

GANANCIAS DE EFICIENCIA *VERSUS* COSTES DE TRANSACCIÓN DE LOS MERCADOS DE AGUA*

YOLANDA MARTÍNEZ MARTÍNEZ
Universidad de Zaragoza

RENAN-ULRICH GOETZ
Universidad de Gerona

La introducción de los mercados de agua se ha 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. No obstante, la efectividad e incluso la viabilidad de los mercados de agua está limitada por factores de diverso tipo que contribuyen al incremento de los costes derivados de su posible implantación. El objetivo de este estudio es mostrar, mediante la simulación de un mercado de agua, la influencia que las diferencias en la productividad de las explotaciones participantes tienen sobre tales ganancias en presencia de costes de transacción. Se mostrará que tales diferencias determinan la viabilidad de los mercados de agua y se calcula el nivel de heterogeneidad mínimo que compensa los costes generados con el sistema de mercado en el caso específico de una zona de regadío del valle medio del Ebro.

Palabras clave: mercados de agua, heterogeneidad, costes de transacción, ganancias de eficiencia.

Clasificación JEL: Q12, Q25.

En los últimos años se ha desarrollado notablemente la literatura dedicada a identificar y evaluar los efectos económicos de los diferentes métodos de gestión de los recursos hídricos en la agricultura, centrando la atención en las políticas basadas en la demanda de dichos recursos. En el ámbito español, los aspectos más estudiados se han concretado en los efectos de las políticas de modernización del regadío, en las políticas tarifarias y en la introducción de mercados de agua.

El interés por este último tipo de organizaciones se centra en la mejora de la eficiencia económica que tal mecanismo puede introducir en situaciones de escasez

(*) Esta investigación ha sido financiada por el Ministerio de Educación y Ciencia a través de los proyectos AGL2001-23333-C02-01 y AGL2004-00964. Los autores desean agradecer los comentarios del ponente y los revisores anónimos, que han permitido una mejora cualitativa de la versión final del documento.

del recurso, que es el contexto habitual en la mayoría de las zonas de regadío de la agricultura española. El método actual con el que se asignan los derechos de propiedad es de tipo proporcional, lo cual significa que los usuarios poseen un mismo porcentaje de recursos por hectárea sobre un volumen fijo. En esta situación, si los beneficios derivados del uso del agua son distintos para cada usuario, tal sistema de asignación resulta ineficiente, tal como ha indicado Randall (1981), y una asignación basada en el mercado puede asegurar las ofertas de agua para los más rentables económicamente sin necesidad de desarrollar nuevas infraestructuras de oferta que resultan costosas financiera y ambientalmente [Hearne y Easter (1997)].

En general, los mercados de agua pueden definirse como las instituciones que posibilitan la cesión voluntaria de los derechos sobre el agua por parte de los titulares de los mismos a otro usuario a cambio de una compensación económica. Estos intercambios pueden concretarse en diversas formas, a través de traspasos temporales (también llamados mercados *spot*) o permanentes, tanto del derecho de uso como del propio recurso. Este trabajo se centra en el mercado de agua introducido en España a través de la Ley de Aguas de 1999 que optó por limitar las transacciones a la compra-venta de agua y no de los derechos sobre ella¹.

No obstante para que este tipo de organizaciones sea eficiente, han de darse ciertas condiciones como la correcta definición de la propiedad sobre los derechos, la existencia de reglas claras y de infraestructuras que permitan el intercambio, y una situación de competencia perfecta entre vendedores y compradores que raramente se da en la realidad. Los fallos provocados por el incumplimiento de estas condiciones elevan los costes derivados de los mercados, y pueden llegar a eliminar sus ventajas económicas.

En consecuencia, las ganancias derivadas del sistema de mercado están relacionadas no solamente con la escasez del recurso sino también con el nivel de costes de funcionamiento que implica el mercado y con la diferente rentabilidad económica del uso del agua de las explotaciones agrarias (o actividades) que se desarrollen en la región donde opera el mercado, cuestión no considerada suficientemente hasta ahora en la literatura sobre mercados de agua. Esta diferencia en la rentabilidad es ciertamente la que genera en último término el incentivo económico del agricultor y por tanto su interés por vender o comprar agua. En efecto, como muestra Garrido (1998 y 2000), las ganancias de los mercados para compradores y vendedores son mayores en aquellas zonas en las que las diferencias entre los valores marginales del agua de los usuarios son más acentuadas.

La literatura cuenta con numerosos trabajos empíricos que muestran la posibilidad de mejoras económicas y también sociales para los agricultores que participan en estos mercados, que son especialmente elevadas cuando las disponibilidades de

(1) Esta novedad fue introducida por la Ley de Aguas aprobada en 1999 (Ley 46/1999 de 13 de diciembre, art. 61 bis) que modificó la Ley de Aguas de 1999 (Ley 19/1985 de 2 de agosto, BOE 14-XII-1999). Sin embargo, 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).

agua son reducidas, permitiendo así reducir el impacto económico de las situaciones de escasez [Miller (1996)]. En el caso concreto de los mercados al contado o *spot* conviene destacar entre otros los estudios de Houston y Whittlesey (1986), Dinar y Letey (1991), Weinberg *et al.* (1993) y Brennan y Scoccimarro (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 Garrido (2000), Arriaza y Gómez-Limón (2000) y Calatrava (2002), en zonas de riego del valle del Guadalquivir, y el de Martínez y Gómez-Limón (2004) en el valle del Duero.

Resulta sin embargo difícil predecir qué efectos tendrá la introducción de un sistema de mercado en un área, ya que las condiciones físicas, institucionales y técnicas que determinan las ganancias son muy variables de unas regiones a otras. Por esta razón el uso de modelos de mercados puede ser un primer paso para simular y evaluar la viabilidad de los mismos tal y como han sugerido Dinar *et al.* (1998). La evaluación puede resultar útil para reflejar las ventajas e inconvenientes de la puesta en marcha de esta forma de asignación de los recursos.

En este contexto, el objetivo de este estudio es mostrar, mediante la simulación de un mercado, la influencia que las diferencias entre las explotaciones participantes (heterogeneidad) tienen sobre las ganancias de eficiencia derivadas del intercambio de agua en presencia de costes de transacción. Se mostrará que tales diferencias determinan la viabilidad de los mercados de agua. De este modo, la contribución de este trabajo se concreta en el cálculo empírico del nivel de heterogeneidad mínimo que compensa los costes generados con el sistema de mercado en el caso específico de una zona de regadío del valle medio del Ebro. Para ello se analiza un sistema de intercambios de agua en el marco actual de derechos de uso proporcionales, y se construye un modelo matemático de equilibrio parcial con el que se representa el comportamiento de los agricultores o explotaciones del área de estudio basado en la maximización del beneficio económico. Los agricultores deciden su uso de agua (o su intercambio) en función del beneficio neto que ésta genera en sus explotaciones.

