, las tecnologías de cultivo son muy sofisticadas tanto en lo referente a los sistemas de riego, como a las variedades de cultivos, la fertilización y la protección fitosanitaria. En las zonas de Cabecera y Noroeste se producen principalmente cultivos extensivos (almendro y cereal) pero también una producción hortofrutícola creciente. En el Altiplano y las ramblas orientales del Río Segura el regadío está ligado a la producción frutícola y vitivinícola.

MAPA 1

Agrupación de zonas hidrológicas consideradas



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de CHS.

Asimismo, se han considerado de manera independiente las UDAs que corresponden a las zonas regables del Trasvase Tajo-Segura para poder analizar económicamente los recursos utilizados en el regadío y provenientes de la cabecera de la cuenca del Tajo.

4.4. Coeficientes técnico-económicos del modelo

Los coeficientes técnico-económicos del modelo se han obtenido o calculado a partir de información proveniente de publicaciones sobre costes de producción e itinerarios técnicos de cultivo y de estadísticas oficiales, así como de la consulta a técnicos y de una encuesta a agricultores realizada en 2009-2010. El modelo utilizado se ha adaptado, en la medida de lo posible, a las características particulares de cada una de las zonas analizadas. En concreto, los datos de superficies regables, disponibilidades de agua, superficies de cultivo y tarifas del agua se han identificado al nivel de las UDAs de la cuenca. Los datos relativos a costes de producción, rendimientos, precios, subvenciones y consumos netos de agua de los cultivos se han establecido a nivel comarcal.

Superficies regables y disponibilidades de agua

En el Cuadro 2 se resumen las superficies y dotaciones de agua de las diferentes zonas de la cuenca consideradas. Las superficies incluyen regadíos no localizados dentro de la Demarcación del Segura pero cuyos recursos provienen del trasvase Tajo-Segura, y que se incluyen en el ámbito de planificación de la cuenca. Debido a la existencia del anteriormente comentado déficit de aplicación de agua en parcela, la demanda bruta de agua descontando el déficit de aplicación es de 1.432 hm³/año, mientras que la demanda neta es de 1.224 hm³/año (Cuadro 2). En el Cuadro 3 se desagrega la demanda bruta de cada una de las zonas consideradas en base al origen del recurso utilizado.

CUADRO 2
Zonas de la Cuenca del Segura consideradas: Superficies y dotaciones

Zona	Superficie regable (ha)	Superficie neta (ha)	Demanda bruta (hm ³ /año)	Demanda bruta menos déficit (hm ³ /año) (a)	Demanda neta menos déficit (hm ³ /año) (b)
Altiplano y Margen Izquierda del Segura	58.765	31.524	134,87	107,5	95,7
Campo de Cartagena	55.967	34.328	223,13	220,5	198,5
Mazarrón, Águilas y Almería	16.884	11.934	80,33	56,4	52,6
Noroeste de Murcia y Río Mula	22.086	17.161	109,29	102,1	80,8
Río Guadalentín	64.178	46.236	271,35	190,4	163,0
Sierra del Segura y Río Mundo	30.361	22.559	117,29	116,8	90,6
Vega Baja del Segura y Riegos de Levante	86.690	61.686	396,34	365,8	310,9
Vegas Alta y Media del Segura	54.324	43.594	328,97	272,9	231,9
TOTAL	389.257	269.022	1.661,57	1.432,4	1.224,0

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del PHN (MMA, 2001) y CHS (2007). (a) es la demanda bruta menos el déficit de aplicación. (b) es la demanda en cabecera de las redes secundarias.

CUADRO 3
Demanda bruta de agua por origen del recurso en el regadío de la cuenca del Segura

	Demanda bruta de agua sin déficit por origen del agua (hm ³ /año)					Total	Demanda neta sin déficit
	Superficial	ATS	Depurada	Desalación	Subterránea		
Altiplano y Margen Izquierda del Segura	1,7	0,6	0,6	-	104,6	107,5	95,7
Campo de Cartagena	-	122,0	21,1	7,0	70,4	220,5	198,5
Mazarrón, Águilas y Almería	-	15,0	3,1	-	38,3	56,4	52,6
Noroeste de Murcia y Río Mula	61,6	8,0	4,8	-	27,7	102,1	80,8
Río Guadalentín	21,8	64,9	5,7	-	98,0	190,4	163,0
Sierra del Segura y Río Mundo	79,7	-	0,4	-	36,7	116,8	90,6
Vega Baja del Segura y Riegos de Levante	192,9	124,9	17,2	21,6	9,2	365,8	310,9
Vegas Alta y Media del Segura	180,9	64,4	0,7	-	26,9	272,9	231,9
TOTAL	538,6	399,8	53,6	28,6	411,8	1.432,4	1.224,0

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del PHN (MMA, 2001) y CHS (2007).

En los Cuadros 4 y 5 se resumen las superficies y dotaciones de agua de las zonas de la cuenca que reciben recursos del trasvase Tajo-Segura. La demanda bruta en las zonas regables del trasvase Tajo-Segura descontando el déficit de aplicación en parcela es de 655 hm³/año (Cuadro 2), de los que 398,1 hm³/año corresponden a recursos trasvasados (Cuadro 3). Existe una pequeña cantidad de 1,7 hm³/año que se utilizan en UDAs que no se consideran zonas regables del trasvase, pero que se toman en consideración para la valoración económica de los recursos trasvasados.

CUADRO 4

Superficies y demandas de agua de las zonas regables de ATS

	Superficie regable (ha)	Superficie neta (ha)	Demanda bruta (hm ³ /año)	Demanda bruta menos déficit (hm ³ /año) (a)	Demanda neta sin déficit (hm ³ /año) (b)
Total zonas del trasvase	179.266	130.134	834,8	654,9	569,0
Resto de la cuenca	209.991	138.888	826,8	777,5	655,1
TOTAL	389.257	269.022	1.661,6	1.432,4	1.224,0

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del PHN (MMA, 2001) y CHS (2007). (a) es la demanda bruta menos el déficit de aplicación. (b) es la demanda en cabecera de las redes secundarias.

