

Nuevas metodologías para el análisis integrado de la gestión del agua subterránea. Aplicación al caso de estudio del Altiplano (Murcia, SE España)

J. L. Molina y J. L. García Aróstegui

Instituto Geológico y Minero de España. Oficina de Murcia
Avda. Alfonso X El Sabio, 6. 30.008 Murcia, España
jl.molina@igme.es; j.arostegui@igme.es

RESUMEN

El análisis integrado de la gestión del agua subterránea supone la incorporación del mayor número posible de dimensiones y aspectos involucrados en la gestión y funcionamiento de un sistema hídrico determinado. Últimamente se están fomentando esta clase de estudios, ya que permiten obtener un conocimiento holístico y facilitan a los gestores la toma de decisiones. No obstante, aún no existe una metodología de referencia para abordar un estudio de este tipo. En este artículo se propone una metodología genérica que puede ser extrapolable a otros casos de estudio. El análisis se inicia con la identificación y conceptualización de la problemática hídrica del caso de estudio. Una segunda fase se centra en el desarrollo de estudios sectoriales detallados y específicos que son la base para la construcción y alimentación de un sistema soporte a la decisión. Se propone y desarrolla la aplicación de un sistema soporte estocástico basado en redes Bayesianas orientadas a objetos, que permite la incorporación de aspectos tales como los hidrogeológicos, socioeconómicos y ambientales, entre otros. La simulación de tres escenarios de gestión es la última fase del estudio y permite comparar y cuantificar los impactos producidos por diferentes intervenciones de gestión hídrica propuestas de antemano. El primer escenario plantea una situación continuista de la actualidad, el segundo escenario está compuesto por varias intervenciones de gestión que son la incorporación de recursos externos, la compra de derechos y la reducción de la demanda; por último, el tercer escenario implica la igualdad en los balances hídricos de los acuíferos.

Palabras clave: Altiplano de Jumilla-Yecla (Murcia), análisis integrado, gestión del agua subterránea, sistemas soporte a la decisión, sobreexplotación de acuíferos

New methodologies for the integrated analysis of groundwater management. Altiplano water system case study (Murcia, SE Spain)

ABSTRACT

Integrated analysis of water management incorporates a great range of dimensions and aspects involved in the management of a water system. Lately, these kind of studies have become numerous because they allow getting a holistic knowledge and they also help managers with the decision making process. Nevertheless, there is not yet a general methodology for tackling this type of studies and there is a big opened field concerning the tools and techniques application. This paper establishes a methodology, which can be extrapolated to other case studies, and a practical procedure for the integrated analysis of groundwater management. This analysis starts with the identification and conceptualization of the hydric problematic. Then, a second phase is focused on the development of sectorial and detailed studies. The third phase is the building of the Decision Support System (DSS) based on the results from the sectorial studies. This research develops and proposes the application of a stochastic DSS based on Object-Oriented Bayesian Networks (OOBNs) that allows incorporating a huge range of aspects such as hydrogeological, socioeconomic and environmental, among others. The last phase of the procedure is the simulation of water management scenarios through the DSS. This allows comparing and quantifying the impacts generated by three water management interventions which have been proposed previously. The first scenario establishes the continuation of the current situation, the second scenario is made up of for several water management interventions which are the incoming of external water resources, the purchase of water rights and a reduction of the water demand; finally, the third scenario implies to reach the equilibrium in the aquifer water budgets.

Key words: Altiplano of Jumilla-Yecla (Murcia), aquifers overexploitation, decision support systems, groundwater management, integrated analysis

Introducción

A lo largo de la década de los años noventa del siglo XX se fue gestando un paradigma de actuación y aná-

lisis de los estudios del agua, conocido internacionalmente como Integrated Water Resources Management (IWRM), traducido al español como Análisis Integrado de la Gestión del Agua. Este tipo

de estudios tiene unos rasgos diferenciales respecto a lo que se había hecho con anterioridad. En primer lugar, el enfoque es holístico; es decir, se considera que para realizar el análisis se debe considerar la mayor cantidad de aspectos involucrados en la gestión del agua en un sistema hídrico determinado y sus relaciones, de tal manera que no se ha de efectuar una mera suma de estudios parciales sino también y, especialmente, considerar la interrelación de unos con otros. Otra de las claves del paradigma consiste en la participación pública de los usuarios del agua, que debe extenderse a lo largo de todo el estudio (Bromley *et al.*, 2005).

En el ámbito europeo, los principios de sostenibilidad y gestión integrada de los recursos hídricos han adquirido especial relevancia tras la aprobación en el año 2000 de la Directiva Marco del Agua (DMA) (EC, 2000). El enfoque medioambiental y la conciliación con los aspectos sociales y económicos están en la raíz y en el espíritu de la propia Directiva y deben plasmarse en los planes hidrológicos de cada demarcación hidrográfica, donde el horizonte del año 2015 queda como punto de referencia para alcanzar el buen estado cuantitativo y cualitativo de las masas de agua.

En el caso de los sistemas hídricos basados parcial o totalmente en aguas de origen subterráneo, las investigaciones realizadas desde un enfoque integrado son muy escasas (Aragón *et al.*, 1992).

Los estudios clásicos sobre las aguas subterráneas, habitualmente, han tratado predominantemente los aspectos puramente hidrológicos y no se abordan en profundidad otros temas cruciales en el uso del agua subterránea, como son los económicos.

A medida que se percibe cierto agotamiento de recursos, surgen cuestiones sobre cómo utilizarlos y protegerlos. Las consideraciones económicas normalmente suelen contribuir al proceso de toma de decisiones y promover un uso más eficiente del recurso. En general, las zonas áridas y semiáridas, donde la escasez de recursos es manifiesta, suelen ser los ejemplos más interesantes para la aplicación de estas metodologías y donde el beneficio social de la ciencia resulta evidente. La DMA planteó un cierto desafío que consistió en encontrar herramientas, técnicas y metodologías que fueran capaces de implementar con éxito esta gestión integrada y por ello asegurar un futuro sostenible para los recursos de agua continentales.

Los principales objetivos de este artículo son en primer lugar mostrar la aplicación de una metodología que sirva para analizar de una forma integrada la gestión del agua subterránea, bajo el paradigma del Análisis Integrado de la Gestión del Agua, y en

segundo lugar mostrar los resultados obtenidos al aplicarla a un caso concreto.

La aplicación de esta metodología se ha llevado a cabo en el sistema hídrico de la comarca del "Altiplano" de Jumilla-Yecla (Murcia). Esta zona constituye un buen ejemplo de los efectos que ocasionan el uso intensivo de las aguas subterráneas en regiones semiáridas, ya que éstas han constituido el único recurso disponible de la población para el desarrollo de todas sus actividades, entre las cuales, la principal consumidora de agua es la agricultura. Se trata de una comarca pionera en el uso y explotación del agua subterránea, a nivel nacional, lo que ha conllevado una explotación intensiva de los acuíferos que se ha traducido en unos impactos negativos de diversa tipología. Entre los más importantes cabe destacar la bajada generalizada de hasta 300 m de los niveles piezométricos que ha hecho que aumenten de forma creciente los costes de extracción; en cuanto a los impactos ecológicos cabe señalar la desaparición de los manantiales que drenaban dichos acuíferos lo que originó la desaparición de los sistemas de humedales de carácter hipogénico (Rodríguez-Estrella, 1999).

Sin embargo no todos los efectos de la explotación intensiva de los acuíferos han sido negativos. La utilización del agua subterránea en la región desde los años cincuenta ha hecho posible el desarrollo de una agricultura de alta rentabilidad. Asimismo se han consolidado regadíos que originalmente fueron declarados de Interés Nacional con unos indudables beneficios sociales; otros efectos positivos han sido: beneficios infraestructurales, reinfiltración de excedentes de regadío y alimentación de los acuíferos, recuperación de suelos salinos y aumento de la vegetación que incrementa la infiltración de la lluvia (Rodríguez Estrella, 2004).