1. MERCADOS DE AGUA, COSTES DE TRANSACCIÓN Y HETEROGENEIDAD

Como se ha apuntado en el apartado anterior, la efectividad e incluso la viabilidad de los mercados de agua está limitada por factores de diverso tipo y han sido expuestos por numerosos autores: Colby (1990) se refiere a aspectos institucionales, entre los que se incluyen la definición de los derechos de propiedad sobre el agua, la posibilidad de ponerse de acuerdo compradores y vendedores, y también factores culturales; Hearne y Easter (1997) se refieren también a la posibilidad física de intercambio de agua y a la necesidad de legalizar y asegurar las transacciones. Todos estos elementos implican una elevación de los costes de implantación o transacción, y por tanto el efecto de los mismos es crítico para la eficacia y viabilidad de los mercados.

Dada la disparidad de factores que influyen sobre los costes que comportan los mercados de agua, la cuantificación de éstos varía de unas zonas a otras. Easter *et al.* (1998) señalan un nivel medio de costes en Chile de 0,069 \$/m³, mientras que Archibald y Renwick (1998) identifican dos tipos de costes de transacción en

California: costes inducidos por la administración, que incluirían los costes de localización de compradores y vendedores y el de negociación, que han oscilado entre 0,014 \$/m³ y 0,041 \$/m³ según los años, y los costes políticamente inducidos que pueden incluir costes para compensar las externalidades causadas por los intercambios de agua, y que han cuantificado en un rango de 0,044-0,152 \$/m³. En la cuenca del Duero, Martínez y Gómez-Limón (2004) han valorado estos costes en 0,01 €/m³ considerando que las transacciones se producen únicamente entre zonas en las que las actuales infraestructuras de transporte lo hacen posible. Garrido (1998) señala que unos costes de transacción que excedan entre el 8 y el 12 por ciento del precio de mercado eliminan las ganancias derivadas del mercado.

Como ya se ha indicado, además de los costes de transacción, otro factor determinante de la eficacia de los mercados de agua se encuentra en las diferencias en la rentabilidad económica de las actividades que intercambian el agua. Las ventas de agua del sector agrario a otros sectores más rentables pueden suponer elevadas ganancias para los vendedores del recurso, si bien el efecto sobre la región puede ser negativo debido a la caída en la actividad de la zona y la consiguiente pérdida de empleo, cuestión ampliamente documentada en la experiencia de California y Colorado. Si los mercados tienen lugar dentro del sector agrario el efecto puede ser también positivo pero más limitado, como indican Arriaza y Gómez-Limón (2000), que han evaluado los resultados en una misma comunidad de regantes del valle del Guadalquivir. En general cabe esperar que cuanto mayor sea la región en la que se dan los intercambios, mayor será el efecto positivo sobre los beneficios y el empleo. En cualquier caso, las ganancias económicas de los mercados serán también mayores cuanto mayores sean las diferencias en la rentabilidad de las explotaciones que concurren en el mercado.

Una diferencia importante con respecto a los modelos utilizados en los estudios mencionados consiste en la modelización de la heterogeneidad. En la mayoría de los trabajos que han simulado mercados de agua en España 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*. En esta línea cabe destacar los trabajos de Arriaza *et al.* (2002) que utilizan una función de utilidad con un único atributo (beneficio), y de 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, considerando tres objetivos de gestión (maximización del margen bruto total, minimización del riesgo y minimización de la mano de obra total utilizada). Los trabajos de Garrido (2000) y Calatrava y Garrido (2001) emplean un modelo de maximización del beneficio basado en la programación matemática positiva con explotaciones tipo para el valle medio del Guadalquivir.

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.). Todos estos factores son los que determi-

nan en último término las decisiones sobre las superficies dedicadas a los distintos cultivos y por tanto la rentabilidad obtenida en cada explotación por el uso del agua. 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 (2005)² para estudiar el distinto potencial productivo y contaminante de los suelos de la región de estudio para el caso del maíz³. Esta variación en la productividad (medida en toneladas por hectárea), se encuentra entre un 7 y un 30 por ciento 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)]⁴.

A diferencia de otros enfoques, y dado que el objetivo del presente estudio consiste en calcular el nivel de heterogeneidad que hace viable la introducción del mercado en una zona concreta, 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 por ciento), con el fin de abarcar un conjunto más amplio de situaciones posibles. De esta forma se trata de comprobar que cuanto más heterogénea es la región tantos más beneficios ocasiona la solución de mercado. Además se mostrará que si las explotaciones no son lo suficientemente heterogéneas, los costes de transacción pueden anular las ganancias generadas por el sistema de intercambios de agua. Así, si se miden las ganancias de eficiencia derivadas de los intercambios de agua (en euros), se puede calcular el grado mínimo de heterogeneidad para que el mercado de agua suponga beneficios netos en una región. Los costes de transacción por su parte, aunque son muy variables, dependen del volumen de intercambios que se produzcan, que en lógica serán mayores cuanto mayores sean las diferencias en la productividad.

Otra diferencia importante del modelo empleado con respecto al de otros trabajos reside en la especificación 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. Así, la mayoría de los trabajos de modelización de la agricultura 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 a partir del simulador de cultivos EPIC [*Environmental Policy Integrate Climate*, Mitchell *et al.* (1998)], calibrado para los cultivos más importantes de la zona de estudio.

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

(3) 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)].

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

2. ZONA DE ESTUDIO

En este apartado se describen los rasgos generales de la zona de estudio, así como las prácticas de gestión del agua más usuales⁵. Estas prácticas se han establecido mediante encuestas a las Comunidades de Regantes del área y la supervisión del Departamento de Suelos y Riegos del Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón.

La superficie estudiada comprende dieciséis municipios de las comarcas de Hoya de Huesca y Monegros (Huesca), con una extensión de 67.841 hectáreas (ha), de las que 45.898 son tierras de regadío. El número de explotaciones agrarias de la zona es de 1.768, el 60 por ciento de las cuales tiene un tamaño de unas 20 ha.

La gestión del agua en la agricultura española depende fundamentalmente de dos tipos de organizaciones: los Organismos de Cuenca o Confederaciones Hidrográficas, como organismos gestores en las cuencas intercomunitarias, y las Comunidades de Regantes, como gestoras de los polígonos de riego. La distribución del agua de uso agrario hacia las explotaciones se lleva a cabo a través de la red de canales principales y secundarios. Esta red es gestionada por los diferentes organismos en función del territorio en el que se localice la infraestructura de distribución.

En el caso del sistema de regadío de Monegros, Riegos del Alto Aragón es el organismo encargado de la asignación del agua a las Comunidades de Regantes de la zona. Estas Comunidades de Regantes disponen de una dotación bruta de agua 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 bruta normal suministrada en cabecera oscila entre 6.000 y 9.000 m³/ha, en función de la disponibilidad de agua existente cada año. Las características climáticas de la región provocan problemas de disponibilidad algunos años de sequía, como 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 menos agua (riego deficitario). Si se tiene en cuenta que el valor marginal del agua no es idéntico en todas las explotaciones, entonces este procedimiento de distribución del agua resulta claramente ineficiente. En este entorno el sistema de mercado puede alcanzar una eficiencia económica mayor también en contexto de incertidumbre respecto a la disponibilidad de agua, tal como muestran los resultados obtenidos por Calatrava (2002) en la cuenca del Guadalquivir.

