

Eficiencia de las reglas de asignación de agua en el regadío: asignación a través de mercados, de la regla proporcional y de la regla uniforme

Renan-Ulrich Goetz*, Yolanda Martínez** y Jofre Rodrigo*

RESUMEN: En el presente trabajo se simula la introducción de diferentes métodos de reparto del agua en la agricultura, y se aplican a una zona de regadío del valle central del Ebro. En concreto, se han escogido tres métodos diferentes de asignación con el fin de comparar su eficiencia económica. Además del actual sistema proporcional y el sistema de mercado, se simulará la introducción de la regla de reparto uniforme, desarrollada en la teoría de la elección social. Los resultados permiten concluir que aunque el mercado de agua conduzca a mejores resultados globales en todos los casos, la regla uniforme puede resultar una alternativa interesante cuando las dotaciones de agua se encuentran en el intervalo habitual, mientras que en situaciones de escasez severa de agua, el mercado presenta una ventaja más clara con respecto a cualquier otro sistema de asignación. Asimismo, los resultados demuestran que los niveles superiores de heterogeneidad entre los usuarios y altos precios administrativos del agua representan situaciones más ventajosas para la aplicación de la regla de asignación uniforme en comparación con el actual sistema proporcional.

PALABRAS CLAVE: Agricultura, Gestión del agua de riego, Mercado de agua, Elección social.

Clasificación JEL: D71, Q12, Q25.

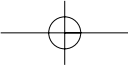
La autoría del artículo corresponde en partes iguales a todos los firmantes. Agradecemos al Ministerio de Educación y Ciencia por el soporte a través de los proyectos AGL2001-23333-CO2-01 y AGL2004-00964. Nos gustaría agradecer a Dolores Berga por sus comentarios y sugerencias sobre versiones anteriores del artículo.

* Departamento de Economía. Facultad de CC. Económicas y Empresariales. Universitat de Girona. Campus Montilivi, s/n, 17071 Girona.

** Departamento de Análisis Económico. Facultad de CC. Económicas y Empresariales. Universidad de Zaragoza. Gran Vía 2-4. 50004 Zaragoza.

Dirigir correspondencia a: Renan-Ulrich Goetz. E-mail: renan.goetz@udg.es

Recibido en marzo de 2005. Aceptado en septiembre de 2005.



Efficiency of the water assignment rules in irrigation: assignment by market, proportional rule and uniform rule

ABSTRACT: In this paper, the introduction of three different methods for the assignment of water in agriculture is simulated in order to compare its economic efficiency for the case of an irrigated area located in the central Ebro Valley. Apart from the currently applied proportional system, water markets have been simulated along with the uniform rule, developed in social choice theory. The results show that although the water market achieves the best results in all cases, the uniform rule can be an interesting alternative to current management methods if water assignments are at regular levels, while in the case of severe water shortage; markets offer a clearer advantage with regard to any other method. The results also show that higher levels of heterogeneity between firms and high water prices situate the uniform rule in a more favorable situation than the currently applied proportional system.

KEY WORDS: Agriculture, Irrigation water management, Water market, Social choice.

JEL classification: D71, Q12, Q25.

1. Introducción

El regadío ha sido tradicionalmente un componente fundamental en las políticas de desarrollo rural de muchos países, sirviendo para aumentar las producciones y actividades de las zonas transformadas. Estas políticas se han basado generalmente en la construcción de sistemas colectivos con grandes obras públicas de regulación y transporte del agua, si bien en los últimos años las nuevas demandas urbanas e industriales y la creciente sensibilidad medioambiental presionan para que se introduzcan otras políticas de gestión del agua que tengan en cuenta estas necesidades. En este contexto, la Directiva Marco del Agua (2000)¹ supone un impulso importante de las prácticas de gestión basadas en la introducción de criterios de recuperación de los costes del agua y del logro de un buen estado de todas las aguas, mediante la elaboración de planes de gestión y programas de medidas concretas para prevenir y mejorar el estado actual de los recursos en el territorio europeo.

Las políticas de gestión más ampliamente tratadas en la literatura reciente consisten en la tarificación, la modernización y en la introducción de mercados (Garrido *et al.*, 1996; Berbel *et al.*, 1999; Calatrava, 2002; Uku, 2003). Desde un punto de vista teórico, el sistema de mercado es el más eficiente y proporciona un punto de referencia que sirve para evaluar y ordenar instrumentos alternativos según su eficiencia, si bien muchas veces en la práctica el funcionamiento de un mercado no es posible, sea por razones políticas, legales, técnicas o por la existencia de altos costes de transacción (Gillingham, 1999; Bédoucha, 1984 y Garrido, 2000). Otra línea de la literatura sobre la asignación de agua se centra en la distribución de los excedentes de los beneficios o costes entre los agricultores. Sin embargo, este enfoque asume bien que el regulador tiene información completa (Moulin y Hervé, 2002) o bien que emplea un

¹ Directiva 2000/60/CE de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.

mecanismo de revelación con sus correspondientes costes para la obtención de la información requerida (Faysse, 2003). Por otra parte, existen un conjunto de reglas de asignación en el marco de la teoría de la elección social, que han recibido poca o nula atención hasta ahora en el ámbito de la gestión de los recursos hídricos y que presentan interesantes propiedades, como por ejemplo la propiedad de no manipulabilidad². Estas reglas de reparto permiten la asignación de un bien racionado con un precio fijo teniendo en cuenta la demanda óptima de los agentes a los que se asignan el bien, y además no requieren que el regulador disponga de información completa. Este es el caso de la regla de reparto uniforme, definida inicialmente por Sprumont (1991), que conduce a asignaciones eficientes en el sentido de Pareto y ayuda a equilibrar demanda y oferta.

El objetivo principal de este trabajo es comparar tres métodos diferentes de asignación del agua de riego con el fin de comparar su eficiencia económica. Además del actual sistema proporcional y el sistema de mercado, se simulará la introducción de la regla de reparto uniforme, desarrollada en la teoría de la elección social. Al mismo tiempo, se analizan las propiedades de cada método de asignación, que como se verá pueden ser determinantes a la hora de decidir su aplicación práctica, es decir, su conveniencia económica, social o ambiental. Además, se consideran distintos grados de heterogeneidad entre los agricultores con el fin de evaluar la sensibilidad en la ordenación de los métodos de asignación. Para ello se simula la introducción de diferentes métodos de reparto del agua en la agricultura, y se aplican a una zona de regadío del valle central del Ebro.

El artículo se organiza como sigue: en el apartado siguiente se describe el área de estudio. En el apartado 3 se define el modelo económico y en el apartado 4 los modelos teóricos de los tres métodos alternativos de reparto. En el apartado 5 se presentan los resultados de la comparación de los tres métodos de reparto. Finalmente, el apartado 6 presenta las conclusiones más importantes del artículo y propone algunas futuras líneas de investigación.

2. Descripción del área de estudio

En este apartado se presenta el modelo matemático que representa el comportamiento de los agricultores o explotaciones del área de estudio en el contexto actual de gestión del agua. La zona estudiada comprende dieciséis municipios de las comarcas de Hoya de Huesca y Monegros (Huesca), con una extensión de 67.841 ha, de las que 45.898 ha son tierras de regadío. El número de explotaciones agrarias de la zona es de 1.768, el 60% de las cuales tiene un tamaño de unas 20 ha³.

Las decisiones claves de la gestión del agua en la agricultura se encuentran en manos de las Comunidades de Regantes, que son las encargadas de gestionar las dotaciones y de hacer llegar el agua a las parcelas a través de las redes secundarias. También son las que establecen el pago de tarifas, la organización de los riegos entre

² Es decir, los agentes no tienen incentivos a actuar estratégicamente.

³ Una descripción más completa de la zona puede consultarse en Martínez (2002).

los usuarios mediante los turnos, el control del consumo y la vigilancia, las inversiones que se llevan a cabo en el polígono, y la cesión del agua a otros usos. Estas entidades de derecho público reciben, generalmente de parte de los Organismos de Cuenca (Confederaciones Hidrográficas), las concesiones de agua correspondientes para llevar a cabo su gestión. Las cantidades asignadas finalmente dependen del nivel anual de recursos hídricos de que dispone la cuenca, y las Comunidades de Regantes reparten el agua a cada parcela siguiendo un sistema de asignación proporcional a la superficie regada (regla proporcional).

De esta forma, cada año antes del comienzo de la campaña de cultivo, el Organismo de Cuenca calcula los caudales brutos que se requieren para satisfacer la demanda solicitada por todas las Comunidades, estima los volúmenes de recursos con que contará previsiblemente para todo el año y, con el balance resultante, informa a cada gestor de red secundaria de la cantidad que se le ha asignado para la temporada de cultivo. En ocasiones, estas estimaciones sobre el agua disponible han de revisarse debido a variaciones más o menos bruscas en los recursos hídricos, ya sea por un nivel de precipitaciones poco corriente en la cuenca afectada, o por averías graves en las redes de canalización. En tales circunstancias, las Confederaciones informan sobre las mismas a las Comunidades con tanta antelación como es posible, para que puedan corregir sus dotaciones iniciales, sin que ello produzca demasiados daños a los cultivos. En el caso del sistema de regadío de Monegros, el organismo encargado de la asignación del agua a las Comunidades de Regantes de la zona es Riegos del Alto Aragón. Estas Comunidades de Regantes disponen de una dotación bruta de agua en cabecera que oscila entre 6.000 y 9.000 m³/ha, y que les llega a través de dos grandes canales: el canal de Monegros y el canal del Cinca, que se abastecen de los pantanos de La Sotonera y de El Grado respectivamente. La cantidad finalmente disponible en parcela es inferior a estas dotaciones debido a las pérdidas en las redes de canalización⁴.

