Impacto de la tarifación del agua de riego en el Bajo Guadalquivir

N.M. Montilla-López*, C. Gutiérrez-Martín y J.A. Gómez-Limón

Departamento de Economía, Sociología y Política Agrarias. Universidad de Córdoba. Carretera Nacional IV, km 396. Campus Universitario de Rabanales. 14014 Córdoba, España

Resumen

Este trabajo se centra en el análisis del efecto de la tarifación sobre la demanda de agua en sistemas de regadío intensivos, así como los impactos tanto económicos como sociales que tendría su aplicación tras la reforma de la Política Agraria Común recientemente aprobada. La zona regable considerada como caso de estudio ha sido la Comunidad de Regantes del Sector BXII del Bajo Guadalquivir. La unidad de análisis ha sido la explotación agraria, distinguiéndose tres explotaciones tipo características de la zona de estudio. Para cada una de estas explotaciones tipo se han construido tres modelos de simulación, basados en tres métodos de programación matemática diferenciados. Con ellos se ha podido simular de forma más robusta la toma de decisiones de los regantes. A partir de tales simulaciones se han podido cuantificar los previsibles impactos de este instrumento sobre el consumo de agua, las rentas agrarias, la recaudación pública, la generación de empleo y el bienestar social asociado al uso agrario del agua. Los resultados obtenidos para las diferentes metodologías aplicadas han resultado ser muy similares. El análisis de las curvas de demanda muestra un primer tramo inelástico hasta precios elevados (0,3 €/m^3), seguidos de tramos elásticos donde los regantes realizarían cambios significativos en sus planes de cultivo. En cuanto al análisis de impactos socioeconómicos de la tarifación, los resultados muestran que en ambos tramos se producen pérdidas de renta agraria. Sin embargo, en el tramo elástico estas pérdidas de renta son superiores a la recaudación por tarifación, lo que provoca importantes pérdidas de eficiencia económica y de empleo generado.

Palabras clave: Regadío, instrumentos económicos, demanda de agua, programación matemática, impacto socioeconómico.

Abstract
Impact of irrigation water pricing in the Bajo Guadalquivir

This paper focuses on the analysis of the effect of water pricing on water demand in intensive irrigation systems, as well as both economic and social impacts that would have applied after the reform of the recently approved Common Agricultural Policy. The irrigation area considered as a case study has been the water user association of Sector BXII of Bajo Guadalquivir. The unit of analysis was the farm, distinguishing there different type of characteristic farms of the study area. Three simulation models have been built for each of these farm types, based on three different mathematical programming methods. With these methods, it was possible to simulate the farmers' decision making in a more robust manner. These simulations have allowed to quantify the expected impact of this instrument on water consumption, farm income, government revenue, employment generation and social welfare associated with agricultural water use. The results obtained from the different methods have been very similar. The analysis of the

* Autor para correspondencia: g02molon@uco.es

http://doi.org/10.12706/itea.2017.006

demand curves shows an inelastic segment up to high water prices (€ 0.3/m^3), followed by an elastic segment where farmers would carry out significant changes to their cropping patterns. Regarding the analysis of socioeconomic impacts of water pricing, the results show a significant loss in agricultural incomes in both segments. However, it is worth mentioning that only in the elastic segment these losses are higher than gains in public revenues, thus generating losses in economic efficiency and generated employment.

Key words: Irrigation, economic instrument, water demand, mathematical programming, socio-economic impact.

Introducción

La escasez estructural de recursos hídricos y su variabilidad espacial y temporal se han convertido actualmente en uno de los principales problemas al que debe enfrentarse la agricultura española. Además, esta problemática situación es probable que empeore en un futuro próximo como consecuencia de la gran vulnerabilidad de España al impacto del cambio climático. Dada la demanda creciente del recurso y la dificultad (elevado coste) de disponer de nuevos recursos, se ha hecho necesario un cambio en la forma de gestión de los recursos hídricos, pasando del tradicional enfoque de "políticas de oferta" a un enfoque de "políticas de demanda", orientadas a la mejora de la eficiencia en el uso del agua y la compatibilidad de su uso por parte de las actividades económicas y la sostenibilidad ambiental (Calatrava *et al.*, 2015).

En este contexto no debe obviarse, sin embargo, que la puesta en riego ha sido una de las estrategias más efectivas de desarrollo rural implementadas durante el último siglo. Efectivamente, la transformación en regadío ha supuesto una mejora generalizada de la rentabilidad del sector agrario, principalmente por el incremento y estabilización de las producciones y, por tanto, de las rentas agrarias. Igualmente, el incremento del rendimiento de los cultivos, así como la posibilidad de desarrollar otros cultivos inviables en condiciones de secano, hace que la agricultura de regadío pueda contribuir de manera más eficiente al bienestar del conjunto de la sociedad, aumentando la cantidad de alimentos y su variedad, así como generando un impacto social positivo en el medio rural donde se localiza, contribuyendo a la fijación de población en el territorio y la viabilidad de las comunidades rurales.

A pesar de las ventajas del regadío antes comentadas, también es cierto que este tipo de agricultura es la actividad con mayor consumo de recursos hídricos. Un ejemplo de ello puede encontrarse en las cuencas del sur de Europa, donde el desarrollo de un importante sector de regadío ha provocado el "cierre" de las mismas. La cuenca del Guadalquivir puede considerarse un caso paradigmático de este proceso, donde se estima que en el año 2015 el uso agrario representa aproximadamente el 88% del total del agua, frente al 10% del uso urbano.

En este sentido, el Parlamento Europeo y el Consejo Europeo de Ministros aprobaron la Directiva Marco del Agua (DMA) en el año 2000, principal norma del marco comunitario de actuación en política de aguas. Esta Directiva exige a los Estados miembros realizar análisis económicos del uso del agua, aplicar el principio de recuperación de los costes de los servicios relacionados con el agua, así como el cumplimiento de objetivos medioambientales, con el fin de alcanzar el buen estado de las masas de agua, cumpliendo el principio de "quien contamina paga". Con ello se trata de conseguir una gestión sostenible de los recursos hídricos y hacer frente a la creciente

presión en la demanda de agua de buena calidad, poniendo mayor énfasis en las medidas de control de la contaminación.

La introducción de tarifas o precios que reflejen el verdadero coste del recurso es una de las principales innovaciones de la DMA. Así, esta directiva propone disminuir el consumo de agua de riego mediante la aplicación de la tarifación como principal instrumento económico incentivador de su uso racional, evitando el deterioro cuantitativo y cualitativo de las masas de agua. Así pues, la tarifación se constituye en el seno de UE como el principal instrumento de las políticas de demanda antes comentadas, el cual será reforzado con otras medidas igualmente encaminadas a asegurar la asignación eficiente del agua dentro del sector agrario, tales como la modernización del regadío o los mercados de agua (Dinar, 2000).

Dada la notoriedad alcanzada por la tarifación del agua tras la aprobación de la DMA, la comunidad científica ha abordado el tema extensamente, tratando de analizar por anticipado los previsibles impactos (análisis *ex-ante*) de la implementación de este instrumento económico en la agricultura de regadío. En la mayoría de las ocasiones estos trabajos empíricos se han basado en modelos de programación matemática (PM), como la técnica que permite una mejor aproximación a la simulación de políticas en el ámbito agrario. Así, en el ámbito internacional podemos encontrar trabajos como los de Wheeler *et al*. (2008), Medellín-Azuara *et al.* (2012) o Grafton *et al.* (2015). De especial interés es el trabajo de Dinar *et al.* (2015), donde recogen las experiencias de tarifación empleadas en varios países del mundo, documentando los últimos 10-15 años de experiencias de fijación de precios e innovaciones en tarifación tales como la aplicación de reformas políticas, la recuperación de costes y la eficiencia y equidad en el uso del agua.

En el ámbito español los trabajos en esta línea han sido igualmente numerosos, destacando entre ellos los de Varela-Ortega *et al.* (1998), Berbel y Gómez-Limón (2000), Mejías *et al.* (2004) e Iglesias y Blanco (2008). A pesar de ello, el análisis de los impactos de la tarifación requiere todavía de una mayor evidencia empírica, especialmente sobre sistemas de regadío con cultivos de alto valor añadido. Asimismo, debe indicarse que la literatura existente se basa en modelos que simulan los efectos de la tarifación bajo antiguos escenarios de la Política Agraria Común (PAC), muy diferentes del aplicable en la actualidad. Este motivo justifica igualmente la necesidad de nuevos trabajos empíricos en esta línea, que reporten evidencias actualizadas al respecto.

Dentro de este contexto, este trabajo trata de cubrir estas lagunas de conocimiento arriba comentadas, analizando el efecto que tendría la tarifación del agua sobre la agricultura de regadío en sistemas de cultivos más intensivos, tomando como caso de estudio la Comunidad de Regantes (CR) del Sector BXII en el Bajo Guadalquivir. Además, este trabajo aborda una simulación que tiene en cuenta las novedades introducidas por la reforma de la PAC que han entrado en vigor en el año 2015, al objeto de evidenciar si tal cambio normativo tiene influencia sobre los impactos previsibles de la tarifación del agua de riego. Con este objetivo se han construido tres modelos de simulación, basados en tres métodos de programación matemática, los cuales han sido aplicados en tres "explotaciones tipo" características de la zona de estudio. De esta manera se ha tratado de simular la toma de decisiones de los regantes acerca de la adopción de planes de cultivo y técnicas de riego frente a la tarifación, y así poder analizar los impactos socioeconómicos de este instrumento económico.