3. EL MODELO Y SU ESPECIFICACIÓN

El sistema de gestión descrito hasta aquí se comparará con la introducción de un mercado de agua, con el objeto de comprobar la mejora en la eficiencia que

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

este último sistema produce, y la influencia que las diferencias en la productividad de las explotaciones tienen sobre las ganancias de eficiencia medidas como el incremento de los beneficios por hectárea.

Seguidamente se plantea el modelo con el que se analiza la conducta de un productor o empresa productora que participa en el mercado de agua. En la formulación matemática del problema de asignación de agua entre los usuarios mediante un mercado de agua se asume un comportamiento del productor maximizador del beneficio de la explotación, como hace la mayoría de los trabajos empíricos existentes [excepciones son las de Arriaza *et al.* (2002) y Martínez y Gómez-Limón (2004), que utilizan la metodología multiatributo].

El beneficio neto del agricultor, en la explotación i -ésima, $i = 1, \dots, I$, se calcula como la diferencia entre los ingresos y los costes derivados de la producción de los j cultivos $j = 1, \dots, J$, de acuerdo con el siguiente problema:

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

$$\text{sujeto a } \sum_{j=1}^J w_{ij} \leq D_i; w_{ij} \geq 0; n_{ij} \geq 0; \quad w_{ij}, n_{ij}, h_{ij} \in Y_i, \quad [2]$$

donde el parámetro 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 superficie (en hectáreas) ocupada por el cultivo j . 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. La función $\pi_i(D_i)$ recoge el valor máximo del problema definido en [1]-[2], es decir los beneficios netos en función de la dotación D_i (en m³/ha) inicialmente asignada al agricultor y los demás parámetros del problema [1].

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, al precio de mercado de agua. Por lo tanto el valor máximo de la función π_i no depende sólo de la dotación inicial sino de la cantidad de agua comprada o vendida, es decir $\pi_i(D_i)$ se convierte en $\pi_i(D_i + m_i)$, donde m_i es la nueva variable de decisión introducida, y D_i es un parámetro. El agricultor i que participa en un mercado de agua paga c^1 €/m³ por el agua asignada (dotación D_i) y p_m €/m³ por el agua que vende o compra en el mercado. Es decir el agricultor tiene que distinguir entre dos precios fijados exógenamente, el precio administrativo del agua, c^1 , y el precio de mercado, p_m . En este contexto el agricultor se enfrenta al siguiente problema de decisión:

$$\pi_i(D_i + m_i) - p_m m_i \quad [3]$$

s.a:

$$-m_i \leq D_i \quad \forall i; \quad (\text{ventas menores que dotación}) \quad [4]$$

La función objetivo [3] expresa el beneficio neto del agricultor derivado de la producción, menos los gastos resultado de la compra de agua ($m_i > 0$), o bien más los ingresos resultado de la venta del agua sobrante en el caso de un vendedor ($m_i < 0$). La función lagrangiana L^i del problema definido en [3] y [4] es:

$$L^i = \pi_i(D_i + m_i) - p_m m_i + \mu_i(D_i + m_i) \quad [5]$$

Las condiciones de primer orden de este problema son:

$$L_{m_i}^i = \pi_i' - p_m + \mu_i = 0 \quad [6]$$

$$L_{\mu_i}^i = D_i + m_i \geq 0; \quad \mu_i L_{\mu_i}^i = \mu_i(D_i + m_i) = 0; \quad \mu_i \geq 0. \quad [7]$$

La condición [6] muestra, 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 del mercado de agua. Si el agricultor vende toda su agua, el precio sombra de la restricción [4] $\mu_i > 0$, recoge la diferencia entre los beneficios marginales del agua utilizada y el precio del mercado de agua.

Para el agricultor individual el precio p_m es un dato. Sin embargo para el conjunto de los agricultores el precio p_m no es un dato, sino que depende de la oferta y demanda de los agricultores en su conjunto. Sabiendo que la asignación del agua a través de un mercado es la más eficiente, la determinación endógena del precio del agua está vinculada al resultado de la maximización de los beneficios netos del conjunto de los agricultores, π^m , sujeto a dos restricciones⁶. Por tanto, para el conjunto de agricultores tenemos el siguiente problema de decisión:

$$\pi^m = \max_{m_i} \sum_i^I \pi_i(D_i + m_i) \quad [8]$$

s.a:

$$\sum_{i=1}^I m_i = 0 \quad (\text{vaciamiento del mercado}) \quad [9]$$

$$-m_i \leq D_i \quad \forall i; \quad (\text{ventas menores que dotación}) \quad [10]$$

(6) Esta afirmación no es del todo correcta si el número I de agricultores que participan en el mercado es pequeño. Un número reducido de agricultores favorece un comportamiento estratégico de todos o algunos participantes en el mercado. Así, el precio de mercado no será necesariamente un

La función objetivo [8] expresa la suma de los beneficios netos de las I explotaciones derivados de la producción, cada una usando el agua ($D_i + m_i$). El equilibrio del mercado es el resultado de la maximización de la función [8] sujeta a dos restricciones. 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, y la segunda implica que las ventas de agua del agricultor en el mercado serán menores, o como mucho iguales a su dotación inicial.

La función lagrangiana, L , del problema que se acaba de definir es:

$$L = \sum_i^I \pi_i (D_i + m_i) - \lambda \sum_i^I m_i + \sum_i^I \mu_i (D_i + m_i), \quad [11]$$

donde λ y μ_i son los multiplicadores de Lagrange asociados a las restricciones [9] y [10], respectivamente. Las condiciones de primer orden de este problema son:

$$L_{m_i} = \pi_i - \lambda + \mu_i = 0 \quad [12]$$

$$L_\lambda = -\sum_i^I m_i = 0; \quad \lambda L_\lambda = -\lambda \sum_i^I m_i = 0; \quad \lambda \geq 0 \quad [13]$$

$$L_{\mu_i} = D_i + m_i \geq 0; \quad \mu_i L_{\mu_i} = \mu_i (D_i + m_i) = 0; \quad \mu_i \geq 0. \quad [14]$$

La expresión [12] 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 sombra de la restricción $\sum_{i=1}^I m_i = 0$. El multiplicador de Lagrange λ refleja cuánto aumentaría la suma de los beneficios netos de todos los agricultores si éstos hubieran intercambiado un metro cúbico de agua adicional. En otras palabras, el valor de λ recoge la disponibilidad marginal a pagar por un metro cúbico de agua adicional. De esta manera se puede deducir que el valor de λ del problema [8]-[10] proporciona el precio de equilibrio de mercado de agua p_m del problema [3]-[4]. Si el agricultor vende toda su agua el precio sombra de la restricción ($-m_i \leq D_i$, $\mu_i > 0$), recogerá la diferencia entre los beneficios marginales del agua utilizada y el precio de equilibrio del mercado de agua. Si el agricultor es comprador, la ecuación [10] nunca restringe y por lo tanto μ_i es siempre 0. En esta situación la condición [12] requiere de nuevo que los beneficios netos marginales del agua utilizada sean en el óptimo iguales al precio de equilibrio del mercado. Las condiciones [13] y [14] establecen el vaciamiento del mercado y el cumplimiento de la restricción de la venta máxima, respectivamente. Los precios sombra asociados tienen que cumplir las condiciones de complementariedad de Kuhn-Tucker.

dato para todos los agricultores. Sin embargo, en nuestro análisis suponemos que ningún agricultor actúa estratégicamente. Para asegurar que esta suposición sea válida haría falta un número suficientemente grande de agricultores. No obstante, como los resultados de nuestro análisis no son sensibles al número de participantes hemos limitado nuestro trabajo empírico en el próximo apartado a 5 participantes.