Metodología

La metodología desarrollada en el marco de esta investigación y que se muestra en este artículo consta de una serie de etapas o fases de aplicación (Figura 1). En la fase previa, se ha realizado la revisión exhaustiva de la literatura científica existente sobre el paradigma de la gestión integrada del agua, y su aplicación en casos de estudio similares (California e Israel). Posteriormente, se ha elaborado un estado del arte sobre estrategias de gestión de acuíferos, así como la aplicación de este tipo de estudios a casos concretos en el ámbito internacional. Con el marco teórico definido, se ha procedido a proponer una metodología genérica para abordar estudios de análisis integrado. En la aplicación al caso de estudio, la

primera fase es la de identificación y conceptualización de la problemática hídrica. Para ello se realiza una caracterización de la zona desde los puntos de vista hidrológico, socioeconómico, y ambiental. La siguiente fase es la de realización de los trabajos sectoriales, que empiezan con el análisis hidrogeológico de los sistemas acuíferos existentes. Dicho análisis ha sido apoyado y complementado por un extenso trabajo de campo y la organización de diversas reuniones y jornadas organizadas por las distintas partes interesadas en la gestión del agua en la zona. De esta forma, se ha conseguido una mejora del conocimiento hidrogeológico de las Masas de Agua Subterránea (M.A.S) consideradas. Posteriormente, y apoyado por estos trabajos previos, se procede a la elaboración propia de un modelo de flujo de diferencias finitas para la M.A.S Serral-Salinas, que ha sido elegida como "acuífero de referencia" en algunas evaluaciones realizadas. En una fase posterior, se realiza el análisis ambiental de la zona de estudio, que consiste en la identificación de los principales ecosistemas rela-

cionados con el agua subterránea. En la siguiente fase se ha realizado el análisis agro-económico, apoyado en un trabajo de campo específico, basado en encuestas y reuniones con los usuarios; con esta información, se realiza un modelo de simulación agro-económico. Con toda la información recopilada y tratada, se procede a la construcción de un Sistema de Soporte a la Decisión (SSD) estocástico y probabilístico, basado en el uso de Redes Bayesianas (BNs) y más concretamente, en las Redes Bayesianas Orientadas a Objetos "Object-Oriented Bayesian Networks" (OOBNs). La última fase del estudio consistió en la simulación, evaluación y cuantificación de los supuestos impactos generados por diferentes escenarios de gestión hídrica preestablecidos.

Materiales y métodos

La técnica utilizada para el diseño y desarrollo del sistema soporte a la decisión es la de las redes bayesia-

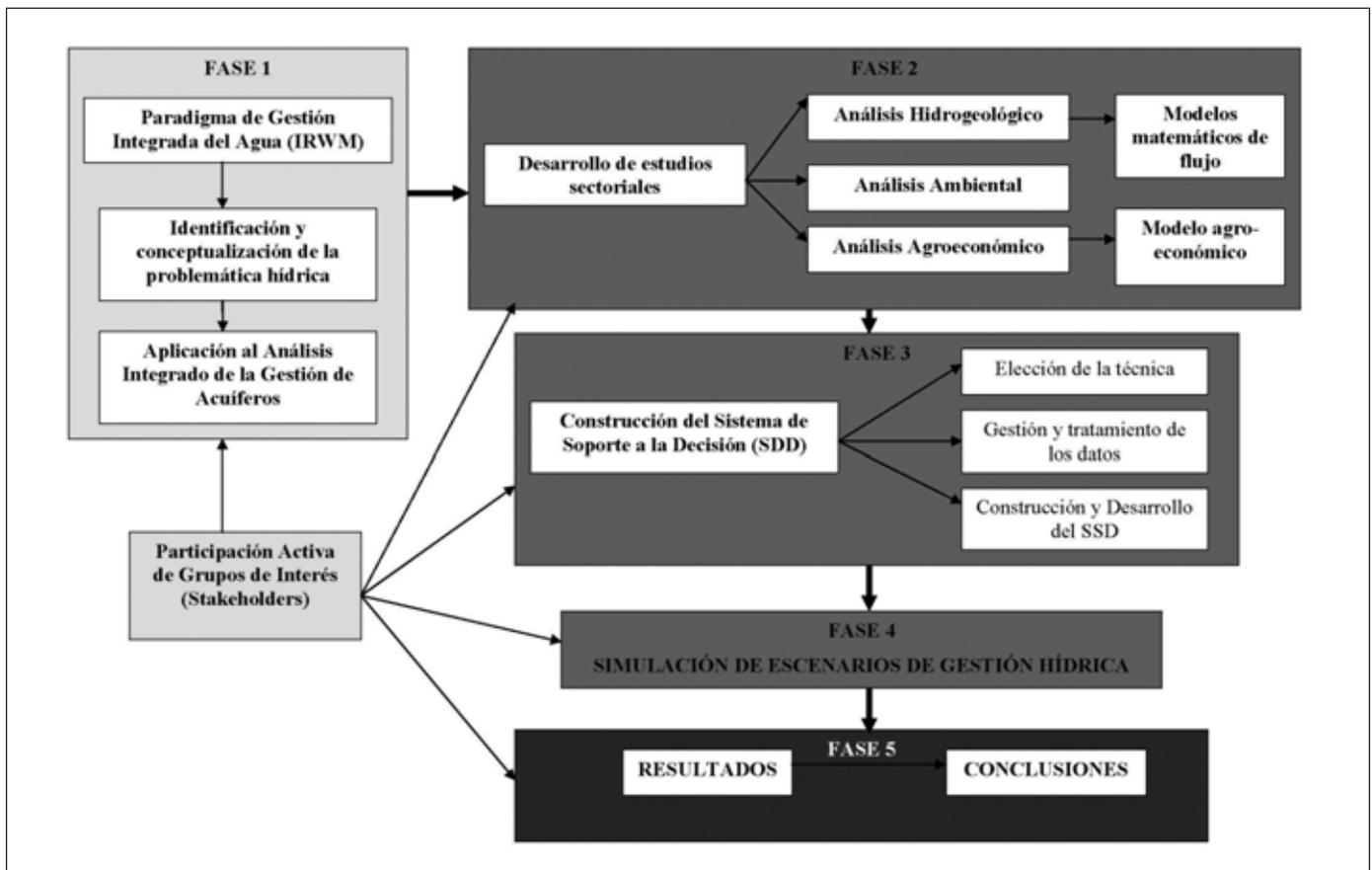


Figura 1. Esquema de la metodología
 Figure 1. Methodology scheme

nas orientadas a objetos. Esta herramienta representa un avance respecto a las Redes Bayesianas tradicionales, con las que comparte sus características y además ofrece ciertas ventajas para la modelización de sistemas naturales reales (Koller and Pfeffer, 1997; Molina *et al.*, in press).

Las redes Bayesianas son usadas para analizar procesos estocásticos en donde la incertidumbre es tratada mediante la probabilidad. Según Cain (2001), una red Bayesiana puede ser definida como varios nodos que representan variables aleatorias que interaccionan unas con otras. Las interacciones son expresadas como conexiones entre las variables. Las BNs se basan en el concepto de probabilidad condicionada. El fundamento matemático para esta técnica es el teorema de Bayes (1763), según el cual si se tienen dos variables X e Y tales que $P(x) > 0$ para todo x, y $P(y) > 0$ para todo y, entonces la siguiente expresión es válida:

$$P(x/y) = \frac{P(x) * P(y/x)}{\sum P(x') * P(y/x')}$$

Una red Bayesiana consta de tres elementos principales (Figura 2). En primer lugar, un conjunto de variables que representan los componentes principales de un determinado sistema o problema; estas variables presentan una serie de estados a los que se les asigna un valor de probabilidad; en segundo lugar, se tienen los enlaces entre esas variables y, en tercer lugar, las tablas de probabilidad condicionada, que pertenecen a cada variable o nodo, y se emplean

para calcular la probabilidad de los estados de las variables. Los dos primeros elementos forman el denominado Diagrama Bayesiano y con el tercer elemento forman la red Bayesiana completa.

No obstante, una red Bayesiana tradicional no es capaz de recibir o transmitir información desde fuera de la red, lo que las diferencia de las redes bayesianas orientadas a objetos. Éstas últimas, por el contrario, pueden unirse unas con otras para formar un conjunto de redes, que pueden relacionarse entre si y transmitirse la información de una a otra. La transferencia de información se logra mediante la creación de variables de salida y de entrada en cada red. Este tipo de variables son capaces de importar y exportar información entre las redes individuales. Las variables que ejercen de unión entre redes se llaman "Nodos Interfase" y a las variables que representan a otra red remota se les llama "Nodos Instancia". A modo de resumen se puede decir que la principal diferencia estructural entre las redes bayesianas tradicionales, y las orientadas a objetos radica en que éstas contienen "Nodos Instancia", lo que, junto con otras características, permite modelizar de una forma muy fiable y sencilla, las estructuras de los sistemas naturales reales.

