

Cambio climático y mercados de agua

José Albiac^a, Mohamed Taber Kabil^b, Ariel Dinar^c y Javier Tapia^d

^aCentro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria (CITA-DGA),

^bInternational Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)

y ^cSchool of Public Policy (University of California at Riverside)

1. Introducción

El cambio climático supone un gran desafío para la sostenibilidad de la producción agraria en las regiones áridas y semiáridas. El IPCC (2014) señala que en estas regiones se producirán aumentos de temperatura y evapotranspiración, reducciones de precipitación y almacenamiento de nieve, modificaciones en el régimen de las precipitaciones, y una mayor frecuencia e intensidad de los fenómenos climáticos extremos. Los impactos de estos cambios serán muy negativos para los recursos hídricos, el sector primario y los ecosistemas. También aumentarán las enfermedades, malas hierbas y plagas, que afectarán negativamente a los procesos biológicos que subyacen a la productividad de plantas y animales (USDA, 2012).

Las proyecciones sobre recursos hídricos que se obtienen acoplando modelos globales hidrológicos y de cultivos indican que las pérdidas de cosechas pueden alcanzar entre el 20 y 30 por cien a final de siglo, dependiendo de los efectos de fertilización del CO₂ (Elliot *et al.*, 2014). Estas pérdidas pueden aumentar por la escasez de agua en las regiones áridas y semiáridas, forzando la conversión de tierras de regadío a secano. Hacer frente al desafío del cambio climático para la agricultura no va a ser fácil, porque también será necesario abastecer la creciente demanda mundial de alimentos y hacer frente a la competencia entre usos del agua productivos y medioambientales.

El sur de Europa es una de las zonas áridas y semiáridas en las que se prevé una mayor vulnerabilidad del regadío al cambio climático (IPCC, 2014), con reducciones importantes de recursos superficiales y subterráneos junto a aumentos en la frecuencia y duración de las sequías (Lehner *et al.*, 2006). Además, la reducción de la disponibilidad y garantía de suministro del recurso irá unida al incremento de las necesidades de riego para cubrir la mayor evapotranspiración de los cultivos (Jiménez *et al.*, 2014).

Como respuesta institucional a estas adversas perspectivas, la adaptación del regadío al cambio climático en el sur de Europa se ha convertido en uno de los principales objetivos de la normativa europea sobre agua y agricultura, como la Directiva Marco del Agua (EC, 2009) y la política de desarrollo rural 2014-2020 (EC, 2013). La evaluación de la eficiencia de las políticas de adaptación actuales y de la necesidad de políticas adicionales, tiene gran interés para los responsables políticos, los grupos de usuarios y organizaciones sociales. Tal evaluación requiere de estudios que provean un mejor conocimiento sobre los impactos económicos y ambientales del cambio climático sobre el regadío, y las alternativas de política de adaptación y sus costes.

En este capítulo se lleva a cabo una evaluación empírica de los mercados de agua como instrumento de política de adaptación al cambio climático, comparando los mercados de agua con otros instrumentos de adaptación como son la modernización de regadíos, los precios del agua, y la actual política institucional basada en la cooperación de los usuarios. Para ello se ha construido un modelo hidroeconómico de la cuenca del Júcar, que permite comparar directamente los mercados de agua con los otros instrumentos de adaptación en función de sus efectos económicos y medioambientales. En la siguiente sección se consideran los mercados de agua en relación a las políticas de cambio climático, y en las secciones 3 y 4 se comparan los mercados de agua con los otros instrumentos de adaptación. Finalmente la sección 5 presenta las conclusiones.

2. Los mercados de agua en el contexto de las políticas de adaptación al cambio climático

Existen numerosos estudios en la literatura que analizan la adaptación del regadío a los impactos del cambio climático. Se pueden distinguir dos enfoques metodológicos en estos estudios. El primer enfoque se basa en los modelos de programación matemática, tanto de equilibrio parcial como de equilibrio general. Estos modelos integran componentes biofísicos (hidrología, agronomía, medio ambiente) y componentes económicos para simular las decisiones de los agricultores sobre planes de cultivo, tecnologías y utilización de insumos bajo diferentes escenarios de clima, reparto de agua, políticas y marco institucional (Hurd *et al.*, 2004; Connor *et al.*, 2009; Medellín *et al.*, 2013; Qureshi *et al.*, 2013; Calzadilla *et al.*, 2014).

El segundo enfoque metodológico se basa en la modelización econométrica, que representa la respuesta de los agricultores a las condiciones climáticas observadas bajo las actuales políticas e instituciones. Estos modelos se utilizan para evaluar los efectos de los cambios en las variables climáticas y de políticas (Zilberman *et al.*, 2002; Mendelsohn y Dinar, 2003; Wheeler *et al.*, 2013; Connor *et al.*, 2014).

En relación a las alternativas de adaptación examinadas, estas se dividen entre propuestas de adaptación a nivel de explotación y propuestas a través de políticas más generales para incentivar la adaptación del sector. Las opciones de adaptación a nivel de parcela consisten en mejoras de la programación de riegos, cambios en el patrón de cultivos, utilización de nuevas variedades, y mejoras en la eficiencia de riego. Varios estudios señalan que las opciones a nivel de parcela consiguen buenos resultados de adaptación (Howden *et al.*, 2007; Reidsma *et al.*, 2010; Leclere *et al.*, 2013).

Otra corriente de la literatura señala la necesidad de reconsiderar las actuales instituciones y políticas de agua, y establecer políticas más generales basadas en incentivos que consigan fomentar la adaptación (Zilberman *et al.*, 2002; Booker *et al.*, 2005). Las dos políticas basadas en incentivos que están recibiendo una mayor consideración en la literatura para la adaptación del regadío al cambio climático son los mercados de agua y las subvenciones públicas a la inversión en sistemas eficientes de riego. Una tercera política que recibe consideración, sobre todo en Europa como consecuencia de la Directiva Marco del Agua, es la reforma e incremento de los precios del agua.

Los *mercados de agua* se consideran una buena opción para reducir los impactos del cambio climático (Calatrava y Garrido, 2005; Gómez-Limón y Martínez, 2006; Gohar y Ward, 2010). Además, numerosos estudios consideran que los intercambios de agua son una manera flexible y eficiente de afrontar el problema del reparto de agua, ya que aumentan la eficiencia del uso de agua, evitan el desarrollo de nuevas y costosas fuentes de suministro, y consiguen ganancias de bienestar reasignando agua hacia cultivos de mayor rentabilidad (Easter *et al.*, 1998; Connor *et al.*, 2009; Howitt *et al.*, 2012). Las condiciones necesarias para que los mercados de agua funcionen bien son numerosas: una adecuada definición de los derechos de agua, un marco legal e institucional para los intercambios, inversiones en infraestructuras de transporte, y bajos costes de transacción (Dinar *et al.*, 1997).