Las características climáticas de la región provocan problemas de disponibilidad algunos años de sequía, como ocurrió en los años 94 y 99 en los que la cantidad suministrada bajó casi a la mitad (Uku, 2003). En esas ocasiones se establecen cupos por hectárea que pueden reducir el riego a cantidades mucho menores. Con este sistema administrativo de gestión, la estrategia de los regantes en los años de cupo o de inseguridad del suministro del agua, es el abandono o disminución de la superficie de cultivos extensivos que consumen más agua o la aplicación de riegos deficitarios.

El rígido sistema actual de concesiones descrito en esta sección permite a los regantes disponer de cantidades fijas de agua altamente subvencionadas, y que no trasladan ninguna señal de coste real o de escasez del recurso, de tal manera que el agricultor utiliza toda el agua que se le asigna siempre que el precio administrativo del agua sea inferior al valor marginal del uso del agua en el cultivo menos rentable. Como consecuencia de este sistema de reparto, la demanda de uso agrario está sobredimensionada porque hay una situación de racionamiento del recurso con precios muy bajos que generan un exceso de demanda.

⁴ Estas pérdidas pueden ser de hasta un 20% según Fernández (1999).

La base principal sobre la que cabe replantearse la existencia de reglas de reparto alternativas a la existente, es la heterogeneidad entre los agentes que participan en la asignación, pues lógicamente si todos los agentes fuesen homogéneos, el reparto proporcional sería un mecanismo perfectamente eficiente. Los aspectos que originan la heterogeneidad en las explotaciones de una misma región son diversos y pueden incluir factores técnicos (tipo de riego, características edafo-climáticas, etc.), empresariales (disponibilidad de capital, tamaño de la explotación, régimen de tenencia, etc.), y humanos (aversión al riesgo, edad y nivel de formación del agricultor, etc.). En último término, estos aspectos son los que determinan las decisiones sobre las superficies dedicadas a los distintos cultivos y, por tanto, la rentabilidad obtenida en cada explotación por el uso del agua.

Todos estos factores pueden incorporarse en los modelos económicos adoptando dos soluciones: en forma de distintas funciones-objetivo (representando así la variabilidad en los criterios de elección de los agentes), como es el caso de los trabajos basados en modelos multicriterio. Algunos ejemplos de esta primera solución son los trabajos de Arriaza *et al.* (2002), que utilizan una función de utilidad con un único atributo (beneficio) y Martínez y Gómez-Limón (2004), que consideran que la decisión sobre el consumo de agua está determinada por la utilidad multiatributo que ésta les aporta. Una segunda solución consiste en la introducción de restricciones y coeficientes técnicos que incorporan la variabilidad en las condiciones agroclimáticas, tecnología, disponibilidad de mano de obra, etc. Ejemplos de esta solución son los trabajos de Garrido (2000) y Calatrava y Garrido (2001) que emplean modelos de maximización del beneficio basado en la programación matemática positiva con explotaciones tipo para el valle medio del Guadalquivir.

En el caso concreto de la zona de estudio escogida se ha optado por definir como principal factor de heterogeneidad la diferencia en la producción (rendimiento) por hectárea de los cultivos causada por las distintas características de los suelos de la zona. Esta decisión se fundamenta en el trabajo de Nogués (2000) que estableció una diferenciación de los suelos de la zona en función de su capacidad productiva, y que ha servido a Martínez y Albiac (2006)⁵ para estudiar el distinto potencial productivo y contaminante de los suelos de la región de estudio para el caso del maíz⁶. Esta variación en la productividad (medida en toneladas por hectárea), se encuentra entre un 7 y un 30% para los cinco tipos de suelo en regadío considerados, pudiendo ser aún mayor en el caso de los cultivos más sensibles a la salinidad (Diputación General de Aragón 2000, 2001a y 2001b)⁷. Así, se ha optado por modelizar de una forma sencilla la existencia de cinco explotaciones con funciones de producción que difieran entre sí en un rango amplio (entre un 5 y un 30%), con el fin de abarcar un conjunto mayor de situaciones posibles. De esta forma se trata de comprobar cómo

⁵ Otros trabajos en los que se consideran diferencias en la productividad del suelo son Thomas y Boisvert (1994) y Helfand y House (1995).

⁶ Los principales parámetros que determinaron estas diferencias son la capacidad de retención de agua, la eficiencia de riego y la conductividad eléctrica (Martínez y Albiac, 2005).

⁷ En el caso de otros cultivos sensibles a la salinidad como el trigo, las diferencias pueden ser aún mayores.

afecta el grado de heterogeneidad a los resultados de las distintas reglas de asignación.

La perspectiva adoptada aquí es la del planificador central que asigna el agua entre los usuarios de la región y su objetivo es la maximización del beneficio agregado. En la línea de la mayoría de los trabajos existentes se ha optado también por asumir un comportamiento maximizador del beneficio en contexto de certidumbre, siguiendo una hipótesis clásica de la teoría económica. No obstante, conviene indicar las limitaciones que presenta este enfoque, pues es bien sabido que las decisiones de los productores agrarios no se ajustan por completo al principio de maximización del beneficio, sino que están también condicionadas por aspectos sociales, culturales y ambientales difíciles de cuantificar. Sin embargo, la consideración de otros aspectos interferiría con el objetivo de la maximización del beneficio del agricultor y no permitiría aislar en qué grado la aplicación de los distintos métodos de reparto afecta al cambio en los beneficios netos del agricultor. Por esta razón aquí nos limitamos a considerar el objetivo de la maximización del beneficio. La consideración de otros aspectos más allá de los beneficios netos podría ser una ampliación interesante del presente trabajo.

Para el cálculo del beneficio se han utilizado estimaciones de las funciones de rendimiento o producción de los cultivos. Existe en la literatura española un gran déficit de estudios que relacionen rendimientos de los cultivos con las cantidades aplicadas de agua. En la mayoría de estos trabajos se hace una selección de un número limitado de explotaciones que se consideran representativas del conjunto. La definición y agrupación de estos conjuntos homogéneos de agentes o «explotaciones tipo» se lleva a cabo en función de su comportamiento en relación con el uso del agua utilizando generalmente técnicas «cluster». Así, los trabajos de modelización a nivel de explotación optan por considerar relaciones tecnológicas rendimiento-agua de tipo Leontief o bien toman los rendimientos medios de las series temporales disponibles. En nuestro caso, se utilizan las funciones de rendimiento obtenidas por Martínez (2002) a partir del simulador biofísico de crecimiento de cultivos EPIC (Environmental Policy Integrated Climate, Mitchell *et al.*, 1998), calibrado para los cultivos más importantes de la zona de estudio.

3. Modelo económico

Para el cálculo de la eficiencia económica derivada de los métodos de asignación alternativos se presenta en este apartado el problema de decisión del planificador central con el fin de estimar las funciones de beneficio en términos de la dotación inicial y del precio administrativo del agua.

En nuestro análisis empírico consideramos cinco tipos de explotaciones con idéntica extensión de terreno. Para representar el problema de decisión del planificador central en la situación actual se ha planteado un modelo de maximización del beneficio del agricultor. Este beneficio neto del agricultor, en la explotación i -ésima, $i = 1, \dots, 5$, se calcula como la diferencia entre los ingresos y los costes derivados de la

producción de los j cultivos, $j = 1, \dots, 6$, más importantes de la zona (maíz, trigo, cebada, alfalfa, girasol y arroz) de acuerdo con las siguientes función y restricciones:

$$\pi_i(D_i, c^1) = \max_{w_{ij}, n_{ij}, h_{ij}} \sum_{j=1}^6 (p_j \cdot y_{ij}(w_{ij}, n_{ij}) - c^1 w_{ij} - c^2 n_{ij} - k_{ij} + s_{ij}) \cdot h_{ij} \quad [1]$$

sujeto a $\sum_{j=1}^6 w_{ij} \leq D_i; w_{ij} \geq 0; n_{ij} \geq 0; w_{ij}, n_{ij}, h_{ij} \in Y_i,$

donde el parámetro exógeno p_j es el precio del cultivo j (en €/Tm), los parámetros c^1 y c^2 son el precio administrativo del agua w_{ij} (en €/m³) y los costes variables del nitrógeno n_{ij} (en €/kg) respectivamente; k_{ij} son los costes fijos del cultivo j (en €/ha), s_{ij} es el pago directo de la PAC del cultivo j (en €/ha); e y_{ij} denota el rendimiento del cultivo j en función de los factores productivos agua y nitrógeno. La variable h_{ij} denota la cantidad de hectáreas cultivadas de j . La función recoge el valor máximo del problema [1], es decir, los beneficios netos en función del precio administrativo c^1 del agua y de la dotación D_i (en m³/ha) inicialmente asignada al agricultor i . La decisión sobre el uso de factores productivos está sujeta además al cumplimiento de ciertas restricciones de rotación y sucesión de cultivos por razones agronómicas, así como a las restricciones de retirada fijadas por la PAC y descritas completamente por Martínez (2002). Todas estas restricciones están representadas por el conjunto Y_i . Además, el conjunto Y_i incluye las restricciones de no-negatividad con respecto a todas las variables de decisión.