Material y métodos

Descripción de la zona

La CR del Sector BXII del Bajo Guadalquivir es una zona regable de 14.643 ha situada en la margen izquierda del río Guadalquivir, cerca de su desembocadura en el océano Atlántico, repartida entre los municipios sevillanos de Lebrija y Las Cabezas de San Juan. Se trata de una zona anteriormente de marismas, improductiva para agricultura, que fue desecada y transformada en regadío por el Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario (IRYDA) durante la década de los setenta del siglo pasado. A medida que se fue terminando la transformación (entre 1980 y 1990), estas nuevas tierras fueron divididas en parcelas perfectamente rectangulares de 12 ha y entregadas a 1.142 colonos. Este proceso de creación ha permitido que las explotaciones que componen la zona regable presenten una relativa homogeneidad, ya que comparten clima, edafología, técnicas de cultivo y tienen un tamaño igualmente similar. Asimismo, el proceso de colonización seguido ha hecho que el perfil sociodemográfico de los titulares sea igualmente homogéneo, presentando perfiles similares en cuanto a edad, formación y renta.

La zona regable cuenta con una concesión otorgada por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG) de 6.700 m^3/ha anuales. El agua se extrae del propio cauce del río, siendo transportada hasta la zona regable a través del Canal del Bajo Guadalquivir. Una vez en la CR, el agua es distribuida entre las diferentes explotaciones mediante una red de tuberías presurizadas completamente modernizadas que permite un sistema de riego a la demanda. Los principales cultivos de la zona son algodón (44,5% del total de la superficie de la CR), maíz (12,9%), tomate (11,5%), remolacha (9,4%), trigo (8,7%), girasol (6,8%) y hortícolas como la zanahoria y la cebolla (6,3%). Estos cultivos son principalmente regados mediante aspersión (72% de la superficie de la CR), aunque también se emplean las técnicas de goteo (22%) y riego superficial (6%).

Actualmente la zona regable del Sector BXII está dividida en 569 explotaciones, con un tamaño medio de 25,7 ha. Los servicios prestados por la CR se tarifan de forma binómica. Durante la campaña 2013, el importe facturado a los comuneros consistió en una derrama por superficie de 294 €/ha (por el canon y la tarifa pagados a la CHG, los gastos de personal, los gastos generales y los gastos de mantenimiento), a la que se sumó un cargo en función del consumo de agua de 0,0023 €/m^3 (por el consumo de energía).

Los datos anteriores evidencian que se trata de una zona con alto grado de modernización tecnológica, así como como una producción altamente rentable. Como se ha comentado anteriormente, en la literatura apenas hay estudios sobre el impacto de la tarifación en zonas regables con estas características, circunstancia que justifica la elección de la CR del Sector BXII como zona de estudio para este trabajo empírico.

Captura de datos

El uso del agua en el regadío depende esencialmente de las decisiones que tomen los regantes, y más concretamente de las decisiones relativas al plan de cultivos (alternativas a sembrar y técnicas de riego a emplear). Esta circunstancia justifica que la unidad más adecuada para el análisis del impacto de la tarifación sea la explotación agraria, considerada como la unidad de gestión de la agricultura de regadío, donde el uso de agua está condicionado por la toma de decisiones de su titular.

La caracterización de las explotaciones de regadío del Sector BXII se ha realizado mediante una encuesta realizada específicamente para este estudio, gracias a la cual se

ha recabado información sobre los planes de cultivos, sistemas y dosis de riego, y otros aspectos relacionados con la gestión del agua. Para la realización de esta encuesta se ha extraído una muestra representativa de regantes de la zona de estudio, seleccionados mediante rutas aleatorias, respetando cuotas por estratos de tamaños. Aunque el tamaño muestral inicial se fijó en 60 individuos, tras las correspondientes entrevistas personales se ha podido contar con 59 cuestionarios válidos. El trabajo de campo correspondiente se realizó durante los meses de marzo y abril de 2014.

Asimismo, se ha realizado un estudio de la rentabilidad (ingresos y gastos) de los cultivos presentes en la zona regable. Para ello se ha partido de información tanto primaria como secundaria. Las fuentes primarias, basadas en entrevistas a técnicos y agricultores de la zona de estudio, han permitido configurar los itinerarios tecnológicos (prácticas de cultivo y dosis de insumos) de los diferentes cultivos, así como los costes unitarios de producción (precios pagados). Con toda esta información se ha podido calcular los ingresos, gastos e indicadores de rentabilidad de cada alternativa de cultivo para el año base (2013). Por otra parte, se han empleado datos secundarios (anuarios de estadística agraria del MAGRAMA y de la Junta de Andalucía, e información del Fondo Español de Garantía Agraria) para obtener las series históricas de rendimientos, precios y subvenciones, las cuales nos han permitido igualmente generar una serie histórica (2007-2013) de ingresos, gastos e indicadores de rentabilidad de los diferentes cultivos.

Los datos recogidos en la encuesta han puesto de manifiesto ciertas disparidades de planes de cultivos y técnicas de riego empleadas entre los regantes de la zona de estudio. Estas disparidades, común a la mayoría de sistemas agrarios de regadío, hace recomendable que el estudio empírico del uso del agua se base en los análisis individualizados de diferentes "explotaciones tipo", representativas de la diversidad de explotaciones existentes en la zona regable. Con el propósito de definir el número y características de estas explotaciones tipo, en este trabajo se ha empleado la técnica del análisis de grupos, de conglomerados o clúster, tal y como recomiendan Gómez-Limón y Riesgo (2004). La técnica de conglomerados se utiliza para agrupar objetos o individuos que se consideran similares entre sí a partir de un conjunto de variables que los caracterizan. En nuestro caso, los elementos a tipificar son las 59 explotaciones de la muestra, empleando para ello el plan de cultivos (porcentaje de superficie dedicada a cada cultivo) y las técnicas de riego utilizadas como variables tipificadoras. Dentro de las posibilidades que permite esta técnica, se ha optado en este caso por emplear el método de Ward como criterio de agregación y la distancia euclídea como medida de la distancia entre elementos de la muestra. De esta manera se han obtenido finalmente tres clases o clústeres, donde se agrupan la totalidad de las explotaciones muestreadas. A partir de esta tipología se ha podido caracterizar las explotaciones "tipo" resultantes mediante los valores medios para cada clase de las diferentes variables recogidas en las encuestas, tanto las relativas al plan de cultivos (variables tipificadoras) como otras relativas a aspectos estructurales de las mismas (tamaño y características sociodemográficas del titular: género, edad, formación, etc.).

En la Tabla 1 se resume los resultados del análisis clúster realizado, donde se indica el plan de cultivos de cada explotación tipo resultante (variables empleadas para la tipificación), así como el tamaño de las mismas, única variable estructural donde se han encontrado diferencias significativas entre clústeres.

Las características de cada una de las explotaciones tipo así definidas se resumen como sigue:

Tabla 1. Resultados del análisis clúster: caracterización de las explotaciones tipo
Table 1. Cluster results: Farm type characterization

	Explotación tipo 1	Explotación tipo 2	Explotación tipo 3
Variables tipificadoras (alternativas de cultivo-sistema de riego)			
Trigo blando aspersión (%)	5,4	6,4	3,9
Maíz superficie (%)	1,8	1,2	
Maíz aspersión (%)		3,8	
Maíz goteo (%)	1,5	4,3	
Remolacha aspersión (%)	24,0	6,2	39,1
Algodón superficie (%)		2,9	6,7
Algodón aspersión (%)	29,6	54,4	50,3
Girasol superficie (%)		2,1	
Alfalfa aspersión (%)	0,5	3,8	
Tomate goteo (%)	30,3	12,8	
Cebolla aspersión (%)	1,6	0,5	
Zanahoria aspersión (%)	5,3	2,0	
Variables estructurales con diferencias significativas			
Superficie total (ha)	35,8	23,9	15,0

- *Explotación tipo 1:* "*Grandes regantes profesionales*". Representa al 39% de explotaciones de la muestra, que ocupan el 52% de la superficie total de la zona regable. Se trata de la explotación tipo de mayor tamaño de la CR (35,8 ha), orientada principalmente hacia cultivos hortícolas (en torno al 40% de su superficie: tomate por goteo, 30,3%; zanahoria, 5,3%; y cebolla, 1,6% regados por aspersión), que son los cultivos más rentables. Otros cultivos de importancia en su plan de cultivos son algodón (29,6%) y remolacha azucarera (24,0%), ambos regados por aspersión.
- *Explotación tipo 2:* "*Diversificadores de riesgo*". Esta explotación representa al 41% de los agricultores de la muestra, y ocupa el 36% de la superficie de la CR. Se trata de una explotación de tamaño mediano (23,9 ha), caracterizada por tener un plan de cultivos altamente diversificado, dedicando superficies a todas las alternativas presentes en la zona de estudio y utilizando todas las técnicas de riego: superficie, aspersión y goteo.
- *Explotación tipo 3:* "*Agricultores conservadores extensivos*". Este tipo de explotación representa la menor proporción de los agricultores de la muestra (20%), y cubre solo el 11% de la superficie total de la CR. Se trata pues de la explotación tipo de menor tamaño, con una media de 15 ha. Su superficie agraria está ocupada por los cultivos más extensivos de la zona, como algodón

(57,0%), regado principalmente por aspersión, aunque también es regado por superficie, y remolacha por aspersión (39,1%), ambos muy dependientes de los subsidios de la PAC.

Modelización a través de la programación matemática

La cuantificación de los impactos socioeconómicos de la tarifación del agua de riego requiere de la consideración de diferentes escenarios de precios del recurso, al objeto de poder simular el comportamiento (toma de decisiones) de los regantes frente a los mismos. En este sentido, el enfoque metodológico más adecuado son los modelos de programación matemática, ya que permite incluir una gran cantidad de información económica y técnica con un nivel de desagregación apropiado, para poder representar y analizar diferentes escenarios (Hazell y Norton, 1986).

