

## **Resumen y conclusiones**

Los recursos hídricos a nivel global están sometidos a presiones y desafíos cada vez mayores. Para enfrentar estos retos una herramienta importante es la utilización de los modelos hidroeconómicos para el diseño de las políticas de gestión del agua. El crecimiento de la población y la renta son los factores que explican la escasez de agua y la degradación de su calidad en las cuencas, como consecuencia del desarrollo masivo de las tecnologías de agua que han aumentado sustancialmente las extracciones de recursos hídricos. Además, en las cuencas de las zonas áridas y semiáridas, la actual situación de escasez va a agravarse por los efectos del cambio climático. Por otra parte hay una creciente preocupación social en relación a la conservación y protección de los ecosistemas acuáticos, lo que supone una mayor competencia por los recursos hídricos disponibles. Por lo tanto los conflictos sobre los recursos hídricos entre sectores y regiones van a aumentar, dando lugar a problemas sociales complejos.

En las últimas décadas, la modelización hidroeconómica se ha convertido en un instrumento esencial para analizar los problemas de escasez de agua, sequías y cambio climático de una forma integrada. Los modelos hidroeconómicos permiten capturar los efectos de las interacciones entre los sistemas hidrológicos y los sistemas económicos. De esta forma se consigue que los resultados económicos óptimos tengan en cuenta la distribución espacial de los recursos hídricos. La localización espacial de los nodos de demanda de agua respecto a los cursos de agua, como los polígonos de riego, las instalaciones industriales, los centros urbanos y los ecosistemas acuáticos, determina la magnitud de los impactos de las distintas alternativas de reparto de agua.

A pesar del avance significativo en el diseño de los modelos hidroeconómicos en las últimas tres décadas, aún son necesarias mejoras sustanciales para afrontar los complejos desafíos futuros. En este contexto, esta tesis presenta el desarrollo y aplicación de varios métodos de modelización hidroeconómica integrada. Los cuatro capítulos principales de esta tesis presentan diferentes avances metodológicos relacionados con las dimensiones dinámica y estocástica de los modelos hidroeconómicos, y con la incorporación del comportamiento estratégico de los grupos de interés.

## 1. Resumen

El primer trabajo de esta tesis (capítulo 2) "Modeling water scarcity and droughts for policy adaptation to climate change in arid and semiarid regions", presenta el desarrollo y aplicación de un modelo hidroeconómico integrado para la cuenca del río Júcar. La contribución de este capítulo a los trabajos anteriores de modelización hidroeconómica se deriva del desarrollo de una forma reducida del componente hidrológico. La forma hidrológica reducida se puede emplear cuando no está disponible un componente hidrológico detallado, como es el caso en muchas cuencas en todo el mundo. Este enfoque alternativo puede implementarse utilizando datos históricos procedentes de las instituciones de gestión del agua, y datos simulados y topología de la red de los modelos que ya existen. Este método es una manera rápida y creíble de construir una forma reducida del modelo hidrológico de la cuenca en estudio. La cuenca se puede representar mediante una red de nodos entrelazados, con unos flujos entre nodos que se determinan mediante ecuaciones hidrológicas simplificadas como las ecuaciones de balance de las masas de agua y mediante ecuaciones de regresión. El modelo hidroeconómico de la cuenca del Júcar vincula la componente hidrológica reducida de la cuenca con un modelo de programación matemática de optimización con restricciones, y un modelo de beneficios medioambientales.

El modelo desarrollado se utiliza para simular el comportamiento de los nodos de demanda bajo distintos escenarios de política de gestión del agua (política de cooperación, mercados de agua, y mercado medioambiental) y tipos de sequía (ligera, severa, y muy severa). La implementación de una política de mercados de agua en la cuenca del Júcar muestra ganancias moderadas en comparación con la política actual de cooperación institucional. Además, el mercado del agua implica una reducción del agua disponible para el medioambiente, provocando un cambio negativo más rápido del estado ecológico del ecosistema en comparación con la política institucional actual. Esta reducción de agua para el medioambiente bajo el mercado de agua se explica porque el agua es un bien comunal con externalidades medioambientales, y los mercados no tienen en cuenta estas externalidades lo que causa un aumento excesivo de las extracciones de agua y daños a los ecosistemas.

La inclusión de la autoridad de cuenca en el mercado del agua para adquirir agua para el medioambiente parece ser una política interesante para afrontar la creciente escasez de agua en la cuenca, ya que sirve para corregir la externalidad medioambiental

de los mercados privados de agua. Esta política de mercado de agua con compras públicas de agua para el medio ambiente, mejora tanto los beneficios sociales como privadas en la cuenca, reduce la vulnerabilidad de los polígonos de riego a las sequías, y protege los ecosistemas.