Por tanto, la conducta del productor se rige por la maximización del beneficio dadas las restricciones comentadas. Las funciones de rendimiento $y_{ij}(\cdot)$ de los cultivos se han estimado \hat{y}_{ij} (denotado por \hat{y}_{ij}), mediante datos generados con el simulador biofísico EPIC. El modelo EPIC reproduce los procesos biológicos del suelo y el crecimiento de la planta en función del clima y de los factores productivos empleados, y fue calibrado y validado por Martínez (2002) para reflejar adecuadamente las condiciones de suelo, clima, y manejo de los cultivos en el área de estudio. Las funciones siguen la especificación polinomial presentada en [2] y los coeficientes de las funciones de producción se muestran en la tabla 1 y dependen de los factores agua de riego y fertilizante nitrogenado.

$$\hat{y}_{ij} = a_{ij,0} + a_{ij,1} w_{ij} + a_{ij,2} w_{ij}^2 + a_{ij,3} n_{ij} + a_{ij,4} n_{ij}^2 \quad [2]$$

Las funciones de producción de las demás explotaciones se generan multiplicando la función de rendimiento [2] por un coeficiente que reduce o aumenta su productividad respecto a la situación real. Las cinco explotaciones que consideramos tienen la misma extensión de superficie pero las funciones de producción son distintas al multiplicarlas por un coeficiente. En base a la elección del coeficiente se generan tres escenarios distintos de heterogeneidad, de forma que las explotaciones tendrán diferencias en su productividad entre sí de un 5, 15 y 30%. Es decir, la heterogeneidad de 5% significa que la producción de las explotaciones menos productivas E_1, E_2 ($i = 1, i = 2$) alcanzan el 90 y 95% de la explotación E_3 ($i = 3$), y la de las explotaciones más

CUADRO 1
Funciones de producción estimadas para cada cultivo y para $i = 3^*$

Variable	Funciones de producción					
	Maíz	Cebada	Trigo	Girasol	Alfalfa	Arroz
Constante	-2,78 (-7,31)	-0,367 (-2,23)	0,09 (0,58)	-2,91 (-12,53)	4,42 (9,95)	-1,79 (-4,81)
Agua (w)	0,0349 (38,55)	0,0060 (6,18)	0,0042 (5,93)	0,0135 (8,79)	0,027 (45,55)	0,0057 (11,50)
Nitrógeno (n)	0,0252 (17,04)	0,0188 (13,73)	0,0188 (2,77)	0,0102 (9,85)	0,0467 (7,88)	0,020 (10,08)
w ²	$-0,269 \cdot 10^{-4}$ (-31,87)	$-0,102 \cdot 10^{-4}$ (-4,8)	$-0,566 \cdot 10^{-5}$ (-5,39)	$-0,181 \cdot 10^{-4}$ (-7,14)	$-0,162 \cdot 10^{-4}$ (-34,14)	$-0,221 \cdot 10^{-5}$ (-7,19)
n ²	$-0,336 \cdot 10^{-4}$ (-13,17)	$-0,515 \cdot 10^{-4}$ (-8,13)	$-0,560 \cdot 10^{-4}$ (-9,74)	$-0,838 \cdot 10^{-4}$ (-2,78)	$-0,344 \cdot 10^{-3}$ (-4,54)	$-0,641 \cdot 10^{-4}$ (-6,64)
R ² ajustado	0,92	0,83	0,85	0,93	0,96	0,75
Muestra	374	359	340	231	168	264

* Entre paréntesis los valores de los t-ratios.

productivas E_4, E_5 ($i = 4, i = 5$) alcanzan respectivamente el 105 y 110% de la producción de la explotación media ($i = 3$).

Utilizando la especificación de la función \hat{y}_{ij} y valores de los parámetros $D_i, p_j, c^1, c^2, k_{ij}$ y s_{ij} el problema [1] fue programado con GAMS (General Algebraic Modeling System, Brooke *et al.*, 1998) y resuelto con el algoritmo CONOPT2, para obtener el valor del beneficio neto $\pi_i(D_i, c^1)$. Con el objeto de estimar la función $\pi_i(D_i, c^1)$, se han variado los parámetros D_i y c^1 , utilizando valores entre 0 y 15.000 m³/ha, y entre 0 y 0,12 € respectivamente para todas las explotaciones. A partir del valor $\pi_i(D_i, c^1)$, como valor máximo del problema [1], es posible estimar una función $\hat{\pi}_i(D_i, c^1)$ que relaciona el beneficio neto obtenido por cada explotación con la cantidad de agua asignada inicialmente, dado un precio administrativo del agua.

La función de beneficio neto $\hat{\pi}_i(D_i, c^1)$ utilizada en el modelo sigue una especificación cuadrática que depende de la cantidad de agua asignada y del precio administrativo del agua. Para la estimación de esta función se ha utilizado el método de mínimos cuadrados ordinarios disponible en el paquete estadístico SHAZAM (White, 2002).

$$\hat{\pi}_i(D_i, c^1) = b_{i,0} + b_{i,1} D_i + b_{i,2} D_i^2 - c^1 D_i. \quad [3]$$

4. Métodos de asignación de agua

En este apartado se introduce la explicación teórica del mecanismo de mercado y de la regla uniforme. Una vez definidos estos métodos de asignación, se compararán en el próximo apartado la eficiencia de la regla uniforme y de la regla proporcional con la eficiencia del mercado en el caso de la zona de estudio.

Mercados de agua

Los mercados de agua se han planteado en los últimos años como un instrumento eficaz para la mejora de la gestión de los recursos hídricos en la agricultura, centrando la atención en las ganancias económicas que de ellos pueden resultar. En general, los mercados de agua pueden definirse como las instituciones que posibilitan el intercambio de los derechos sobre el agua, si bien estos intercambios pueden concretarse de diversas formas: a través de traspasos temporales (también llamados mercados «spot») o permanentes, tanto del derecho de uso como del propio recurso⁸.

La literatura cuenta con numerosos trabajos empíricos que señalan la posibilidad de mejoras económicas para los agricultores que participan en estos mercados y también mejoras sociales. Estas ganancias son especialmente elevadas cuando las disponibilidades de agua son reducidas, permitiendo moderar el impacto económico negativo de las situaciones de escasez (Miller, 1996). En el caso concreto de los mercados de tipo instantáneo o «spot» conviene destacar, entre otros, los estudios de Houston y Whittlesey (1986), Dinar y Letey (1991) y Weinberg *et al.* (1993), Brennan y Scocimarro (1998) localizados en Estados Unidos, y Bjornlund y Mckay (1998), y Bjornlund (2003) en Australia. En el ámbito de la literatura española cabe citar los trabajos de Arriaza y Gómez-Limón (2000), Arriaza *et al.* (2002), en contexto de la modelización multicriterio y localizados en zonas de riego del valle del Guadalquivir. También utiliza esta metodología el trabajo de Martínez y Gómez-Limón (2004), que considera tres objetivos de gestión (maximización del margen bruto total, minimización del riesgo y minimización de la mano de obra total utilizada), pero en este caso aplicado a nivel de cuenca hidrográfica en el valle del Duero. El trabajo de Calatrava y Garrido (2001) utiliza la programación positiva, y Calatrava (2002) introduce en su análisis la influencia del riesgo económico en la actividad de los mercados de la agricultura del valle del Guadalquivir. Todos estos trabajos coinciden en señalar las teóricas ventajas económicas que tiene el mecanismo de mercado, lo cual contrasta con la escasa actividad de los mercados en la realidad⁹.

Dado que la formulación teórica del modelo de mercado ha sido ampliamente presentada en la literatura, se ha optado por presentar el modelo de mercado a partir de la función de beneficio estimada en [3]. En el contexto de nuestro modelo de asignación y siguiendo la formulación de Calatrava (2002), si se permiten intercambios de agua, cada explotación cuenta con una dotación de agua por hectárea que puede aumentarse mediante compras, $m_i > 0$ (m³/ha), a otras explotaciones y que puede utilizar para su plan de producción, o bien que puede vender, $m_i < 0$, en parte o en su totalidad, a un precio resultante del equilibrio de mercado. Por lo tanto, el valor má-

⁸ Conviene indicar que la normativa española vigente en materia de intercambios de agua es el Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio (art. 67 y siguientes), por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas (BOE 24-VII-2001), y el Real Decreto 606/2003, de 23 de mayo, que modifica el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, y por el que se aprueba el Reglamento de Dominio Público Hidráulico (BOE 6-VI-2003).

⁹ Esta conclusión obtienen también los trabajos de Pujol *et al.* (2004) en cuencas del Bajo Ter y el de Goetz y Martínez (2005) en el valle del Ebro.

ximo de la función π_i no depende sólo de la dotación inicial y del precio administrativo del agua sino de la cantidad de agua comprada o vendida, es decir $\pi_i(D_i, c^1)$ se convierte en $\pi_i(D_i + m_i, c^1)$, donde m_i es la nueva variable de decisión introducida, y D_i y c^1 son unos parámetros.

La maximización de los beneficios netos del conjunto de los agricultores, π^m , en presencia de un mercado de agua conduce al siguiente problema:

$$\pi^m = \max_{m_i} \sum_i^5 \pi_i(D_i + m_i, c^1) \quad [4a]$$

$$s.a. \sum_{i=1}^5 m_i = 0 \quad (\text{vaciamiento del mercado}) \quad [4b]$$

$$-m_i \leq D_i \quad \forall_i \quad (\text{ventas menores que dotación}). \quad [4c]$$

La función objetivo [4a] expresa la suma de los beneficios netos de las 5 explotaciones derivados de la producción, cada una usando la cantidad del agua ($D_i + m_i$). El equilibrio del mercado es el resultado de la maximización de la función [4a] sujeta a los restricciones [4b] y [4c]. La primera de ellas requiere el vaciamiento del mercado, es decir, la suma de las ventas y las compras de agua debe ser igual a cero ($\sum_{i=1}^5 m_i = 0$), y la segunda implica que las ventas de agua del agricultor en el mercado serán menores, o como mucho iguales a su dotación inicial. Puesto que el sistema de mercado servirá de referencia como alternativa más eficiente en la asignación del agua, las condiciones necesarias para la solución del problema [4] se puede consultar en el apéndice 1. En una versión extendida de este artículo, disponible en la página <http://www.unizar.es/econatura/documentos/RecursosHidricos/ReglaUniforme.pdf>, presentamos en el apéndice 1 no sólo las condiciones necesarias para la solución de mercado sino también la interpretación económica de las mismas.