En este trabajo la aplicación de la programación matemática (PM) ha consistido en la construcción de modelos a través de los cuales simular individualmente el comportamiento de cada una de las tres explotaciones tipo definidas frente a tarifas volumétricas crecientes del agua de riego. De manera más concreta, cabe comentar que se han construido un total de 3 modelos para cada una de las explotaciones tipo, utilizando para ello tres técnicas de PM diferentes: a) maximización del beneficio, b) Programación Matemática Positiva (PMP), y c) maximización de una Función de Utilidad Multiatributo (MAUF). Así pues, se han construido un total de 9 modelos (3 explotaciones tipo × 3 métodos de PM). La consideración de tres métodos diferentes de PM para la realización del estudio empírico está justificada por el propósito de obtener resultados y conclusiones más robustos.

Una vez que los modelos se han construido, estos se han adaptado para la simulación del comportamiento de las explotaciones tipo frente la tarifación del agua de riego. Para ello se ha incluido en dichos modelos la tarifa del agua (P_w) como un nuevo parámetro, que se ha hecho variar en un intervalo de 0,00 €/m^3 a 1,00 €/m^3. Así, considerando la tarifa volumétrica del agua como un nuevo coste variable de producción (dependiente de las necesidades de agua de los cultivos sembrados), se ha derivado el plan de cultivos óptimo para cada uno de los 101 escenarios de precios del agua considerados (parametrización de P_w con incrementos sucesivos de 0,01 €/m^3). A partir de estos resultados de los modelos de PM se han obtenido, igualmente para cada nivel de tarifación, el valor de determinadas variables de interés para el análisis político de este instrumento económico: a) la cantidad de agua demandada por el regante, b) el beneficio de los agricultores, c) el empleo generado en la agricultura, d) la recaudación pública proveniente de la tarifa del agua, y e) el nivel de bienestar económico generado por el uso agrario del agua.

El último paso realizado ha consistido en agregar los resultados obtenidos para las explotaciones tipo, al objeto de estimar así los resultados agregados a nivel del conjunto de la zona regable. Con este propósito se ha realizado una suma ponderada de las variables obtenidas en cada explotación tipo, considerando para ello la superficie representada por cada una de ellas.

Los modelos de PM tienen tres elementos definitorios: a) variables de decisión, b) restricciones, y c) función objetivo. A continuación se detalla cómo se ha considerado cada uno de estos elementos en la construcción de los modelos empleados en este trabajo.

a) Variables de decisión. Se han considerado como variables de decisión la superficie dedicada a cada una de las alternativas de cultivo-sistema de riego existentes en la zona, $\vec{x}_{ij} = (x_{1,1}, \ldots x_{i,j}, \ldots, x_{n,m})$, donde $x_{i,j}$ es área dedicada a cada combinación de cultivo i y técnica de riego j. En la primera columna de la Tabla 1 pueden observarse las alternativas de cultivos

empleadas como variables de decisión en los modelos, construidos como binomios de los cultivos y las técnicas de riego conforme a las existentes en la zona de estudio. Además, como variables de decisión posibles en un escenario de tarifación del agua de riego, se ha considerado igualmente las alternativas de cultivos de secano (trigo y girasol), dejar la tierra en barbecho y el arrendamiento de tierra de pastizal a terceros como posibilidad para cumplir con las exigencias de la nueva PAC.

En este sentido conviene indicar que el riego deficitario no ha sido considerado a la hora de definir las variables de decisión, debido a que en la zona de estudio este tipo de manejo del riego no es considerado en la práctica por los agricultores, dado el carácter anual de los cultivos existente en la misma. Efectivamente, en el caso de los cultivos herbáceos existe una relación lineal entre la evapotranspiración y el rendimiento del cultivo, circunstancia que provoca que, desde una perspectiva técnica y económica, la dosis óptima de agua de riego coincida con el máximo técnico (necesidades hídricas de los cultivos completas), con independencia de la tarifa de agua aplicada, siempre y cuando el cultivo genere una rentabilidad positiva. Este hecho justifica la nula incidencia del riego deficitario en cultivos herbáceos, tal y como ha quedado demostrada en diversos trabajos empíricos (véase, por ejemplo, Martínez-Álvarez *et al.*, 2014).

b) Restricciones. Son las condiciones o los límites, tanto superiores como inferiores, que deben respetar las variables de decisión, ya que de lo contrario la solución sería imposible de implementar en el mundo real. Para todos los modelos desarrollados se ha considerado las siguientes restricciones:

- Restricciones de *ocupación de la tierra*. La suma de todas las variables de decisión tiene que ser menor o igual que la superficie disponible en la explotación tipo k (a_k), de tal manera que se verifique que:

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\vec{x}_{i,j} \leq a_k \qquad [1]$$

- Restricciones de *agua*. Los requerimientos de agua de los cultivos no pueden superar la cantidad de agua disponible por explotación, que se deriva de la superficie de la misma (a_k) y de la concesión otorgada a la CR por la CHG (b_k = 6.700 m^3/ha). Así, se tiene que cumplir que:

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\vec{x}_{i,j}\cdot wr_{i,j} \leq a_k \cdot b_k \qquad [2]$$

  donde $wr_{i,j}$ son los requerimientos de agua de la alternativa i, j.

- Restricciones de *mercado*. Algunos cultivos, por su carácter perecedero (principalmente los hortícolas), presentan limitaciones en su comercialización, dado que el mercado no puede absorber una cantidad superior a la demanda. Por este motivo se han incluido restricciones que limitan las superficies cultivadas de tomate, cebolla y zanahoria a la máxima superficie histórica de cada explotación tipo k durante el período 2007-2013.
- *Cupo remolacha*. Según el sistema de cuotas de producción establecido por la PAC, la superficie cultivada con remolacha azucarera no puede superar la superficie observada, que es equivalente a la cuota asignada a cada explotación tipo.
- *Restricciones agronómicas*. Se han incluido las restricciones de sucesión y rotación de cultivos consideradas de la zona de estudio, de acuerdo con la información proporcionada por los técnicos entrevistados.
- Restricciones relativas al *sistema de riego.* Se supone que las infraestructuras específicas de cada sistema de riego (superficie, aspersión y goteo) se mantienen fijas en el corto plazo. Como consecuencia, se ha asumido que el área regada por cada uno de estos sistemas en cada tipo de explotación no se puede variar en más de 10% respecto la superficie observada.

$$\sum_{i=1}^{n}\vec{x}_{i,j} \leq 1{,}1 \cdot \sum_{i=1}^{n}\vec{x}_{i,j}^{obs} \quad \forall j \qquad [3]$$

La aplicación de la PAC establece igualmente una limitación legal en relación con la superficie máxima individual de algodón. No obstante, tras la información recogida durante el trabajo de campo, se ha considerado pertinente no incluir esta limitación como restricción de los modelos, ya que los titulares de explotación de la zona analizada han venido sorteando dicha limitación para poder acogerse a la ayuda del cultivo del algodón, compartiendo la titularidad de las explotaciones con otros miembros de su familia.

Tal y como se han definido las variables de decisión y las restricciones para todos los modelos, resulta evidente que estos se han planteado para la realización de simulaciones considerando un horizonte temporal a corto plazo. Este enfoque cortoplacista está justificado por el objetivo definido para el trabajo, consistente en analizar el efecto que supondría incrementos en la tarifa del agua dentro del contexto de la nueva PAC. Esto implica que las únicas variables sobre las que puede decidir el agricultor son las relativas al plan de cultivos (se considera que los bienes de capital fijo –p. ej., los sistemas de riego– y la dimensión de las explotaciones son componentes estructurales que no pueden alterarse).

c) Función objetivo. Es la expresión matemática que el agricultor trata de optimizar a través de su toma de decisiones (asignación de valores a las variables de decisión). Dicha expresión se fija en función de los supuestos de partida que se asuman sobre el comportamiento de estos productores. En este trabajo se ha optado por considerar diferentes supuestos al respecto, derivándose por tanto diferentes expresiones para la función objetivo. Así, la expresión de dicha función es el elemento diferenciador de los tres métodos de PM utilizados. A continuación se describen las funciones objetivos empleados para cada uno de los tres métodos aplicados.

Maximización del beneficio

En este caso, siguiendo el criterio clásico de la Economía de la empresa, la función objetivo considerada es la maximización del beneficio. Dado el ámbito decisional de los modelos de simulación desarrollados, que pretenden simular decisiones de los regantes a corto plazo (es decir, las relativas al plan de cultivo), se ha optado por considerar el margen bruto total de la explotación (MBT) como *proxy* operativo para cuantificar las variaciones en el beneficio, variaciones que a la postre son las que determinan los cambios en las decisiones productivas. Este indicador económico se calcula como diferencia de los ingresos de explotación (ventas y subvenciones acopladas) y los costes variables.