Aplicación a la comarca del altiplano de Jumilla-Yecla

La zona de estudio se encuentra situada entre las provincias de Murcia y Alicante, en el sureste de España, a unos 75 km de distancia de la costa mediterránea y

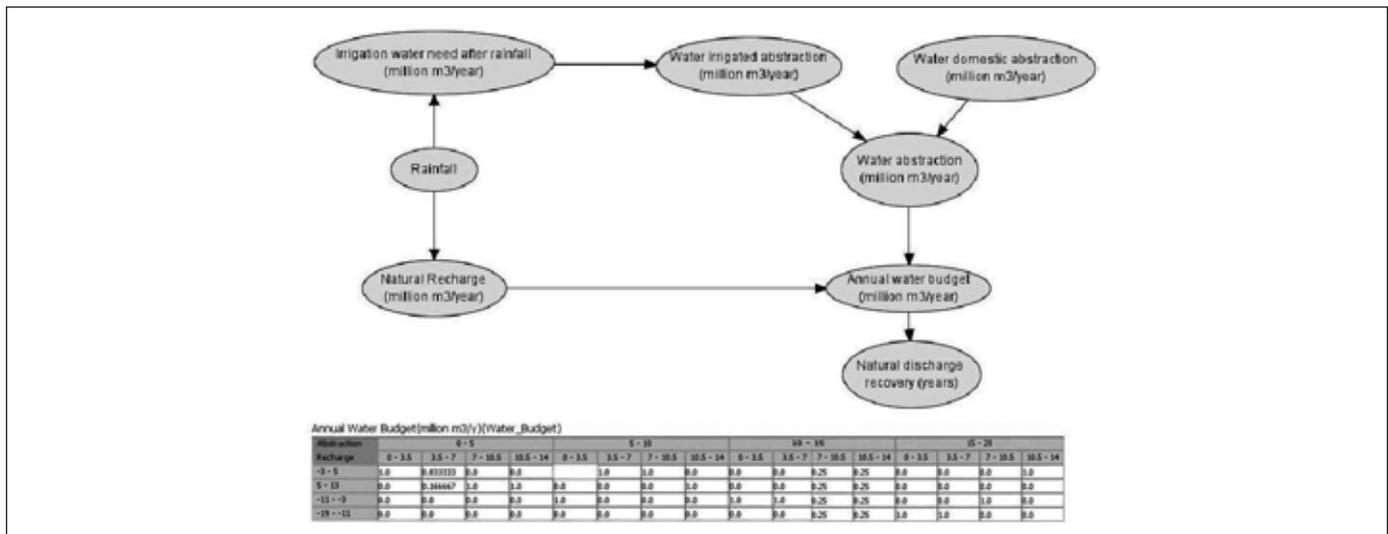


Figura 2. Ejemplo de una Red Bayesiana simple y de una Tabla de Probabilidad Condicional (CPT)
 Figure 2. Example of a basic BN and a Conditional Probability Table (CPT)

comprende principalmente la comarca del Altiplano Jumilla-Yecla de la Región de Murcia; pero también se extiende por las comarcas del Alto y del Medio Vinalopó, en la provincia de Alicante. El área estudiada ocupa, a su vez, parte de las cuencas hidrográficas del Segura y del Júcar (Figura 3).

La comarca del Altiplano, constituida por los términos municipales de Jumilla y Yecla, cuenta con una población de aproximadamente 60000 habitantes repartidos en una superficie de 1.579 km². Esto significa una densidad de población relativamente baja de aproximadamente el 4,3% de la población regional sobre el 14% de ese espacio.

Los recursos superficiales son casi inexistentes. La red de drenaje superficial corresponde a una red de ramblas, muy características del sureste peninsular, con un régimen hídrico anual e interanual muy irregular. Entre ellas, destacan las ramblas del Moro y del Judío. Además de estos cauces, la zona de estudio

tiene una serie de cubetas endorreicas favorecidas por la disposición del relieve, la litología y las condiciones de los suelos y originadas la mayoría de las veces por el diapirismo (Rodríguez Estrella, 1983). Algunas de las cuencas endorreicas más extensas son la Hoya del Carche, laguna de Salinas, lagunas de Villena, la Hoya del Mollidar, la del Ardal o la del Hondo del Pozo, todas situadas en el sureste del área de estudio, compartimentadas en los corredores paralelos que separan las alineaciones montañosas y siguen la dirección SW-NE.

Desde el punto de vista de la administración hidráulica, la zona de estudio incluye, total o parcialmente, 12 masas de agua subterránea (según la nomenclatura de la DMA). En cuanto a la satisfacción de las demandas urbanas, industriales y agrícolas, las M.A.S. especialmente a tener en cuenta, en la cuenca del Segura, son la 070.025 Ascoy-Sopalmo, 070.012 Cingla, 070.023 Jumilla-Yecla y 070.027

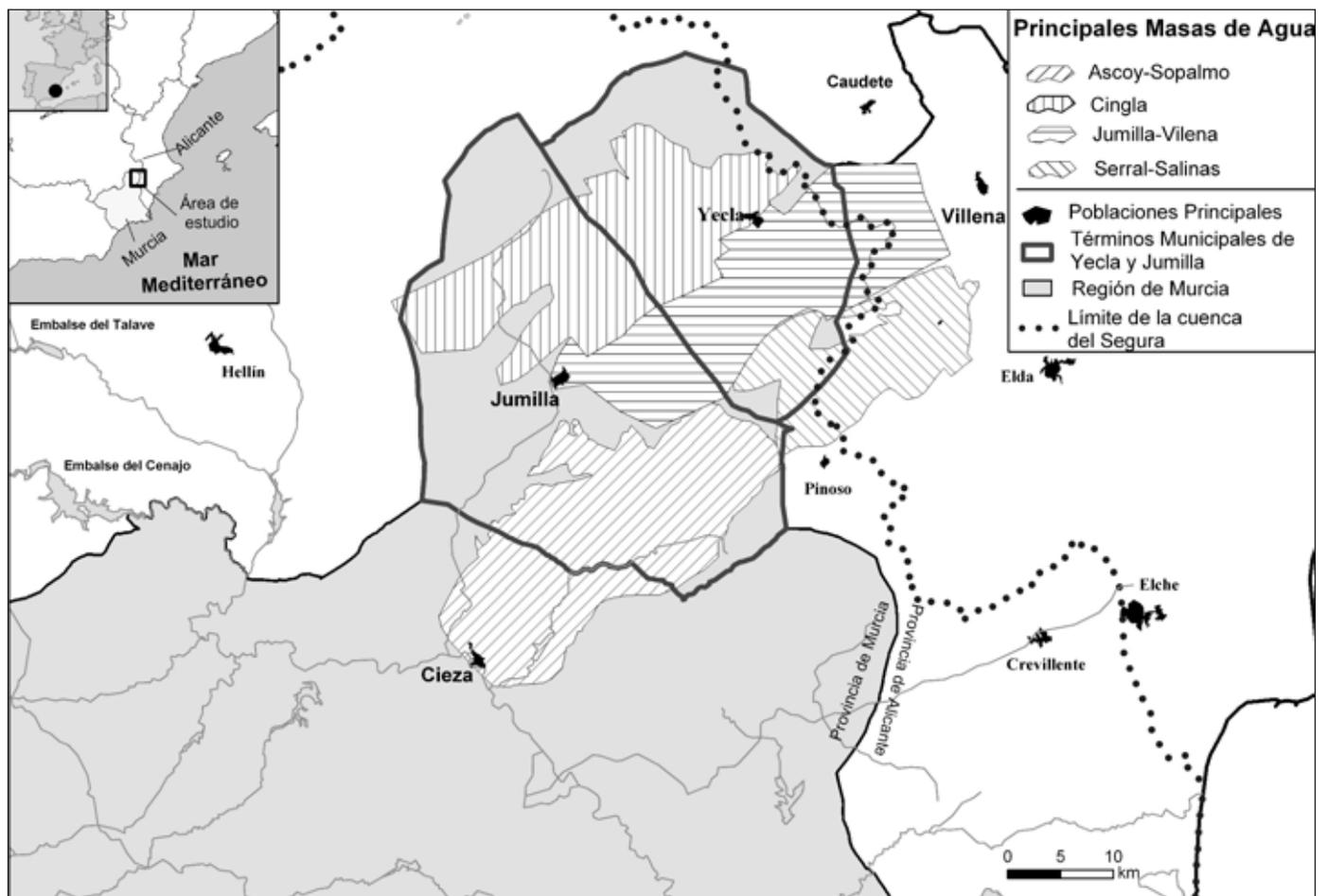


Figura 3. Localización geográfica de la zona de estudio y acuíferos estudiados
 Figure 3. Study area location and studied aquifers

Serral-Salinas, y en la cuenca del Júcar, las M.A.S 8062 Sierra del Castellar y la 8070 Serral-Salinas (Figura 3).