CUADRO 5

Demanda bruta de agua por origen del recurso en las zonas regables del ATS y en el resto de la cuenca del Segura

	Demanda bruta de agua sin déficit por origen del agua (hm ³ /año)					
	Superficial	ATS	Depurada	Desalación	Subterránea	Total
Total zonas del trasvase	46,0	398,1	42,3	24,3	144,2	654,9
Resto de la cuenca	492,6	1,7	11,3	4,3	267,6	777,5
TOTAL	538,6	399,8	53,6	28,6	411,8	1.432,4

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del PHN (MMA, 2001) y CHS (2007).

Superficies dedicadas a los distintos cultivos en cada UDA

La calibración del modelo requiere conocer la distribución de cultivos en cada una de las UDAs consideradas. Para ello, se ha partido de los datos de superficies municipales de cultivo provenientes de las hojas 1T correspondientes a 2005, las más recientes disponibles para la totalidad de la cuenca. Se han eliminado aquellos cultivos de regadío que representan menos del 1% de la superficie de todos los municipios de la cuenca, lo que permite trabajar con un número reducido de cultivos que suponen aproximadamente el 97% de la superficie de regadío de los municipios que pertenecen a la cuenca del Segura.

Para obtener la distribución de cultivos de regadío en las UDAs de la cuenca se utilizó la distribución de UDAs por municipios obtenida del SIG de la Confederación Hidrográfica del Segura (disponible en www.chsegura.es). Dicha distribución se

cruzó utilizando el programa ArcMap con la distribución de cultivos por municipios obtenida de las hojas 1T. La distribución de cultivos de regadío por UDAs obtenida se utilizó para calibrar el modelo.

Rentabilidad de las actividades de cultivo

La información utilizada para la caracterización de la rentabilidad de los cultivos proviene de diversos trabajos sobre costes de producción agrícolas, así como de estadísticas agrarias regionales relativas principalmente a precios de los productos y cánones de arrendamiento de la tierra. Asimismo, se ha utilizado información proveniente de una encuesta a agricultores. Puntualmente se ha contrastado la información consultando a técnicos, tanto privados como de la administración pública, muy especialmente en lo referente a los rendimientos y consumos de agua de algunos cultivos.

Para caracterizar los rendimientos de los cultivos se ha partido de los considerados en los estudios de De Juan *et al.* (2003) y Segura *et al.* (2006), así como los estudios técnico-económicos del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación correspondientes a Castilla La Mancha, Región de Murcia, Comunidad Valenciana y Andalucía (MAPA, varios años a, b, c y d). Sin embargo, y puesto que dichas fuentes no permiten establecer los rendimientos de todos los cultivos para todas las zonas consideradas, se han utilizado también rendimientos medios obtenidos de encuestas a agricultores realizadas en la campaña agraria 2009-2010 en el marco del proyecto de investigación AGL2006-12293-C02-02/AGR, procediendo a contrastar en caso de discrepancia dichos rendimientos con técnicos de las diferentes zonas consideradas.

Para obtener el precio de los productos se ha partido de la serie de precios medios anuales para el período 1998-2009 en la Región de Murcia, que se han obtenido del Servicio de Estadística Agraria Regional de la Consejería de Agua y Agricultura de la Región de Murcia (CREM, varios años). Se ha considerado que dichos precios son representativos para toda la cuenca. A la serie histórica de precios medios anuales de cada producto se le ha eliminado la tendencia para obtener una serie de precios estacionaria, y se ha calculado el valor medio de cada una de ellas, valor que se ha tomado como representativo del precio de cada producto. Asimismo, los precios anteriores al año 2002 se han convertido a euros y todos los precios han sido convertidos a valores de 2009.

Para la elaboración de los costes de producción de los cultivos se han utilizado principalmente los trabajos de Segura *et al.* (2006) y De Juan *et al.* (2003), así como los mencionados estudios sobre la economía de los sistemas de producción elaborados por el MAPA (varios años a, b, c y d). Todas las partidas económicas contenidas en dichos trabajos se han actualizado a valores de 2009. Los cánones de arrendamiento se han obtenido de la Encuesta de cánones de arrendamiento rústico para 2008 (MARM, 2009).

El margen neto, que es el indicador económico utilizado en el modelo, se ha obtenido de restar a los ingresos brutos, los costes directos, los costes de maquinaria y mano de obra asalariada, los costes indirectos y las amortizaciones. En el caso de los costes directos relativos al agua, se ha diferenciado entre los costes de aplicación

del agua de riego y el coste derivado del pago de la tarifa, con el objeto de poder diferenciar en el modelo el coste de obtención del agua de riego para cada origen del recurso. El coste medio por m³ del agua de riego en cada UDA es el valor actualizado a 2009 de los costes de suministro del agua en baja para regadío diferenciados por orígenes (aguas superficiales, recursos del ATS, depuración y desalación y aguas subterráneas) calculados por la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS, 2007; MMA, 2007). Los márgenes netos varían para las distintas áreas consideradas ya que, por un lado, los rendimientos de los cultivos, y por tanto los ingresos, son distintos y, por otro, los costes de recolección se han ajustado en función de los rendimientos de cada zona considerada. Además, las tarifas pagadas por el agua de riego son específicas para cada UDA. Si bien se han caracterizado estos parámetros a nivel comarcal, el proceso de calibración realizado utilizando las superficies de cultivo observadas de cada UDA ha permitido diferenciar económicamente cada una de ellas.

Demanda neta de agua de los cultivos

Las dotaciones netas de agua para los cultivos se han tomado de Villalobos *et al.* (2006), Segura *et al.* (2006) De Juan *et al.* (2003), AMOPA (2000) y CREA (2005).