Los beneficios de los mercados de agua durante la última sequía en la cuenca del Murray-Darling en Australia, que es el mercado más activo del mundo,

superan los mil millones de dólares australianos por año (Connor y Kaczan, 2013). El potencial que tendrían los mercados de agua en California durante la actual sequía ha sido estimado en unos beneficios de mil cuatrocientos millones de dólares americanos por año en el Central Valley (Medellin *et al.*, 2013).

Pero los mercados de agua se enfrentan al desafío de los efectos a terceros que pueden producir, en especial los medioambientales (véase el capítulo 7 de este libro). Los mercados de agua reducen los caudales de los ríos porque se venden derechos de agua que anteriormente no se utilizaban, pero también porque se generan ganancias de eficiencia de riego en parcela que reducen los retornos de riego a cuenca. La razón es que se transfiere agua de zonas de baja eficiencia poco rentables a zonas de alta eficiencia más rentables, por lo que caen los retornos de riego, fenómeno que se ha observado tanto en Estados Unidos (Howe *et al.*, 1986) como en Australia (Qureshi *et al.*, 2010). Otro efecto preocupante y que es paralelo a los intercambios cuando hay escasez hídrica, es el enorme aumento de extracciones de agua subterránea, como se observa en la última sequía en la cuenca del Murray-Darling.¹ Connor y Kaczan (2013) señalan que la opción que se ha tomado en Australia ha sido ignorar los impactos medioambientales en el diseño de los mercados de agua. La consideración de estos impactos requeriría mercados basados en el consumo de agua y no en las extracciones, lo que elevaría los costes de transacción disminuyendo los beneficios de los intercambios.

Los impactos medioambientales reducen los beneficios de los intercambios de agua y aumentan los costes de adaptación. Para contrarrestar los impactos medioambientales de la caída de caudales en la cuenca del Murray-Darling por los mercados de agua, se han puesto en marcha proyectos públicos que financian tanto inversiones de modernización de infraestructuras como compras de agua para el medio ambiente, con un elevado coste de varios miles de millones de dólares australianos (Wheeler *et al.*, 2014).

Otro problema para el funcionamiento de los mercados de agua es el entramado institucional. A pesar de los enormes beneficios que tendrían los mercados de agua en California, la implementación de estas ganancias potenciales del mercado no es tarea fácil, como muestra el fracaso del banco de agua en la sequía de 2009. Los intercambios del recurso fueron bloqueados por las zonas exportadoras de agua con el apoyo de las organizaciones medioambien-

¹ Blewett (2012) señala que las extracciones de agua subterránea entre 2002 y 2007 fueron siete veces superiores a las extracciones autorizadas, con un vaciado de acuíferos en el Murray-Darling cercano a los 100.000 hm³.

tales (Medellín *et al.*, 2013). El logro de esta solución requiere de un contexto institucional más fuerte que facilite la cooperación de los grupos de interés.

Culp *et al.* (2014) señalan que el problema de los fallos del mercado de agua por los efectos a terceros conduce a decisiones muy politizadas en el oeste de EEUU. La consecuencia es un desarrollo muy limitado de los mercados de agua (Hanak, 2015). Esta cuestión de los costes de transacción ha sido examinada por Regnacq *et al.* (2016), y la evidencia empírica en California muestra la importancia de la distancia y los impedimentos institucionales en los intercambios de agua. Aunque una parte de los costes de transacción representa una protección justificada de los recursos respecto a terceros (en especial el medio ambiente), el resto de los costes de transacción podría reducirse para facilitar los intercambios.

Una segunda opción de adaptación al cambio climático es la *modernización de regadíos*. La política de subvención pública de las inversiones en sistemas eficientes de riego también se considera una alternativa importante de adaptación al cambio climático (Cazcarro *et al.*, 2011; Graveline *et al.*, 2014; Varela *et al.*, 2014). La modernización de regadíos reduce el abandono de tierras, facilita la adopción de patrones de cultivo rentables y diversificados, y mejora los rendimientos, con lo que aumenta el valor de la producción agraria (Perry *et al.*, 2014). Otras ventajas de la modernización son que impulsa el desarrollo rural y mejora la calidad del agua (Playán *et al.*, 2013).

Pero en contra de la visión ingenua de las soluciones puramente tecnológicas, la modernización aumenta el consumo de agua del regadío, al aumentar la evapotranspiración y caer los retornos de riego. Estos retornos contribuyen al mantenimiento de los caudales en los cursos de agua y a la recarga de los acuíferos, que pueden ser esenciales para los usos económicos y ambientales en los tramos receptores de la cuenca (Huffaker, 2008; Perry *et al.*, 2014). La caída de retornos por la modernización de regadíos se conoce desde hace tiempo (Huffaker y Whittlesey, 2000), pero solo recientemente se está considerando en el debate de políticas de agua en Europa.

Finalmente, la tercera opción de adaptación al cambio climático es la política de *precios del agua*. La política de precios en el regadío para ahorrar agua ha sido objeto de debate desde los años noventa. Una corriente de la literatura señala que los precios del agua en el regadío tienen un efecto muy limitado en el ahorro del recurso (Moore, 1991; Sheierling *et al.*, 2004), y otros autores indican que los mercados de agua son mucho más efectivos que los precios para el reparto de agua en el regadío (Cornish *et al.*, 2004).

En España existe una amplia literatura sobre los precios del agua en regadío, de la que cabe destacar Berbel y Gómez-Limón (2000), Gómez-Limón y Riesgo (2004), Iglesias *et al.* (2004), Mejías *et al.* (2004) y Calatrava *et al.* (2011). Los resultados muestran que el instrumento precios genera unas pérdidas elevadas de renta entre los agricultores, como señalan Garrido y Calatrava (2009) en su revisión de estos trabajos.

En este trabajo se aporta una comparación directa entre las tres opciones de adaptación al cambio climático señaladas: mercados de agua, modernización de regadíos y precios del agua. La contribución a la literatura consiste en la coherencia y consistencia de la comparación, ya que se utiliza un modelo hidroeconómico que integra la hidrología, las actividades económicas y los ecosistemas de la cuenca.