Matemáticamente, el margen bruto de cada alternativa de cultivo i y técnica de riego j ($MB_{i,j}$) se calcula como sigue:

$$MB_{i,j} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\left[Y_{i,j}\cdot P_i + S_i - CV_{i,j} - (wr_{i,j}\cdot P_w)\right] \quad [4]$$

Siendo:

$Y_{i,j}$ = rendimiento del cultivo i y técnica de riego j (en kg/ha)

P_i = precio de venta del cultivo i (en €/kg)

S_i = ayuda acoplada a la producción del cultivo i (en €/ha)

$CV_{i,j}$ = costes de producción del cultivo i y técnica de riego j (en €/ha)

$wr_{i,j}$ = requerimiento de agua del cultivo i y técnica de riego j (en m^3/ha)

P_w = tarifa del agua (en €/m^3)

La función objetivo a maximizar en este caso será, por tanto, la siguiente:

$$MBT = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} MB_{i,j}\cdot \vec{x}_{i,j} \quad [5]$$

Programación Matemática Positiva (PMP)

La PMP, desarrollada por Howitt (1995), también asume un comportamiento maximizador del beneficio de los agricultores, pero, a diferencia del enfoque clásico, considera una función objetivo no lineal, obtenida mediante un proceso de calibración que ajusta la función de costes de los cultivos mediante una función cuadrática. Esta innovación metodológica permite simulaciones más flexibles y realistas que con la maximización del beneficio. Este hecho le ha convertido en uno de los enfoques de PM más aceptados y utilizados para la modelización del sector agrario.

Para la aplicación de la PMP a nuestro caso de estudio se ha optado por seguir el enfoque estándar propuesto por Howitt (1995). No obstante, dentro de este enfoque estándar se ha considerado la aproximación del coste medio (*average cost approach*) propuesta por Heckelei y Britz (2000), que considera que los costes medios de la función de costes variables para cada actividad son iguales a los costes observados. De esta manera el margen bruto tras aplicar la PMP resulta ser igual al margen bruto observado.

La aplicación de este enfoque estándar de la PMP consta de dos fases. La primera de ellas consiste en la construcción de un modelo de maximización del beneficio como el antes comentado, al cual se le añaden una serie de restricciones adicionales (restricciones de calibración), que limitan la superficie destinada a cada cultivo a las superficies observadas en la realidad. Al incluir tales restricciones se fuerza a que la solución óptima del modelo reproduzca exactamente los niveles de actividad (superficie de cultivo y técnica de riego) observados en el año base. En la segunda fase, los valores duales de las restricciones de calibración se utilizan para especificar una función objetivo de maximización de beneficio con costes cuadráticos, tal y como se describe a continuación:

$$Max\ MB = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}(P_i \cdot \vec{x}_{i,j} + S_i - \alpha_{i,j} \cdot \vec{x}_{i,j} - \frac{1}{2}\beta_{i,j} \cdot \vec{x}_{i,j}^{2}) \quad [6a]$$

$$\alpha_{i,j} = CV_{i,j} - \lambda_{i,j} \quad [6b]$$

$$\beta_{i,j} = \frac{2\lambda_{i,j}}{x_{i,j}^{obs}} \quad [6c]$$

donde $\lambda_{i,j}$ es el precio sombra (valor dual) de la restricción de calibración del cultivo i y técnica de riego j, y $\alpha_{i,j}$ y $\beta_{i,j}$ son los parámetros de calibración de la PMP.

La función objetivo así generada incluye una función de costes cuadrática que trata de recoger todos los costes de los diferentes cultivos, tanto los observables como los no observables. El interés de esta función objetivo es que su maximización permite reproducir de manera exacta el plan de cultivo de las explotaciones modelizadas para el escenario base empleado para la calibración. Esta circunstancia suele esgrimirse como argumento en favor de este enfoque de PM, ya que permite asumir que las simulaciones realizadas mediante esta técnica son más realistas que las derivadas de otros enfoques que no son capaces de reproducir ni tan siquiera las soluciones del escenario base.

Cabe comentar que la PMP ha evolucionado considerablemente en los últimos años, planteándose nuevos desarrollos que tratan resolver algunas de las debilidades del enfoque estándar propuesto por Howitt (1995). Entre estos desarrollos cabe comentar el de Röhm y Dabbert (2003), que considera un intercambio más favorable entre "variantes" de determinadas actividades (p. ej., distintos sistemas de riego para un mismo cultivo en nuestro caso) que entre actividades diferentes, o el de Cortignani y Severini (2009), que posibilita la calibración de alternativas no observadas en el año base, (p. ej., las alternativas de secano en nuestro caso). Todos estos desarrollos se basan en procedimientos de calibración que utilizan un valor marginal de la tierra en el escenario base. Por este motivo el empleo de estas variantes de la PMP para

la simulación de escenarios es sólo recomendable en aquellos casos en que el valor marginal de la tierra (renta de la tierra) no se vea afectado de manera significativa (no tiene sentido que funciones objetivo calibradas en base a la renta de la tierra del escenario base se utilicen para simular escenarios donde dicha renta es radicalmente diferente). Desgraciadamente, este no es el caso de la tarifación del agua de riego, instrumento que supone la adición de un coste lineal a cada uno de los cultivos regadío, y que por tanto provoca la disminución de la renta de la tierra. Por este motivo, se ha tenido que descartar el uso de los desarrollos de la PMP arriba comentados para esta investigación, optándose por el enfoque estándar de la PMP como mejor opción disponible.

Maximización de una Función de Utilidad Multiatributo (MAUF)

Este método de PM asume que el comportamiento de los agricultores trata de maximizar una *Función de Utilidad Multiatributo* (MAUF en inglés) en la que condensan todos los criterios que estos productores consideran relevantes (Romero y Rehman, 2003). Este enfoque multicriterio se supone igualmente más realista que la simple maximización del beneficio, pues se trata de un modelo más general.

Para la aplicación de este enfoque a nuestro caso de estudio se asume que los principales criterios que integran la función de utilidad de los agricultores (Gómez-Limón y Berbel, 2000; Gómez-Limón *et al.*, 2004; Gutiérrez-Martín y Gómez-Gómez, 2011) son:

- La *maximización del beneficio*:

$$MBT = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} MB_{i,j}\cdot \vec{x}_{i,j} \qquad [7]$$

- La *minimización del riesgo* medido como la varianza del margen bruto (VAR) durante un período de 7 años (2007-2013). Así, el riesgo se calcula como:

$$VAR = \vec{x}_{i,j}^{\,t}[cov]\vec{x}_{i,j} \qquad [8]$$

donde $[cov]$ es la matriz de varianzas-covarianzas de los márgenes brutos de los cultivos por hectárea en el período considerado.

- La *minimización de la mano de obra total* (MOT) empleada en la explotación, considerada como *proxy* de la complejidad de gestión. Matemáticamente este atributo se calcula como:

$$MOT = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} MO_{i,j}\cdot \vec{x}_{i,j} \qquad [9]$$

donde $\mathrm{MOT}_{i,j}$ es la cantidad de mano de obra demanda de cada alternativa i, j.

La formulación matemática concreta de la función de utilidad se ha obtenido siguiendo la metodología propuesta por Sumpsi *et al.* (1996) basada en una función de utilidad aditiva:

$$MAUF = \sum_{a=1}^{l} w_a\, u_a(f_a) \qquad [10]$$

donde $\mathrm{u}_a(f_a)$ es la expresión matemática de la utilidad parcial asociada al atributo a, y w_a es la ponderación o peso otorgado a dicho atributo a, cumpliéndose que:

$$\sum_{a=1}^{l} w_a = 1 \qquad [11]$$

Para la determinación operativa de la MAUF característica del comportamiento de los regantes, se han considerado funciones de utilidad parcial monoatributo [$u_a(f_a)$] lineales, normalizadas en todos los casos para tomar valores entre 0 (menor utilidad posible) y 1 (mayor utilidad posible). Para ello se ha empleado la expresión $u_a = \frac{f_a(\vec{x}_{i,j}) - f_{a*}}{f_a{}^{*} - f_{a*}}$ para los atributos del tipo "más es mejor", y la expresión $u_a = \frac{f_{a*} - f_a(\vec{x}_{i,j})}{f_{a*} - f_a{}^{*}}$ para los atributos de tipo "menos es mejor", donde $f_a{}^{*}$ y f_{a*} son los valores ideales y anti-ideales, respectivamente, de cada atributo en la correspondiente matriz de pagos. Así las funciones monoatributo de los criterios asociadas a MBT, VAR y MOT han quedado como sigue:

$$u_{MBT} = MBTn = \frac{MBT(\vec{x}_{i,j}) - MBT_*}{MBT^* - MBT_*} \quad [12]$$

$$u_{VAR} = VARn = \frac{VAR_* - VAR(\vec{x}_{i,j})}{VAR_* - VAR^*} \quad [13]$$

$$u_{MOT} = MOTn = \frac{MOT_* - MOT(\vec{x}_{i,j})}{MOT_* - MOT^*} \quad [14]$$

Puede evidenciarse, que todas las $u_a(f_a)$ así obtenidas son del tipo "más es mejor", por lo que $VARn$ debe interpretarse como el riesgo evitado y $MOTn$ como la complejidad de gestión evitada.

Siguiendo el método propuesto por Sumpsi *et al.* (1996), el valor de las ponderaciones w_a se obtiene a partir de un modelo auxiliar de programación por metas ponderadas, que trata de reproducir con exactitud el comportamiento observado de los productores. Así, finalmente se obtiene una función de utilidad del tipo:

$$MAUF = w_1 \cdot MBTn + w_2 \cdot VARn + w_3 \cdot MOTn \quad [15]$$

Debe indicarse en cualquier caso, que la forma funcional de $MAUF$ de será diferente para cada explotación tipo. Efectivamente, este enfoque de PM permite detectar diferencias en las ponderaciones de los diferentes atributos en base a la disparidad de los planes de cultivos observados en el escenario base. Esta circunstancia se ha esgrimido igualmente como una ventaja singular del mismo, que justifica la obtención de soluciones más realistas.