4.5. Escenarios de disponibilidades hídricas

El modelo se ha ejecutado para cuatro escenarios diferentes de disponibilidad de agua:

1. El primer escenario (escenario de referencia) se corresponde con las disponibilidades y demandas teóricas de agua de riego oficiales consideradas en el Plan Hidrológico Nacional de 2001 (MMA, 2001), y que se basan en las aportaciones medias anuales de agua para el período 1940-1996 y en que el trasvase Tajo-Segura realiza aportaciones completas (400 hm³/año para el regadío). Se trata de un escenario teórico utilizado en la planificación hidrológica de la cuenca y que nunca se cumple.
2. En el segundo escenario, que puede identificarse con la situación actual de recursos hídricos, la disponibilidad de recursos propios superficiales y subterráneos se evalúa teniendo en cuenta las aportaciones medias del período 1980-2005, mientras que para el trasvase Tajo-Segura se toman las cantidades medias trasvasadas durante los últimos 10 años. Este escenario supone una reducción en la disponibilidad total de agua de aproximadamente un 27% con respecto al escenario 1. Este segundo escenario permite una valoración más realista del valor del uso del agua en el regadío de la cuenca y es por eso el utilizado para la valoración económica realizada.
3. El tercer escenario se diferencia del segundo escenario en que se asume que se trasvasan del Tajo las aportaciones completas. La diferencia entre los resultados obtenidos en este escenario y el escenario 2 permite estimar el impacto económico de la reducción de los caudales trasvasados desde el Tajo con respecto a la cantidad máxima teórica a trasvasar para el regadío.

4. El cuarto escenario se diferencia del segundo en que se considera que no se trasvasan recursos para el regadío desde la cuenca del Tajo. Este escenario equivale aproximadamente a una reducción del 42% en la disponibilidad media de agua en la cuenca con respecto al escenario de referencia. Comparándolo con el escenario 2 puede estimarse el impacto actual de eliminar el trasvase Tajo-Segura en base a la media de las aportaciones reales recientes del mismo.

5. Resultados

5.1. Valor total y marginal del agua en la cuenca

El Cuadro 6 muestra los valores totales, medios y marginales del agua obtenidos en los escenarios 1 y 2 para el conjunto de la cuenca. Puede verse como la consideración de un escenario más realista de disponibilidades medias de agua supone una muy diferente valoración del agua de riego. Tanto el valor marginal como el valor medio del agua son claramente superiores en el escenario 2.

CUADRO 6

Valor de uso del agua de riego para el conjunto de la cuenca (escenarios 1 y 2)

	Escenario	
	1 (Referencia)	2 (Actual)
Dotación de agua en términos netos (hm ³ /año)	1.225,44	924,93
Dotación de agua en términos brutos (hm ³ /año)	1.432,40	1.082,40
Margen neto (Millones €)	973,00	878,96
Valor marginal del agua neta (€/m ³)	0,30	0,59
Valor marginal del agua bruta (€/m ³)	0,27	0,52
Valor medio del agua neta (€/m ³)	0,79	0,95
Valor medio del agua bruta (€/m ³)	0,68	0,81

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados obtenidos para el segundo escenario, la agricultura de regadío de la cuenca del Segura genera una rentabilidad media medida en términos de margen neto de explotación de 879 millones de euros al año, siendo actualmente el valor marginal del agua a nivel de la cuenca de 0,52 €/m³ y el valor medio de 0,81 €/m³. Si se evalúa en cabecera de redes secundarias, el valor marginal del agua en la cuenca es de 0,59 €/m³ mientras que el valor medio es de 0,95 €/m³.

El Cuadro 7 muestra los resultados para las diferentes zonas de la cuenca en el escenario 2, el más realista en términos de disponibilidad de agua. Comentaremos los valores evaluados en términos de recursos hídricos en alta (brutos).

Las zonas que mayor valor del agua presentan son en general las zonas en las que se concentra la horticultura intensiva. Destacan en primer lugar las zonas regables de Mazarrón, Águilas y Pulpí en Almería con un valor marginal del agua de 0,97 €/m³ y un valor medio que alcanza los 1,64 €/m³. Le siguen las zonas regables de la cuenca del Guadalentín y del Campo de Cartagena con un valor medio del agua de 1,09 y 1,03 €/m³ respectivamente.

Hay que hacer una aclaración relativa al valor marginal del agua calculado para el Campo de Cartagena y que está solo ligeramente por encima de la media de la cuenca. Los valores marginales calculados ya descuentan el coste de obtención del recurso hídrico. En el caso del campo de Cartagena, los últimos recursos en ser utilizados son obviamente los más caros que proceden de la desalación (Cuadro 3), lo que hace que el valor marginal del agua de riego una vez pagada la tarifa del agua desalada se vea sustancialmente reducido con respecto, por ejemplo, al de la cuenca del Guadalentín dónde la utilización de recursos desalados para el regadío todavía no se ha iniciado.

CUADRO 7

Valor de uso del agua de riego en las diferentes zonas de la cuenca (Escenario 2)

	Dotación de agua neta (hm ³ /año)	Dotación de agua bruta (hm ³ /año)	Margen neto (Mill. €/año)	Valor marginal del agua neta (€/m ³)	Valor marginal del agua bruta (€/m ³)	Valor medio del agua neta (€/m ³)	Valor medio del agua bruta (€/m ³)
Altiplano y Margen Izquierda del Segura	76,53	86,00	78,36	0,64	0,57	1,02	0,91
Campo de Cartagena	141,86	157,62	162,77	0,64	0,57	1,15	1,03
Mazarrón, Águilas y Almería	39,99	42,74	70,32	1,05	0,97	1,76	1,64
Noroeste de Murcia y Río Mula	64,00	81,04	49,82	0,33	0,26	0,78	0,61
Río Guadalentín	121,26	140,48	151,54	0,90	0,79	1,26	1,09
Sierra del Segura y Río Mundo	72,45	93,52	43,11	0,17	0,13	0,59	0,46
Vega Baja del Segura y Riegos de Levante	234,09	275,42	187,49	0,51	0,44	0,80	0,68
Vegas Alta y Media del Segura	174,75	205,58	135,56	0,50	0,43	0,78	0,66
Total Cuenca	924,93	1.082,40	878,96	0,59	0,52	0,95	0,81

Fuente: Elaboración propia.