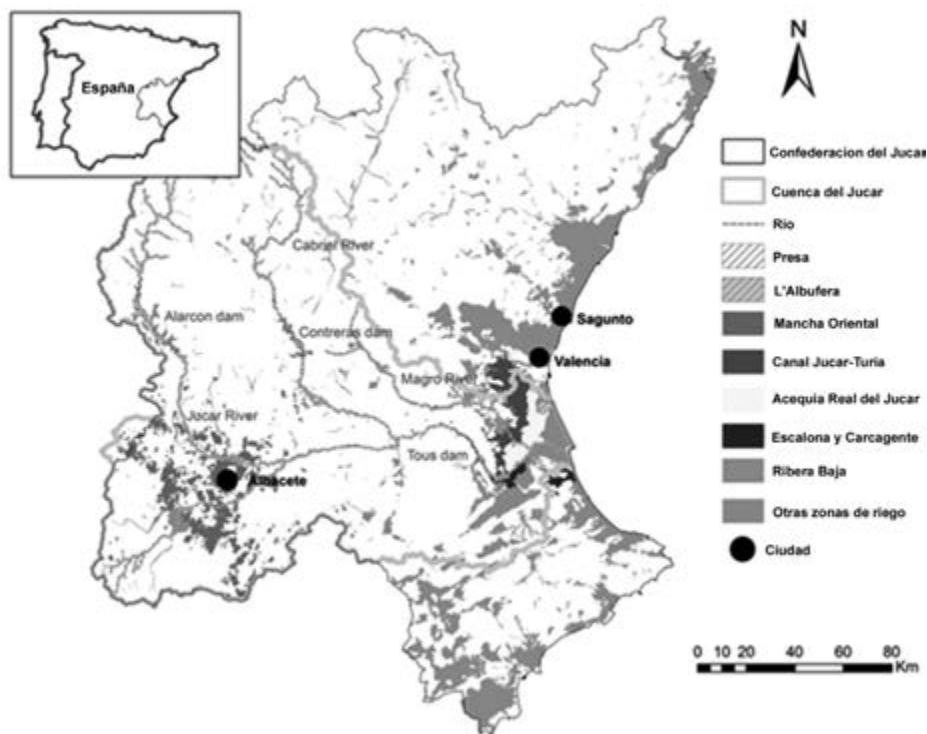
3. Evaluación de los mercados de agua ante la sequía y el cambio climático en la cuenca del Júcar

3.1. El modelo hidroeconómico de la cuenca del Júcar

El potencial de los mercados de agua como instrumento de política de adaptación a las sequías y al cambio climático se ha examinado mediante un modelo hidroeconómico de la cuenca del Júcar (Figura 1). El modelo se ha utilizado para comparar tres políticas de adaptación al cambio climático con la actual política institucional de la autoridad de cuenca basada en la cooperación de los usuarios en la asignación de agua. Las tres políticas de adaptación consideradas son mercados de agua, modernización de regadíos, y precios del agua.

La gestión sostenible de los recursos hídricos en zonas áridas y semiáridas no es una tarea fácil, como muestra la mala gestión generalizada de recursos hídricos en las principales cuencas del mundo. Por ello es necesario desarrollar metodologías que permitan un mejor conocimiento de los problemas de gestión de agua en un contexto de escasez, sequía y cambio climático. La modelización hidroeconómica integrada es una metodología que permite un análisis riguroso a escala de cuenca, orientando el diseño de políticas de gestión sostenible del agua. Esta metodología de modelización de las interacciones a nivel de cuenca se ha utilizado en varios estudios como los de Booker y Young (1994), McKinney *et al.* (1999), Cai *et al.* (2003), Booker *et al.* (2005), Pulido *et al.* (2008), Molinos *et al.* (2014) y Ward (2014).

Figura 1. Cuenca del Júcar



Fuente: Kabil *et al.* (2015a).

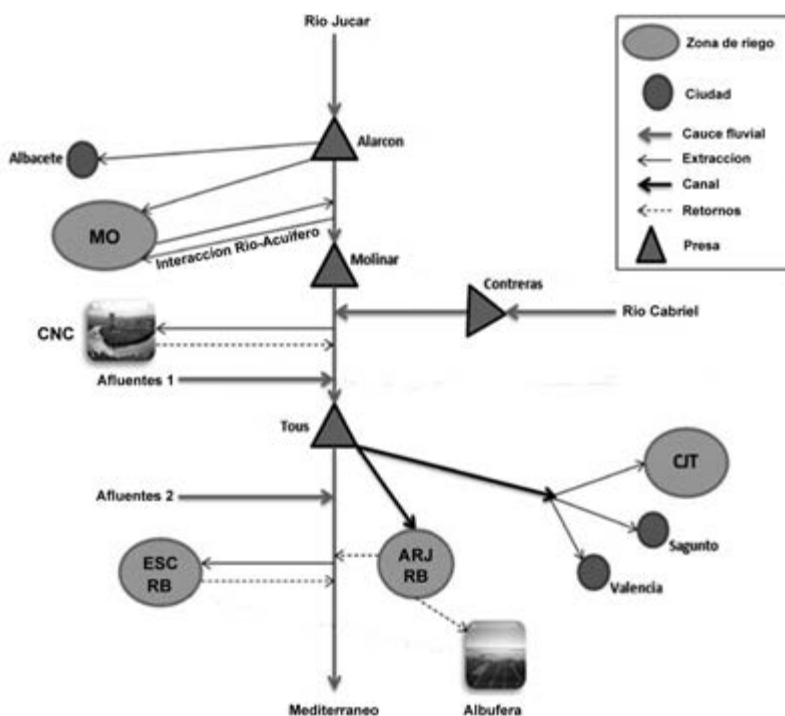
Siguiendo este enfoque, el modelo hidroeconómico de la cuenca del Júcar utilizado relaciona un componente hidrológico, un componente regional de las actividades económicas, y una componente medioambiental. El *componente hidrológico* es una forma reducida de la hidrología de la cuenca y está calibrado con las observaciones de asignación de agua en periodos normales y en periodos de sequía. El *componente de economía regional* incluye modelos de optimización detallados a escala de polígono de riego y modelos de excedente económico del uso urbano. El *componente medioambiental* estima los beneficios que aporta el medio ambiente a la sociedad.

La interacción entre los componentes del modelo permite realizar una evaluación fiable de los impactos de la escasez de agua y las sequías bajo las distintas alternativas de política de agua en relación a la asignación entre sectores, distribución espacial, decisiones sobre uso de la tierra, y beneficios y

costes privados y sociales del uso del agua. La Figura 2 muestra la red hidrológica de la cuenca del Júcar y la Figura 3 el esquema del modelo hidroeconómico de la cuenca.

Los detalles de la elaboración del modelo hidroeconómico del Júcar y de su utilización para la simulación de las políticas de adaptación se puede consultar en los trabajos de Kahil *et al.* (2015a, 2015b, 2016a y 2016b), que examinan los mercados de agua, la modernización de regadíos, los precios del agua, y la actual política institucional basada en la cooperación, respectivamente.

Figura 2. Red hidrológica de la cuenca del Júcar*



* MO: Mancha Oriental; ESC: Escalona-Carcagente; RB: Ribera Baja; ARJ: Acequia Real del Júcar; CJT: Canal Júcar-Turía.