Por su parte, la cuantía de la dotación inicial de agua D_i tiene un papel relevante en la respuesta de los individuos al mercado y por tanto en sus efectos. Si la dotación inicial D_i es menor que el nivel óptimo de uso de agua $D_i + m_i^*$, entonces la posibilidad de comprar agua puede ser una oportunidad para el agricultor de aumentar su beneficio neto. Por el contrario, si el valor del beneficio marginal del agua es inferior al precio de mercado del agua, entonces el agricultor venderá toda o parte de su dotación.

4. APLICACIÓN AL CASO DE ESTUDIO DEL VALLE DEL EBRO

En la zona analizada en este trabajo, los seis cultivos más importantes son maíz, trigo, cebada, alfalfa, girasol y arroz. Sus funciones de rendimiento $y_{ij}(\cdot)$ se han estimado mediante datos generados con el simulador agronómico EPIC, calibrado para las características de la zona [Martínez (2002)]. Estas seis funciones de rendimiento estimadas \hat{y}_{ij} , cuyos coeficientes se muestran en el cuadro 1 para una explotación de referencia \hat{i} , dependen de los *inputs* productivos agua de riego y fertilizante nitrogenado, y siguen la siguiente especificación polinomial:

$$\hat{y}_{ij} = a_{ij,0} + a_{ij,1}w_{ij} + a_{ij,2}w_{ij}^2 + a_{ij,3}n_{ij} + a_{ij,4}n_{ij}^2. \quad [15]$$

Cuadro 1: FUNCIONES DE PRODUCCIÓN ESTIMADAS PARA CADA CULTIVO PARA LA EXPLOTACIÓN \hat{i} *

Funciones de producción ⁷						
Variable	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*10 ⁻⁴ (-31,87)	-0,102*10 ⁻⁴ (-4,8)	-0,566*10 ⁻⁵ (-5,39)	-0,181*10 ⁻⁴ (-7,14)	-0,162*10 ⁻⁴ (-34,14)	-0,221*10 ⁻⁵ (-7,19)
n ²	-0,336*10 ⁻⁴ (-13,17)	-0,515*10 ⁻⁴ (-8,13)	-0,560*10 ⁻⁴ (-9,74)	-0,838*10 ⁻⁴ (-2,78)	-0,344*10 ⁻³ (-4,54)	-0,641*10 ⁻⁴ (-6,64)
R ² _{aj}	0,84	0,83	0,85	0,93	0,96	0,75

* Entre paréntesis los valores de los t-ratios.

Fuente: Elaboración propia.

(7) La elección de una especificación de la función de rendimiento donde la constante no es negativa hubiera significado una pérdida de ajuste; es decir, un R² más bajo. En otras palabras un mejor ajuste para la parte inferior de la función pero un peor ajuste para el resto de la función. Esto es muy poco deseable porque nos interesa especialmente la parte de la función donde el agua o el nitrógeno no tienden a cero.

Las funciones de producción de las cinco explotaciones que se consideran en nuestro análisis se generan multiplicando la función de rendimiento [15] por un coeficiente que reduce o aumenta su productividad respecto a la situación media de referencia \hat{t} . Consideramos que las cinco explotaciones tienen idéntica extensión de terreno pero sus funciones de producción difieren de forma proporcional a un coeficiente fijado exógenamente. La empresa $i = 1$ tiene la productividad promedio definida para la explotación de referencia \hat{t} . Las empresas $i = 2$, $i = 3$ son menos productivas que $i = 1$, mientras que $i = 4$, $i = 5$ son más productivas. En base a la elección del coeficiente se generan seis escenarios distintos de heterogeneidad, de forma que las explotaciones tendrán diferencias en su productividad entre sí de un 5, 10, 15, 20, 25 y 30 por ciento. Es decir, la heterogeneidad del 5 por ciento significa que la producción de las explotaciones menos productivas ($i = 2$, $i = 3$) alcanzan el 95 y 90 por ciento de la explotación $i = 1$, respectivamente, y la de las explotaciones más productivas ($i = 4$, $i = 5$) alcanzan respectivamente el 105 y 110 por ciento de la producción de la explotación media ($i = 1$).

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]-[2] 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 $\pi_i(D_i)$ ⁸.

A partir de la función de valor $\pi_i(D_i)$, como valor máximo del problema [1]-[2], es posible estimar una función que relacione el beneficio neto obtenido por cada explotación con la cantidad de agua asignada inicialmente, tal como hace Calatrava (2002), variando los valores de D_i . Con este objeto se ha parametrizado la variable D_i , simulando valores entre 0 y 15.000 m³/ha para todas las explotaciones y diferentes grados de heterogeneidad. Para la estimación de esta función se ha utilizado el método de mínimos cuadrados ordinarios disponible en el paquete estadístico SHAZAM [White (2002)]. La función estimada de beneficios netos finales $\hat{\pi}_i(D_i)$ utilizada en el modelo sigue una especificación cuadrática que depende únicamente de la cantidad de agua asignada:

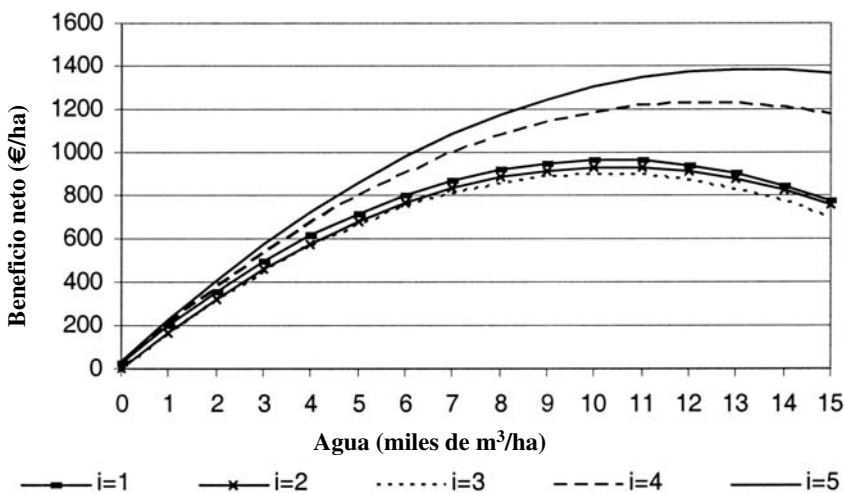
$$\hat{\pi}_i(D_i) = b_{i,0} + b_{i,1}D_i + b_{i,2}D_i^2. \quad [16]$$