Las zonas regables de la Vega del Segura presentan valores muy similares de rentabilidad del agua de riego, con un valor marginal de 0,43-0,44 €/m³ y un valor medio de 0,66-0,68 €/m³, valores que están aproximadamente un 15% por debajo de la media de la cuenca. La existencia de amplias zonas de regadíos tradicionales y la importancia de la superficie de cítricos, cuya rentabilidad ha sido relativamente baja en los últimos años, explica estos valores. En el caso de la Vega Baja, en la provincia de Alicante, el amplio uso que se hace de recursos desalados (véase el Cuadro 2) explica que, pese que la horticultura intensiva es algo más importante que en la Vega media y alta del Río Segura, los valores medio y marginal del agua de riego sean similares a los de estas zonas.

La menor rentabilidad del regadío corresponde a algunas zonas de interior de la cuenca, caso de las zonas de Cabecera de la cuenca en la Sierra del Segura y la cuenca del Río Mundo y de las comarcas murcianas del Noroeste y el Río Mula. Sin embargo, y pese a presentar rentabilidades muy por debajo de la media de la cuenca, el valor medio del agua, en el rango 0,45-0,60 €/m³, es notable si se compara con el de muchas de las zonas regables del interior de la península. El crecimiento de la producción hortofrutícola en estas zonas, junto con la producción de ciertos cultivos amparados por denominaciones de origen (vino de Jumilla y arroz de Calasparra), está detrás de esta rentabilidad.

Un caso particularmente notable es el de la comarca del Altiplano de Murcia, que presenta niveles de rentabilidad superiores a la media de la cuenca. Se trata de una zona de interior cuyo regadío se nutre casi exclusivamente de recursos subterráneos muy sobreexplotados. Si bien no se trata de una zona de producción hortícola intensiva, una parte importante del regadío de la zona corresponde a cultivos leñosos como el viñedo de vinificación y el olivar que permiten obtener un incremento notable de los rendimientos con aplicaciones relativamente reducidas de agua. Hay que añadir que la producción vitivinícola está amparada por dos denominaciones de origen (Yecla y Jumilla), lo que supone una rentabilidad adicional del cultivo de la vid en la zona.

5.2. Valoración económica del agua procedente del Trasvase Tajo-Segura

En el Cuadro 8 se muestran los resultados anteriores pero diferenciando entre las zonas regables del Acueducto Tajo-Segura y las del resto de la cuenca. En primer lugar, puede afirmarse que la rentabilidad del agua es claramente superior en las zonas que reciben agua del trasvase Tajo-Segura. Esto se debe a que éstas están situadas en las zonas de la cuenca en las que se concentra la mayor parte de la horticultura intensiva y de los invernaderos de la cuenca, además de tratarse generalmente de los regadíos más modernos y menos dotados en términos de disponibilidad de agua por hectárea (como se deduce del Cuadro 4).

CUADRO 8

Valor de uso del agua de riego en las zonas que reciben recursos trasvasados desde la cuenca del Tajo (escenario 2)

	Dotación neta de agua (hm³/año)	Dotación bruta de agua (hm³/año)	Margen neto (Mill. €/año)	Valor marginal del agua neta (€/m³)	Valor marginal del agua bruta (€/m³)	Valor medio del agua neta (€/m³)	Valor medio del agua bruta (€/m³)
Zonas del trasvase	398,59	457,62	434,77	0,79	0,69	1,09	0,95
Resto de la cuenca	526,34	624,78	444,20	0,41	0,36	0,84	0,71
Total Cuenca	924,93	1.082,40	878,96	0,59	0,52	0,95	0,81

Fuente: Elaboración propia.

En el Cuadro 9 se presenta el valor generado exclusivamente por los recursos del trasvase Tajo-Segura, considerando el valor de los recursos medio trasvasados en el período 1999-2009. La aportación media anual del trasvase Tajo-Segura a la rentabilidad privada del regadío en la cuenca es de aproximadamente 169 millones de euros. Los valores medios y marginales del agua trasvasada son aproximadamente el doble en las zonas regables del trasvase que en el resto de la cuenca.

CUADRO 9

Valor de uso de los recursos trasvasados para el regadío desde la cuenca del Tajo (considerando el volumen medio anual trasvasado entre 1999 y 2009)

	Volumen medio trasvasado neto (hm³/año)	Volumen medio trasvasado bruto (hm³/año)	Margen neto generado (Mill. €/año)	Valor medio del agua trasvasada neta (€/m³)	Valor medio del agua trasvasada bruta (€/m³)
Zonas del trasvase	208,26	238,86	168,86	0,81	0,71
Resto de la cuenca	0,87	1,02	0,345	0,40	0,34
Total Cuenca	209,13	239,88	169,21	0,81	0,71

Fuente: Elaboración propia.

Por el contrario, el Cuadro 10 resume el impacto económico de los recursos medios no trasvasados, considerando el volumen medio de agua no trasvasado con destino al regadío de la cuenca con respecto al máximo legal que puede ser trasvasado. El coste de oportunidad medio derivado de no trasvasar la totalidad de los 400 hm³ brutos anuales previstos para el regadío de la cuenca es de 59,75 millones de euros al año.

CUADRO 10

Impacto económico de los recursos no trasvasados para usos agrarios desde la cuenca del Tajo (considerando el volumen medio anual no trasvasado entre 1999 y 2009)

	Volumen medio no trasvasado neto (hm ³ /año)	Volumen medio no trasvasado bruto (hm ³ /año)	Margen neto no generado (Mill. €/año)	Valor medio del agua no trasvasada neta (€/m ³)	Valor medio del agua no trasvasada bruta (€/m ³)
Zonas del trasvase	138,84	159,24	59,52	0,43	0,37
Resto de la cuenca	0,57	0,68	0,23	0,41	0,34
Total Cuenca	139,41	159,92	59,75	0,43	0,37

Fuente: Elaboración propia.