Los resultados empíricos muestran también el valor de la negociación y la cooperación de los grupos de interés, que es el actual enfoque institucional de gestión del agua en España. Este enfoque institucional alcanza casi los mismos resultados económicos y mejores resultados medioambientales en comparación con una política de mercado privado de agua. Estos resultados muestran la importancia de la cooperación en la gestión del agua, y suponen un cuestionamiento de las políticas de agua utilizadas en la actualidad en la mayoría de las cuencas de las zonas áridas y semiáridas. Las políticas actuales de gestión de agua se basan principalmente en el uso de los instrumentos de mando y control o de instrumentos económicos puros, sin tener en cuenta la importancia de la cooperación de los grupos de interés y la participación pública en la toma de decisiones.

El segundo trabajo (capítulo 3) "Cooperative water management and ecosystem protection under scarcity and drought in arid and semiarid regions", presenta el desarrollo de un modelo de teoría de juegos cooperativa. Este modelo se utiliza para analizar las posibilidades de cooperación en la gestión de los recursos hídricos, y las opciones para la protección de los ecosistemas acuáticos bajo distintos escenarios de sequía en las cuencas de las zonas áridas y semiáridas. El uso de la teoría de juegos cooperativa para incorporar el comportamiento estratégico de los grupos de interés es esencial para examinar la aceptabilidad y la estabilidad de las soluciones cooperativas de gestión de agua. Este capítulo muestra la posibilidad de incorporar el comportamiento estratégico de los grupos de interés a nivel de cuenca en los modelos hidroeconómicos.

Los resultados de este capítulo indican que los costes de los daños de sequía en la cuenca del Júcar podrían reducirse mediante la cooperación de los grupos de interés dentro de un marco institucional adecuado. Los resultados indican también que la gestión cooperativa puede tener poco efecto en la protección de los ecosistemas acuáticos sin el diseño de políticas adicionales. El análisis realizado muestra que la cooperación es una opción viable en la cuenca del Júcar, pero la base de la cooperación es frágil, lo que significa que la cooperación es poco estable. La razón es que los

usuarios tienen diferentes intereses respecto a las distintas soluciones cooperativas propuestas. La internalización de los daños medioambientales proporciona más estabilidad a la cooperación. Estos resultados tienen importantes implicaciones políticas porque demuestran las dificultades para seleccionar instrumentos de política adecuados para hacer frente a la escasez y las sequías, y el riesgo de fracaso que tienen algunas políticas.

El tercer trabajo (capítulo 4) "Efficient water management policies for irrigation adaptation to climate change in Southern Europe", evalúa los efectos económicos y medioambientales de dos instrumentos económicos de gestión del agua: los mercados de agua y las subvenciones a las tecnologías de riego. Estas dos políticas son de particular interés para las autoridades de gestión de agua en España y en el sur de Europa. El análisis se ha llevado a cabo en el bajo Júcar mediante un modelo hidroeconómico estocástico. Se han utilizado varias funciones de producción de cultivos, lo que permite analizar las estrategias de riego deficitario. Los resultados del modelo proporcionan información sobre las respuestas de los agricultores, tanto a largo plazo como a corto plazo, ante escenarios de cambio climático y de políticas alternativas. Las respuestas a largo plazo incluyen las decisiones de inversión en sistemas de cultivo y tecnologías de riego, mientras que las respuestas a corto plazo incluyen las decisiones de regar o abandonar las tierras de cultivo una vez que se ha llevado a cabo la inversión de capital.

Los resultados de este capítulo indican que el cambio climático tendrá efectos negativos sobre los agricultores. Sin embargo, la magnitud de los impactos depende de del contexto político y las respuestas de los agricultores. Los mercados del agua y las subvenciones a las tecnologías de riego proporcionan incentivos a los agricultores para invertir en la agricultura de regadío, reducir el abandono de las tierras de cultivo, e intensificar el uso de la tierra y el agua. Asimismo, se ha visto que la estrategia de riego deficitario es una buena respuesta al cambio climático, reduciendo significativamente los costes de los daños a los agricultores. Sin embargo, los impactos medioambientales de estos dos instrumentos (mercados y subvenciones a la tecnología de riego) son adversos, generando costes considerables para la sociedad. Las implicaciones de estos resultados es que las políticas de gestión del agua y la agricultura europeas deben orientarse hacia: i) la mejora de la capacidad de adaptación a nivel de explotación; ii) la mejora de la información y el conocimiento de los agricultores sobre los impactos del

cambio climático para optimizar las decisiones de inversión de capital a largo plazo; y iii) la adopción de políticas de adaptación que minimicen a la vez las pérdidas de beneficios privados y sociales.