Adaptación de los modelos a la PAC-2015

Las observaciones de las decisiones de los regantes en el año base se corresponden con el año 2013, decisiones que estuvieron condicionadas por la PAC aplicada en ese año (PAC-2013). Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la simulación del comportamiento futuro de los regantes requiere la consideración del nuevo marco normativo de la PAC, resultante de la última reforma de esta política europea y que ha entrado en vigor en 2015 (PAC-2015).

Esta circunstancia ha obligado a considerar dos escenarios distintos de política agraria. Así, las calibraciones de las funciones objetivo de los modelos PMP y MAUF se han realizado considerando el escenario PAC-2013, teniendo en cuenta las subvenciones acopladas (S_i) existentes entonces, así como las restricciones arriba indicadas.

Sin embargo, simular el comportamiento de los regantes frente a la tarifación del agua de riego ha exigido la consideración del escenario actual de la PAC (PAC-2015). Para ello se han tenido que adaptar los modelos empleados para la calibración, al objeto de actualizar el nivel de subvenciones acopladas y tener en cuenta las novedades en relación al nuevo "pago verde", tal y como se describe a continuación:

- Las explotaciones mayores de 15 ha deben dedicar al menos un 5% de la explotación a superficies de interés ecológico o SIE (barbecho, cultivos fijadores de nitrógeno y forestadas). Así, si $a_k \geq 15$, entonces debe cumplirse que $SIE \geq 0{,}05 \cdot a_k$.
- Las explotaciones entre 10 y 30 ha deben tener al menos dos cultivos diferentes, siendo el cultivo principal menor del 75% de la superficie de la explotación. Así, si $10 \leq a_k \leq 30$, entonces debe verificarse que $\sum_{j=1}^{m} \vec{x}_{i,j} \leq 0{,}75 \cdot a_k$ para todo i.
- Las explotaciones mayores de 30 ha tienen que tener al menos tres cultivos diferentes, donde el cultivo principal debe ocupar menos del 75%, y la suma de los dos cultivos principales tiene que ser menor del 95%. Así, si $a_k > 30$, entonces ha de cumplirse, además de $\sum_{j=1}^{m} \vec{x}_{i,j} \leq 0{,}75 \cdot a_k$ para todo i, y que $\sum_{j=1}^{m} \vec{x}_{i,j} + \sum_{j=1}^{m} \vec{x}_{i',j} \leq 0{,}95 \cdot a_k$ para todo $i \neq i'$.

Resultados

En primer lugar se han obtenido las funciones de utilidad para cada una de las explotaciones tipo consideradas por el método MAUF, resultando las funciones que se muestran a continuación:

$$\text{Expl. tipo 1: } MAUF_1 = 0{,}766 \cdot MBTn + 0{,}234 \cdot VARn \quad [16]$$

$$\text{Expl. tipo 2: } MAUF_2 = 0{,}775 \cdot MBTn + 0{,}225 \cdot VARn \quad [17]$$

$$\text{Expl. tipo 3: } MAUF_3 = 0{,}848 \cdot MBTn + 0{,}122 \cdot VARn + 0{,}030 \cdot MOTn \quad [18]$$

Observando las diferentes MAUF se evidencia como el margen bruto tiene en todos los casos una importancia relativa muy superior al resto de los criterios. La similitud de comportamiento (MAUF) puede explicarse por la relativa homogeneidad de las explotaciones (clima, edafología, tamaño y técnicas de cultivo) y titulares (edad, formación, etc.) de la zona regable analizada, tal y como se comentaba en la sección dedicada a la descripción del caso de estudio.

Los modelos construidos para cada explotación tipo han permitido obtener, para cada nivel de la tarifa volumétrica del agua (parametrización de P_w desde 0,00 a 1,00 €/m^3), los correspondientes planes de cultivos óptimos como primeros resultados. A partir de esta información sobre el previsible comportamiento de los regantes ante cada escenario de precios del agua, se han podido obtener una serie de variables de interés para la toma de decisión política: el margen bruto total generado por la actividad agraria, la recaudación pública derivada de la tarifación y el nivel de bienestar económico derivado del uso del agua en la agricultura (indicadores económicos), el empleo generado por el regadío (indicador social) y el uso del agua para riego (indicador ambiental). El análisis de la evolución de estos indicadores a medida que se incrementa la tarifa del agua, sin duda, resulta de utilidad para la evaluación *ex-ante* de este instrumento económico, de cara a su adecuado diseño y gestión.

El efecto aislado de la reforma de la PAC

El primer resultado a reportar es el del previsible impacto de la reforma de la PAC-2015. Para ello se comparan el valor de los indicadores de interés político antes comentados en el escenario base (año 2013) con los simulados para un escenario PAC-2015 con precio del agua nulo, tal y como se muestra en la Tabla 2.

En esta tabla puede observarse cómo la última reforma de la PAC apenas va a afectar a la agricultura de la zona regable analizada. De hecho, las variaciones esperadas en el margen bruto, la demanda de mano de obra o el uso de agua de las diferentes explotaciones tipo son inferiores al 1% respecto a la situación actual. Estos resultados se explican por dos motivos. Primero, porque las condiciones de rotación obligatoria establecidas por el *greening* ya se cumplían previamente a la reforma y, por tanto, no ha sido necesario hacer cambios en los planes de cultivo por este motivo. Segundo, porque la estrategia a seguir por las explotaciones de la zona analizadas para el cumplimiento de la superficie de interés ecológico (SIE), que implica dedicar al menos un 5% de sus tierras a barbecho, cultivos fijadores de nitrógeno (leguminosas como la alfalfa), pastos o a superficie forestada, va a consistir en arrendar tierra de secano fuera de la zona regable para dedicarlas a barbecho o a pastos.

Estos resultados evidencian por tanto que la última reforma de la PAC no condiciona el potencial del impacto de la tarifación del agua de riego.

Tabla 2. Impacto previsible de la reforma de la PAC-2015
Table 2. Feasible impact of PAC-2015 reform

	Explot. tipo 1	Explot. tipo 2	Explot. tipo 3	Zona regable
PAC-2013				
Margen bruto (€/ha)	3.140	2.269	1.820	2.678
Mano de obra (h/ha)	34,07	20,95	27,09	28,64
Uso de agua (m^3/ha)	5.774	5.176	5.502	5.531
Nº cultivos en la rotación	7	9	4	9
Superficie 1er cultivo (%)	35,8	32,6	41,1	28,5
Superficie 2º cultivo (%)	29,3	28,2	39	24,4
Alfalfa regadío (%)	0,6	4,5	0,0	1,9
SIE† en superficie de secano arrendada (%)	0,0	0,0	0,0	0,0
SIE total (%)	0,6	4,5	0,0	1,9
PAC-2015				
Margen bruto (€/ha)	3.129	2.267	1.807	2.670
Mano de obra (h/ha)	34,12	20,96	27,14	28,67
Uso de agua (m^3/ha)	5.773	5.176	5.502	5.531
Nº cultivos en la rotación	8	10	5	10
Superficie 1er cultivo (%)	35,8	32,6	41,1	28,5
Superficie 2º cultivo (%)	29,3	28,2	39,0	24,4
Alfalfa regadío (%)	0,6	4,5	0,0	1,9
SIE† en superficie de secano arrendada (%)	4,4	0,5	5,0	3,1
SIE total (%)	5,0	5,0	5,0	5,0
Impacto PAC				
Margen bruto (€/ha)	-0,4%	-0,1%	-0,7%	-0,3%
Mano de obra (h/ha)	+0,1%	0,0%	+0,2%	+0,1%
Uso de agua (m^3/ha)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Nº cultivos en la rotación	+14,3%	+11,1%	+25,0%	+11,1%
Superficie 1er cultivo (%)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Superficie 2º cultivo (%)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Alfalfa regadío (%)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
SIE† en superficie de secano arrendada (%)	+4,4%	+0,5%	+5,0%	+3,1%
SIE total (%)	+4,4%	+0,5%	+5,0%	+3,1%

† Superficie de interés ecológico.

Las curvas de demanda de agua

La presentación de resultados comienza con el análisis de la evolución del uso del agua para valores crecientes de la tarifa volumétrica de agua, a través de las correspondientes curvas de demanda, tal y como se evidencia en la Figura 1. En dicha figura pueden observarse ciertas diferencias en función tanto del método de PM empleado como de la explotación tipo analizada. En cuanto al método, se evidencia cómo las curvas derivadas a partir de la PMP y la MAUF experimentan cambios de pendiente más suaves, frente a la brusquedad en los cambios de la curva derivada de la maximización del beneficio. Esta circunstancia se debe a la mayor sensibilidad de la PMP y la MAUF a la hora simular escenarios, circunstancia que permiten considerar estos resultados más próximos al comportamiento real de los agricultores.