En el cuadro A1 del anexo se presentan los resultados de la estimación de las funciones de beneficio neto máximo $\hat{\pi}_i$ 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 máximo siguen una especificación cuadrática y dependen únicamente de la cantidad de agua total utilizada en la explotación. En el gráfico 1 se han representado las funciones de beneficio máximo de las cinco explotaciones en la situación inicial sin mercado con un 5 por ciento de heterogeneidad. La forma cóncava de estas funciones indica la existencia de una dotación máxima a partir de la cual los beneficios de las explotaciones decrecen. Como es lógico, las explotaciones de menor productividad (empresas 2 y 3) muestran menores niveles de beneficio neto para todas las

(8) Por ejemplo, para el precio administrativo del agua, parámetro c^1 , utilizamos el precio actual de 0,012 €/m³, y para el precio del fertilizante nitrogenado, parámetro c^2 , un precio de 0,9 €/kg.

dotaciones iniciales de agua. Las explotaciones más productivas (4 y 5) obtienen beneficios mayores para cualquier nivel de dotación y la diferencia de beneficio con respecto a las menos productivas aumenta conforme lo hace la dotación inicial de agua, lo cual se debe a que un aumento en la dotación permite a éstas variar la superficie dedicada a los cultivos más intensivos en el uso de agua, que son los más rentables económicamente.

Gráfico 1: FUNCIONES DE BENEFICIO NETO MÁXIMO ESTIMADAS CON HETEROGENEIDAD 5%



Fuente: Elaboración propia.

5. SIMULACIÓN DE UN MERCADO Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Una vez determinada la función $\hat{\pi}_i(D_i)$ se introduce la variable de decisión m_i y se sustituye $\pi_i(D_i + m_i)$ por $\hat{\pi}_i(D_i + m_i)$ en el problema [3]-[4] para determinar la solución de un mercado de agua. El equilibrio del mercado es la solución simultánea de las ecuaciones [8] [9] y [10] con los cinco participantes, $i = 1, \dots, 5$. El problema fue programado con GAMS y resuelto numéricamente. Mediante el análisis de los diferentes escenarios de disponibilidad de agua por hectárea (de 0 a 15.000 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. Este análisis se repite además para cada uno de los seis escenarios de heterogeneidad considerados.

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 me-

nores son los niveles de dotación, es decir, la influencia de la escasez de agua en el volumen de agua transferida es claramente positiva. Tal conclusión es coherente con los resultados de otros trabajos empíricos sobre mercados de agua [Calatrava (2002) y Martínez y Gómez-Limón (2004)], en los que se destaca que la actividad de los mercados es mayor en situación de escasez de agua. Ello tiene una explicación clara, ya que ante situaciones de mayor escasez (menores dotaciones) el agricultor debe modificar su estrategia de cultivos, reduciendo la superficie dedicada a aquellos 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. El mercado de agua, en situaciones de escasez, permite una reasignación de los recursos hacia las explotaciones donde genera mayor beneficio, es decir, hacia las zonas regables con mayores potencialidades productivas. En cuanto al efecto de la heterogeneidad sobre la cantidad total de intercambios, es notable su repercusión positiva, y por tanto cabe esperar que cuanto mayores son las diferencias entre las explotaciones mayor será el volumen intercambiado.

Cuadro 2: PORCENTAJE DEL AGUA INTERCAMBIADA EN EL MERCADO
SOBRE EL TOTAL DE AGUA ASIGNADA

Dotación (miles m ³ /ha)	Heterogeneidad entre explotaciones					
	5%	10%	15%	20%	25%	30%
0	0	0	0	0	0	0
1	32,40	40,00	40,85	41,48	60,00	61,00
2	17,55	19,62	22,50	25,09	39,90	44,55
3	12,54	12,60	13,90	15,97	27,69	30,57
4	8,31	9,00	10,12	12,70	21,59	23,58
5	7,17	8,50	9,24	10,74	17,93	19,38
6	6,99	8,41	8,64	9,76	15,64	16,59
7	6,94	7,61	8,30	8,86	14,48	14,86
8	6,41	7,60	8,18	8,56	13,62	13,90
9	6,00	7,59	8,03	8,31	12,94	13,15
10	5,67	7,57	7,86	8,12	12,40	12,55
11	5,40	7,54	7,65	7,95	11,96	12,06
12	5,17	7,51	7,64	7,81	11,59	11,65
13	4,98	7,47	7,38	7,69	11,28	11,31
14	4,82	7,42	7,36	7,65	11,01	11,01
15	4,68	7,03	7,28	7,59	10,78	10,92

Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento en situación de mercado que se ha descrito se confirma en los resultados sobre la posición compradora o vendedora de las explotaciones, reflejada en el cuadro 3. Las transferencias de agua se producirán hacia las explotaciones con mayor productividad, es decir, hacia aquellas que obtengan mayores incrementos de beneficio por el aumento de agua. Hay que señalar que las explotaciones más productivas ($i = 4$ y $i = 5$), es decir, aquellas con mejores condiciones edafo-climáticas, son compradoras en todas las situaciones de heterogeneidad y para todas las dotaciones iniciales, mientras que las menos productivas ($i = 2$ y $i = 3$) son vendedoras netas de agua. El comportamiento vendedor de la explotación $i = 1$ varía en los modelos con heterogeneidad superior al 10 por ciento. En estos casos, con dotaciones inferiores a 6.000 m³/ha y con el precio de mercado superior a 0,88 €/m³, la explotación $i = 1$ vende parte de su dotación, mientras que para cantidades de agua superiores y a precios inferiores, cambia su comportamiento a comprador. Únicamente con heterogeneidad del 25 y 30 por ciento y con dotaciones de 1.000 m³/ha, las explotaciones vendedoras intercambian la totalidad de sus recursos.