El último trabajo (capítulo 5) "Hydro-economic modeling with aquifer-river interactions for sustainable basin management", presenta el desarrollo de un modelo hidroeconómico dinámico, que se utiliza para la evaluación de escenarios de cambio climático y de políticas de gestión de agua en la cuenca del Júcar. La contribución de este trabajo a la literatura se deriva de la incorporación de una ecuación de flujo de agua subterránea en el modelo hidroeconómico. Esta ecuación de flujo es similar a la que se utiliza en el modelo de aguas subterráneas MODFLOW. Este enfoque metodológico mejorado es capaz de simular el comportamiento real de los acuíferos y las interacciones entre ríos y acuíferos.

Los resultados de este capítulo muestran la capacidad de los modelos hidroeconómicos integrados para evaluar un amplio conjunto de escenarios de cambio climático y de políticas de agua. Los resultados empíricos proporcionan información detallada sobre los impactos espacio-temporales del cambio climático sobre la hidrología, el uso de la tierra, y los beneficios económicos. Los resultados muestran también cómo los usuarios del agua en las cuencas de las zonas áridas y semiáridas podrían adaptarse estratégicamente al cambio climático, y cuáles son los impactos económicos y medioambientales de estas estrategias de adaptación. Esta información sólo puede ser generada usando modelos hidroeconómicos integrados, para poder diseñar políticas sostenibles de adaptación al cambio climático.

## **2. Conclusiones**

Esta tesis aborda algunos de los desafíos más importantes en relación a los recursos hídricos de las zonas áridas y semiáridas. Estos desafíos incluyen la creciente escasez de agua, los impactos del cambio climático, y la degradación generalizada de los ecosistemas acuáticos. Los cuatro capítulos principales presentan el desarrollo de distintos métodos de modelización hidroeconómica que integran aspectos hidrológicos, económicos, institucionales y medioambientales, y que se aplican al caso de la cuenca del Júcar en España. Los capítulos ofrecen una descripción detallada del proceso de modelización, los análisis realizados, y las principales conclusiones e implicaciones. Sin embargo, los modelos también pueden aplicarse a otras cuencas de las zonas áridas y semiáridas. Las metodologías desarrolladas en esta tesis representan un conjunto de

herramientas muy prometedoras para realizar análisis integrados de los escenarios climáticos y de política de agua. Los resultados obtenidos proporcionan información útil para el diseño de políticas de gestión sostenible de los recursos hídricos.

En esta tesis se consideran varios métodos para mejorar los modelos de análisis de la política de agua. Estos avances metodológicos están relacionados con el proceso de integración de las diferentes dimensiones de los recursos hídricos, la mejora de los aspectos estocásticos y dinámicos de los modelos, y la inclusión del comportamiento estratégico de los grupos de interés. No existen muchos estudios en la literatura que consideren conjuntamente las cuestiones de modelización y de implementación de las políticas de agua. Los resultados empíricos muestran el potencial de los modelos hidroeconómicos integrados para evaluar los impactos económicos y medioambientales de las políticas de agua bajo distintos escenarios climáticos. La modelización parcial basada solamente en las relaciones económicas, pero sin un fundamento biofísico sólido, no pueden determinar con rigor estos impactos que son importantes para la toma de decisión en la gestión de los recursos hídricos.

Los resultados de esta tesis tienen implicaciones políticas importantes porque muestran las dificultades para lograr una gestión más sostenible de los recursos hídricos en las regiones áridas y semiáridas. La toma de decisiones es compleja para poder resolver los impactos de la escasez de agua, las sequías y el cambio climático en las actividades económicas y los ecosistemas de las cuencas. Los gobiernos pueden implementar varias políticas para mitigar dichos impactos, tales como la promoción de la gestión cooperativa de los recursos hídricos, facilitar la implementación de mercados de agua, y proporcionar incentivos económicos para el ahorro del agua. Sin embargo, los decisores políticos deben ser conscientes de las consecuencias adversas de la mala planificación hídrica, como son los impactos medioambientales negativos. También deben considerar la aceptabilidad de las políticas por los grupos de interés, para evitar el fracaso de las políticas.