Reglas de asignación social: el caso de la regla uniforme

La situación en la que un grupo de agentes debe repartirse un bien racionado con precio fijo ha sido analizada teóricamente en el marco de la literatura de la elección social (Benassy 1982, Barberà y Jackson 1995). En esta literatura, se considera la existencia de un decisor central que lleva a cabo el reparto del bien teniendo en cuenta las preferencias de los agentes. Por otra parte, se asume que los individuos tienen preferencias unimodales o de pico único con respecto a la porción deseada del bien racionado¹⁰. Esta cantidad del bien puede denominarse asignación ideal. Como muestra la tabla A1 del apéndice 3, la función es estrictamente cóncava y, por tanto, la función de beneficio neto de los agricultores es unimodal o de pico único.

¹⁰ Una preferencia es unimodal si existe una alternativa mejor a todas las demás, denominada «pico», tal que al alejarnos de ella en cualquier dirección encontramos alternativas menos preferidas.

Sprumont (1991) propuso para este caso una regla de asignación uniforme que es anónima¹¹, no manipulable y eficiente en el sentido de Pareto. La propiedad de no manipulabilidad de la regla uniforme significa que los agentes no pueden mejorar sus asignaciones expresando una porción deseada que no sea la verdadera (los agentes no pueden engañar).

Para que esto sea posible, tal como demuestra Sprumont (2001), es necesario que las preferencias de los agentes sean unimodales o de pico único. Esta característica hace posible diseñar la regla de reparto uniforme de tal manera que revelar la información correcta resulte económicamente mejor que engañar, aportando así el incentivo adecuado para el cumplimiento de la no manipulabilidad. A continuación, se describen el funcionamiento práctico y las características básicas de la regla uniforme.

La regla uniforme debe considerarse como inicio de la solución a partes iguales, pero corregida posteriormente para alcanzar eficiencia en el sentido de Pareto. El primer paso de la regla consiste en que los agricultores pueden manifestar su porción deseada o ideal de agua al planificador o gestor central. Para ilustrar el funcionamiento de la regla uniforme podemos partir de la situación en que la suma de las asignaciones ideales de agua de todos los agricultores es mayor que el agua total disponible. En principio, dado que la regla es anónima, a todos les correspondería idéntica proporción del total disponible. Sin embargo, una vez conocidas las preferencias o peticiones de los usuarios, si existe algún agricultor que desea menor o igual cantidad de agua que la porción igualitaria que le corresponde, entonces se le asignará esa cantidad de agua ideal solicitada. La cantidad adicional que se libera queda disponible para repartirse a partes iguales entre el resto de los agricultores, con lo cual se determina una nueva cantidad «mínima» para estos agricultores. Si de nuevo alguno de ellos desea menor o igual cantidad que esta nueva porción, entonces se le asigna lo que pide. Este procedimiento se repetirá hasta que todas las cantidades ideales de agua de los restantes agricultores sean mayores o iguales que la porción que les corresponde según este reparto igualitario.

La propiedad de no manipulabilidad de la regla uniforme es una cuestión relevante para el funcionamiento correcto de la regla. Intuitivamente la no manipulabilidad de la regla uniforme reside en el hecho de que todos los agentes que piden menos que la porción igualitaria del bien o recurso (en nuestro caso de la cantidad total de agua) obtienen la cantidad de agua deseada. A medida que se va asignando el agua, queda menos para los agentes que piden más que su porción igualitaria. Como el conjunto de agentes pide más agua que el total disponible, los agentes que han sobrealorado su demanda corren el riesgo de quedarse con menos agua de lo que hubieran recibido si hubieran indicado su demanda verdadera. Por el contrario, los agentes que han infravalorado su demanda nunca reciben más de lo que han indicado. Es decir, en las dos situaciones hay incentivos para manifestar su demanda verdadera.

Antes de presentar la formulación matemática precisa de la regla uniforme, es necesario introducir cierta notación matemática y algunas definiciones. Sea $N = \{1, 2, \dots, n\}$ un conjunto finito de agentes. Las asignaciones de agua son los conjuntos de

¹¹ La regla es anónima si el reparto no discrimina a los agentes en función de sus características. Todos los agentes son tratados igualmente.

n -elementos a en el conjunto $A = \{a \in [0, 1]^n \mid \sum_{i \in N} a_i = 1\}$. Se asume que las preferencias son continuas y están representadas usualmente mediante una función de utilidad u . En nuestro caso concreto, la función de utilidad coincide con los beneficios netos del agricultor π , que tienen un único punto máximo tal como se indicó en el apartado de mercado. Se llamará x^* al pico o punto máximo de u_i , con $i \in N$, y se denotará como $x^*(u_i)$.

Sea S el conjunto de todas las funciones de utilidad que representan preferencias unimodales en el intervalo $[0, 1]$. Los perfiles de las preferencias están dados por los conjuntos de n -elementos de las funciones de utilidad, denotadas mediante u_1, u_2, \dots, u_n , siendo u_{-i} el conjunto de $(n-1)$ -elementos obtenido a partir de u eliminando u_i , y (u_{-i}, v_i) representa el conjunto obtenido a partir de u sustituyendo v_i por u_i . Una regla de asignación, asocia un vector de porciones del bien o recurso con cada perfil de preferencias. Se trata por tanto de una función $f: S^n \rightarrow [0,1]$ que satisface la condición: $\sum_{i \in N} f_i(u) = 1 \forall u \in S^n$.

La regla de asignación uniforme anónima, no manipulable y eficiente puede por tanto definirse como:

$$f_i^*(u) = \begin{cases} \min [x^*(u_i), \lambda(u)] & \text{si } \sum_{i \in N} x^*(u_i) \geq 1 \\ \max [x^*(u_i), \mu(u)] & \text{si } \sum_{i \in N} x^*(u_i) \leq 1 \end{cases} \quad [5]$$

donde $\lambda(u)$ resuelve la expresión $\sum_{i \in N} \min [x^*(u_i), \lambda(u)] = 1$ y $\mu(u)$ resuelve

$$\sum_{i \in N} \max [x^*(u_i), \mu(u)] = 1.$$

Con el objeto de ilustrar la regla uniforme que se acaba de enunciar, el apéndice 2 muestra una aplicación con un ejemplo en el que existen $n = 3$ agentes cuyos puntos ideales son $x_1^* = 1/2, x_2^* = 1/4, x_3^* = 2/3$.

5. Resultados

Las estimaciones de las funciones $\hat{\pi}_i$, de la ecuación [3] se presentan en el apéndice 3. Utilizando estas estimaciones de las funciones en el problema [4] se puede resolver el equilibrio del mercado numéricamente con GAMS. Mediante el análisis de los diferentes escenarios de disponibilidad de agua por hectárea (de 0 a 15.000 m³) y de los precios administrativos de agua (de 0 a 0,12 €/m³) se han calculado los beneficios de las cinco explotaciones con y sin mercado, el volumen de agua utilizada, las transferencias de agua y el precio del agua en situación de mercado.

En el cuadro 2 se muestra el porcentaje de agua intercambiada en la región sobre el volumen total de agua disponible para cada dotación de agua. Los resultados muestran que el porcentaje de volúmenes intercambiados crece cuanto menores son los niveles de dotación, es decir, los intercambios son proporcionalmente mayores cuanto menor

es la dotación, e indica que los mercados son más activos y más eficientes en situaciones de escasez. Tal conclusión es coherente con los resultados de otros trabajos empíricos sobre mercados de agua (Calatrava, 2002; Martínez y Gómez-Limón, 2004), en los que se destaca que la actividad de los mercados es mayor, en términos relativos, en las situaciones de escasez de agua. Ello tiene una explicación clara, ya que con menores dotaciones el agricultor debe modificar su estrategia de cultivos, reduciendo la superficie dedicada a aquéllos que son más intensivos en el uso de agua, y que son también los de mayor rentabilidad, o por el contrario puede acudir al mercado para comprar agua. En ambos casos el resultado será una disminución del beneficio neto de la explotación. Esta tendencia remitirá en la medida en que las dotaciones de agua vayan aumentando y por tanto el porcentaje de agua intercambiada disminuirá.