Fuente: Kahil *et al.* (2015a).

Figura 3. Esquema de modelización



Fuente: Kabil *et al.* (2015a).

3.2. Mercados de agua versus política institucional

La Tabla 1 presenta los resultados de la comparación entre políticas bajo distintos escenarios de sequía. Los resultados de la política de mercados de agua muestran que los intercambios de agua aumentan conforme se intensifica la sequía, y alcanzan cerca del 20% de la disponibilidad de agua en sequía extrema (cf. Kabil *et al.*, 2015a). Los mercados de agua aumentan el consumo de agua en relación a la actual política institucional, ya que la evapotranspiración de los cultivos se incrementa con los mercados como se ha explicado en la sección 2, por lo que caen los retornos de riego y los caudales en cuenca. La consecuencia es que los caudales ecológicos y las entradas de agua a la Albufera (el principal ecosistema de la cuenca) son menores con mercados de agua que con la política institucional actual.

Los beneficios privados y sociales de los mercados de agua son similares a los beneficios que se obtienen bajo la actual política institucional, tanto en escenarios de sequía moderada como extrema. En sequía moderada los be-

beneficios sociales alcanzan los 483 millones de euros con mercados de agua y 484 millones con la política institucional, mientras que en sequía extrema los beneficios sociales alcanzan los 408 millones de euros con mercados de agua y 399 millones con la política institucional.

Este primer resultado para la cuenca del Júcar tiene una gran relevancia para el debate de los mercados de agua en España, porque muestra que tanto la política institucional como la de mercados de agua son buenos instrumentos para reducir los costes de las sequías, alcanzando unos beneficios privados y sociales similares. Dado que los mercados de agua maximizan los beneficios privados (solución Pareto-óptima), este resultado es clave porque demuestra que la política institucional alcanza casi los mismos beneficios privados que los mercados. La implicación es que no hay razón para sustituir el buen desempeño de la actual política institucional basada en la cooperación de los usuarios por mercados de agua.

El segundo resultado es que la política institucional supera a los mercados de agua en la protección del medio ambiente. El resultado es lógico ya que los mercados de agua optimizan los beneficios privados pero ignoran los beneficios medioambientales. En el Júcar se observa que los mercados conllevan una reducción de agua para el medio ambiente en comparación con el enfoque institucional, y provocan un cambio de régimen del ecosistema más rápido. La política institucional mantiene unos caudales ecológicos de 52 hm³ en sequía moderada y 34 hm³ en sequía extrema, mientras que los mercados reducen estos caudales a 50 hm³ en sequía moderada y 29 hm³ en sequía extrema. Por lo tanto, la actual política institucional tiene ventajas medioambientales respecto a los mercados de agua, que además son mayores cuanto más extrema es la sequía. Este segundo resultado tiene importancia cuando se planifica un futuro con cambio climático y demandas sociales de protección de los ecosistemas.

Tabla 1. Comparación de políticas institucional, mercados de agua y precios de agua

Escenario de sequía Tipo de política de agua	Año normal			Sequía moderada			Sequía extrema		
	Situación actual (cooperación institucional)	Cooperación institucional	Mercados de agua	Cooperación institucional	Mercados de agua	Precios de agua	Cooperación institucional	Mercados de agua	Precios de agua
Uso de agua (hm³)									
Polígonos de riego	1.030	908	908	683	683	683			
<i>Mancha Oriental</i>	399	359	363	304	316	316			
<i>Canal Júcar-Tiria</i>	155	132	150	107	146	146			
<i>Acequia Real del Júcar</i>	200	180	197	131	185	185			
<i>Escalona-Carragente</i>	33	30	32	18	31	31			
<i>Ribera Baja</i>	243	207	166	123	4	4			
Uso urbano	119	105	105	74	74	74			
Caudales ambientales (entradas a la Albufera)	60	52	50	34	29	29			
Beneficios privados y ambientales (millones de euros)									
Beneficios privados									
Polígonos de riego	190	171	175	136	148	148			
<i>Mancha Oriental</i>	80	72	72	61	62	62			
<i>Canal Júcar-Tiria</i>	45	40	42	36	39	39			
<i>Acequia Real del Júcar</i>	34	31	32	23	25	25			
<i>Escalona-Carragente</i>	7	7	7	4	5	5			
<i>Ribera Baja</i>	24	21	22	12	17	17			
Uso urbano	283	276	276	241	241	241			
Total	473	447	451	377	389	389			
Beneficios ambientales	75	37	32	22	19	19			
Beneficios sociales	548	484	483	399	408	408			

* Asignación de agua al regadío, uso urbano y medioambiente en millones de metros cúbicos (parte superior) y beneficios privados del regadío y uso urbano, y beneficios medioambientales en millones de euros (parte inferior).

Fuente: Kahil et al. (2016a).

3.3. Mercados de agua versus política de precios del agua

La política de mercados de agua también se ha comparado con la política de precios de agua que propugna la Comisión Europea (EC, 2012). El principal resultado empírico sobre los precios del agua es que los agricultores pierden entre la mitad de sus beneficios en sequía moderada y los dos tercios de sus beneficios en sequía extrema cuando se implementa la política de precios del agua en lugar de los mercados de agua o la política institucional actual. La Tabla 1 muestra que los agricultores pierden en el caso de una sequía moderada unos 80 millones de euros (diferencias de 175-93 con los mercados de agua y 171-93 con la política institucional), mientras que en una sequía extrema pierden casi 100 millones de euros (diferencias de 148-54 con los mercados de agua y 136-54 con la política institucional). Estas grandes pérdidas de los agricultores solo cabría compensarlas utilizando los ingresos conseguidos para mejorar sus infraestructuras de transporte o de tecnología de riego en parcela, de forma que se equilibrara el fuerte impacto negativo de las pérdidas.

Los costes de oportunidad de las políticas para los agricultores son las pérdidas de beneficio que soportan bajo cada política. La elección de una política que tenga un coste de oportunidad desproporcionado se encontrará con la oposición de los agricultores. El fracaso de una política que tenga costes desproporcionados es muy probable, sobre todo si existen otras políticas con un coste de oportunidad mucho menor. En este sentido, los costes de la política de precios del agua son muy elevados para los agricultores en comparación con las otras alternativas, con una caída de beneficios que casi alcanza el 70 % en sequía extrema cuando se implementa la política de precios en lugar de las otras políticas. Estos costes para los agricultores solo podrían justificarse reinvertiendo los ingresos de la subida de precios en la zona. La oposición a la política de precios sería especialmente fuerte en Ribera Baja, Mancha Oriental y Acequia Real del Júcar, ya que los costes de oportunidad de optar por dicha política son especialmente perjudiciales para los agricultores. Este resultado empírico muestra que las opciones de mercados de agua o política institucional son mucho menos conflictivas y, por lo tanto, más factibles que los precios del agua.