En relación con las explotaciones tipo, se observa cómo para tarifas bajas (entre 0,0 y 0,2 €/m^3) la explotación representativa del clúster 1 es en todos los casos la que presenta una mayor demanda de agua, seguida por la explotación tipo 3 y, por último, por la explotación tipo 2. Sin embargo, el comportamiento de cada una de ellas difiere a medida que se incrementa la tarifa de agua. Así, se observa como los "*Agricultores conservadores extensivos*" (explotación tipo 3) son los más reactivos a la tarifación, en la medida que son los que más reducen su consumo de agua cuando su precio sube, haciendo que para tarifas superiores a 0,3 €/m^3 su consumo sea prácticamente nulo. Por el contrario, los "*Grandes regantes profesionales*" (explotación tipo 1) se muestran más reticentes a reducir su consumo, demandando cantidades significativas de agua hasta niveles de la tarifa de 0,9 €/m^3. La diferencia en este com-

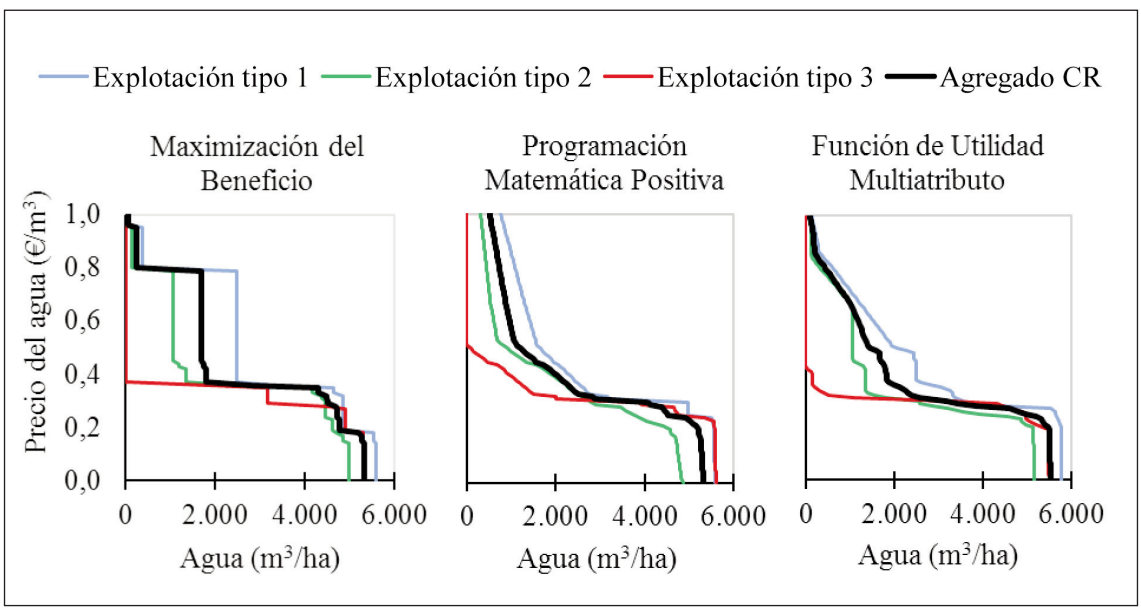


Figura 1. Curvas de demanda de agua correspondientes a los tres métodos de programación matemática.
Figure 1. Irrigation water demand corresponding to the three mathematical programming methods.

portamiento puede justificarse en las diferencias existentes en la productividad del agua en los cultivos incluidos en sus respectivos planes. Así, mientras en la explotación tipo 3 predominan cultivos extensivos con bajo valor añadido (p. ej., remolacha, algodón o maíz), con una baja productividad del uso del agua (productividad media aparente de 0,33 €/m^3), la explotación tipo 1 tiene una orientación principalmente hortícola, cultivos de mayor valor añadido y elevada productividad del agua (productividad media aparente de 0,53 €/m^3).

Asimismo conviene indicar que, a pesar de las diferencias arriba señaladas, para todos los métodos de PM empleados, y para todas las explotaciones tipo, se ha identificado un patrón similar en las correspondientes curvas de demanda, diferenciándose claramente dos tramos:

- *Tramo inelástico* (para tarifas de 0,0 a 0,3 €/m^3). La reacción de los regantes ante incrementos en el precio del agua no se corresponde con disminuciones en la demanda. Este comportamiento se debe a que para estas tarifas, incluso los cultivos con menor productividad del agua (remolacha, algodón y maíz) proporcionan una rentabilidad mayor que las alternativas de secano, circunstancia que justifica que los agricultores se resistan a hacer cambios en sus planes de cultivos (sustitución de cultivos con elevadas necesidades hídricas por otros que tengan un menor consumo de agua).
- *Tramo elástico* (para tarifas superiores a 0,3 €/m^3). Para precios superiores a 0,3 €/m^3 la curva de demanda adquiere una forma más elástica, es decir, ante subidas adicionales de la tarifa, los agricultores cambian progresiva y rápidamente sus planes de cultivo hacia alternativas con menor consumo hídrico, disminuyendo así el consumo total de agua y el coste correspondiente al uso del recurso.

Análisis de impactos socioeconómicos

Siguiendo con el análisis de los resultados, en la Figura 2 se puede observar la evolución de los indicadores socioeconómicos seleccionados para el estudio (margen bruto, empleo generado, recaudación por tarifación y eficiencia económica asociada al uso del agua en el regadío) a medida que se incrementa la tarifa del agua. A este respecto conviene indicar que, como ocurría con la demanda de agua, los resultados obtenidos a partir de los tres métodos de PM empleados siguen el mismo patrón de comportamiento. Por este motivo en la Figura 2 se ha optado, en aras de la simplicidad, por representar únicamente los resultados derivados del método MAUF.

En líneas generales puede apreciarse como la tarifación progresiva del agua de riego supone una creciente pérdida de beneficios (medido por el margen bruto) por parte de los regantes, así como del empleo generado en el regadío (ver figuras 2a y 2b, respectivamente). Asimismo, se observa que la recaudación pública por la tarifación se incrementa a medida que aumenta la tarifa, hasta llegar a un nivel máximo que oscila entre 0,2 y 0,3 €/m^3 (ver Figura 2c), según los casos. Este punto de inflexión coincide con el cambio del tramo inelástico por el elástico antes descrito. Para tarifas superiores a este nivel, incrementos en el precio del agua se traducen en reducciones de la recaudación pública. Este hecho es importante destacarlo porque refleja que a partir de estos niveles de la tarifa del agua los regantes sustituyen rápidamente los cultivos de regadío por cultivos de secano, reduciendo de forma drástica la factura de agua como estrategia para afrontar el encarecimiento del uso del recurso.

En este sentido, puede observarse cómo durante el tramo inelástico (tarifas de 0,0 a 0,3 €/m^3), al no haber cambios en los planes de cultivos (no hay disminución en el uso del agua ni en el empleo), la pérdida de renta-

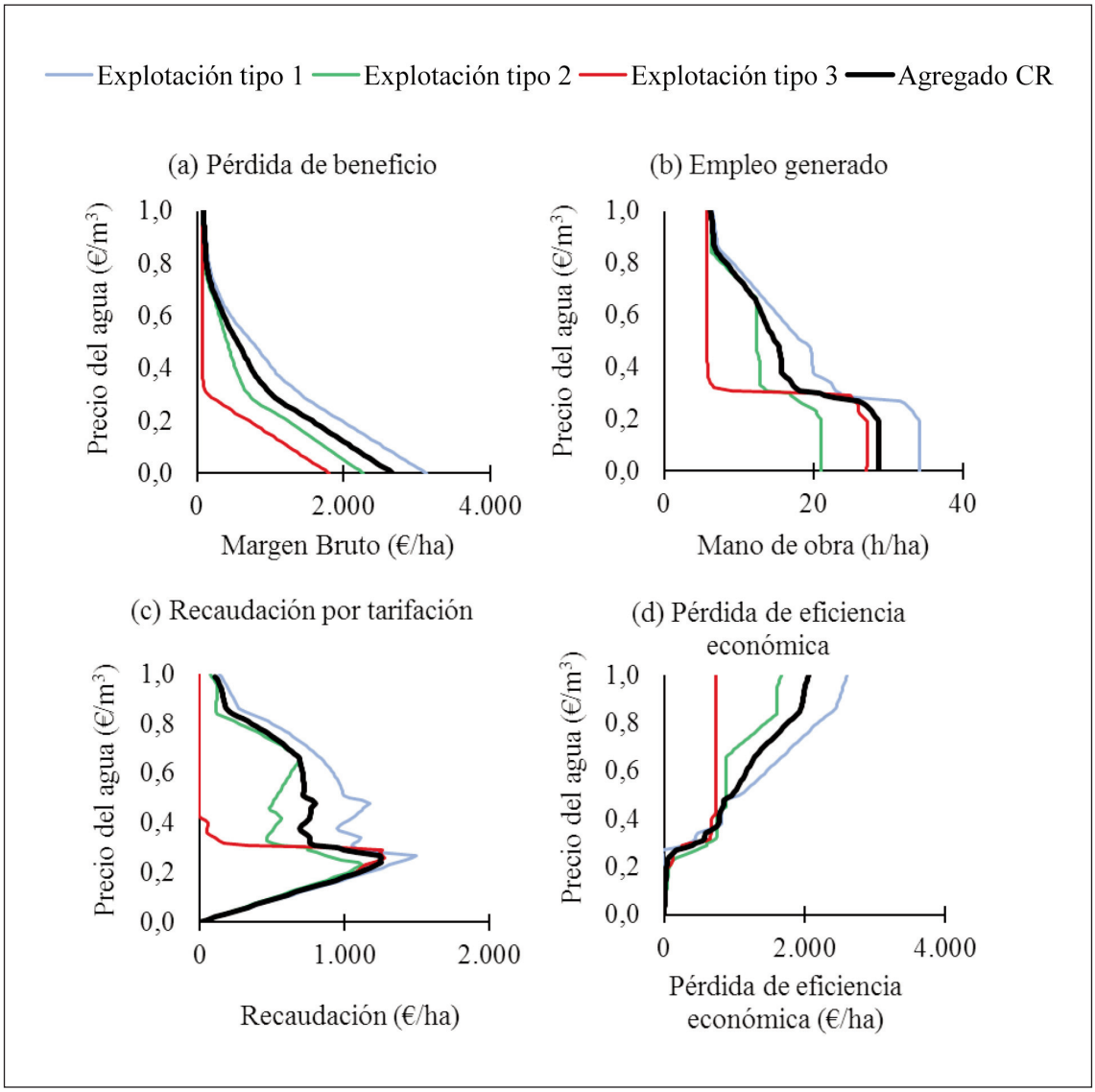


Figura 2. Impacto socioeconómico de la tarifación del agua de riego (método MAUF).
Figure 2. Socio-economic impact of irrigation water pricing (MAUF approach).

bilidad (margen bruto) por parte de los regantes equivale de manera exacta al incremento en la recaudación pública. Así, para estos niveles de precios del agua, la tarifación produce simplemente una transferencia de rentas desde el sector privado (productores de regadío) al sector público, sin que puedan significarse variaciones en el bienestar asociado al uso del agua de riego, cuantificado como suma del beneficio privado (margen bruto de las explotaciones) y público (recaudación). De esta manera, las pérdidas de efi-

ciencia económica, considerando conjuntamente la parte privada como la pública, son prácticamente nulas (ver Figura 2d).