CUADRO 2

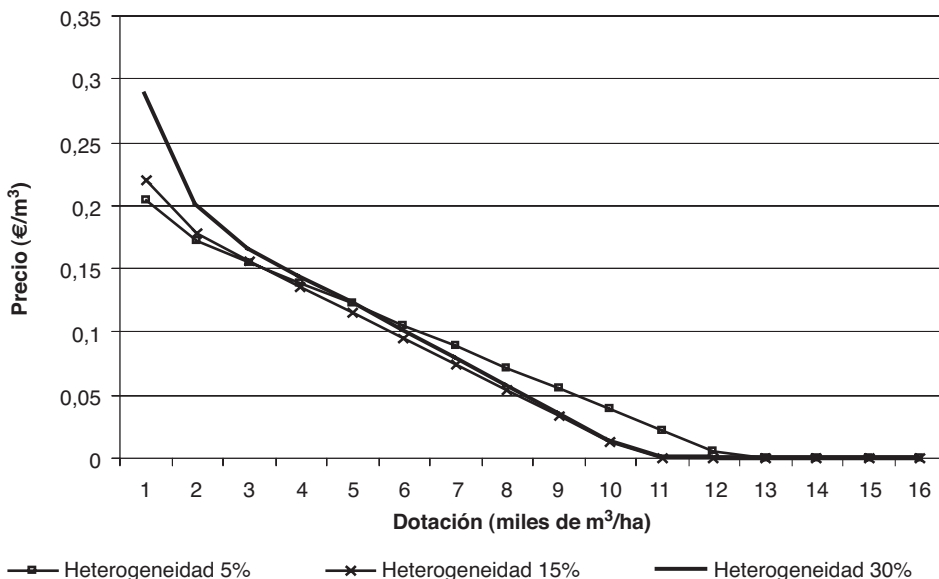
Porcentaje del agua intercambiada en el mercado sobre el total de agua asignada con un precio administrativo de agua de 0,012 €/m³

Dotación (miles m ³ /ha)	Heterogeneidad entre explotaciones		
	5%	15%	30%
0	0	0	0
1	32,40	40,85	61,0
2	17,55	22,50	44,55
3	12,54	13,90	30,57
4	8,31	10,12	23,58
5	7,17	9,24	19,38
6	6,99	8,64	16,59
7	6,94	8,30	14,86
8	6,41	8,18	13,90
9	6,00	8,03	13,15
10	5,67	7,86	12,55
11	5,40	7,65	12,06
12	5,17	7,64	11,65
13	4,98	7,38	11,31

La figura 1 muestra también los precios de equilibrio del agua obtenidos para distintos niveles de dotación por hectárea. Como puede apreciarse la escasez de agua provoca un aumento de la utilidad marginal del agua, de manera que el precio de equilibrio en el mercado aumenta. Es importante señalar que el precio de mercado se hace cero para niveles superiores a 11.000 m³/ha, lo cual implica que los incentivos para el intercambio disminuyen cuanto mayores son las dotaciones de agua. En cualquier caso, los precios del agua no llegan a los 30 céntimos de euro por metro cúbico.

Las transferencias de agua se producen hacia las explotaciones con mayor productividad, es decir, hacia aquellas que obtienen mayores incrementos de beneficio por el aumento de agua. Tal comportamiento se confirma en los resultados sobre la posición compradora o vendedora de las explotaciones ya que las explotaciones más productivas (E4 y E5) son compradoras para todas las dotaciones iniciales, mientras que las menos productivas (E1, E2 y E3) son vendedoras netas de agua.

FIGURA 1
Precios de equilibrio del agua en el mercado con un precio administrativo de agua de 0,012 €/m³



El cuadro 3 recoge las ganancias de beneficio del sistema de mercado con respecto a la situación inicial sin mercado para el conjunto de las explotaciones en función de la dotación inicial de agua. La introducción de la posibilidad de intercambiar agua entre las explotaciones genera mayores beneficios con respecto a la situación sin mercado, ya que permite solucionar las eventuales situaciones de escasez de recursos acudiendo al mercado. Efectivamente, en la situación con mercado los agricultores pueden modificar sus decisiones de cultivo con respecto a la situación sin mercado, de tal manera que dedica mayor superficie a los cultivos más rentables y más intensivos en agua. Este aumento en las ganancias derivadas del mercado es tanto mayor cuanto mayores son las diferencias entre las productividades de las explotaciones que intervienen en el mercado, pues los incentivos existentes al intercambio también aumentan. La magnitud de las ganancias es algo menor que la calculada por Martínez y Gómez-Limón (2004) para la cuenca del Duero, si bien puede llegar a superar los 500 euros por hectárea.

De aquí en adelante, el sistema de mercado nos servirá como referencia para comparar los resultados obtenidos de la asignación con la regla proporcional y con la regla uniforme. Para ello se ha comparado la pérdida de eficiencia de estas reglas con respecto al mercado considerando distintos niveles de precios administrativos del agua, distintas dotaciones iniciales de agua y distintos niveles de heterogeneidad de las explotaciones que intervienen en el reparto. Independientemente de la regla de

CUADRO 3
Ganancias de beneficios netos en situación de mercado (€/ha) con un precio administrativo de agua de 0,012 €/m³

Dotación (miles m ³ /ha)	Heterogeneidad entre explotaciones		
	5%	15%	30%
0	0	0	0
1	19,28	44,64	196,29
3	25,92	46,42	237,94
5	33,60	42,13	276,66
7	42,32	124,21	329,81
9	52,07	166,26	397,39
11	62,86	126,98	479,41
13	74,69	201,45	575,86

asignación del agua las explotaciones deben pagar el precio administrativo por toda el agua que se les ha asignado inicialmente. En el caso de la situación de mercado, además, existe el precio de equilibrio del mercado de agua. Comparando la suma de los beneficios netos de todas las explotaciones se observa que la asignación de agua a través del mercado es más eficiente que cualquiera de las otras dos reglas de asignación. Esta pérdida de beneficios netos agregados se ha calculado como el porcentaje respecto a los obtenidos con el mercado. Los resultados se muestran en las figuras 2 a 5 para los tres niveles de heterogeneidad considerados¹².

Con un precio administrativo nulo del agua, las pérdidas de eficiencia de las dos reglas respecto al mercado se encuentran en porcentajes del beneficio neto cercanos al 1% en el caso del 5% de heterogeneidad, superiores al 2% para el 15% de heterogeneidad y por encima del 8% para el 30% de heterogeneidad. Conforme aumenta el precio del agua, estas pérdidas se incrementan progresivamente en el caso de la regla proporcional desde un 3,5% hasta más de un 30% con el precio más elevado. Esta evolución es similar en todos los casos de heterogeneidad considerados para el caso de la regla proporcional, pero no para la regla uniforme como se verá más adelante.

Si nos fijamos en los gráficos que corresponden a la heterogeneidad del 5%, podemos observar que la regla uniforme conduce a idénticas pérdidas de eficiencia que el método de asignación proporcional respecto a la asignación de mercado. La única excepción la encontramos cuando la dotación inicial es de 8.000 m³/ha. En este caso y a partir de un precio del agua de 0,03 €/m³ la regla uniforme conduce a pérdidas de eficiencia inferiores a las de la regla proporcional. En ese mismo sentido, si analizamos la evolución de las series que corresponden a la regla uniforme en el caso de la heterogeneidad del 15 y del 30%, puede comprobarse que las pérdidas de eficiencia son menores que las resultantes del reparto proporcional. Además, esta disparidad en-

¹² Se presentan gráficamente únicamente los resultados para los niveles de dotación más comunes en el área, considerando el agua disponible en parcela para el usuario, que es inferior a la dotación bruta en cabecera. Los resultados para mayores dotaciones confirman las conclusiones obtenidas.

FIGURA 2
Pérdidas de eficiencia de las reglas proporcional y uniforme con dotación de 3.000 m³/ha (5, 15 y 30 % de heterogeneidad)

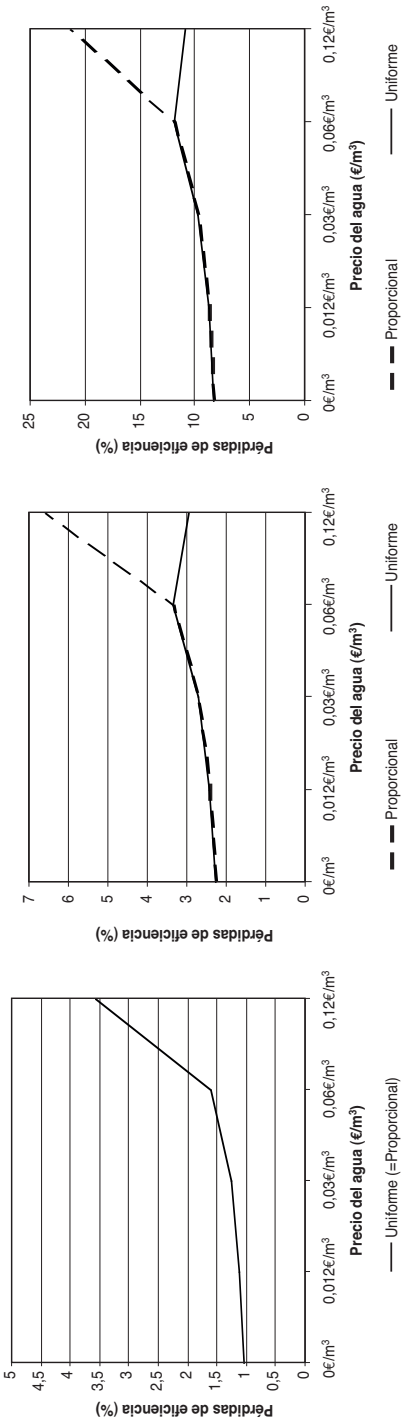


FIGURA 3
Pérdidas de eficiencia de las reglas proporcional y uniforme con dotación de 6.000 m³/ha (5, 15 y 30 % de heterogeneidad)