6. Conclusiones

En este trabajo se presenta una valoración económica del uso del agua en el regadío de la Cuenca del Segura, una cuenca que presenta una situación especialmente grave de escasez estructural de agua. Frente a otros estudios previos, este trabajo aborda dicha valoración en la totalidad de la cuenca del Segura, evaluando también el impacto económico de los caudales trasvasados a través del acueducto Tajo-Segura. El valor económico del agua se ha obtenido a partir de un modelo de programación matemática no lineal que asigna los recursos hídricos y la superficie regable entre los cultivos de cada una de las Unidades de Demanda Agraria de la cuenca, si bien los resultados se han presentado agrupados para ocho grandes áreas de la cuenca.

El uso de la programación matemática permite una evaluación más aproximada del valor económico del agua de riego, ya que la disponibilidad de agua se considera de manera explícita en la valoración. Puesto que el valor marginal del agua disminuye cuando se incrementa la disponibilidad de agua, una valoración realizada utilizando datos máximos de disponibilidad de agua (en nuestro caso, los utilizados en el proceso de planificación hidrológica de la cuenca), supondría una sobrevaloración del impacto económico total del uso de los recursos hídricos y una infravaloración del valor medio y marginal del agua. Por eso, nuestros resultados se han obtenido considerando un escenario más realista de disponibilidad de agua.

Otra aportación original del trabajo es que los resultados se han referido tanto al agua medida en términos brutos (servicio en alta) como netos (a pie de parcela), lo que permite su interpretación y su uso para el análisis de alternativas de gestión tanto al nivel de la cuenca como al nivel del uso del agua en las explotaciones.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el regadío de la cuenca del Segura genera una rentabilidad privada media, medida en términos de margen neto, de 879 millones de euros al año. El valor marginal del agua en alta en la cuenca de 0,52 €/m³,

mientras que el valor medio es de 0,81 €/m³. Si consideramos los consumos de agua a nivel de explotación, se obtiene un valor marginal del agua de 0,59 €/m³ y un valor medio de 0,95 €/m³.

Los mayores valores marginales del agua corresponden a las zonas de la cuenca en que se localiza la mayor parte de la horticultura intensiva, así como en las zonas regables que utilizan recursos trasvasados desde la cabecera del Tajo. Sin embargo, algunas zonas del interior de la cuenca presentan notables valores de rentabilidad del agua debido al crecimiento de la superficie hortícola, a la existencia de cultivos amparados bajo denominaciones de origen y al riego de cultivos tradicionalmente de secano como el olivar o el viñedo.

Finalmente, se ha estimado que los recursos medios trasvasados a la cuenca durante los últimos diez años han generado un margen neto anual de 169 millones de euros, mientras que los recursos no trasvasados para el regadío han supuesto un coste de oportunidad de casi 60 millones de euros al año.

Anexo: Calibración del modelo

La calibración es una técnica que permite que un modelo de programación matemática sea una representación más fiel de la situación real cuando no se dispone de datos a nivel muy detallado. La calibración de un modelo se plantea cuando el número de restricciones del mismo que se satisfacen como igualdad en el óptimo es menor que el número de actividades observadas, lo que suele ocurrir cuando no se dispone de suficiente información para definir un conjunto de restricciones que permita reproducir el comportamiento observado en la práctica, bien por la dificultad de obtención de la información o bien por su elevado coste. Este problema es especialmente importante en modelos regionales en los que el número de actividades es grande y la disponibilidad de datos a nivel micro o desagregado es reducida.

El modelo utilizado en este trabajo se ha calibrado mediante Programación Matemática Positiva (PMP). De los diferentes enfoques de calibración de modelos agrarios propuestos en la literatura (ver una revisión de métodos en Hazell y Norton, 1986 y Howitt, 1995), el más utilizado en el ámbito de la Economía Agraria es la Programación Matemática Positiva. Howitt (1995) formaliza analíticamente esta metodología que ya había sido utilizada en diversos trabajos previos.

La PMP es un procedimiento de calibración que se basa en el uso de información previamente disponible sobre la selección de actividades o cultivos realizada por los agricultores. El método consiste en añadir al modelo de programación matemática original unas restricciones de calibración que restringen el comportamiento del modelo a los niveles de actividad observados. La información contenida en los valores duales de las restricciones de calibración se utiliza para calcular los coeficientes de una función cuadrática que se incorpora a la función objetivo inicial del modelo. Esta función cuadrática puede ser, bien una función de costes variables de cada actividad

productiva, o bien una función de rendimientos de cada cultivo, y sus valores dependen de los valores observados para las actividades del modelo. Una vez obtenida la nueva función objetivo se resuelve el modelo ya calibrado sin las restricciones de calibración.

El modelo no lineal que se obtiene mediante PMP se calibra exactamente a la realidad observada, no necesita de restricciones adicionales, tiene el mismo valor de la función objetivo que el modelo inicial con sus restricciones y se obtienen los mismos valores duales de las restricciones de disponibilidad de recursos productivos que en el modelo inicial no calibrado. El principal inconveniente de la PMP es que el número de parámetros de la función cuadrática a especificar es mayor que el número de observaciones. Si la función cuadrática que se usa en el procedimiento de calibración es la de costes, lo que se suele hacer para solventar ese problema es suponer que son igual a cero todos los elementos que están fuera de la diagonal de la matriz de los parámetros asociados con el término cuadrático de los costes variables (Heckelei y Britz, 2000).