Desde el punto de vista geológico, la zona de estudio se encuentra enclavada en la zona Prebética de las Cordilleras Béticas. Los materiales que constituyen los acuíferos corresponden predominantemente a dolomías y calizas del Cretácico superior y el impermeable de base lo constituyen las formaciones de margas y margocalizas del Cretácico inferior. Hay que considerar también, en la gestión del agua subterránea de esta comarca, a los acuíferos profundos pertenecientes al Jurásico superior y al Valanginiense, pues pueden resolver problemas puntuales, dadas sus excelentes características hidráulicas (caudales de hasta 140 l/s), buena calidad química y 1.750 hm³ de reservas; aunque de forma transitoria, ya que sus recursos son muy limitados (Rodríguez Estrella, 2001).

La Principal actividad económica de la zona es la agricultura, que se caracteriza por una alta rentabili-

dad económica, debido principalmente a la buena comercialización de sus productos. En la actualidad, los cultivos más rentables son los frutales y la uva de mesa.

Resultados de los estudios sectoriales

Los aspectos principalmente considerados en esta investigación se pueden agrupar en hidrológicos, socioeconómicos, y ambientales. Los resultados de estos estudios después se traducirán en variables concretas con sus interrelaciones, que son introducidas en el Sistema Soporte a la Decisión. Respecto a los aspectos hidrológicos, se realizó un estudio hidrogeológico para cada uno de los acuíferos involucrados, así como un modelo de flujo de uno de los acuíferos (IGME-DPA, 2008); para los aspectos socioeconómicos se realizó un modelo agroeconómico de simulación y para los aspectos ambientales se realizó una caracterización ambiental de la zona. Los

	Cingla	Jumilla-Villena	Serral- Salinas	Ascoy-Sopalmo	TOTAL (mill m ³ /año)
Demanda hídrica agrícola (mill m ³ /año)					
Cuenca Segura	25	28	10	72	164
Cuenca Júcar	0	17	12	0	
Total	25	45	22	72	
Extracción para regadío (mill m ³ /año)					
Cuenca Segura	25	21	5	53	128
Cuenca Júcar	0	17	7	0	
Total	25	38	12	53	
Extracción para abastecimiento (mill m ³ /año)					
Cuenca Segura	5	1	0	0	18
Cuenca Júcar	0	6	6	0	
Total	5	7	6	0	
Otros usos (mill m ³ /año)					
Total	0	1	0	0	1
Uso total (mill m ³ /año)					
Cuenca Segura	30	22	5	53	147
Cuenca Júcar	0	24	13	0	
Total	30	46	18	53	

Tabla 1. Demanda hídrica y usos del agua subterránea procedente de las masas de agua subterránea estudiadas
Table 1. Water demand and uses for the groundwater abstraction from the studied groundwater masses

resultados de estos estudios se resumen a continuación.

El estudio de los aspectos socioeconómicos y sus impactos también incluye el análisis de los usos y demandas de agua y sus repercusiones en la sociedad y en la economía de la zona. Para las demandas de agua se han tenido en cuenta los datos procedentes de los planes hidrológicos de las cuencas del Segura (CHS, 1998) y del Júcar (CHJ, 1998), donde se definen una serie de Unidades de Demanda Agraria (UDA), Industrial (UDI) y Urbana (UDU). En el caso de la cuenca del Segura, la demanda hídrica bruta de los regadíos atendidos mayoritariamente a partir de las cuatro masas de agua subterránea asciende a 135 hm³/año para unas 30.000 hectáreas (Tabla 1); los cultivos de regadío predominantes son los frutales no cítricos (albaricoque, melocotón, peral), que ocupan un 35% de la superficie pero consumen un 58% del agua; resulta destacable que la uva de vinificación supone un 25% en superficie y sólo tiene una demanda de agua del 7%. Por otro lado, dentro del ámbito de la cuenca del Júcar se extienden amplias superficies de cultivos de regadío en el Alto y Medio Vinalopó, y el Campo de Alicante (más de 40.000 ha en total), que demandan unos 155 hm³/año atendidos parcialmente a partir de las masas de agua subterránea de Jumilla-Villena y Serral-Salinas (Tabla 1). La mayor parte de los cultivos citados se encuentran fuera de los límites de la comarca del Altiplano cuya superficie de tierras de regadío es de unas 18.000 ha (Yecla 55%; Jumilla 45%).

A pesar de la gran profundidad a la que se encuentra el agua subterránea (más de 200 m), los costes de extracción no suelen superar el 15% de los costes totales de producción agraria, y, en el caso de los frutales se reduce este valor al 10%. El coste medio de

extracción se ha estimado actualmente en 0,17 €/m³, incluidas las infraestructuras, aunque existe gran dispersión de valores. Dicho coste se incrementa ligeramente con el descenso de niveles piezométricos, pero resulta difícil cuantificar el incremento dado que viene muy condicionado por el consumo eléctrico y éste se establece mediante negociación de cada usuario con la compañía eléctrica (0,06 a 0,10 €/kwh). Por tanto, a pesar de que el coste del agua subterránea es de los mayores de España, no es un factor limitante de la rentabilidad agraria en la zona aunque evidentemente sí la reduce; en esta zona el mayor problema realmente se centra en la escasa disponibilidad de agua y el agotamiento físico de las reservas, con importantes incertidumbres de cara a la viabilidad futura de las explotaciones agrarias basadas en recursos hídricos subterráneos.

Los cultivos de frutales son los que tienen mayor capacidad de transacción de dinero ya que las tasas de productividad son muy altas (30 a 35 T/ha/año), y a pesar de tener costes elevados, han sido bastante rentables en los últimos años, con la excepción del melocotón, el cual ha dado pérdidas significativas por su bajo valor de mercado. El margen neto medio para los frutales en la zona se ha cifrado en 8000 €/ha. La uva de mesa presenta unos rendimientos parecidos a los frutales y está generando beneficios en la actualidad debido a su alto valor de mercado. En el caso de la uva de vino los rendimientos son mucho menores (7 T/ha/año), y se trata de cultivos económicamente deficitarios.

Las demandas urbanas e industriales incluidas en la red de abastecimiento ascienden a unos 5,5 hm³/año para satisfacer a más de 60.000 habitantes en la comarca del Altiplano. Por otro lado, en la actualidad se extraen unos 13 hm³/año para satisfacer par-

	Cingla	Jumilla-Villena	Ascoy-Sopalmo	Serral-Salinas	Total
Recarga media (mill m³/año) <i>Periodo 1966/67-2006/2007</i>	13	15	2	5	35
Bombeo actual (mill m³/año) <i>Año 2006-2007</i>	30	46	52	18	147
Variación del almacenamiento actual (mill m³/año) 2006-2007	-17	-31	-50	-13	-111
Bajada del nivel piezométrico total desde el régimen natural (m) <i>Periodo 1966/67-2006/2007</i>	25	115	187	130 (sector occidental) 290 (sector oriental)	
Bajada media del nivel piezométrico durante los diez últimos años (m/año) <i>Periodo 1996/1007-2006/2007</i>	1,3	3,5	4,5	4,9 (sector occidental) 10,5 (sector oriental)	

Tabla 2. Balance hídrico anual de las masas de agua subterránea
Table 2. Annual water balance of the groundwater masses

cialmente las demandas urbanas e industriales de algunos municipios del sistema de explotación Vinalopó-Alacantí, perteneciente a la cuenca del Júcar. El hecho de que el agua subterránea sea la única fuente de suministro tiene evidentes repercusiones socioeconómicas y condiciona el desarrollo urbanístico.

En lo que concierne al estudio de los aspectos hidrológicos e hidrogeológicos, la investigación se ha centrado en el análisis hidrometeorológico necesario para la evaluación de la recarga a los acuíferos, en la cuantificación de la explotación por bombeo y en la determinación del consumo de reservas. La precipitación media en la zona es de unos 300 mm/año, con una fuerte variación interanual (superior en algunos casos al 100%), e intensidades de precipitación ocasionalmente frecuentes que llegan a superar los 100 mm/día. La evaluación de la recarga se ha efectuado con series hidrometeorológicas diarias superiores a 30 años, mediante el código de balance hídrico Visual Balan (Samper *et al.*, 1999), que han permitido cifrar en 35 hm³/año los recursos renovables medios de los acuíferos estudiados, procedentes únicamente de la infiltración de la precipitación sobre los afloramientos permeables (Tabla 2). La aplicación de este método ha puesto de manifiesto los escasos datos existentes para la calibración de los modelos, su dificultad de cálculo y las incertidumbres existentes en la evaluación de la recarga, derivadas en otros motivos del desconocimiento del régimen natural de los acuíferos.