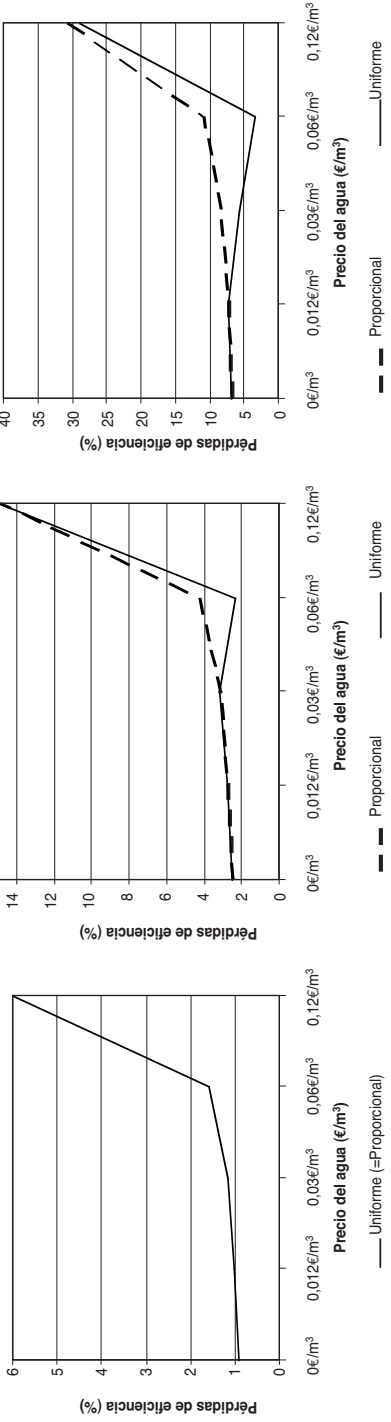


FIGURA 4
Pérdidas de eficiencia de las reglas proporcional y uniforme con dotación de 7.000 m³/ha (5, 15 y 30 % de heterogeneidad)

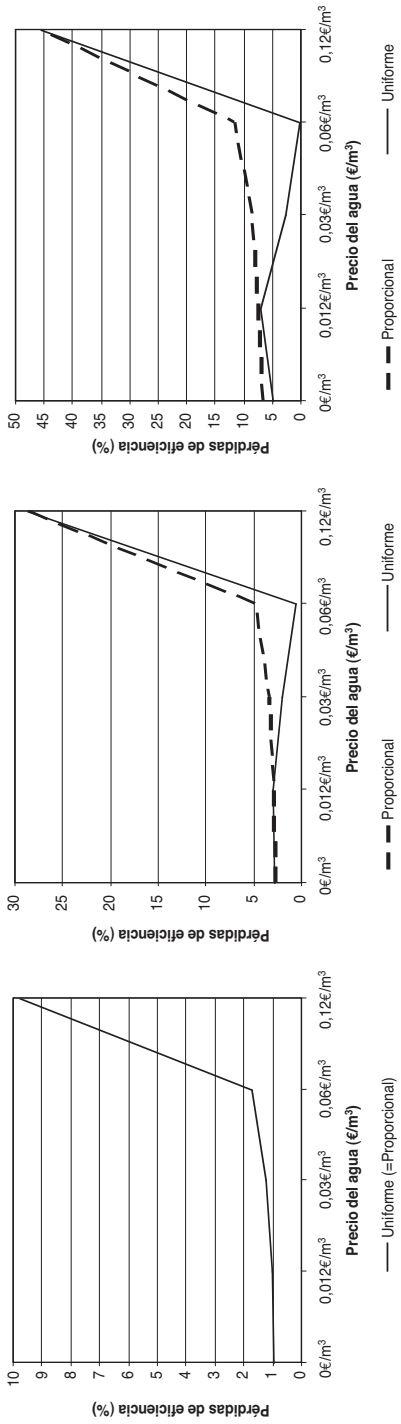
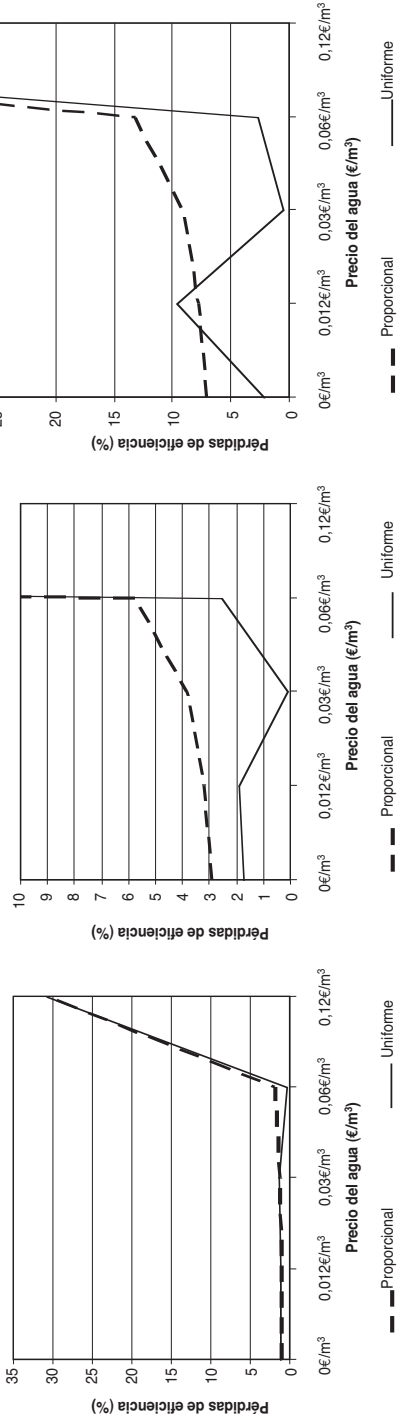


FIGURA 5
Pérdidas de eficiencia de las reglas proporcional y uniforme con dotación de 8.000 m³/ha (5, 15 y 30 % de heterogeneidad)



tre ambas reglas en beneficio de la regla uniforme se hace mayor cuanto mayor es la dotación de agua inicial y cuanto mayor es el precio del agua considerado. Todo ello lleva a confirmar la ventaja potencial de la regla uniforme respecto a la proporcional. Esta ventaja encuentra su explicación en que la regla uniforme tiene en cuenta las preferencias de los agricultores o usuarios que participan en el reparto, de tal manera que cuando existe algún usuario cuyas preferencias resultan ser inferiores a la solución por partes iguales, la regla uniforme permite reasignaciones de la parte sobrante entre el resto de los usuarios. Esta circunstancia se da en situaciones de escasez de agua no muy acentuada, o bien en situaciones de precios de agua elevados.

Por tanto, y aunque el mercado de agua conduzca a mejores resultados en todos los casos, la regla uniforme puede resultar una alternativa interesante cuando las dotaciones de agua se encuentran en el intervalo habitual (entre 6.000 y 9.000 m³/ha), mientras que en situaciones de escasez severa de agua, el mercado presenta una ventaja más clara con respecto a cualquier otro sistema de asignación. Además, cuanto mayor es la heterogeneidad de las explotaciones o usuarios que participan en el sistema, mejores son los resultados de la regla uniforme con respecto a la regla proporcional. La relevancia de este resultado adquiere mayor fuerza si tenemos en cuenta que los costes de introducir una regla uniforme de reparto serían sensiblemente inferiores a los costes que implicaría un sistema de mercado. Aunque no es sencillo cuantificar el nivel de los costes de transacción de un mercado, algunos estudios han estimado que éstos pueden estar en un rango entre 0,05 y 0,20 \$/m³ (Archibald y Renwick, 1998)¹³. En el caso de la regla uniforme este coste sería prácticamente nulo, puesto que podría aprovecharse la organización actual en la que se basa la asignación del agua, ya que la regla uniforme, al igual que la regla proporcional, afecta sólo a la asignación de agua dentro de la comunidad de regantes.

6. Conclusiones

En este trabajo se muestra una aplicación práctica del funcionamiento de una regla de asignación desarrollada en la teoría de la elección social (regla uniforme) y se compara con la solución derivada del mercado así como con la regla actualmente utilizada para asignar el recurso hídrico. Los datos para la aplicación y la comparación proceden de una zona del regadío de Aragón (Flumen-Monegros). De los resultados pueden deducirse algunas conclusiones relevantes.

En primer lugar cabe destacar el grado de similitud de los resultados obtenidos con la regla de reparto proporcional y con la regla uniforme para situaciones con poca heterogeneidad entre las explotaciones y con bajos precios del agua. En esos casos, la eficiencia económica de ambas reglas con respecto a la situación de mercado es la misma. Esto es así porque con la regla uniforme los agricultores tienen una can-

¹³ Estos autores han identificado dos tipos de costes de transacción: los costes inducidos por la administración, y los costes políticamente inducidos. Estos últimos pueden incluir los costes para compensar las externalidades causadas por el intercambio de agua. Por otra parte, Easter *et al.* (1998) señalan un nivel medio de costes de los mercados en Chile de 0,069 \$/m³.

tividad garantizada de agua que coincide con la porción que se obtiene si se hace un reparto a partes iguales cuando las explotaciones tienen las mismas hectáreas. Las diferencias entre ambas reglas de asignación surgen cuando alguno de los usuarios tiene una preferencia óptima inferior a la solución a partes iguales, en cuyo caso la regla uniforme reasigna la parte sobrante de forma igualitaria entre los restantes usuarios.

Se ha comprobado que la ganancia de eficiencia que proporciona el mercado es mayor en situaciones de dotaciones bajas o de mayor escasez de agua, si bien a partir de dotaciones superiores a 8.000 m³/ha la ganancia no es tan evidente. Por el contrario, cuando la dotación está en el rango habitual de valores, la regla uniforme conduce a pérdidas de eficiencia más moderadas que la regla proporcional e incluso en algunos casos estas pérdidas son prácticamente nulas con respecto a la solución que aporta el mercado.