3.4. Mercados de agua versus política de modernización

La comparación entre los mercados de agua y la política de subvenciones públicas a la modernización de regadíos se examina en el trabajo de Kahil *et al.* (2015b). En este trabajo se utiliza un modelo de programación estocástica discreta que analiza la adaptación al cambio climático en los cuatro polígonos de riego más importantes del bajo Júcar: Acequia Real del Júcar, Escalona-Carcagente, Ribera Baja, y Canal Júcar-Turia. El modelo se utiliza para evaluar la respuesta de los agricultores al cambio climático y a las políticas de mercados de agua y de modernización de regadíos, en términos de decisiones a largo plazo sobre las inversiones de capital en tipos de cultivo y sistemas de riego, y decisiones a corto plazo sobre el riego de los cultivos.

Los resultados de los escenarios de adaptación al cambio climático recogen los impactos económicos, los cambios de uso de la tierra y de los sistemas de riego, el uso del agua y los caudales ambientales. Las pérdidas de beneficios de los agricultores por el cambio climático pueden reducirse sustancialmente mediante las políticas de mercados de agua o de subvenciones a la modernización. Estas políticas proporcionan incentivos a los agricultores para invertir en tipos de cultivo y sistemas de riego, reduciendo el abandono de tierras, cambiando el patrón de cultivos hacia otros más rentables, y aumentando el uso del agua, aunque el comportamiento de los agricultores es distinto en cada política.

En concreto, en el caso del Júcar, los beneficios privados de los mercados de agua superan en un 12 % a los beneficios de la modernización. La diferencia aumenta hasta el 22 % si se tienen en cuenta las subvenciones a la modernización, aunque los mercados de agua también conllevan costes de transacción y control que no se consideran en el trabajo. La cuestión de los costes de transacción de los mercados de agua es clave porque impide el desarrollo de los mercados, aunque la evidencia empírica es muy escasa. La evidencia que presentan Regnacq *et al.* (2016) demuestra que los costes de transacción impiden en la práctica el funcionamiento de los mercados de agua, y ello a pesar de las enormes ganancias potenciales señaladas por Medellín *et al.* (2013).

En cuanto a sus impactos ambientales, tanto los mercados de agua como la política de modernización de regadíos reducen los caudales en cuenca en relación al escenario base, si bien la modernización provoca una mayor reducción de caudales.

4. Medidas adicionales a las políticas de adaptación para proteger el medio ambiente

Los resultados empíricos obtenidos para la cuenca del Júcar muestran que los mercados de agua y la actual política institucional son políticas de adaptación a la sequía y el cambio climático mucho mejores que el incremento de los precios del agua. Además, los mercados de agua también son más eficientes que la política de subvenciones públicas a la modernización de regadíos. Pero ante las sequías y el cambio climático, el problema es que tanto los mercados de agua como la política institucional provocan una caída significativa de los caudales ecológicos.

El mantenimiento de los caudales ecológicos es un problema importante en la mayoría de las zonas áridas y semiáridas, en especial durante las sequías. Los responsables de la gestión se enfrentan a serios desafíos para asegurar los caudales ecológicos, no solo porque no tienen el control efectivo de las extracciones superficiales y subterráneas, sino también porque el componente de retornos de riego es aún más difícil de regular que las extracciones. Los ejemplos de estas dificultades de gestión incluyen cuencas en las que los esfuerzos de gestión del agua son muy sofisticados, como las cuencas del Júcar en España, Murray-Darling en Australia, o Central Valley en California.² En la cuenca del Júcar, los caudales ecológicos están fijados en el plan de cuenca, pero estos caudales son muy bajos e inferiores a 1 m³/s en desembocadura.

El modelo hidroeconómico de la cuenca del Júcar se ha utilizado para evaluar dos medidas de protección medioambiental, una asociada a la política de mercados de agua y la otra asociada a la política institucional. Los detalles de la medida asociada a los mercados de agua pueden consultarse en Kahil *et al.* (2015a), y los detalles de la medida asociada a la política institucional en Kahil *et al.* (2016b), donde se utiliza la teoría de juegos cooperativos.

La primera medida sigue el ejemplo de la cuenca del Murray-Darling, donde se ha implementado una costosa recuperación de agua para el medio ambiente, utilizando un programa de compras públicas de agua con una financiación de miles de millones de dólares australianos. Esta política puede denominarse *mercado de agua medioambiental*, y parece adecuada para conseguir los beneficios privados de los mercados de agua, y a la vez proteger los ecosistemas. La segunda medida es mejorar la cooperación de los grupos de

² En el Júcar, el cauce se secó durante la última sequía. En el Murray-Darling, el vaciado de acuíferos alcanzó los 104 km³ durante la última sequía (Blewett, 2012). En el Central Valley de California, el vaciado de acuíferos ha alcanzado los 180 km³ durante la actual sequía (UCCHM, 2014).

usuarios en el Júcar en el marco del actual enfoque institucional, incluyendo el medio ambiente como usuario de pleno derecho, y se puede denominar *política institucional sostenible*. Con ello se lograría aumentar los caudales ecológicos mediante la negociación de todos los grupos de «usuarios», tanto económicos como medioambientales.

Tanto la medida de mercado de agua medioambiental como la medida de política institucional sostenible logran aumentos importantes de beneficios medioambientales. Estas ganancias medioambientales suponen cerca de 230 millones de euros tanto en sequías moderadas como severas, con unos beneficios sociales en cuenca que alcanzan los 730 millones de euros en sequía moderada, y los 660 millones de euros en sequía extrema. Estos resultados se describen en detalle en Kahil *et al.* (2015a) para el mercado de agua medioambiental, y en Kahil *et al.* 2016b) para la política institucional sostenible.

5. Conclusiones

Las presiones sobre los recursos hídricos están aumentando en todo el mundo por el crecimiento de las actividades económicas y la población. Estas presiones agravan los problemas de escasez y calidad del agua, y provocan daños cada vez mayores sobre los ecosistemas acuáticos. El cambio climático también se está convirtiendo en un factor perturbador del ciclo del agua, contribuyendo al empeoramiento de la escasez de agua en las zonas áridas y semiáridas. El uso sostenible de los recursos hídricos para afrontar los problemas de escasez de agua, sequías y cambio climático requiere de una comprensión sólida de los procesos biofísicos, una evaluación acertada de los impactos, y de una mejora tanto de la gestión local por los grupos de usuarios como de la gobernanza por los responsables políticos. Una adecuada gestión y gobernanza es un desafío bastante complicado porque el agua provee distintos tipos de bienes y servicios, que pueden ser bienes privados, comunales o públicos.