La explotación por bombeo sólo puede ser estimada de forma indirecta dado que apenas existen sondeos con dispositivos de control volumétrico. En el caso de uno de los acuíferos (Serral-Salinas), la investigación realizada ha incluido una reconstrucción de la explotación por bombeo desde su origen mediante el estudio de antecedentes bibliográficos y encuestas de campo a los principales usuarios del agua. A nivel de los cuatro acuíferos estudiados, se estima que actualmente existen unos 125 sondeos activos que aglutinan la mayor parte de la explotación, cuyo valor medio representativo de los últimos diez años asciende a unos 147 hm³/año. No obstante, la cifra de sondeos profundos realmente ejecutados en la zona puede ser hasta cuatro veces mayor dado que ha sido muy frecuente la sustitución o reprofundización; todo ello puede dar idea de la importante inversión realizada.

Los balances hídricos resultantes son claramente deficitarios (Tabla 2), y se traducen en un considerable consumo de reservas (-111 hm³/año), con un vaciado acumulado superior a los 3.000 hm³. Las tasas de descenso de niveles piezométricos llegan a superar los 10 m/año en sectores concretos de los acuífe-

ros. Tales cifras se encuentran entre las mayores de España y de Europa. La mejora del conocimiento de las reservas disponibles y el impacto que produciría su agotamiento, como por ejemplo la compartimentalización de acuíferos, constituye parte del interés de las investigaciones hidrogeológicas recientes (IGME-DPA, 2006).

En relación a los aspectos ambientales, la zona de estudio posee cinco áreas protegidas a nivel europeo catalogadas como LIC (Lugares de Interés Comunitario) e incorporados a la Red Natura 2000; se trata de las sierras del Carche, Salinas, Serral, del Buey y Enmedio. Asimismo, existen figuras de protección ambiental de carácter regional para el Parque Natural de la Sierra del Carche y el Paisaje Natural de la Sierra de Salinas. No se conocen referencias de investigaciones concretas sobre la incidencia de la explotación intensiva de los acuíferos en estas áreas protegidas. El principal impacto ambiental negativo derivado de la explotación intensiva radica sin duda en la pérdida de los manantiales y zonas húmedas asociadas. Respecto a las zonas húmedas, existen referencias de importantes lagunas en cuencas endorreicas de Villena y Salinas (Sociedad y territorio, 2002), con aportaciones parcialmente procedentes de las descargas de los acuíferos Jumilla-Villena y Serral-Salinas, respectivamente; sin embargo, dado que estas lagunas ya fueron desecadas en el siglo XIX mediante drenajes artificiales, resulta difícil conocer la afección real del cese de las aportaciones subterráneas. Al respecto cabe señalar que diversas investigaciones han puesto de manifiesto la pérdida de numerosas zonas húmedas en el sureste español a lo largo del siglo XX, con impactos negativos relacionados con el cambio de las rutas migratorias de las aves, (Gallego-Fernández *et al.*, 1999; Lloyd, 2007).

Sistema soporte a la decisión

El trabajo anterior fue de utilidad para realizar una primera identificación genérica de los principales aspectos e impactos que están relacionados con la explotación intensiva del agua subterránea en la zona (Molina y García-Aróstegui, 2007). Se trata de unas líneas generales de temáticas que, a continuación, se plasmaron en una serie de variables concretas y sus interrelaciones, que formarán la estructura del sistema soporte a la decisión (Tabla 3).

Por otro lado, el diseño de este sistema está basado también en una conceptualización del problema y de los resultados obtenidos del proceso de discusión con los usuarios y agentes interesados. Debido a ésto, no solo las variables y sus relaciones son un

GRUPO	NOMBRE	EXPLICACIÓN
1. PADRES	Climate Change	% Annual Rainfall Reduction
	*WDRC (Coercive Tools)	% Reduction of Agriculture Water Demand Applying Coercive Tools
	*WDRV (Incentive Tools)	% Reduction of Agriculture Water Demand Applying Incentive Tools
	*External irrigation water resource income TJV	million m ³ /y
	*External irrigation water resource income Desalination	million m ³ /y
	*Purchase of WR Offer price	Euros/ha
	*External domestic water resource income JV Transfer	Boolean (Y/N)
	*External domestic water resource income TS Transfer	Boolean (Y/N)
	*Reduction in water concession or quotas	% Reduction in total water quotas assigned
2. DESARROLLADORAS DE INTERVENCIONES	Sale Land OfferPrice (Rustic)	Euros/ha
	Price of External Irrigation Water Resource	Euros/m ³
	External Irrigation water resource Income or Availability	million m ³ /y
	Purchase of water right	% Water Rights sold by the farmers
	Sale of land for Tourist activities	% Irrigated Crop Area sold
3. INTERMEDIAS	Income from sale land	Euros/ha
	Rainfall	Annual Average Rainfall (mm/year)
	Natural recharge	million m ³ /y
	Irrigation Water Need After Rainfall	million m ³ /y
	Water irrigated abstraction 1	million m ³ /y
	Water irrigated abstraction 2	million m ³ /y
	Water irrigated abstraction 3	million m ³ /y
	Water domestic abstraction	Binary (Current Abstraction/None)
	Water abstraction	million m ³ /y
	Annual Water Budget	million m ³ /y
	Crop distribution	% Crop surface
4. OBJETIVOS PARCIALES	Market Trend	Trend of crops prices in the last 5 years
	Variable Costs	% Increasing above Retail Price Index (RPI) RPI: 4,5 %
5. OBJETIVOS FINALES	Total Income from alternative activities	Euros/ha
	Agricultural Net Profit	Euros/ha
	Total Income	Euros/ha
	Natural discharge recovery	years
	Total number of Agricultural Direct Employment	Number of employments/ha

Tabla 3. Lista completa de variables incluidas en el Sistema Soporte a la Decisión
 Table 3. Extended list of variables included in the Decision Support System

reflejo de cómo los stakeholders perciben la realidad del sistema hídrico (Figura 4), sino que también la estructura del modelo, así como la discretización de las tablas de probabilidad condicional, son una fiel reproducción de la realidad.

Se ha propuesto un modelo de redes, que reproduce la estructura del sistema real (Figura 4). Si tenemos en cuenta que el sistema hídrico está formado por cuatro masas de agua independientes, el comportamiento de cada una de ellas es autónomo y, por tanto, las variables hidrológicas también lo son. Es por ello que no tiene sentido hablar de variables hidrológicas medias. Por esta causa, se ha diseñado una red similar para cada acuífero, que pueda ser

comparable con el resto (Figura 4). Las variables socioeconómicas, por el contrario, aunque han sido asignadas por cada área de riego asociada a cada acuífero, sí están relacionadas entre ellas. Por tanto, se engloban en una quinta red (Figura 5), que resume el comportamiento socioeconómico medio de toda la zona de estudio.

Simulación de escenarios de gestión hídrica

Los impactos generados por una hipotética y real gestión integrada del agua en el caso de estudio se ocasionan debido al intento de alcanzar un equilibrio