Una vez alcanzado el tramo elástico (tarifas que provocan cambios en los planes de cultivo) se puede advertir cómo tanto el consumo de agua como el margen bruto de las explotaciones y la generación de empleo disminuyen de manera importante. Por su parte, como ya se ha comentado, la recaudación pública disminuye por la drástica disminución del uso del agua. En consecuencia, puede afirmarse que para tarifas del agua superiores a 0,3 €/m^3 se aprecia una pérdida creciente de bienestar social, en la medida que la tarifación supone una pérdida tanto para el sector privado (en términos de margen bruto) como público (en términos de recaudación). Así pues, como se aprecia en Figura 2d, tarifas elevadas generarían importantes pérdidas de eficiencia económica.

Para terminar este apartado, conviene indicar finalmente que si bien todas las explotaciones tipo analizadas reproducen el patrón de comportamiento arriba señalado, existen ciertas diferencias de detalle entre las mismas. En este sentido cabe señalar a la explotación tipo 1 ("*Grandes regantes profesionales*") como aquella que genera un mayor nivel de empleo y una mayor contribución a la recaudación por unidad de superficie, puesto que se trata de los regantes con cultivos más intensivos y de mayor valor añadido. Sin embargo, cuando la tarifa llega a niveles muy elevados (mayores de 0,5 €/m^3), haciendo inviables la mayoría de cultivos hortícolas, son igualmente los que provocan una mayor pérdida de eficiencia económica (disminución conjunta del margen bruto y la recaudación). Por su parte, la explotación tipo 3 ("*Agricultores conservadores extensivos*"), a partir de 0,3 €/m^3 deja de regar de manera abrupta (cuando los cultivos de la remolacha, el algodón y el maíz en regadío resultan inviables). No obstante, al tratarse de las explotaciones orientadas hacia las producciones de menor valor añadido, son las que evidencian una menor pérdida de eficiencia económica motivada por tarifas elevadas del agua de riego.

Discusión

En el presente trabajo se han aplicado tres métodos de PM diferentes para la simulación de impactos de la tarifación del agua de riego. Los resultados obtenidos han sido en buena medida coincidentes, mostrando el mismo patrón de comportamiento para cada explotación tipo analizada y para el conjunto de la zona regable. No obstante, como señalan Howitt *et al.* (1980), para la realización de este tipo de trabajos de simulación resultan más adecuados los métodos de PM no lineales, como la PMP o la MAUF empleados en este trabajo, ya que tales modelos presentan una aproximación más realista al comportamiento de los agricultores (las soluciones óptimas modifican los parámetros definitorios del escenario actual) que la maximización del beneficio mediante programación lineal.

Asimismo, debe señalarse que la similitud de resultados obtenidos entre la PMP y la MAUF está motivada por el perfil comercial de todos los agricultores de la zona analizada (preponderancia del atributo del MBT respecto al resto de atributos en la metodología MAUF en todas las explotaciones tipo), por lo que esta evidencia no puede generalizarse para cualquier otra zona regable. Efectivamente, cuando el comportamiento de los agricultores objeto de estudio pueda considerarse próximo a la maximización del beneficio, PMP y MAUF serán enfoques de PM igualmente válidos para la simulación de los efectos de potenciales escenarios de política agraria, ya que las funciones objetivo a optimizar en ambos casos conducirán a resultados similares. No obstante, como señalan Gómez-Limón y Berbel (2000), Gómez-Limón y Riesgo

(2004) o Gutiérrez-Martín y Gómez-Gómez (2011), cuando éste no sea el caso, y existan grupos de agricultores con un comportamiento productivo significativamente diferente de la maximización del beneficio (p. ej., agricultores con alto grado de aversión al riesgo o la complejidad gerencial), parece que el enfoque MAUF sería el más adecuado ya que, a diferencia de la PMP, este enfoque de PM permite considerar el conjunto de criterios de gestión que tales productores tienen en mente a la hora de su toma de decisiones.

El análisis del efecto de la tarifación sobre la demanda de agua y otros indicadores económicos (rentas agrarias) y sociales (generación de empleo) han sido ampliamente estudiados. A continuación se comparan de manera crítica las evidencias reportadas en la literatura y los resultados obtenidos en este trabajo.

En un primer lugar, debe señalarse que la existencia de dos tramos diferenciados en las curvas de demanda de agua de riego, uno primero de carácter inelástico para tarifas bajas y otro elástico para precios más elevados, ya ha sido evidenciada en muchos trabajos realizados anteriormente (Varela-Ortega *et al.*, 1998; Gómez-Limón y Berbel, 2000; Gómez-Limón *et al.*, 2002; Molle y Berkoff, 2007; Wheeler *et al.*, 2008). Así, se encuentra un tramo inicial inelástico, en el que el agricultor conserva su plan de cultivos sin disminuir el uso de agua y un posterior tramo elástico donde se produce una sustitución de los cultivos más intensivos en el uso del agua por otros con menores requerimientos hídricos, incluso sustituyendo cultivos de regadío por otros de secano.

El análisis de la literatura existente y los resultados del presente estudio, evidencian cómo el mayor o menor intervalo de tarifas correspondiente al tramo inelástico depende de la productividad del agua (mayor productividad, mayor tramo inelástico), que en última instancia depende de las ventajas competitivas proporcionadas por las condiciones edafoclimáticas y el nivel tecnológico presente en la zona regable analizada. Así puede observarse cómo, en sistemas muy extensivos y poco modernizados (riego por superficie), como los sistemas cerealistas del Duero analizados en Gómez-Limón y Berbel (2000), el primer tramo inelástico termina en una tarifa del agua muy baja, inferior a 0,05 €/m^3. Por el contrario, en sistemas más intensivos y tecnificados (riego por goteo y aspersión), que incluyen cultivos hortícolas y frutales, como en este trabajo, el tramo inelástico se conserva hasta tarifas mucho mayores, superiores a los 0,25 €/m^3.

En cualquier caso, debe señalarse que la relativa amplitud del tramo inelástico de la curva de demanda obtenido en nuestro caso de estudio puede estar condicionado igualmente por el enfoque cortoplacista seguido en la modelización, ya que éste limita la capacidad de respuesta de los productores frente a la introdución de tarifas volumétricas (p. ej. al no posibilitar cambios en las técnicas de riego). Así, es probable que en un enfoque a más largo plazo, en el que se permitieran cambios en las técnicas de riego, el tramo inelástico se reduciría significativamente (Iglesias y Blanco, 2008).

En segundo lugar, este trabajo evidencia igualmente el impacto diferencial que tiene la tarifación sobre las explotaciones agrarias de una misma zona regable, en función de su orientación productiva y la rentabilidad de sus planes de cultivos. En este sentido, los resultados de este trabajo son coincidentes con las evidencias aportadas por Gómez-Limón y Riesgo (2004). Efectivamente, se puede apreciar cómo dentro de una misma zona regable, incluso en aquellas que emplea las tecnologías de riego más eficientes (Mejías *et al.*, 2004), coexisten explotaciones agrícolas con productividades del agua muy diferentes. Por ese motivo, la

respuesta de estas explotaciones frente a la tarifación es igualmente dispar.

Así, mientras que las explotaciones con producciones más extensivas (explotación tipo 3 en este trabajo) se muestran más reactivas a los cambios en el precio del agua de riego, modificando rápidamente su plan de cultivos en función de la tarifa aplicable, las explotaciones con planes de cultivos más intensivos (explotación tipo 1 en este trabajo, donde predominan los hortícolas) se muestran menos sensibles a la tarifación, y mantienen su plan de cultivos hasta elevadas tarifas, para las cuales ni siquiera los cultivos de mayor valor añadido son viables económicamente. Esta disparidad en el impacto de la tarifación deja entrever el gran potencial que tendrían los mercados de agua locales (entre regantes de una misma comunidad de regantes), donde los agricultores más conservadores (cultivos de bajo valor añadido) podrían ceder sus derechos en contextos de escasez a los más profesionales (cultivos de mayor valor añadido), tal y como señalan Rey *et al.* (2014) y Calatrava *et al.* (2015).

En tercer lugar, debe señalarse que el análisis de impactos socioeconómicos de la tarifación del agua de riego, en términos de pérdida de renta agraria, empleo y eficiencia económica, también ha sido reportado anteriormente por Varela-Ortega *et al.* (1998), Berbel y Gutiérrez (2006), Riesgo y Gómez-Limón (2006), Iglesias y Blanco (2008), y más recientemente por Kahil *et al.* (2016) y Pérez-Blanco *et al.* (2016). Tal y como se ha comentado en este trabajo, los trabajos antes citados evidencian que el incremento del precio del agua de riego produce cambios en los planes de cultivos que implican siempre pérdidas de rentas agrarias, así como una reducción del empleo directo generado por el sector de regadío, como consecuencia tanto del incremento de costes variables por el pago de la tarifa como por la sustitución de cultivos de elevado valor añadido y consumo de agua por otros menos rentables y con menores necesidades hídricas.