Cuadro 3: POSICIÓN COMPRADORA O VENDEDORA DE LAS EXPLOTACIONES SEGÚN LA HETEROGENEIDAD

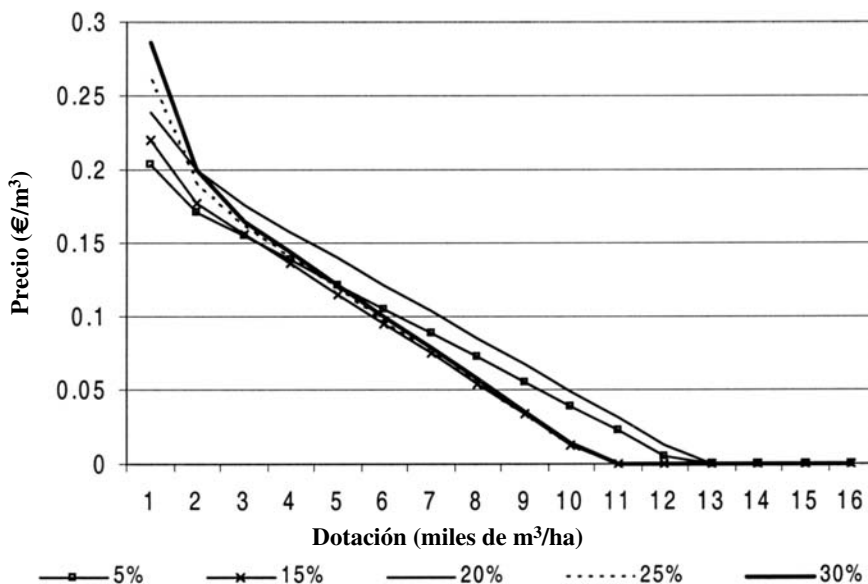
Heterogeneidad	Explotación				
	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$
5%	V	V	V	C	C
10%	V	V	V	C	C
15%	C	V	V	C	C
20%	C	V	V	C	C
25%	C	V	V	C	C
30%	C	V	V	C	C

Fuente: Elaboración propia.

El gráfico 2 muestra los precios de equilibrio en el mercado de agua obtenidos para distintos niveles de dotación de agua por hectárea para todos los casos de heterogeneidad. Los resultados muestran que estos precios resultan muy similares en todas las simulaciones. Como puede apreciarse, la escasez de agua provoca un aumento de la utilidad marginal del recurso, 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 en los casos de heterogeneidad 25 y 30%, lo cual implica que los incentivos para el intercambio disminuyen cuanto mayores son las dotaciones de agua. Para los niveles de dotación más usuales en la zona (entre 6.000 y 9.000 m³/ha) los precios de mercado resultantes se encuentran en un intervalo entre 0,03 y 0,12 €/m³. En cualquier caso, los precios del agua no superan los 29 céntimos de euro por metro cúbico. Este resultado se aproxima notablemente a los resultados obtenidos en otros trabajos que simularon

mercados de agua, en los que se obtienen precios máximos en torno a los 30 céntimos de euro por metro cúbico en las cuencas del Guadalquivir y Duero [Calatrava (2002) y Martínez y Gómez-Limón (2004)].

Gráfico 2: PRECIOS DE EQUILIBRIO DEL AGUA EN EL MERCADO



Fuente: Elaboración propia.

El cuadro 4 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 situaciones eventuales 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 se 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.

Para examinar la influencia de los costes de transacción en la viabilidad del mercado que se ha simulado, se han calculado dichos costes considerando tres nive-

les de coste por unidad de agua intercambiada en el mercado. Los costes de transacción en el caso de los mercados de agua incluyen componentes muy distintos y difíciles de medir empíricamente. McCann y Easter (2002) enumeran hasta nueve factores que afectan a la magnitud de estos costes. Algunos de estos factores, tales como la necesidad de infraestructuras y tecnología que posibilite los intercambios, pueden hacer verosímil una estructura de costes compuesta por una parte fija y otra variable, y esta última con tendencia a decrecer conforme aumentan los intercambios.

Cuadro 4: GANANCIAS DE BENEFICIOS NETOS EN SITUACIÓN DE MERCADO (€/ha)

Dotación (miles m ³ /ha)	Heterogeneidad					
	5%	10%	15%	20%	25%	30%
0	0	0	0	0	0	0
1	19,8	43,21	44,64	59,43	146,55	196,29
3	25,92	29,56	46,42	63,43	191,16	237,94
5	33,60	31,92	42,13	89,93	238,99	276,66
7	42,32	50,28	124,21	183,91	298,92	329,81
9	52,07	84,6	166,26	236,80	370,94	397,39
11	62,86	135,05	126,98	216,08	455,05	479,41
13	74,69	187,84	201,45	273,67	551,26	575,86

Fuente: Elaboración propia.

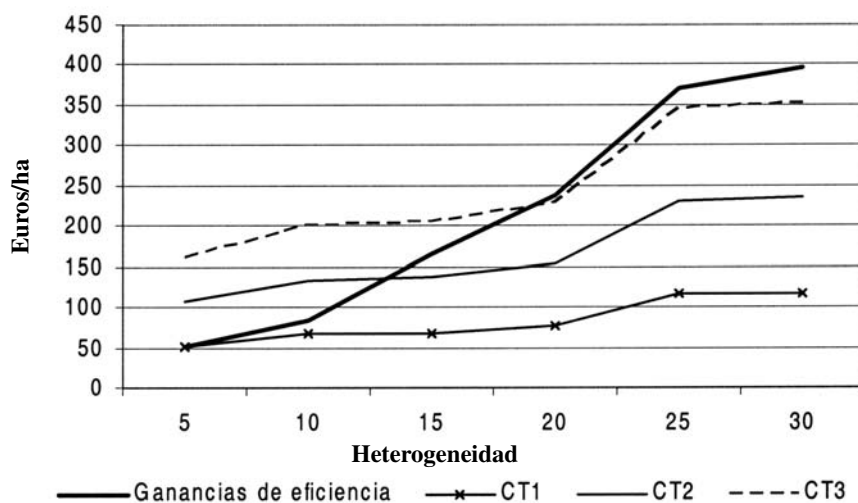
No obstante, otro tipo de factores podría conducir a que los costes crecieran conforme aumentan las transacciones. Tal es el caso por ejemplo de los efectos externos o medioambientales de los mercados y de los efectos sobre otros usuarios del agua no agrarios. Incluso si se piensa en los costes derivados de la incertidumbre podrían considerarse estructuras más complejas. A falta de evidencia empírica al respecto, hemos optado por la postura común en la literatura y hemos considerado tres niveles de coste fijo tomados de otros trabajos. Los costes considerados son 0,02 y 0,04 €/m³, próximos a los identificados por Archibald y Renwick (1998) en California, y 0,06 €/m³, que es el señalado por Easter *et al.* (1998) en Chile.

El efecto de la introducción de los costes de transacción puede observarse en el gráfico 3, en el que se han representado las ganancias de eficiencia calculadas como la diferencia entre los beneficios netos agregados de las situaciones con y sin mercado y los tres niveles de costes considerados en que se incurre como consecuencia de la introducción del mercado.

En el caso de un coste unitario de 0,02 euros (curva CT1), las ganancias son superiores a los costes para todos los niveles de heterogeneidad considerados. Cuando el coste se sitúa en 0,04 euros (curva CT2) las ganancias como consecuencia del mercado superan a los costes a partir del 15 por ciento de heterogeneidad, mientras que para un coste de 0,06 euros (curva CT3) la heterogeneidad debe superar el 20 por ciento para que el mercado sea viable económicamente. A

la vista de estos resultados conviene resaltar la importancia de valorar adecuadamente los posibles costes de transacción y la heterogeneidad de las explotaciones existentes antes de introducir un sistema de mercado, puesto que tales costes pueden limitar e incluso eliminar las ganancias que el mercado genera en ausencia de los mismos. Sin embargo, esta valoración no es sencilla y las estimaciones existentes se basan en las experiencias con los mercados de agua ya existentes, y por ello los trabajos que simulan el funcionamiento de los mercados de agua en zonas con problemas de escasez evitan la valoración de los costes de transacción.