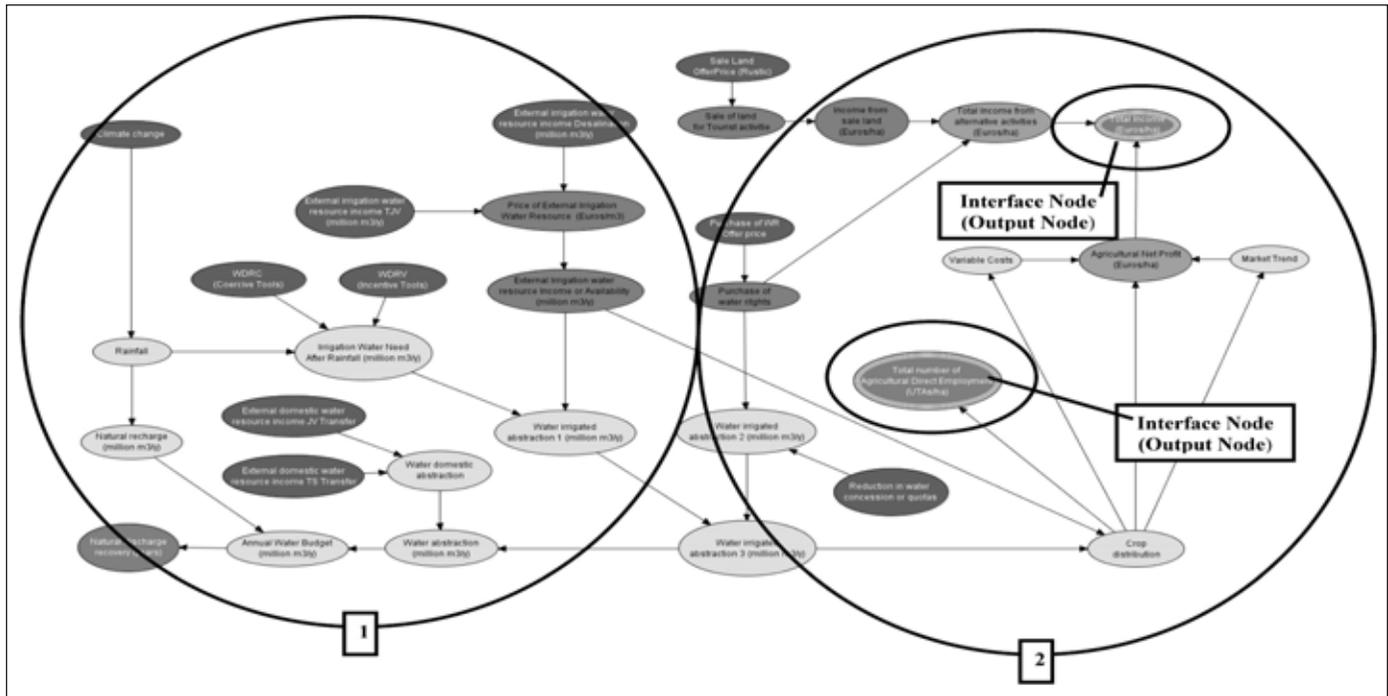


Figura 4. Red Bayesiana para cada acuífero. (1) Parte hidrológica. (2) Parte socioeconómica
 Figure 4. Bayesian network for each aquifer. (1) Hydrological part. (2) Socioeconomic part

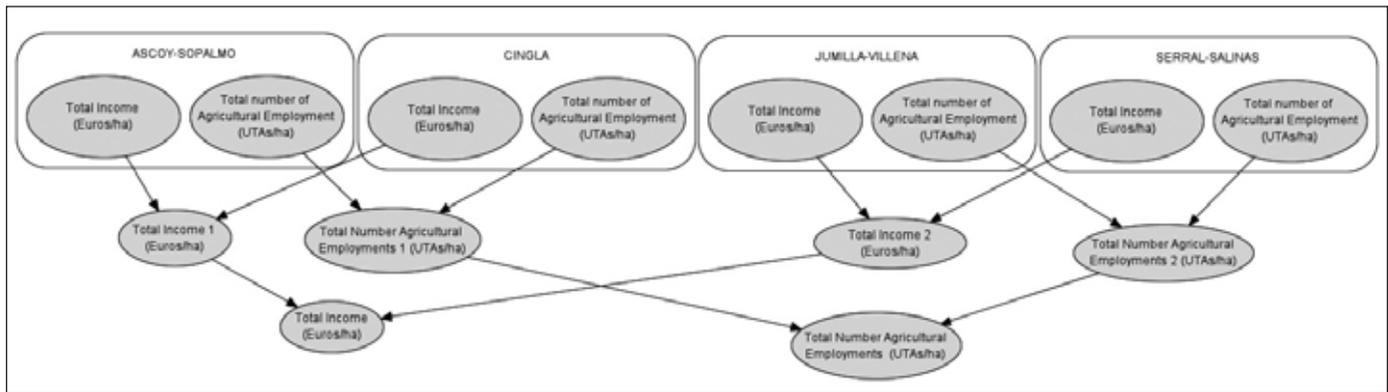


Figura 5. Red final que permite describir el comportamiento socioeconómico de todo el sistema
 Figure 5. Final network that allow calculating the socioeconomic results of the entire water system

entre los intereses socioeconómicos y los ambientales y/o hidrológicos. Estos efectos son evaluados y comparados con el año hidrológico de referencia 2007-2008, que es utilizado para establecer el primer escenario actual (Business As Usual, BAU) (Tabla 4). El segundo escenario está compuesto por intervenciones de gestión individuales inspiradas en acciones ya implementadas en otras demarcaciones hidrográficas como las del Guadiana o Júcar. El grado de aplicación de estas intervenciones, que los stakeholders estarían dispuestos a asumir, fue consultado con ellos a través

de encuestas, cuestionarios, etc. Esta información fue introducida en el sistema soporte a la decisión, y en consecuencia, tanto los estados como las distribuciones de probabilidad son un reflejo de la voluntad de los stakeholders a asumir cada intervención. El tercer escenario evaluado se basa en conseguir un equilibrio en los balances hídricos de cada acuífero, como requisito indispensable que establece la DMA. Para ello, el sistema ha sido forzado para alcanzar dicho equilibrio y poder evaluar los impactos generados en las variables socioeconómicas del sistema.

Los resultados obtenidos de esta simulación de escenarios de gestión han sido expresados de dos formas; en primer lugar una forma estocástica a través de distribuciones probabilísticas, tal y como se han obtenido del sistema soporte a la decisión, y en segundo lugar de una forma determinística con valores discretos representativos de cada distribución de probabilidad, que han sido obtenidos gracias a la técnica de la discretización estadística. Estos últimos resultados son comentados en el apartado de conclusiones.

Los resultados en forma de probabilidad obtenidos de la evaluación de cada intervención para cada acuífero, así como para todo el sistema en general están recogidos en la tabla 4. La probabilidad de recuperación total de los acuíferos hasta su estado natural es prácticamente nula, bajo condiciones actuales. En el segundo escenario, si las intervenciones son llevadas a cabo hasta su extremo máximo, la recuperación de los acuíferos es bastante más probable. No obstante, como esto no es una situación realista, se ha optado por mostrar los resultados obtenidos en situaciones reales en las que las intervenciones propuestas serían implementadas hasta el límite de aceptación de los stakeholders. Se aprecia que no existe gran variación entre los resultados de impactos obtenidos en las variables socioeconómicas generados por cada intervención, dentro del segundo escenario. Esto se explica por varias razones entre las que destacan que se trata de una implementación aceptada por los stakeholders, y por tanto muy suave, y que a la naturaleza leñosa de los cultivos de la zona impide que se pueda producir un cambio de cultivos cada año, como si sucedería en caso de tener cultivos herbáceos. El tercer escenario si refleja grandes impactos socioeconómicos debido al cambio radical del panorama de explotación del agua subterránea, y por tanto, de la disponibilidad hídrica para regadío.

Primer escenario: BAU

El acuífero Ascoy-Sopalmo tiene un 0 % de probabilidad de recuperar su régimen natural bajo las condiciones actuales. Por otro lado, la rentabilidad agrícola "Agricultural Net Profit" de la zona irrigada por el agua procedente de este acuífero es alta. De esta forma, el SSD expresa que existe un 80% de probabilidad de obtener una rentabilidad agraria de entre 1000-5000 euros ha⁻¹ y un 20 % de que se sitúe entre 5000-10000 euros ha⁻¹. Debido a esta alta rentabilidad, la tasa de empleo se sitúa por encima de 0.40 empleos/ha/año, bajo estas condiciones.

El acuífero Serral-Salinas tiene un 3.3% de probabilidad de recuperar su régimen natural, lo cual signifi-

ca una situación casi igual que la anterior (Fig. 4). Por el contrario, la rentabilidad agrícola es buena, con un 100 % de probabilidad de situarse entre 1000-5000 euros ha⁻¹. Cuando se tiene en cuenta la renta procedente de otras actividades no agrícola "Total Income", existe un 13 % de probabilidad de que incremente esa tasa y se sitúe entre 5000 y 10000 euros ha⁻¹. Aquí, hay un 30 % de probabilidad de que la tasa de empleo sea menor de 0,1 empleos por hectárea y año.

El acuífero Jumilla-Villena tiene un 8,8 % de posibilidades de recuperar su régimen natural dentro de un periodo temporal de entre 100 a 200 años. La rentabilidad agrícola tiene un 100 % de estar entre 1000 y 5000 euros ha⁻¹.

El acuífero Cingla tan solo tiene un 0.74 % de probabilidad de recuperar su régimen natural, y la rentabilidad agrícola tiene un 90 % de probabilidad de situarse entre 1000 y 5000 euros ha⁻¹ año, y un 10% de estar comprendida entre 0 y 1000 euros ha⁻¹.