En cuanto a la recaudación pública proveniente de la tarifación, los trabajos anteriores señalan igualmente que, tras el tramo de demanda de agua inelástico, se produce una rápida disminución de la recaudación pública motivada por los drásticos cambios en los planes de cultivos. Efectivamente, cuando las tarifas superan un determinado límite, la demanda entra en un tramo elástico donde la reducción porcentual del consumo de agua es muy superior al incremento porcentual del precio del agua, lo que conduce a una disminución de la recaudación pública.

El comportamiento de la demanda de agua de riego evidenciado en este trabajo y corroborado por buena parte de la literatura existente, sugiere que la tarifación no resulta ser un instrumento tan efectivo como podría pensarse para la gestión tanto en aguas superficiales como subterráneas (Calatrava *et al.*, 2011; Kahil *et al.*, 2016). Efectivamente, para que la tarifación tenga un efecto disuasorio sobre el consumo, los precios a aplicar deben ser lo suficientemente elevados para alcanzar el tramo elástico. Sin embargo, una vez alcanzado este tramo que permite reducir el consumo, aparecen pérdidas de eficiencia económica, en la medida que las pérdidas de rentas agrarias y de empleo superan con creces la recaudación pública. Así, a pesar de lo que podría asumirse inicialmente en trabajos como el de Tsur *et al.* (2004), que señalan que con la tarifación se podría obtener una distribución más eficiente del agua para el regadío, los resultados obtenidos en este trabajo confirman que la tarifación no puede considerarse como el único instrumento económico dentro de la política de demanda orientada a fomentar un uso del agua en agricultura más racional y sostenible. Efectivamente, la tarifación es considerada menos efectiva que los mercados de agua (Cornish *et al.*, 2004) en este sentido, e incluso es

considerada como el peor de los instrumentos económicos posibles (Kahil *et al.*, 2016), no sólo en términos de beneficios ambientales y privados, sino también en términos de equidad y en cuanto al uso del agua. Por tanto, la tarifación debería considerarse en cualquier caso dentro de un paquete o "mix" de instrumentos económicos, que integre igualmente seguros agrarios (Massarutto, 2015) y mercados de agua. De manera semejante, la desalación también es considerada por otros autores como complemento a la tarifación de agua. En este sentido, Calatrava *et al.* (2011) proponen la combinación de una tasa sobre las extracciones de aguas subterráneas y la sustitución de éstas por agua desalada subvencionada que permita eliminar la sobreexplotación de los acuíferos compatibilizando la contención del coste presupuestario con la minimización del impacto sobre el sector agrario.

Finalmente, cabe comentar que el trabajo realizado debe complementarse en un futuro con nuevas investigaciones encaminadas al análisis del impacto de la tarifación en un contexto temporal más largo, que contemple la posibilidad de cambios estructurales en las explotaciones de regadío (sistemas de riego, tamaño). Sólo de esta manera se podrían cuantificar los impactos económicos, sociales y ambientales de la tarifación en el largo plazo, horizonte en el que se enmarcan los objetivos de DMA, encaminados a la preservación ambiental de las masas de agua y la compatibilidad de sus usos económicos.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), a través del Proyecto de Investigación AGL2013-48080-C2-1-R y de la Ayuda Predoctoral FPI asociada al mismo.

Bibliografía

Berbel J, Gómez-Limón JA (2000). The impact of water-pricing policy in Spain: An analysis of three irrigated areas. Agricultural Water Management 43: 219-238.

Berbel J, Gutiérrez C (2006). Sostenibilidad de la agricultura de regadío europea bajo la Directiva Marco de Aguas y la Agenda 2000. Fenacore, Córdoba, España. 138 pp.

Calatrava J, García-Valiñas M, Garrido A, González-Gómez F (2015). Water pricing in Spain: Following the footsteps of somber climate change projections. En: Water pricing experiences and innovations (Ed. Dinar A, Pochat V, Albiac-Murillo J), pp. 313-340. Springer, Dordrecht, Alemania.

Calatrava J, Guillem A, Martínez-Granados D (2011). Análisis de alternativas para la eliminación de la sobreexplotación de acuíferos en el Valle de Guadalentín. Economía Agraria y Recursos Naturales 11: 33-62.

Cornish G, Bosworth B, Perry CJ, Burke JJ (2004). Water charging in irrigated agriculture: An analysis of international experience. Food & Agriculture Organization, Roma. 98 pp.

Cortignani R, Severini S (2009). Modeling farm-level adoption of deficit irrigation using Positive Mathematical Programming. Agricultural Water Management 96: 1785-1791.

Dinar A (2000). The political economy of water pricing reforms. World Bank, New York. 404 pp.

Dinar A, Pochat V, Albiac J (2015). Water pricing experiences and innovations. Springer, Dordrecht, Alemania. 471 pp.

Gómez-Limón JA, Arriaza M, Berbel J (2002). Conflicting implementation of agricultural and water policies in irrigated areas in the EU. Journal of Agricultural Economics 53: 259-281.

Gómez-Limón JA, Berbel J (2000). Multicriteria analysis of derived water demand functions: A Spanish case study. Agricultural Systems 63: 49-72.

Gómez-Limón JA, Riesgo L (2004). Irrigation water pricing: Differential impacts on irrigated farms. Agricultural Economics 31: 47-66.

Gómez-Limón JA, Riesgo L, Arriaza M (2004). Multi-criteria analysis of input use in agriculture. Journal of Agricultural Economics 55: 541-564.

Grafton RQ, Chu L, Kompas T (2015). Optimal water tariffs and supply augmentation for cost-of-service regulated water utilities. Utilities Policy 34: 54-62.

Gutiérrez-Martín C, Gómez-Gómez CM (2011). Assessing irrigation efficiency improvements by using a preference revelation model. Spanish Journal of Agricultural Research 9: 1009-1020.

Hazell PBR, Norton RD (1986). Mathematical programming for economic analysis in agriculture. MacMillan Publishing Company, Nueva York, EE. UU. 400 pp.

Heckelei T, 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 RE (1995). Positive mathematical programming. American Journal of Agricultural Economics 77: 329-342.

Howitt RE, Watson WD, Adams RM (1980). A reevaluation of price elasticities for irrigation water. Water Resources Research 16: 623-628.

Iglesias E, Blanco M (2008). New directions in water resources management: The role of water pricing policies. Water Resources Research 44: W06417.

Kahil MT, Albiac J, Dinar A, Calvo E, Estevan E, Avella L, García-Mollá M (2016). Improving the performance of water policies: Evidence from drought in Spain. Water 8: 34.

Martínez-Álvarez V, García-Bastida PA, Martín-Gorriz B, Soto-García M (2014). Adaptive strategies of on-farm water management under water supply constraints in south-eastern Spain. Agricultural Water Management 136: 59-67.

Massarutto A (2015). Water pricing in Italy: Beyond full-cost recovery. En: Water pricing experiences and innovations (Ed. Dinar A, Pochat V, Albiac-Murillo J), pp. 201-230. Springer, Dordrecht, Alemania.

Medellín-Azuara J, Howitt RE, Harou JJ (2012). Predicting farmer responses to water pricing, rationing and subsidies assuming profit maximizing investment in irrigation technology. Agricultural Water Management 108: 73-82.

Mejías P, Varela Ortega C, Flichman G (2004). Integrating agricultural policies and water policies under water supply and climate uncertainty. Water Resources Research 40: W07S03.

Molle F, Berkoff J (2007). Irrigation water pricing: The gap between theory and practice. Cabi, Wallingford, Reino Unido. 346 pp.

Pérez-Blanco CD, Standardi G, Mysiak J, Parrado R, Gutiérrez-Martín C (2016). Incremental water charging in agriculture. A case study of the Regione Emilia Romagna in Italy. Environmental Modelling & Software 78: 202-215.

Rey D, Garrido A, Calatrava J (2014). The water markets in Spain: Moving towards 21st century mechanisms and approaches with 20th century regulations. En: Water markets for the 21st century: What have we learned? (Ed. Easter KW, Qiuqiong H), pp. 127-147. Springer, Nueva York, EE. UU.

Riesgo L, Gómez-Limón JA (2006). Multi-criteria policy scenario analysis for public regulation of irrigated agriculture. Agricultural Systems 91: 1-28.

Röhm O, Dabbert S (2003). Integrating agri-environmental programs into regional production models: An extension of Positive Mathematical Programming. American Journal of Agricultural Economics 85: 254-265.

Romero C, Rehman T (2003). Multiple criteria analysis for agricultural decisions. Elsevier, Amsterdam, Países Bajos. 186 pp.

Sumpsi JM, Amador F, Romero C (1996). On farmers' objectives: A multi-criteria approach. European Journal of Operational Research 96: 64-71.

Tsur Y, Dinar A, Doukkali RM, Roe T (2004). Irrigation water pricing: Policy implications based on international comparison. Environment and Development Economics 9: 735-755.

Varela-Ortega C, Sumpsi JM, Garrido A, Blanco M, Iglesias E (1998). Water pricing policies, public decision making and farmers' response: Implications for water policy. Agricultural Economics 19: 193-202.

Wheeler S, Bjornlund H, Shanahan M, Zuo A (2008). Price elasticity of water allocations demand in the Goulburn-Murray Irrigation District. Australian Journal of Agricultural and Resource Economics 52: 37-55.

(Aceptado para publicación el 13 de abril de 2016)