El procedimiento utilizado consta de tres etapas. En una primera etapa, se parte del modelo de optimización original para cada una de las UDAs de la cuenca, que viene dado por las ecuaciones (a1) a (a5):

$$\text{Maximizar} \quad MN = \sum_j s_j [p_j \cdot q_j + \text{sub}_j - c_j] - \sum_o [t_o \cdot w_o] \quad [\text{a1}]$$

Sujeta a las siguientes restricciones:

$$\sum_j s_j \leq \text{SUP} \quad (\text{Ocupación de la tierra}) \quad [\text{a2}]$$

$$w_o \leq D_o \quad \forall o \quad (\text{Disponibilidad de agua por origen}) \quad [\text{a3}]$$

$$\sum_j (s_j \cdot a_j) \leq \sum_o w_o \quad (\text{Disponibilidad de agua total}) \quad [\text{a4}]$$

$$s_j \geq 0, w_o \geq 0 \quad \forall j, o \quad (\text{No negatividad}) \quad [\text{a5}]$$

donde: j es cultivo j -ésimo; o es el o -ésimo origen del recurso hídrico; s_j es la superficie asignada al cultivo j (hectáreas); p_j es el precio medio del producto j (€/kg, €/unidad); q_j es el rendimiento medio del cultivo j (kg/ha, unidades/ha); a_j es la cantidad de agua de riego aplicada por hectárea al cultivo j (m³/ha); c_j es el coste de producción del cultivo j sin incluir el pago del agua de riego (€/ha); sub_j es la subvención del cultivo j (euros/ha); w_o es la cantidad de agua utilizada del origen o en cada UDA; D_o es la dotación neta de agua por origen del recurso (m³); t_o es el precio del agua según su origen en cada UDA (€/m³); SUP es la superficie de cada UDA (ha). Las variables de decisión del modelo son s_j y w_o .

A este modelo se añaden una serie de restricciones de calibración que restrinjan el comportamiento del modelo a los valores observados de las actividades, tales como:

$$s_j \leq s_j^O(1 + \varepsilon) \quad \forall j \quad [a6]$$

donde S_j^O es la superficie del cultivo j observada en la realidad; y ε es una perturbación que permite que las actividades consideradas normales satisfagan la restricción correspondiente, pero que las restricciones de disponibilidad de recursos productivos se satisfagan como igualdad antes de que lo hagan las actividades consideradas marginales o menos rentables (Howitt, 1995). El valor dual asociado a cada restricción de calibración viene dado por λ_j , valor que será positivo para las actividades normales y cero para las marginales.

En una segunda etapa, los valores duales de las restricciones de calibración λ_j se utilizan para calcular los coeficientes de la función cuadrática de costes o rendimientos para cada actividad. Si el procedimiento se utiliza para obtener funciones cuadráticas de costes para cada actividad, como es el caso en el presente trabajo, éstas serán funciones convexas que dependerán del valor de la superficie asignada a actividad de cultivo. Para el cultivo j la función de costes cuadrática ($cpmp_j$) viene dada por la expresión [a7]:

$$cpmp_j = \alpha_j + \frac{1}{2} \gamma_j s_j \quad [a7]$$

De acuerdo con las fórmulas de cálculo propuestas por Howitt (1995), los coeficientes de la función cuadrática de costes (α_j, γ_j) se calculan como:

$$\alpha_j = c_j - \lambda_j \quad [a8]$$

$$\gamma_j = \frac{\lambda_j}{s_j^O} \quad [a9]$$

En la tercera y última etapa, las funciones cuadráticas de costes calculadas [a7] sustituyen al término c_j en la función objetivo original [a1] para obtener así la nueva función objetivo del modelo calibrado, modelo en el que también se eliminan las restricciones de calibración [a6]. Una vez realizado el procedimiento de calibración expuesto, el modelo es:

$$MN = \sum_j s_j \left[p_j \cdot q_j + sub_j - \alpha_j - \frac{1}{2} \gamma_j s_j \right] - \sum_o [t_o \cdot w_o] \quad [a10]$$

sujeto a las restricciones [a2], [a3], [a4] y [a5].

Cuando el valor observado en la realidad para una actividad o cultivo es pequeño, la correspondiente restricción de calibración [a6] limitará en gran medida la selección de dicha actividad por parte del modelo, de manera que su valor dual asociado (λ_j) será elevado y la función de costes correspondiente tendrá un mayor término cuadrático, existiendo un menor incentivo a seleccionar la actividad en cuestión en el modelo. Paralelamente, si la cantidad observada de una actividad es elevada, el valor

dual asociado a su restricción de calibración será pequeño, el término cuadrático de la función de costes será menor y el modelo penalizará en menor medida la selección de dicha actividad.

Howitt (1995) demuestra que la capacidad de calibrar un modelo con mayor exactitud depende de que un mayor número de actividades puedan ser calibradas de forma independiente para obtener un término no lineal para cada una de ellas. Sin embargo, en el enfoque estándar de PMP todas las restricciones de calibración se satisfacen como igualdad excepto la correspondiente a la actividad menos rentable o marginal, por lo que el valor dual es cero para dicha actividad (Howitt, 1995).

En este sentido, y para mejorar la robustez del modelo, dado que solo disponemos de una observación de superficies de cultivo para realizar la calibración del modelo, se ha utilizado el enfoque propuesto por Gohin y Chantreuil (1999), que consiste en igualar el valor dual de la restricción de disponibilidad de tierra al valor de arrendamiento de la tierra observado en el año base. De esa manera, se obtiene un valor dual positivo, y por tanto una función de costes creciente, para todas las actividades, incluyendo la marginal o menos rentable.