En cuanto a los resultados obtenidos de la evaluación del sistema global bajo las condiciones actuales, existe un 82,49% de que la renta total se sitúe entre 1000 y 5000 euros ha⁻¹, con solo una remota posibilidad (0.08%) de que exceda de 10,000 euros ha⁻¹. Finalmente, existe un 94,4% de posibilidad de obtener entre 0.1 to 0.3 empleos agrícolas por hectárea y año.

Segundo escenario: Intervenciones de gestión hídrica individuales. (Individual Water Management Interventions, IWMA)

Los resultados obtenidos en el primer escenario reflejan claramente que bajo esas condiciones actuales no existe apenas ninguna posibilidad de recuperación de los acuíferos. Por otro lado, si las intervenciones de gestión hídrica son llevadas a cabo hasta su extremo la recuperación sería mucho más probable, pero la implementación real de esas medidas sería imposible debido a los intereses contrarios principalmente de los agricultores. Como se ha dicho anteriormente la evaluación de la implementación de cada intervención se ha realizado desde un punto de vista realista y teniendo en cuenta el límite de aceptación de los stakeholders, obtenido mediante su participación activa a través de cuestionarios, reuniones, entrevistas etc. Las intervenciones evaluadas para este escenario y para cada acuífero son la entrada de recurso hídrico externo para regadío ("External Irrigation Water Resource Income", EIWRI), la entrada de recurso hídrico externo para uso doméstico ("External Domestic Water Resource Income", EDWRI"), la compra de derechos de agua "Purchase of Water Rights",

PWR), y la reducción de la demanda hídrica ("Water Demand Reduction", WDR).

Los impactos de cada intervención en las variables objetivo del sistema se muestran en la Tabla 4. El impacto en las variables no es muy fuerte debido a dos razones principales. (1) Las medidas extremas de cada intervención no han sido consideradas, sino solamente aquellas que los stakeholders aceptarían y verían razonables. (2) La mayoría de los cultivos son leñosos y, por tanto, no pueden ser cambiados de un año para otro. De esta forma, para que se reflejara un cambio drástico en las variables objetivo o de salida se requeriría llevar hasta el extremo dichas intervenciones o la implementación simultánea de algunas de ellas.

Tercer escenario: Water Balance Equilibrium (WBE)

Este escenario, que implica el equilibrio de los balances hídricos de cada acuífero genera unos resultados de extraordinaria importancia. De esta forma, el área de regadío más afectada sería la relacionada con el acuífero Ascóy-Sopalmo, debido a que se produciría la mayor pérdida de rentabilidad agrícola. Debido a esto, en condiciones actuales y para este mismo acuífero existe un 7,3 % de probabilidad de obtener una rentabilidad agrícola entre 0 y 1000 euros/ha, mientras que bajo este escenario esa probabilidad sube hasta el 99,51 % para el mismo intervalo de rentabilidad. El número de empleos agrícolas es otra variable seriamente afectada en estas condiciones; de esta forma, se produciría un incremento del 100% de probabilidad entre el primer escenario (BAU) y este escenario para generarse una tasa de empleo de entre 0-0,1 empleos/ha. Estos resultados son muy lógicos ya que precisamente este área de regadío, que es el más rentable, es abastecido por el acuífero con mayor tasa de déficit hídrico, es decir con una mayor diferencia entre su recarga y su explotación por bombeo. Los efectos socioeconómicos producidos por esta intervención no pueden ser paliados por ninguna otra intervención y, por tanto, el impacto global implicaría prácticamente la total destrucción de la agricultura productiva de la zona y obviamente, sus empleos relacionados. El área de regadío perteneciente al acuífero Cingla también sufriría una gran reducción en el número de empleos, con una reducción en la probabilidad del 15 % para el intervalo 0,3-0,4 empleos/ha. El mayor impacto en el sistema en general está relacionado con la pérdida de empleos agrícolas, ya que se produciría un descenso de aproximadamente un 17% para el intervalo entre 0-0,1 empleos/ha, en comparación con el primer escenario de condiciones actuales.

Conclusiones

El primer escenario continuista, implica no realizar ninguna intervención de gestión hídrica, lo que supone el futuro agotamiento físico de los acuíferos y por tanto, la adaptación del sistema en su conjunto a una nueva situación en la que el modelo de desarrollo debería cambiar. Es para este escenario donde un conocimiento preciso de las reservas de los acuíferos es más necesario, en el sentido de estimar vidas útiles de los mismos, de cara a una gestión de la oferta fiable.

El segundo escenario ha consistido en la simulación de diversas intervenciones individuales de gestión, que reflejan la voluntad de los grupos de interés a realizarlas. Por tanto, el impacto en términos de reducción del déficit hídrico, de cada una por separado no es muy grande. Estas son las principales conclusiones extraídas para cada intervención:

Se ha contemplado la posibilidad de entrada al sistema de agua procedente de una fuente externa. En primer lugar, a través de una permuta de utilización de derechos de agua desalada con comarcas de regadío costeras, suplidas mediante derechos de agua del Trasvase Tajo-Segura. El impacto de esta intervención ha estimado en unos 43 hm³/año, de reducción de la explotación intensiva del agua subterránea. En segundo lugar existen otras actuaciones como la construcción actual del trasvase Júcar-Vinalopó, que aliviará la situación de sobreexplotación en el área oriental pero que el impacto en el área total no será muy importante en términos de reducción de la explotación intensiva (20 hm³/año), habida cuenta del gran déficit existente.

Actualmente existen actuaciones parciales, como la incorporación de los abastecimientos públicos de Yecla y Jumilla a la Mancomunidad de los Canales del Taibilla, de tal manera que se paralicen la explotación actual de aguas subterráneas para éste uso. Esta intervención supondrá una reducción del déficit hídrico de unos 5 hm³/año.

Otra intervención simulada es la posible compra de derechos de los regantes de explotación de aguas subterráneas. No obstante, los regantes son muy reacios a vender sus derechos y por tanto la oferta de compra debe ser atractiva para estimular su venta. Por medio de esta actuación, se produciría una reducción del déficit hídrico de unos 9 hm³/año

El tercer escenario se ha establecido como un requerimiento de la DMA que impone un plazo para alcanzar el buen estado cualitativo y cuantitativo de las masas de agua para el año 2015. La Directiva prevé que puedan retrasarse o derogarse los objetivos medioambientales cuando las masas de agua estén muy modificadas y/o los costes de su recupera-