Este capítulo presenta una evaluación empírica de los mercados de agua como instrumento de política de adaptación al cambio climático, comparándolo con otros instrumentos de adaptación como son la modernización de regadíos, los precios del agua, y la actual política institucional basada en la cooperación de los usuarios. El modelo hidroeconómico de la cuenca del Júcar utilizado compara directamente los mercados de agua con los otros instrumentos de adaptación en función de sus efectos económicos y medioambientales.

Los mercados de agua y los precios del agua son instrumentos económicos que funcionan bien cuando el agua es un bien privado, pero no tan bien cuando el agua es un bien comunal o un bien público. Estos instrumentos económicos pueden conseguir ganancias de eficiencia importantes en redes urbanas donde el agua es un bien privado, pero el carácter de bien comunal del agua de riego requiere de la acción colectiva, o bien convertir el agua de riego en un bien privado.

El enfoque de política de agua en España es institucional, y se fundamenta en la cooperación de los usuarios en las autoridades de cuenca para las decisiones de reparto de agua. Aunque la gestión del agua en España está lejos de ser perfecta, se observan casos de experiencias de éxito, como la reducción de extracciones en Mancha Oriental (Esteban y Albiac, 2011 y 2012). Este logro es notable porque no se ha conseguido en ningún otro gran acuífero del mundo.

En la evaluación de las políticas de adaptación al cambio climático con el modelo hidroeconómico del Júcar se obtienen varios resultados importantes. Los dos primeros resultados se refieren a la comparación entre el desempeño de los mercados de agua y el de la política institucional. El primer resultado es que tanto los mercados de agua como el actual enfoque institucional son buenos instrumentos de adaptación a las sequías y consiguen unos beneficios privados y sociales similares. Este resultado demuestra el buen desempeño de la actual política institucional que se acerca a la solución Pareto-óptima de los mercados de agua, que maximizan los beneficios privados. Un segundo resultado es que el actual enfoque institucional supone ventajas medioambientales respecto a los mercados de agua, al garantizar unos mayores caudales en cuenca para el sostenimiento de la Albufera y el resto de los ecosistemas acuáticos.

El tercer resultado pone de manifiesto las enormes pérdidas que para los agricultores supone la política de precios del agua frente a las otras políticas de adaptación. La Directiva Marco promueve los precios del agua como instrumento de gestión de la demanda, lo que plantea un desafío importante en España donde el regadío es el mayor uso del agua y está muy ligado a un amplio abanico de servicios medioambientales. La utilización de la política de precios en lugar de las políticas alternativas provoca unas pérdidas adicionales a los agricultores de 80 y 100 millones de euros en sequía moderada y extrema, lo que muestra el elevado coste de oportunidad que tiene esta política. Este resultado confirma los resultados obtenidos en estudios previos descritos en Garrido y Calatrava (2009). La ventaja que aporta este resultado en relación a los estudios anteriores es que se calculan las pérdidas a nivel de cuenca, y no solo para algu-

nos polígonos de riego o para una selección de explotaciones tipo. Los impactos se estiman a nivel espacial para toda la red hidrológica de la cuenca, y además se integra la interacción del regadío, el uso urbano y el medioambiental.

La principal conclusión empírica sobre la política de precios del agua es que los agricultores pierden entre la mitad y dos tercios de sus beneficios cuando se implementan los precios del agua en lugar de políticas alternativas. La implantación de la política de precios como pide la Comisión Europea se convertiría, por tanto, en una tarea francamente difícil por la fuerte oposición social derivada de la falta de equidad en la distribución de los costes de la política, cuando existen además mejores políticas alternativas.

El cuarto resultado compara los mercados de agua con la política de modernización de regadíos. Ambas políticas permiten reducir sustancialmente las pérdidas del cambio climático para los agricultores, proporcionando incentivos a las inversiones en tipos de cultivos y sistemas de riego que favorecen cultivos más rentables y un mayor uso de agua. Los resultados muestran que los mercados de agua superan en beneficios a la política de modernización, y la diferencia es mayor cuando se considera el coste de las subvenciones públicas a la modernización. Otra ventaja de los mercados de agua sobre la modernización es que los mercados de agua provocan una menor reducción de caudales en cuenca que la modernización. Ahora bien, los costes de transacción de los mercados son muy importantes e impiden el funcionamiento de los mercados, como demuestran Regnacq *et al.* (2016) en California. La introducción de mercados de agua es imposible sin solucionar previamente la cuestión de los costes de transacción.

La evidencia empírica de los resultados del Júcar muestra que los mercados de agua y el enfoque institucional son las mejores políticas de adaptación, y además se pueden diseñar medidas adicionales para mejorar la protección medioambiental. Una medida asociada a los mercados de agua consiste en compras públicas de agua, para aprovechar los beneficios de los mercados y a la vez proteger los ecosistemas. La otra medida asociada al enfoque institucional consiste en reverdecer la actual política institucional, incluyendo el medio ambiente como un usuario de pleno derecho en el proceso de reparto de agua. Sin embargo, la protección del medio ambiente con precios del agua supondría añadir más costes «medioambientales» y «de uso del recurso» (en terminología de la DMA) a los precios del agua, con el resultado de unos costes claramente desproporcionados para los agricultores. El mensaje es clave para las autoridades de agua y los responsables políticos de la toma de deci-

siones españoles y europeos, ya que estos resultados cuestionan seriamente el énfasis de la Directiva Marco del Agua en el uso del instrumento precios del agua para el regadío.

Referencias bibliográficas

- BERBEL, J. y GÓMEZ-LIMÓN, J. A. (2000): «The impact of water pricing policy in Spain: an analysis of three irrigated areas»; *Agricultural Water Management* 43(2); pp. 219-238.
- BLEWETT, R. (2012): *Shaping a nation. A geology of Australia*. Geoscience Australia-ANU Press, Canberra (Australia).
- BOOKER, J.; MICHELSEN, A. y WARD, F. (2005): «Economic impact of alternative policy responses to prolonged and severe drought in the Rio Grande Basin»; *Water Resources Research* 41(2); pp. 1-15.
- BOOKER, J. y YOUNG, R. (1994): «Modeling intrastate and interstate markets for Colorado River water resources»; *Journal of Environmental Economics and Management* 26(1); pp. 66-87.
- CAI, X.; MCKINNEY, D. y LASDON, L. (2003): «Integrated hydrologic-agronomic economic model for river basin management»; *Journal of Water Resources Planning and Management* 129(1); pp. 4-17.
- CALATRAVA, J. y GARRIDO, A. (2005): «Modelling water markets under uncertain water supply»; *European Review of Agricultural Economics* 32(2); pp. 119-142.
- CALATRAVA, J.; GUILLEM, A. y MARTÍNEZ-GRANADOS, D. (2011): «Análisis de alternativas para la eliminación de la sobreexplotación de acuíferos en el Valle del Guadalentín»; *Economía Agraria y Recursos Naturales* 11(2); pp. 33-62.
- CALZADILLA, A.; ZHU, T.; REHDANZ, C.; TOL, R. y RINGLER, C. (2014): «Climate change and agriculture: Impacts and adaptation options in South Africa»; *Water Resources and Economics* 5; pp. 24-48.
- CAZCARRO, I.; DUARTE, R.; SANCHEZ, J. y SARASA, C. (2011): «Water rates and the responsibilities of direct, indirect and end-users in Spain»; *Economic Systems Research* 23(4); pp. 409-430.
- CONNOR, J.; SCHWABE, K.; KING, D.; KACZAN, D. y KIRBY, M. (2009): «Impacts of climate change on lower Murray irrigation»; *The Australian Journal of Agricultural and Resource Economics* 53(3); pp. 437-456.