Asimismo, los resultados confirman que los niveles superiores de heterogeneidad entre los usuarios y los valores elevados del precio administrativo del agua (los cálculos indican que un nivel razonable estaría entre 0,012 y 0,06 €/m³) representan situaciones más ventajosas para la aplicación de la regla de asignación uniforme. En situaciones de altos precios del agua, la eficiencia económica de la asignación proporcional disminuye significativamente, debido a la imposibilidad de realizar intercambios y al aumento del coste del recurso.

A pesar de las ganancias económicas que muestra la solución basada en el mercado, su implantación genera en la práctica no pocas dudas a las instituciones y a los propios usuarios, debido a la dificultad en la evaluación de los beneficios y costes originados. Estos inconvenientes pueden paliarse utilizando las reglas de asignación propias de la elección social por su fácil implantación, lo cual hace de este tipo de reglas un instrumento atractivo para lograr mejoras en la gestión de los recursos hídricos.

Del análisis de la regla uniforme surgen algunas posibles extensiones que nos parecen interesantes. Por una parte los resultados que se muestran se han obtenido considerando que las explotaciones deben pagar el precio administrativo por toda el agua que se les ha asignado inicialmente. Sin embargo, si se considera el caso en que fuera posible ahorrar las cantidades de agua que superasen las dotaciones o preferencias óptimas, podría evitarse la situación de sobreasignación y reservar el agua sobrante considerándola como derechos de agua para la campaña siguiente o bien destinarla a otros usos, si bien esto implicaría importantes cambios en la legislación actual en el sentido de una mayor flexibilización del actual sistema de concesiones. Otras interesantes extensiones de este trabajo son el cálculo de los costes de transacción y el desarrollo de una regla de asignación no anónima, es decir, una regla que tenga en cuenta las diferencias de productividad entre las distintas explotaciones. El diseño de esta regla puede basarse en el concepto de la regla secuencial desarrollado por Barberà, Jackson y Neme (1997).

APÉNDICE 1. Solución del mercado de agua

La función lagrangiana, L , del problema que se ha definido en [4] es:

$$L = \sum_i^5 \pi_i (D_i + m_i, c^1) - \lambda \sum_i^5 m_i + \sum_i^5 \mu_i (D_i + m_i),$$

donde μ y μ_i son los multiplicadores de Lagrange asociados a las restricciones [4b] y [4c] respectivamente. Las condiciones de primer orden de este problema son:

$$L_{m_i} = \pi_i' - \lambda + \mu_i = 0; \quad \forall i \quad [6a]$$

$$L_\lambda = \sum_i^5 m_i \geq 0; \quad \lambda L_\lambda = -\lambda \sum_i^5 m_i = 0; \quad \lambda \geq 0 \quad [6b]$$

$$L_{\mu_i} = D_i + m_i \geq 0; \quad \mu_i L_{\mu_i} = \mu_i (D_i + m_i) \quad ; \quad \mu_i \geq 0. \quad \forall i. \quad [6c]$$

La expresión [6a] establece, cuando el agricultor vende una parte del agua inicialmente asignada ($0 < m_i < D_i$ implicando $\mu_i > 0$), que los beneficios netos marginales del agua utilizada son, en el óptimo, iguales al precio de equilibrio del mercado de agua, que viene dado por el precio sombra λ de la restricción $\sum_{i=1}^5 m_i = 0$. Si el agricul-

tor vende toda su agua el precio sombra de la restricción $-m_i \leq D_i$, $\mu_i > 0$, recoge la diferencia entre los beneficios marginales del agua utilizada y el precio de equilibrio del mercado de agua. Si el agricultor es comprador, la restricción [4c] nunca restringe y por lo tanto μ_i es siempre 0. En esta situación la condición [6a] requiere de nuevo que los beneficios netos marginales del agua utilizada sean en el óptimo iguales al precio de equilibrio del mercado. Las condiciones [6b] y [6c] establecen el vaciamiento del mercado y el cumplimiento de la restricción de la venta máxima respectivamente. Los precios sombra asociados tienen que ser no negativos y cumplir las condiciones de complementariedad de Kuhn-Tucker. Un desarrollo analítico y una discusión más amplios de la solución de mercado se presentan en el apéndice 1 de una versión extendida de este artículo disponible en <http://www.unizar.es/econatura/documentos/RecursosHidricos/ReglaUniforme.pdf>.

APÉNDICE 2. Ejemplo de la regla uniforme

Sea $n = 3$, y los valores ideales de cada agente $x_1^* = 1/2$, $x_2^* = 1/4$, $x_3^* = 2/3$. Las cantidades garantizadas inicialmente son: $q_1^0 = 1/3$, $q_2^0 = 1/3$, $q_3^0 = 1/3$. Dado que $\sum_{i \in N} x^*(u_i) = 1/2 + 1/4 + 2/3 = 13/12 > 1$, entonces la regla uniforme asigna el min $[x^*(u_i), \lambda(u)]$ siendo $\lambda(u)$ un parámetro que resuelve la expresión $\sum_{i \in N} \min [x^*(u_i), \lambda(u)] = 1$.

Debemos buscar el valor del parámetro $\lambda(u)$ que cumpla esta igualdad. Obsérvese que si tomáramos $\lambda \geq 2/3$, la regla asignaría para el primer agente, $1/4$ para el segundo y el valor λ para el tercero. La suma de las tres porciones sería: $1/4 + 1/2 + 2/3 = 13/12 > 1$, y por tanto no se cumple la condición.

Algo similar sucede si tomamos $1/2 \leq \lambda(u) < 2/3$. El valor de $\lambda(u)$ debe ser tal que $1/4 \leq \lambda(u) < 1/2$. Así, $\sum_{i \in N} \min [x^*(u_i), \lambda(u)] = 1/4 + \lambda + \lambda = 1$. Por tanto $2\lambda + 1/4 = 1$, y el único valor posible del parámetro es $\lambda = 3/8$. La asignación final resulta por tanto: $a_1 = 1/4, a_2 = 3/8, a_3 = 3/8$.

APÉNDICE 3. Las funciones de beneficios netos estimadas

En el cuadro A1 se presentan los resultados de la estimación de las funciones de beneficio neto máximo $\hat{\pi}_i$, ecuación [3], de las explotaciones obtenidas a partir de los valores de beneficio proporcionados por el modelo de asignación de cultivos para cada nivel de disponibilidad de agua. Las funciones de beneficio neto siguen una especificación cuadrática y dependen de la cantidad de agua total utilizada en la explotación y de los precios administrativos del agua.

CUADRO A1

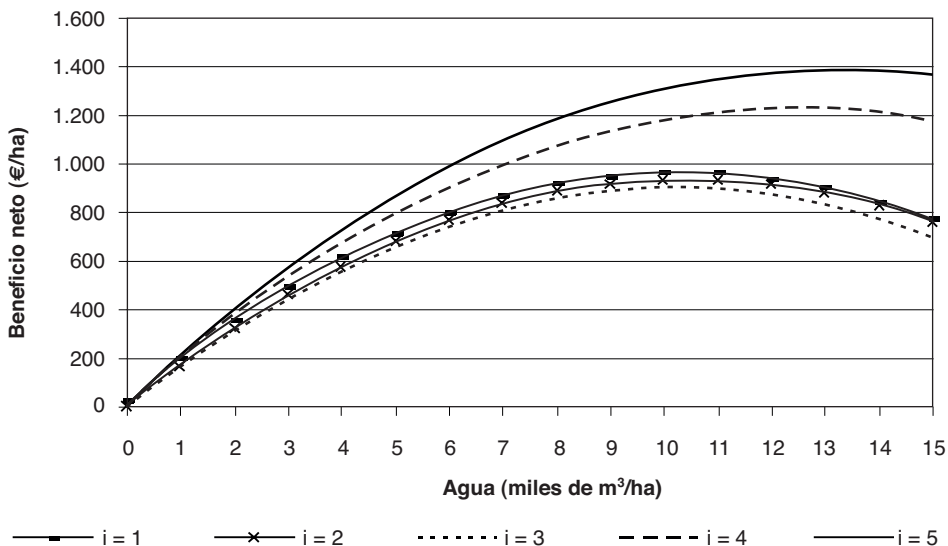
Parámetros de las funciones de beneficio neto máximo de las explotaciones según heterogeneidad para un precio administrativo del agua 0,012 €/m³*

Heterogeneidad	Constante ($b_{i,0}$)	Término lineal ($b_{i,1}$)	Término cuadrático ($b_{i,2}$)	R ² ajustado	
5%	i = 1	26,7 (2,36)	1,81 (13,14)	$-0,881 \cdot 10^{-3}$ (-3,04)	0,9713
	i = 2	-3,3 (-3,32)	1,79 (12,90)	$-0,859 \cdot 10^{-3}$ (-2,85)	0,9737
	i = 3	-8,2 (-7,35)	1,77 (12,65)	$-0,869 \cdot 10^{-3}$ (-2,91)	0,9758
	i = 4	16,7 (7,54)	1,95 (18,53)	$-0,788 \cdot 10^{-3}$ (-5,5)	0,9534
	i = 5	31,9 (3,45)	2,03 (33,2)	$-0,767 \cdot 10^{-3}$ (-7,2)	0,9375
15%	i = 1	26,7 (2,36)	1,81 (13,14)	$-0,881 \cdot 10^{-3}$ (-3,04)	0,9713
	i = 2	-10,4 (-3,17)	1,92 (13,57)	$-1,182 \cdot 10^{-3}$ (-4,09)	0,9866
	i = 3	-11,5 (-3,59)	1,75 (12,16)	$-1,238 \cdot 10^{-3}$ (-4,26)	0,9890
	i = 4	50,9 (4,51)	2,08 (18,98)	$-1,008 \cdot 10^{-3}$ (-5,26)	0,9459
	i = 5	105,1 (9,26)	2,23 (20,09)	$-0,905 \cdot 10^{-3}$ (-4,67)	0,9381
30%	i = 1	26,7 (2,36)	1,81 (13,14)	$-0,881 \cdot 10^{-3}$ (-3,04)	0,9713
	i = 2	-11,5 (-3,59)	1,75 (12,16)	$-1,238 \cdot 10^{-3}$ (-4,26)	0,9890
	i = 3	-211,9 (-10,32)	1,70 (14,43)	$-1,408 \cdot 10^{-3}$ (-5,32)	0,9968
	i = 4	105,1 (9,26)	2,23 (20,09)	$-0,905 \cdot 10^{-3}$ (-4,67)	0,9381
	i = 5	165,7 (10,40)	2,86 (20,36)	$-1,155 \cdot 10^{-3}$ (-5,02)	0,9394

* Entre paréntesis se muestran los valores del estadístico t-ratio de las variables.