Además del enfoque original, se ha ensayado también el enfoque de calibración mediante PMP desarrollado por Röhm y Dabbert (2003). En el enfoque original, los parámetros de cada cultivo se obtienen de manera separada a los de otros, de manera que diferentes tecnologías de producir un mismo cultivo (denominadas variantes) se consideran cultivos separados. Röhm y Dabbert (2003) proponen una calibración que permite que las posibilidades de sustitución entre variantes tecnológicas de un mismo cultivo (que pueden tener características técnico-económicas similares) sean mayores que entre cultivos diferentes. Puesto que no se dispone de información de superficies de cultivo diferenciadas por tecnologías de producción, no se consideraron variantes diferentes de un mismo cultivo, sino que se asumió que cultivos similares (cereales, hortícolas de hoja, etc.) pueden tener cierto grado de sustitución entre sí. Este enfoque se ha utilizado también de manera conjunta con el procedimiento de calibración propuesto por Gohin y Chantreuil (1999). Sin embargo, es el modelo calibrado utilizando el enfoque original de PMP, junto con la corrección propuesta por Gohin y Chantreuil (1999), el finalmente seleccionado, ya que reproduce con mayor exactitud la distribución de cultivos observada que se ha utilizado para la calibración. Tal y como argumentan Blanco *et al.* (2008) y Cortignani y Severini (2009), el enfoque de Röhm y Dabbert (2003) es adecuado para modelizar diferentes tecnologías de producción de un mismo cultivo, pero no permite una adecuada calibración del modelo cuando se utiliza para permitir un cierto grado de sustitución entre cultivos similares.

Referencias

- Albiac, J., Hanemann, M., Calatrava, J., Uche, J. y Tapia, J. (2006). "The rise and fall of the Ebro water transfer". *Natural Resources Journal*, 46(3): 727-757.
- Albiac, J., Tapia, J., Meyer, A., Hanemann, M., Mema, M., Calatrava, J., Uche, J. y Calvo, E. (2008). "Los problemas económicos de la planificación hidrológica". *Revista de Economía Aplicada*, XVI(47): 25-50.
- Alcalá, F. y Sancho, I. (2002). "Agua y producción agrícola: un análisis econométrico del caso de Murcia". *Revista Española de Estudios Agrosociales y Pesqueros*, 197: 129-157.
- AMOPA (2000). *Estudio General de la Estructura y Balance Agronómico y Económico de las Explotaciones Agrícolas de la Región de Murcia*. AMOPA-Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente de la Región de Murcia, Murcia.
- Arriaza, M., Gómez-Limón, J.A. y Upton, M. (2002). "Local water markets for irrigation in southern Spain: a multicriteria approach". *The Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 46(1): 21-43. <http://doi.org/bt3p8s>
- Arriaza, M., Gómez-Limón, J.A., y Ruiz, P. (2003). "Evaluación de alternativas de desacoplamiento total de ayudas COP: El caso de la agricultura de regadío del Valle del Guadalquivir". *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 3(6): 129-153.
- Ballesteros, E., Alarcón, S. y García-Bernabeu, A. (2002). "Establishing politically feasible water markets: a multi-criteria approach". *Journal of Environmental Management*, 65(4): 411-429. <http://doi.org/fkqbj5>
- Berbel, J. y Mesa, P. (2007). "Valoración del agua de riego por el método de precios quasi-hedónicos: aplicación al Guadalquivir". *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 7(14): 127-144.
- Berbel, J., Mesa-Jurado, M. y Pistón, J. (2011). "Value of Irrigation Water in Guadalquivir Basin (Spain) by Residual Value Method". *Water Resources Management*, 25(6): 1565-1579. <http://doi.org/ckvcgb>
- Blanco, M., Cortignani, R., y Severini, S. (2008). "Evaluating Changes in Cropping Patterns due to the 2003 CAP Reform. An Ex-post Analysis of Different PMP Approaches Considering New Activities". Comunicación presentada al 107th EAAE Seminar "Modelling of Agricultural and Rural Development Policies", Sevilla.
- Calatrava, J. y Garrido, A. (2001). "Análisis del efecto de los mercados de agua sobre el beneficio de las explotaciones, la contaminación por nitratos y el empleo eventual agrario". *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 1(2): 153-173.
- Calatrava, J. y Garrido, A. (2005a). "Modelling water markets under uncertain water supply". *European Review of Agricultural Economics*, 32(2): 119-142. <http://doi.org/fnb96k>

- Calatrava, J. y Garrido, A. (2005b). "Spot water markets and risk in water supply". *Agricultural Economics*, 33(2): 131-143. <http://doi.org/cb52nf>
- Calatrava, J. y Garrido, A. (2006). "Difficulties in adopting formal water trading rules within users' associations". *Journal of Economic Issues*, 40(1): 27-44.
- CHS (1998). *Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura*. Confederación Hidrográfica de la Cuenca del Segura, Murcia.
- CHS (2005). *Informe sobre los artículos 5, 6 y 7 de la DMA en la Cuenca del Segura (versión 3, 6 de mayo de 2005)*. Confederación Hidrográfica del Segura, Murcia.
- CHS (2006). *Plan de Actuación en Situaciones de Alerta y Eventual Sequía en la Cuenca del Segura*. Confederación Hidrográfica del Segura, Murcia.
- CHS (2007). *Estudio General sobre la Demarcación Hidrográfica del Segura (versión del 2 de julio de 2007)*. Confederación Hidrográfica del Segura, Murcia.
- CHS (2008). *Esquema Provisional de Temas Importantes*. Confederación Hidrográfica del Segura, Murcia.
- Colino, J. y Martínez-Paz, J.M. (2007). "Productividad, disposición al pago y eficiencia técnica en el uso del agua: la horticultura intensiva de la Región de Murcia". *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 7(14): 109-125.
- Cortignani, R. y Severini, S. (2009). "Modeling farm-level adoption of deficit irrigation using Positive Mathematical Programming". *Agricultural Water Management*, 96(12): 1785-1791. <http://doi.org/b39rfc>
- CREA (2005). *Análisis del uso del agua en situaciones de sequía: "Riegos de socorro" en cultivos leñosos de la Región de Murcia*. Centro Regional de Estudios del Agua de la Universidad de Castilla La Mancha, Albacete.
- CREM (varios años). *Anuario Estadístico de la Región de Murcia*. Centro Regional de Estadística de Murcia, Murcia.
- De Juan, J.A., Ortega, J.F. y Tarjuelo, J.M. (2003). *Sistemas de cultivo. Evaluación de itinerarios técnicos*. Consejería de Agricultura y Medio Ambiente Junta de Comunidades de Castilla La Mancha y Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- Garrido, A. (2000). "A mathematical programming model applied to the study of water markets within the Spanish agricultural sector". *Annals of Operations Research*, 94(1-4): 105-123. <http://doi.org/ch5r7h>
- Gil, M., Garrido, A. y Gómez-Ramos, A. (2009). "Análisis de la productividad de la tierra y del agua en el regadío español". En Gómez-Limón, J.A., Calatrava, J., Garrido, A., Sáez, F.J. y Xabadía, A. (Eds.): *La economía del agua de riego en España*. Fundación Cajamar, Almería: 95-114.
- Gohin, A. y Chantreuil, F. (1999). "La programmation mathématique dans les modèles d'exploitation agricole. Principes et importance du calibrage". *Cahiers d'Economie et Sociologie Rurales*, 52: 59-77.
- Gómez-Limón, J.A. y Martínez, Y. (2006) "Multi-criteria modelling of irrigation water market at basin level: A Spanish case study". *European Journal of Operational Research*, 173(1): 313-336. <http://doi.org/b6bwmg>