- CONNOR, J. y KACZAN, D. (2013): «Principles for economically efficient and environmentally sustainable water markets: The Australian experience»; en SCHWABE, K.; ALBIAC, J.; CONNOR, J.; HASSAN, R. y MEZA L., eds.: *Drought in arid and semi-arid environments: A multi-disciplinary and cross-country perspective*. Springer, Dordrecht (The Netherlands).
- CONNOR, J.; KANDULU, J. y BARK, R. (2014): «Irrigation revenue loss in Murray-Darling Basin drought: An econometric assessment»; *Agricultural Water Management* 145; pp. 163-170.
- CORNISH, G.; BOSWORTH, B.; PERRY, C. y BURKE, J. (2004): *Water charging in irrigated agriculture. An analysis of international experience*. FAO Water Report N° 28. FAO, Rome.
- CULP, P.; GLENNON, R. y LIBECAP, G. (2014): *Shopping for water: How the market can mitigate water shortages in the American West*. Discussion paper 2014-05. Stanford Woods Institute for the Environment, Washington, D.C.
- DINAR, A.; ROSEGRANT, M. y MEINZEN-DICK, R. (1997): *Water allocation mechanisms: Principles and examples*. Policy Research Working Paper N° WPS 1779. World Bank, Washington, D.C.
- EASTER, K. W.; DINAR, A. y ROSEGRANT, M. (1998): «The performance of water markets: Transaction costs, interjurisdictional barriers and institutional options»; en JUST, R. E. y NETANYAHU, S., eds.: *Conflict and cooperation on trans-boundary water resources*. Kluwer, New York.
- EC (EUROPEAN COMMISSION) (2009): *Common implementation strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC). Guidance document n° 24, river basin management in a changing climate*. Technical Report 2009-040. European Commission, Brussels.
- EC (EUROPEAN COMMISSION) (2013): *Principles and recommendations for integrating climate change adaptation considerations under the 2014-2020 programmes. SWD 139 final*. European Commission, Brussels.
- EC (EUROPEAN COMMISSION) (2012): *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. A Blueprint to safeguard Europe's water resources*. COM(2012) 673 final. European Commission, Brussels.
- ELLIOT, J.; DERYNG, D.; MÜLLER, C., *et al.* (2014): «Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change»; *PNAS* 111(9); pp. 3239-3244.

- ESTEBAN, E. y ALBIAC, J. (2011): «Groundwater and ecosystems damages: Questioning the Gisser-Sánchez effect»; *Ecological Economics* 70(11); pp. 2062-2069.
- ESTEBAN, E. y ALBIAC, J. (2012): «The problem of sustainable groundwater management: The case of La Mancha aquifers, Spain»; *Hydrogeology Journal* 20(5); pp. 851-863.
- GARRIDO, A. y CALATRAVA, J. (2009): «Trends in water pricing and markets»; en GARRIDO, A. y LLAMAS, R. M., eds.: *Water policy in Spain*. CRC Press, Leiden (The Netherlands).
- GOHAR, A. y WARD, F. (2010): «Gains from expanded irrigation water trading in Egypt: An integrated basin approach»; *Ecological Economics* 69(12); pp. 2535-2548.
- GÓMEZ-LIMÓN, J. A. y MARTINEZ, Y. (2006): «Multi-criteria modelling of irrigation water market at basin level: A Spanish case study»; *European Journal of Operational Research* 173(1); pp. 313-336.
- GÓMEZ-LIMÓN, J. A. y RIESGO L. (2004): «Irrigation water pricing: differential impacts on irrigated farms»; *Agricultural Economics* 31(1); pp. 47-66.
- GRAVELINE, N.; MAJONE, B.; VAN DUINEN, R. y ANSINK, E. (2013): «Hydro-economic modeling of water scarcity under global change: an application to the Gállego river basin (Spain)»; *Regional Environmental Change* 14(1); pp. 119-132.
- HANAK, E. (2015): «A Californian postcard: lessons for a maturing water market»; en BURNETT, K.; HOWITT R.; ROUMASSET, J. y WADA, C., eds.: *Routledge handbook of water economics and institutions*. Routledge, London.
- HOWDEN, M.; SOUSSANA, J.; TUBIELLO, F.; CHHETRI, N.; DUNLOP, M. y MEINKE, H. (2007): «Adapting agriculture to climate change»; *PNAS* 104(50); pp. 19691-19696.
- HOWE, C. W.; SCHURMEIER, D. y SHAW, W. (1986): «Innovative approaches to water allocation: The potential for water markets»; *Water Resources Research* 22(4); pp. 439-449.
- HOWITT, R. E.; MEDELLÍN, J.; MACÉWAN, D. y LUND, J. (2012): «Calibrating disaggregate economic models of agricultural production and water management»; *Environmental Modelling and Software* 38; pp. 244-258.
- HUFFAKER, R. y WHITTLESEY, N. (2000): «The allocative efficiency and conservation potential of water laws encouraging investments in on-farm irrigation technology»; *Agricultural Economics* 24(1); pp. 47-60.