En la figura A1 se han representado las funciones de beneficio máximo de las cinco explotaciones en la situación inicial sin mercado en el caso de diferencias en la productividad de un 5% y un precio administrativo de 0,012 €/m³. La forma cóncava de estas funciones indica la existencia de una dotación máxima a partir de la cual los

FIGURA A1
 Funciones de beneficio neto máximo estimadas con heterogeneidad 5%
 y un precio administrativo de 0,012 €/m³



beneficios de las explotaciones decrecen¹⁴. Cómo es lógico, las explotaciones de menor productividad (explotaciones 2 y 3) muestran niveles inferiores de beneficio neto para todas las dotaciones iniciales de agua. Derivando las funciones de beneficio respecto del uso de agua se obtienen las correspondientes funciones de demanda inversa de agua para cada explotación.

Bibliografía

- Archibald, S.O. y Renwick, M.E. (1998). «Expected transaction costs and incentives for water market development». En Easter, K.W., Rosegrant, M. y Dinar A., (eds.), *Markets for water: potential and performance*. Kluwer Academic Publishers, New York.
- Arriaza, M. y Gómez-Limón, J.A. (2000). «Mercados locales de agua de riego. Una modelización multicriterio en el Bajo Guadalquivir». *Revista de estudios agrosociales y pesqueros* 188:135-164.
- 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.

¹⁴ Como π_i es lineal en la función de beneficio respecto al parámetro c^1 , la concavidad de las funciones de beneficios es independiente del valor de c^1 .

- Bédoucha, G. (1984). «L'eau, l'ami du puissant. Une communauté oasienne du Sud Tuni-sien». *Édition des archives contemporains*, Centre National de la Recherche Scientifique, Paris.
- Barberà, S. y Jackson (1995). «Strategy-Proof Exchange». *Econometrica*, 63:51-88.
- Barberà, S.; Jackson, M. y Neme, A. (1997). «Strategy-Proof allotment rules». *Games and Economic Behavior*, 18:1-21.
- Benassy (1982). «The Economics of Market Disequilibrium». Academic Press, New York.
- Berbel, J.; Cañas, J.A.; Gómez-Limón, J.A.; López, M. J. y Arriaza, M. (1999). «*Micromode-los de gestión de agua de riego. Análisis del impacto socioeconómico y ambiental de una política de precios*». Federación Nacional de Comunidades de Regantes de España. Madrid.
- Bjornlund, H. (2003). «Farmer participation in markets for temporary and permanent water in southeastern Australia». *Agricultural Water Management*, 63:57-76.
- Bjornlund, H. y McKay, J. (1998). «Factors affecting water prices in a rural water market: a South Australian experience». *Water Resources Research*, 34 (6):1563-1570.
- Brennan, D. y Scoccimarro, M. (1998). «Signes in defining property rights to improve Australian water markets». *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 43 (1):69-89.
- Brooke, A.; Kendrick, D.; Meerans, A. and Raman, R. (1998). *GAMS Tutorial by R. Rosenthal*. GAMS Development Corporation. Washington.
- Calatrava, J. (2002). *Los mercados de agua en la agricultura y el riesgo económico: una aplicación en el valle del Guadalquivir*. Tesis doctoral. ETSIA Madrid.
- 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.
- Dinar, A. y Letey, J. (1991). «Agricultural water marketing, allocative efficiency and drainage reduction». *Journal of Environmental Economics and Management*, 20:210-223.
- Diputación General de Aragón (2000). *Evolución de la fertilidad del suelo y respuesta de los cultivos*. Informaciones técnicas 91, Servicio de Formación y Extensión Agraria. DGA. Zaragoza.
- Diputación General de Aragón (2001a). *Orientaciones para las siembras de otoño-invierno*. Resultados de los ensayos. Informaciones técnicas 100, Servicio de Formación y Extensión Agraria. DGA. Zaragoza.
- Diputación General de Aragón (2001b). *Resultados de los ensayos de maíz y girasol*. Informaciones técnicas 108, Servicio de Formación y Extensión Agraria. DGA. Zaragoza.
- Easter, K.W.; Rosegrant, M.W. y Dinar, A. (eds.) (1998). *Markets for water: potential and performance*. Kluwer Academic Publishers, New York.
- Faysse, N. (2003). «Allocating irrigation water: the impact of strategic interaction on the efficiency of rules». *European Review of Agricultural Economics*, 30 (3):305-332.
- Fernández, J. (1999). *Análisis económico coste-beneficio y valoración socioambiental del proyecto de embalse de Biscarrués (Huesca)*. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza.
- Garrido, A. (2000). «A mathematical programming model applied to the study of water markets within the Spanish agricultural sector». *Annals of Operations Research*, 94:105-123.
- Garrido, A.; Iglesias, E. y Blanco, M. (1996). Análisis de la actitud de los regantes ante el establecimiento de políticas de precios públicos y de mercados de agua». *Revista Española de Economía Agraria y Recursos Naturales* 178:139-162.
- Gillingham, M. (1999). «Gaining access to water: formal and working rules of indigenous irrigation management on Mont Kilimanjaro». *Natural Resources Journal*, 39:419-441.

- Goetz, R. y Martínez, Y. (2005). *Ganancias de eficiencia versus costes de transacción de los mercados de agua: el caso de la heterogeneidad de las explotaciones agrícolas*. Documento de trabajo.
- Helfand, G. y House, B. (1995). «Regulating nonpoint source pollution under heterogeneous conditions». *American Journal of Agricultural Economics*, 77:1024-1032.
- Houston, J.E. y Whittlesey, N.K. (1986). «Modelling agricultural water markets for hydropower production in the Pacific Northwest». *Western Journal of Agricultural Economics*, 11:221-231.
- Martínez, Y. (2002). *Análisis económico y ambiental de la contaminación por nitratos en el regadío*. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza.
- Martínez, Y. y Albiac, J. (2006). «Nitrate pollution control under soil heterogeneity». *Land Use Policy*, en prensa. Disponible *on line* desde julio de 2005, doi:10.1016/j.landusepol.2005.05.002.
- Martínez, Y. y Gómez-Limón, J.A. (2004). «Simulación multicriterio de mercados de agua de regadío: el caso de la cuenca del Duero». *Revista de estudios agrosociales y pesqueros*, 202:101-135.
- Miller, K.A. (1996). «Water banking to manage supply variability». En Hall, D.C. (ed.), *Advances in the economics of environmental resources*. Vol. 1. Marginal cost rate design and wholesale water markets. JAI Press, Greenwich, Connecticut, pp. 185-211.
- Mitchell, G.; Griggs, R.; Benson, V. y Williams, J. (1998). *The EPIC model: environmental policy integrated climate*. Texas Agricultural Experiment Station. Temple.
- Moulin and Hervé (2002). «Axiomatic Cost and Surplus Sharing», Chapter 6 in: Arrow, K.J., A.K. Sen, y K. Suzumara (editors), *Handbook of Social Choice and Welfare*, vol. I, Elsevier Science, Amsterdam, 2002.
- Nogués, J. (2000). *Mapa de suelos (E 1/25.000) de Barbués y Torres de Barbués (Huesca). Aplicaciones para modernización de regadíos*. Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón. Serie Investigación. Zaragoza.
- Pujol, J.; Ramírez de Cartagena, F. y Berbel, J. (2004). *Los mercados locales de aguas como instrumentos para mejorar la eficiencia en la asignación del recurso. Análisis de su aplicación en las Comunidades de Regantes del Bajo Ter y el Muga (Girona, España)*. Comunicación presentada en el V Congreso de la Asociación Española de Economía Agraria. Santiago de Compostela, 2004.
- Sprumont, Y. (1991). «The division problem with single peaked preferences: a characterization of the uniform allocation rules». *Econometrica*, 59:509-519.
- Thomas, A. y Boisvert, R. (1994). «Bioeconomics of regulating nitrates in groundwater: taxes, quantity restrictions and pollution permits». *Working paper 94-07*. Department of agricultural, resource and managerial economics. Cornell University, Ithaca.
- Uku, S. (2003). *Análisis económico y medioambiental de los sistemas de riego: una aplicación al regadío de Bardenas*. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza.
- Weinberg, M.; Kling, C.L. y Wilen, J. (1993). «Water markets and water quality». *American Journal of Agricultural Economics* 75:278-291.
- White, K.J. (2002). *SHAZAM - For Windows*, Version 9.0.