- Gómez-Limón, J.A. y Riesgo, L. (2004). "Irrigation water pricing: differential impacts on irrigated farms". *Agricultural Economics*, 31(1): 47-66. <http://doi.org/cbzh4z>
- Gutiérrez, C. y Gómez, C.M. (2009). "Efectos de la política agraria sobre la política del agua". En Gómez-Limón, J.A., Calatrava, J., Garrido, A., Sáez, F.J. y Xabadia, A. (Eds.): *La economía del agua de riego en España*. Fundación Cajamar, Almería: 365-381.
- Hazell, P.B.R. y Norton, R.D. (1986). *Mathematical programming for Economic Analysis in Agriculture*. Macmillan, New York.
- Heckelei, T. y Britz, W. (2000). "Positive Mathematical Programming with Multiple Data Points: A Cross-Sectional Estimation Procedure". *Cahiers d'Economie et Sociologie Rurales*, 57: 28-50.
- Howitt, R.E. (1995). "Positive Mathematical Programming". *American Journal of Agricultural Economics*, 77(2): 329-342. <http://doi.org/fh327d>
- Iglesias, E., Garrido, A. y Gómez-Ramos, A. (2003). "Evaluation of drought management in irrigated areas". *Agricultural Economics*, 29: 211-229. <http://doi.org/cxxdhf>
- Iglesias, E. y Blanco, M. (2004). "Impacto Socioeconómico y Ambiental de la Reforma de la PAC en los Regadíos Españoles". Comunicación presentada al V Congreso de la Asociación Española de Economía Agraria. Santiago de Compostela.
- Maestu, J. y Gómez, C.M. (2008). "Análisis Económico de los usos del agua en España". *Ambienta*, 75: 44-51.
- MAPA (varios años a). *Análisis de la economía de los sistemas de producción. Resultados técnico-económicos de explotaciones agrícolas de Castilla-La Mancha*. Subsecretaría de Agricultura, Pesca y Alimentación. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid.
- MAPA (varios años b). *Análisis de la economía de los sistemas de producción. Resultados técnico-económicos de explotaciones agrícolas de Andalucía*. Subsecretaría de Agricultura, Pesca y Alimentación. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid.
- MAPA (varios años c). *Análisis de la economía de los sistemas de producción. Resultados técnico-económicos de explotaciones hortofrutícolas de la Región de Murcia*. Subsecretaría de Agricultura, Pesca y Alimentación. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid.
- MAPA (varios años d). *Análisis de la economía de los sistemas de producción. Resultados técnico-económicos de explotaciones hortofrutícolas de la Comunidad Valenciana*. Subsecretaría de Agricultura, Pesca y Alimentación. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid.
- MARM (2009). *Encuesta de cánones de arrendamiento rústico. Año 2008*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Madrid.
- MMA (2001). *Plan Hidrológico Nacional*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.

- MMA (2007). *Precios y Costes de los Servicios de Agua en España. Informe Integrado de Recuperación de Costes de los Servicios de Agua en España. Artículo 5 y Anejo III de la Directiva Marco de Agua*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Riesgo, L. y Gómez-Limón, J.A. (2005). “Análisis de escenarios de políticas para la gestión pública de la agricultura de regadío”. *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 5(9): 81-114.
- Röhm, O. y Dabbert, S. (2003). “Integrating Agri-Environmental Programs into Regional Production Models: An Extension of Positive Mathematical Programming”. *American Journal of Agricultural Economics*, 85(1): 254-265. <http://doi.org/cw3n7t>
- Segura, P., García, A. y Costantini, B. (2006). *Estudio técnico-económico de los procesos de producción agrícola y de transformación (manipulación y confección) de las principales orientaciones hortofrutícolas de la Región de Murcia*. Asociación Murciana de Organizaciones de Productores Agrarios (AMOPA), Murcia.
- Varela-Ortega, C., Sumpsi, J.M., Garrido, A., Blanco, M. e Iglesias, E. (1998). “Water Pricing Policies, Public Decision Making and Farmers’ Response: Implications for Water Policy”. *Agricultural Economics*, 19(1-2): 193-202. <http://doi.org/c2mdj5>
- Villalobos, F.J., Orgaz, F. y Fereres, E. (2006). *Estudio sobre necesidades de agua de riego de los cultivos en la zona del trasvase Tajo-Segura*. Instituto de Agricultura Sostenible (CSIC) y Universidad de Córdoba, Córdoba.
- Young, R.A. (2005). *Determining the economic value of water: Concepts and Methods*. RFF Press, Washington.