- HUFFAKER, R. (2008): «Conservation potential of agricultural water conservation subsidies»; *Water Resources Research* 44(7); W00E01.
- HURD, B.; CALLAWAY, M.; SMITH, J. y KIRSHEN, P. (2004): «Climatic change and U.S. water resources: From modeled watershed impacts to national estimates»; *Journal of the American Water Resources Association* 40(1); pp. 129-148.
- IGLESIAS, E.; SUMPSI, J. M. y BLANCO, M. (2004): «Environmental and socioeconomic effects of water pricing policies: Key issue in the implementation of the Water Framework Directive»; *13th Annual Conference of the European Association of Environmental and Resource Economists*, EAERE, Budapest, June 2004.
- IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE) (2014): «Summary for Policymakers»; en FIELD, C.; BARROS, V.; DOKKEN, D. *et al.*, eds.: *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge (UK).
- JIMÉNEZ, B.; OKI, T.; ARNELL, N., *et al.* (2014): «Freshwater resources»; en FIELD, C.; BARROS, V.; DOKKEN, D., *et al.*, eds.: *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge (UK).
- KAHIL, M.; ALBIAC, J.; DINAR, A.; CALVO, E.; ESTEBAN, E.; AVELLÀ, L. y GARCÍA-MOLLA, M. (2016a): «The debate on water policies: Evidence from drought in Spain»; *Water* (en prensa).
- KAHIL, M.; CONNOR, J. y ALBIAC, J. (2015b): «Efficient water management policies for irrigation adaptation to climate change in Southern Europe»; *Ecological Economics* 120; pp. 226-233.
- KAHIL, M.; DINAR, A. y ALBIAC, J. (2015a): «Modeling water scarcity and droughts for policy adaptation to climate change in arid and semiarid regions»; *Journal of Hydrology* 522; pp. 95-109.
- KAHIL, M.; DINAR, A. y ALBIAC, J. (2016b): «Cooperative water management and ecosystem protection under scarcity and drought in arid and semiarid regions»; *Water Resources and Economics*; doi:10.1016/j.wre.2015.10.001.

- LECLERE, D.; JAYET, P. y DE NOBLET, N. (2013): «Farm-level autonomous adaptation of European agricultural supply to climate change»; *Ecological Economics* 87; pp. 1-14.
- LEHNER, B.; DÖLL, P.; ALCAMO, J.; HENRICH, T. y KASPAR, F. (2006): «Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: A continental, integrated analysis»; *Climatic Change* 75(3); pp. 273-299.
- MCKINNEY, D.; CAI, X.; ROSEGRANT, M.; RINGLER, C. y SCOTT, C. (1999): *Modeling water resources management at the basin level: Review and future directions*. SWIM Paper 6. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka.
- MEDELLÍN, J.; HOWITT, R. y LUND, J. (2013): «Modeling economic-engineering responses to drought: The California case»; en SCHWABE, K.; ALBIAC, J.; CONNOR, J.; HASSAN, R. y MEZA, L., eds.: *Drought in arid and semi-arid regions. A multi-disciplinary and cross-country perspective*. Springer, Dordrecht (The Netherlands).
- MEJIAS, P.; VARELA, C. y FLICHTMAN, G. (2004): «Integrating agricultural policies and water policies under water supply and climate uncertainty»; *Water Resources Research* 40(7); W07S03.
- MENDELSON, R. y DINAR, A. (2003): «Climate, water, and agriculture»; *Land Economics* 79(3); pp. 328-341.
- MOLINOS, M.; HERNÁNDEZ, F.; MOCHOLÍ, M. y SALA, R. (2014): «A management and optimisation model for water supply planning in water deficit areas»; *Journal of Hydrology* 515; pp. 139-146.
- MOORE, M. (1991): «The bureau of reclamation's new mandate for irrigation water conservation – purposes and policy alternatives»; *Water Resources Research* 27(2); pp. 145-155.
- PERRY, C.; WICHELS, D. y STEDUTO, P. (2014): «The myth that «water efficiency» will eradicate hunger and poverty»; *Waterfront* 4; pp. 10.
- PLAYAN, E.; LECINA, S.; ISIDORO, D.; ARAGUES, R.; FACI, J.; SALVADOR, R.; ZAPATA, N. y CAVERO, J. (2013): «Living with drought in the irrigated agriculture of the Ebro basin (Spain): Structural and water management actions»; en SCHWABE, K.; ALBIAC, J.; CONNOR, J.; HASSAN, R. y MEZA, L., eds.: *Drought in arid and semi-arid regions. A multi-disciplinary and cross-country perspective*. Springer, Dordrecht (The Netherlands).

- PULIDO, M.; ANDREU, J.; SAHUQUILLO, A. y PULIDO-VELAZQUEZ, D. (2008): «Hydro-economic river basin modelling: The application of a holistic surface-groundwater model to assess opportunity costs of water use in Spain»; *Ecological Economics* 66(1); pp. 51-65.
- QURESHI, E.; WHITTEN, S.; MAINUDDIN, M.; MARVANEK, S. y ELMAHDI, A. (2013): «A biophysical and economic model of agriculture and water in the Murray-Darling Basin, Australia»; *Environmental Modelling & Software* 41; pp. 98-106.
- QURESHI, M.; SCHWABE, K.; CONNOR, J. y KIRBY, M. (2010): «Environmental water incentive policy and return flows»; *Water Resources Research* 46; W04517.
- REGNACQ, C.; DINAR, A. y HANAK, E. (2016): «The gravity of water: Water trade friction in California»; *Annual Meeting of the Allied Social Science Association*, San Francisco (USA), January 2016.
- REIDSMA, P.; EWERT, F.; LANSINK, A. y LEEMANS, R. (2010): «Adaptation to climate change and climate variability in European agriculture: The importance of farm level responses»; *European Journal of Agronomy* 32(1); pp. 91-102.
- SCHEIERLING, S.; YOUNG, R. y CARDON, G. (2004): «Determining the price responsiveness of demands for irrigation water deliveries versus consumptive use»; *Journal of Agricultural and Resource Economics* 29(2); pp. 328-345.
- UCCHM (UC CENTER FOR HYDROLOGIC MODELING) (2014): *UCCHM Water Advisory #1*. University of California, Irvine (USA).
- USDA (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE) (2012): *Climate change and agriculture in the United States: Effects and adaptation*. Agriculture Research Service. USDA Technical Bulletin 1935. USDA, Washington, D.C.
- VARELA, C.; BLANCO, I.; ESTEVE, P.; BHARWANI, S.; FRONZEK, S. y DOWNING, T. (2014): «How can irrigated agriculture adapt to climate change? Insights from the Guadiana Basin in Spain»; *Regional Environmental Change* 16(1); pp. 59-70.
- WARD, F. (2014): «Economic impacts on irrigated agriculture of water conservation programs in drought»; *Journal of Hydrology* 508; pp. 114-127.

- WHEELER, S.; LOCH, A.; ZUO, A. y BJORN LUND, H. (2014): «Reviewing the adoption and impact of water markets in the Murray-Darling Basin, Australia»; *Journal of Hydrology* 518; pp. 28-41.
- WHEELER, S.; ZUO, A. y BJORN LUND, H. (2013): «Farmers' climate change beliefs and adaptation strategies for a water scarce future in Australia»; *Global Environmental Change* 23(2); pp. 537-547.
- ZILBERMAN, D.; DINAR, A.; MACDOUGAL, N.; KHANNA, M.; BROWN, C. y CASTILLO, F. (2002): «Individual and institutional responses to the drought: The case of California agriculture»; *Journal of Contemporary Water Research and Education* 121(1); pp. 17-23.