ACUÍFERO	INTERVENCIÓN	PROBABILIDAD DE LAS VARIABLES OBJETIVO											
		Recuperación del régimen natural (%)		Renta agrícola (%) (€/ha)			Renta Total (%) (€/ha)				Número de empleos agrícolas (%) (emp/ha)		
	ESTADO	Si	No	0-1000	1000-5000	5000-10000	0-1000	1000-5000	5000-10000	10000-20000	0-0,1	0,1-0,3	0,3-0,4
ASCOY-SOPALMO	BAU	0	100	7,3	77,30	15,4	4,96	72,62	21,87	0,55	0	0	100
	EIWRI (Irrigation)	0	100	7,47	72,76	19,76	5,00	69,26	25,03	0,70	0,69	0	99,31
	PWR	0	100	8,46	73,82	17,72	4,97	69,81	24,52	0,70	1,55	0	98,45
	WDR	0	100	17,04	68,83	14,13	10,23	69,44	19,83	0,5	10,63	0	89,37
	ALL INTERVENTIONS	2,19	97,81	29,48	58,04	12,48	15,27	66,28	17,96	0,49	24,17	0	75,83
	W.B EQUILIBRIUM	100	0	99,51	0,49	0	54,87	45,07	0,06	0	100	0	0
SERRAL-SALINAS	BAU	3,28	96,72	11,70	87,6	0,7	7,07	80,82	12,09	0,03	30	70	0
	EIWRI (Irrigation)	3,86	96,14	13,46	82,16	4,38	7,92	77,42	14,48	0,18	30,29	64,57	5,14
	EDWRI (domestic)	11,63	88,37	11,52	84,45	4,03	6,94	78,41	14,48	0,17	28,85	66,52	4,63
	PWR	3,65	96,35	13,8	83,26	2,94	7,28	78,02	14,57	0,13	30,99	65,86	3,15
	WDR	4,22	95,78	17,22	80,98	1,80	9,86	77,92	12,15	0,07	34,07	64,34	1,59
	ALL INTERVENTIONS	36,82	64,18	26,77	71,94	1,29	13,27	75,20	11,47	0,06	41,82	57,19	0,99
	W.B EQUILIBRIUM	100	0	12,73	83,88	3,39	7,56	78,42	13,87	0,14	30,01	66,23	3,76
JUMILLA-VILLENA	BAU	8,78	91,22	4,4	91,9	3,70	3,32	81,34	15,19	0,15	0	100	0
	EIWRI (Irrigation)	8,61	91,39	5,28	82,45	12,26	3,67	74,64	21,18	0,51	1,41	84,85	13,74
	EDWRI (domestic)	14,99	85,01	4,5	89,5	5,99	3,35	79,6	16,81	0,25	0,24	96,09	3,67
	PWR	8,52	91,48	6,77	87,73	5,51	3,95	78,41	17,39	0,25	2,58	94,38	3,03
	WDR	8,78	91,22	14,04	82,49	3,47	8,22	77,87	13,76	0,14	10,09	89,68	0,24
	ALL INTERVENTIONS	12,13	87,87	21,23	72,19	6,58	10,64	73,05	16,01	0,30	17,81	75,55	5,64
	W.B EQUILIBRIUM	100	0	4,6	91,71	3,69	3,42	81,27	15,15	0,15	0,21	99,79	0
CINGLA	BAU	0,74	99,26	52,20	47,80	0	27,68	66,05	6,27	0	30	70	0
	EIWRI (Irrigation)	4,37	95,63	44,7	44,42	10,88	23,74	60,78	15,02	0,45	26,36	58,66	14,98
	EDWRI (domestic)	0,65	99,35	47,45	46,14	6,41	25,19	63,07	11,47	0,27	27,36	63,81	8,82
	PWR	3,32	96,68	49,62	45,52	4,85	24,09	64,98	10,72	0,21	29,52	63,80	6,68
	WDR	12,61	87,39	56,51	43,01	0,48	29,87	64,06	6,05	0,02	36,74	62,60	0,66
	ALL INTERVENTIONS	38,37	61,63	57,88	36,65	5,47	27,96	61,86	9,92	0,25	42,15	50,31	7,53
	W.B EQUILIBRIUM	100	0	61,62	38,38	0	32,47	62,49	5,04	0	44	56	0
OVERAL SYSTEM	BAU						0,63	82,49	16,8	0,08	1,54	94,42	4,04
	EIWRI (Irrigation)						0,53	75,84	23,38	0,25	1,32	90,26	8,41
	EDWRI (domestic)						0,55	78,6	20,68	0,17	1,32	92,23	6,45
	PWR					NO APLICABLE	0,56	78,6	20,68	0,16	1,86	92,58	5,56
	WDR						1,10	83,73	15,10	0,07	4,44	92,26	3,30
	ALL INTERVENTIONS						1,43	82,51	15,94	0,12	8,26	88,31	3,43
	W.B EQUILIBRIUM						2,91	88,18	8,89	0,03	18,42	81,48	0,10

Tabla 4. Resultados probabilísticos de la situación de los escenarios de gestión hídrica
 Table 4. Probabilistic results from simulation of water management scenarios

ción sean desproporcionados. Sin embargo, en tales casos, la Directiva indica que no puede continuarse con el deterioro, lo que obliga, en el caso de estudio, a igualar los recursos disponibles con la explotación. Se ha realizado la evaluación del impacto de este escenario por dos vías diferentes; si se realiza a través de una permuta de derechos de agua desalada con comarcas costeras el impacto sería de 35 mill. €/año en términos de pérdida de Margen Neto agrícola; para el caso de una compra de derechos el impacto sería de 120 mill €/año en términos de lucro cesante. Por tanto, es evidente que cualquier intento por restaurar o al menos equilibrar los balances de los sistemas acuíferos mediante esta medida, requiere una reestructuración total del actual sistema de derechos de extracción.

Por tanto, el plazo establecido por la DMA para la consecución del buen estado cuantitativo y cualitativo de las el año 2015 es imposible de llevar a cabo en esta comarca debido al gran impacto económico que esto supone y es muy difícil de cumplir incluso con las dos prórrogas previstas (año 2027).

Referencias

- Aragón, R., Solís, L., García Lázaro, U., Grís, J. y Rodríguez Estrella, T. 1992. Groundwater problems in Segura basin. Economic impact of overexploitation in the Mazarrón zone (Murcia, Spain). En: Simmer, Villarroja y Rebollo (ed.), *Selected Papers on Aquifer overexploitation*. IAH Hannover (3), 235-246.
- Bromley, J., Jackson, N., Clymer, O., Giacomello, A. and Jensen, F. 2005. The use of Hugin to develop Bayesian Network as an aid to integrated water resource planning. *Environmental Modelling & Software*, (20), 231-242.
- Cain, J. 2001. *Planning improvements in natural resources management*. Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford.
- CHJ (Confederación Hidrográfica del Júcar) 1998. *Plan Hidrológico de la Cuenca del Júcar*. Confederación Hidrográfica del Júcar, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- CHS (Confederación Hidrográfica del Segura) 1998. *Plan hidrológico de la cuenca del Segura*. Confederación Hidrográfica del Segura, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- EC 2000. *Water Frame Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council, establishing a framework for Community action in the field of water policy*. Official Journal 327 European Commission, Brussels.
- Gallego-Fernández, J., García-Mora, M.R. y García-Novo, F. (1999). Small wetlands lost: a biological conservation hazard in Mediterranean landscapes. *Environmental Conservation* (26), 190-199.
- IGME-DPA 2006. *Estudio del funcionamiento hidrogeológico y elaboración de un modelo numérico de flujo subterráneo en los acuíferos carbonatados de Solana y Jumilla-Villena*. IGME, Madrid.
- IGME-DPA 2008. *Estudio de funcionamiento y aplicación de modelos numéricos en acuíferos carbonatados explotados intensivamente: Serral-Salinas (Murcia-Alicante)*. IGME, Madrid.
- Koller, D. and Pfeffer, A. 1997. Object-oriented Bayesian networks. *Thirteenth Annual Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI-97)*, Providence, Rhode Island.
- Lloyd, N. 2007. Iberia Nature. A guide to the natural history of Spain. 18/03/2009. http://www.iberianature.com/material/Lakes_Wetlands_Spain.html.
- Molina, J. L. y García Aróstegui, J. L. 2007. Identificación preliminar de impactos del uso intensivo del agua subterránea en el sureste español: Acuífero Serral-Salinas (Murcia-Alicante). *Monográfico del Boletín Geológico y Minero sobre la II Semana de Jóvenes Investigadores del IGME*, Madrid, 2007.
- Molina, J.L., Bromley, J., García-Aróstegui, J.L., Sullivan, C. and Benavente, J. (en prensa). Application of Object-Oriented Bayesian networks to Integrated Water Resources Management: Theoretical background. *Environmental Modelling & Software*.
- Rodríguez Estrella, T. 1983. Neotectónica relacionada con las estructuras diapíricas en el Sureste de la Península Ibérica. *III Semin. de Neotectónica. Univ. Compl. Madrid. Tecniterrae*, Madrid, 14-30.
- Rodríguez Estrella, T. 1999. Some consideration on the concept of "hydrogeological heritage", with special reference to the hydrogeological heritage of the Murcian region of Spain. En: Baretino, Vallejo y Gallego (ed.), *Towards the Balanced Management and Conservation of the Geological Heritage in the New Millenium*, Madrid, 166-171.
- Rodríguez Estrella, T. 2001. Los acuíferos profundos: ¿Un aliento que puede alargar la agonía de los acuíferos sobreexplotados del Altiplano de Jumilla y Yecla (Murcia)? *VII Simposio de Hidrogeología*, Murcia, 717-732.
- Rodríguez Estrella, T. 2004. Sobreexplotación de acuíferos y desertificación en el Sureste Español. pp 105-135. En: Fundación Ramón Areces y Fundación Instituto Euromediterráneo de Hidrotecnia (ed.), *Arididad, Salinización y Agricultura en el Sureste Ibérico*, Madrid.
- Samper, J., Huguet, L., Ares, J. y García Vera, M.A. 1999. *Manual del usuario del programa VISUAL BALAN v.1.0: Código interactivo para la realización de balances hidrogeológicos y la estimación de la recarga*. ENRESA, Madrid. 205 pp.
- Sociedad y territorio 2002. *Salinas*. Excmo. Ayuntamiento de Salinas y Universidad de Alicante, Alicante.

Recibido: abril 2009

Revisado: abril 2009

Aceptado: mayo 2009

Publicado: julio 2009