Gráfico 3: GANANCIAS Y COSTES DE TRANSACCIÓN DEL MERCADO



Fuente: Elaboración propia.

6. CONCLUSIONES

Las características climáticas de algunas zonas de regadío en las que se dan problemas temporales de disponibilidad de agua tienen efectos económicos adversos que pueden mitigarse a través de mecanismos de intercambio de agua entre los usuarios. Si además se tiene en cuenta que las explotaciones de una región no tienen una productividad idéntica, entonces el actual sistema administrativo de distribución del agua puede resultar ineficiente.

La literatura muestra que los mercados de agua son instrumentos que bien diseñados y correctamente supervisados aportan mayor flexibilidad a la gestión de los recursos hídricos, estabilizan su disponibilidad e incrementan la eficiencia en el uso, mitigando los efectos adversos de los periodos de sequía [Calatrava (2002)]. No obstante, las ganancias derivadas del sistema de mercado están relacionadas no solo con la escasez del recurso sino también con el nivel de costes de transac-

ción que implica el mercado y con la diferente productividad existente entre las explotaciones agrarias que se desarrollen en la región donde opera el mercado.

En este trabajo se ha simulado la introducción de un mercado de agua en una zona de regadío del valle medio del Ebro (Flumen-Monegros), con el objeto de analizar la influencia que las diferencias en la productividad de las explotaciones tienen sobre las ganancias de eficiencia derivadas del mercado en presencia de costes de transacción, estableciendo el grado de heterogeneidad mínimo para que se den intercambios que aumenten los beneficios netos agregados.

En cuanto al caso de estudio desarrollado, también conviene destacar el interés que el modelo teórico planteado tiene para una mejor comprensión y modelización de los mercados de agua en el mundo real. Así, de los resultados obtenidos del mismo se pueden obtener igualmente conclusiones de interés práctico. A este respecto, y pese a las limitaciones inherentes al enfoque empleado, cabe destacar el importante potencial que tienen los mercados para aumentar la eficiencia económica especialmente en períodos de escasez. Los resultados obtenidos confirman que este impacto positivo desde la perspectiva económica se debe a las transferencias que se realizan preferentemente hacia aquellos productores con mayores ventajas competitivas (condiciones edafo-climáticas más favorables).

Los resultados corroboran las conclusiones obtenidas en los trabajos empíricos llevados a cabo en otras regiones españolas, en el sentido de que los volúmenes intercambiados son mayores en situación de escasez de agua más aguda y cuanto mayor es la heterogeneidad de las explotaciones, produciéndose siempre hacia las explotaciones más productivas. Los beneficios netos en contexto de mercado son mayores que en la situación actual de reparto, ya que la posibilidad de intercambiar agua permite solucionar las eventuales situaciones de escasez sin necesidad de abandonar o disminuir las superficies de cultivo. La consideración de los costes de transacción ha permitido establecer el efecto determinante que éstos pueden tener en la viabilidad económica de los mercados. Así, se ha podido comprobar que la estimación adecuada de estos costes es necesaria para no ponderar en exceso las ganancias de eficiencia derivadas de los mercados. En último término, tal como se ha indicado a lo largo de este trabajo, se trata de una cuestión empírica, difícil de establecer *a priori*.

Pese a la evidencia de ganancias potenciales del mercado que se manifiestan en los trabajos empíricos, la realidad de la agricultura española muestra un uso limitado de los intercambios como estrategia frente a las situaciones de sequía, lo cual puede deberse a distintas causas. Una razón puede encontrarse precisamente en que no existe suficiente incentivo económico para que las intercambios superen los costes de transacción existentes, si bien una causa determinante puede encontrarse en la reticencia de los propios agricultores a considerar el agua como un bien mercantil en lugar de un bien de propiedad común, tal como han puesto de manifiesto Garrido *et al.* (1996) y Ortiz y Ceña (2001). Martínez y Gómez-Limón (2004) apuntan en este sentido que la posibilidad contemplada en la legislación de que las concesiones sean retiradas a aquellos regantes que no las usen de forma provechosa puede incrementar la incertidumbre, y por tanto los costes de transacción de los intercambios. La creación de agencias de transacción o bancos de agua puede ser una medida eficaz para la reducción de estos costes.

ANEXO 1

Cuadro A1: FUNCIONES DE BENEFICIO NETO MÁXIMO DE LAS EXPLOTACIONES SEGÚN HETEROGENEIDAD*

Heterogeneidad	Constante	Término lineal	Término cuadrático	R ² ajustado	
5%	i=1	26,7 (2,36)	1,81 (13,14)	-0,881*10 ⁻³ (-3,04)	0,9713
	i=2	-3,3 (-3,32)	1,79 (12,90)	-0,859*10 ⁻³ (-2,85)	0,9737
	i=3	-8,2 (-7,35)	1,77 (12,65)	-0,869*10 ⁻³ (-2,91)	0,9758
	i=4	16,7 (7,54)	1,95 (18,53)	-0,788*10 ⁻³ (-5,5)	0,9534
	i=5	31,9 (3,45)	2,03 (33,2)	-0,767*10 ⁻³ (-7,2)	0,9375
10%	i=1	26,7 (2,36)	1,81 (13,14)	-0,881*10 ⁻³ (-3,04)	0,9713
	i=2	-8,21 (-7,35)	1,77 (12,65)	-0,869*10 ⁻³ (-2,91)	0,9758
	i=3	-329,6 (-11,27)	2,33 (15,61)	-1,139*10 ⁻³ (-3,24)	0,9877
	i=4	31,9 (3,45)	2,03 (33,2)	-0,767*10 ⁻³ (-7,2)	0,9375
	i=5	96,4 (6,73)	1,90 (35,81)	-0,648*10 ⁻³ (-17,85)	0,9348
15%	i=1	26,7 (2,36)	1,81 (13,14)	-0,881*10 ⁻³ (-3,04)	0,9713
	i=2	-10,4 (-3,17)	1,92 (13,57)	-1,182*10 ⁻³ (-4,09)	0,9866
	i=3	-11,5 (-3,59)	1,75 (12,16)	-1,238*10 ⁻³ (-4,26)	0,9890
	i=4	50,9 (4,51)	2,08 (18,98)	-1,008*10 ⁻³ (-5,26)	0,9459
	i=5	105,1 (9,26)	2,23 (20,09)	-0,905*10 ⁻³ (-4,67)	0,9381
20%	i=1	26,7 (2,36)	1,81 (13,14)	-0,881*10 ⁻³ (-3,04)	0,9713
	i=2	-329,6 (-11,27)	2,33 (15,61)	-1,139*10 ⁻³ (-3,24)	0,9877
	i=3	-470,0 (-7,43)	2,34 (18,29)	-1,152*10 ⁻³ (-6,07)	0,9910
	i=4	96,4 (6,73)	1,90 (35,81)	-0,648*10 ⁻³ (-17,85)	0,9348
	i=5	133,1 (11,10)	2,38 (20,67)	-0,908*10 ⁻³ (-4,55)	0,9330
25%	i=1	26,7 (2,36)	1,81 (13,14)	-0,881*10 ⁻³ (-3,04)	0,9713
	i=2	-12,1 (-10,48)	1,77 (19,57)	-1,359*10 ⁻³ (-3,46)	0,9926
	i=3	-168,9 (-9,39)	1,66 (19,60)	-1,276*10 ⁻³ (-4,38)	0,9945
	i=4	85,7 (7,49)	2,19 (19,66)	-0,959*10 ⁻³ (-4,93)	0,9804
	i=5	149,5 (11,04)	2,61 (20,90)	-1,016*10 ⁻³ (-4,89)	0,9742
30%	i=1	26,7 (2,36)	1,81 (13,14)	-0,881*10 ⁻³ (-3,04)	0,9713
	i=2	-11,5 (-3,59)	1,75 (12,16)	-1,238*10 ⁻³ (-4,26)	0,9890
	i=3	-211,9 (-10,32)	1,70 (14,43)	-1,408*10 ⁻³ (-5,32)	0,9968
	i=4	105,1 (9,26)	2,23 (20,09)	-0,905*10 ⁻³ (-4,67)	0,9381
	i=5	165,7 (10,40)	2,86 (20,36)	-1,155*10 ⁻³ (-5,02)	0,9394

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

Fuente: Elaboración propia.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Archibald, S.O. y M.E. Renwick (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 J.A. Gómez-Limón (2000): "Mercados locales de agua de riego. Una modelización multicriterio en el Bajo Guadalquivir", *Revista de estudios agrosociales y pesqueros* n.º 188, págs. 135-164.
- Arriaza, M., J.A. Gómez-Limón y M. Upton (2002): "Local water markets for irrigation in southern Spain: a multicriteria approach", *The Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, n.º 46, vol. 1, págs. 21-43.
- Bjornlund, H. (2003): "Farmer participation in markets for temporary and permanent water in southeastern Australia", *Agricultural Water Management*, n.º 63, págs. 57-76.
- Bjornlund, H. y J. McKay (1998): "Factors affecting water prices in a rural water market: a South Australian experience", *Water Resources Research*, n.º 34, vol. 6, págs. 1563-1570.
- Brennan, D. y M. Scoccimarro (1998): "Signes in defining property rights to improve Australian water markets", *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, n.º 43, vol. 1, págs. 69-89.
- Brooke, A., D. Kendrick, A. Meerans y R. Raman (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 A. Garrido (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*, n.º 1, vol. 2, págs. 153-173.
- Colby, B.G. (1990): "Transaction costs and efficiency in western water allocation", *American Journal of Agricultural Economics*, n.º 72, vol. 5, págs. 1184-1192.
- Dinar, A. y J. Letey (1991): "Agricultural water marketing, allocative efficiency and drainage reduction", *Journal of Environmental Economics and Management*, n.º 20, págs. 210-223.
- Dinar, A., R. Howitt, S.J. Rassenti y V.L. Smith (1998): "Development of water market using experimental economics", en Easter, K.W., M. Rosegrant y A. Dinar (eds.), *Markets for water: potential and performance*, Kluwer Academic Publishers, New York.
- Diputación General de Aragón (2000): "Evolución de la fertilidad del suelo y respuesta de los cultivos", *Informaciones técnicas*, n.º 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*, n.º 100, Servicio de Formación y Extensión Agraria. DGA, Zaragoza.
- Diputación General de Aragón (2001b): "Resultados de los ensayos de maíz y girasol", *Informaciones técnicas*, n.º 108, Servicio de Formación y Extensión Agraria. DGA, Zaragoza.
- Easter, K.W., M.W. Rosegrant y A. Dinar (eds.) (1998): *Markets for water: potential and performance*, Kluwer Academic Publishers, New York.
- Garrido, A., E. Iglesias y M. Blanco (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*, n.º 178, págs. 139-162.
- Garrido, A. (1998): "An economic analysis of water markets within the Spanish agricultural sector: Can they provide substantial benefits?", en Easter, K.W., M. Rosegrant y A. Dinar (eds.), *Markets for water: potential and performance*, Kluwer Academic Publishers, New York.

- Garrido, A. (2000): "A mathematical programming model applied to the study of water markets within the Spanish agricultural sector", *Annals of Operations Research*, n.º 94, págs. 105-123.
- Hearne, R.R. y K.W. Easter (1997): "The economic and financial gains from water markets in Chile", *Agricultural Economics*, n.º 15, págs. 187-199.
- Helfand, G. y B. House (1995): "Regulating nonpoint source pollution under heterogeneous conditions", *American Journal of Agricultural Economics*, n.º 77, págs. 1024-1032.
- Houston, J.E. y N.K. Whittlesey (1986): "Modelling agricultural water markets for hydro-power production in the Pacific Northwest", *Western Journal of Agricultural Economics*, n.º 11, págs. 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 J. Albiac (2005): "Nitrate pollution control under soil heterogeneity", *Land Use Policy* (en prensa).
- Martínez, Y. y J.A. Gómez-Limón (2004): "Simulación multicriterio de mercados de agua de regadío: el caso de la cuenca del Duero", *Revista de estudios agrosociales y pesqueros*, n.º 202, págs. 101-134.
- McCann, L. y K.W. Easter (2002): "Estimating the transaction costs of alternative mechanisms for water exchange and allocation", artículo presentado en *Agadir Water Resources Management Conference 2002*.
- 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, págs. 185-211.
- Mitchell, G., R. Griggs, V. Benson y J. Williams (1998): "The EPIC model: environmental policy integrated climate", Texas Agricultural Experiment Station, Temple.
- 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.
- Ortiz, D. y F. Ceña (2001): "Los derechos de propiedad en la agricultura de regadío: su situación frente al cambio institucional", *Revista Española de Economía Agraria y Recursos Naturales*, n.º 1 (2), págs. 93-110.
- Randall, A. (1981): "Property entitlements and pricing policies for a maturing water economy", *The Australian Journal of Agricultural Economics*, n.º 25, págs. 195-220.
- 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., C.L. Kling y J. Wilen (1993): "Water markets and water quality", *American Journal of Agricultural Economics*, n.º 75, págs. 278-291.
- White, K.J. (2002): SHAZAM - For Windows, Version 9.0.

Fecha de recepción del original: febrero, 2004

Versión final: noviembre, 2005

ABSTRACT

On theoretical grounds, water markets provide the most efficient solution to balance water supply and demand, but imply transaction costs, resulting from technical or political barriers, which may substantially reduce the resulting gains from establishing a water market. The aim of this paper is to show, by simulating a water market, the influence on market gains of the productivity difference between firms in the presence of transaction costs. We will show that such differences determine the efficiency of water markets and we calculate the minimum heterogeneity level that compensates the costs generated by markets in the specific case of an irrigation area located in Ebro Valley.

Key words: water markets, heterogeneity, transaction costs, efficiency gains.

JEL classification: Q12, Q25.