

## **Optimización de la gestión de recursos hídricos en cuencas deficitarias**

Molinos-Senante, María (maria.molinos@uv.es); Hernández-Sancho, Francesc; (francesc.hernandez@uv.es); Mocholí-Arce, Manuel (manuel.mocholi@uv.es) y Sala-Garrido, Ramón (ramón.sala@uv.es)  
*Departamento de Economía Aplicada y Departamento de Matemáticas para la Economía y la Empresa  
Universidad de Valencia*

### **RESUMEN**

La gestión de recursos hídricos debe realizarse de forma eficiente, eficaz y sostenible, especialmente en áreas con déficit hídrico. Así, las técnicas de optimización constituyen una herramienta de gran utilidad en el proceso de toma de decisión para la asignación del agua entre los distintos usuarios. Por ello y con el objetivo de maximizar el valor del uso del agua, se ha desarrollado un modelo de optimización global que integra múltiples ofertas de agua (convencional y no convencional) y múltiples demandas. En la función objetivo se han introducido penalizaciones de forma que el modelo contempla la posibilidad de que no toda la demanda de agua sea satisfecha. Como aspectos más novedosos, el modelo incorpora la eficiencia en las redes de distribución y la existencia de conexiones físicas entre la oferta y la demanda. Posteriormente, se ha desarrollado una aplicación empírica para una cuenca mediterránea demostrando la utilidad del modelo para resolver problemas de desequilibrio hídrico a escala de cuenca hidrográfica.

## **ABSTRACT**

Water management should be done in an efficient, effective and sustainable way mainly in areas with water scarcity problems. Hence, optimization is a useful tool in the decision making process for water allocation. In this context and in order to maximize the value of water use it has been developed a global optimization model which integrates multiple water supply sources (conventional and non-conventional) and multiple demands. Penalties caused by water shortage have been incorporated in the objective function to consider the possibility that not all water demand can be satisfied. As most novel aspects, the model takes into account the efficiency in the water distribution networks and the existence of physical connections between supply and demand. Subsequently, an empirical application has been developed for a Mediterranean watershed. It shows the usefulness of the model to solve water imbalances at river basin level.

***Palabras claves:***

Asignación de agua; gestión integrada de recursos hídricos; modelos de optimización; gestión sostenible del agua; escasez de agua.

***Área temática:*** Optimización.

## **1. INTRODUCCIÓN**

El agua es un recurso básico para el desarrollo humano. Tradicionalmente, el suministro de agua se ha realizado de forma que se abastecía el 100% de las necesidades de agua demandadas por los distintos usuarios (Medellín-Azuara et al., 2007). El incremento de los costes de abastecimiento y la escasez de recursos hídricos en determinadas áreas ha planteado la necesidad de desarrollar sistemas de suministro de agua más sostenibles. En este contexto, nace el concepto de Gestión Integral de Recursos Hídricos (GIRH), cuyo objetivo es equilibrar la oferta y la demanda de agua en base a la disponibilidad de recursos hídricos, tanto convencionales como no convencionales e integrando aspectos tanto cuantitativos como cualitativos. Por ejemplo, aunque desde el punto de vista es viable la producción de agua potable a partir de agua regenerada, lo cierto es que por razones de aceptabilidad, la reutilización de agua residual está limitada básicamente al ámbito agrícola. Sin embargo, bajo la perspectiva de GIRH, en áreas con escasez hídrica podría realizarse la transferencia de agua subterránea (alta calidad) desde la agricultura a usos urbanos e industriales y abastecer a la agricultura con agua regenerada. En definitiva, se trata de realizar una distribución de los recursos hídricos disponibles teniendo en cuenta la calidad requerida por cada usuario.

En los últimos años, se ha puesto de manifiesto que uno de los retos más importantes en áreas deficitarias de agua es la asignación del agua disponible ya que la competencia por su uso entre la demanda agrícola, urbana, industrial y ambiental se ha intensificado. En este sentido, se han desarrollado diversos modelos de optimización cuyo objetivo es mejorar la gestión y planificación de los recursos hídricos. Debido a que tradicionalmente la agricultura es el usuario con mayor demanda de agua, un amplio número de modelos de optimización se han centrado en la asignación óptima de recursos hídricos en sistemas agrícolas (Lu et al., 2012; Ortega Alvarez et al., 2004; Reca et al., 2001). Más recientemente, los modelos de optimización han incorporado el concepto de recursos hídricos no convencionales (Medellín-Azuara et al., 2007; Ray et al., 2010).

Hasta la fecha, únicamente los modelos desarrollados por Han et al. (2008) y Kondili et al. (2010) han considerado múltiples usuarios y múltiples fuentes de agua (convencionales y no convencionales). El trabajo de Han et al. (2008) no presenta un enfoque económico y además se centra en el ámbito urbano. En este sentido, la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/UE) establece claramente que la gestión de los recursos hídricos debe realizarse a escala de cuenca hidrográfica. Por otra parte, la principal limitación del modelo de Kondili et al. (2010) es que la función objetivo no incluye el coste de distribución del agua ya que asume que los usuarios toman el agua directamente de un tanque de almacenamiento.

En base al concepto de GIRH, en este trabajo hemos desarrollado un modelo global de optimización para la asignación de los recursos hídricos que integra múltiples demandas y múltiples ofertas (convencionales y no convencionales). La solución óptima global queda garantizada ya que el modelo propuesto es una adaptación del *modelo general del transporte*. El objetivo es maximizar el valor del agua teniendo en cuenta los ingresos y los costes asociados a su uso.

Hay tres aspectos novedosos que diferencian el modelo propuesto de otros previamente existentes: i) integra aspectos cualitativos tanto desde el punto de vista de la demanda como de la oferta; ii) el modelo contempla la existencia de conexión física entre la oferta y la demanda; y iii) se han considerado las pérdidas de agua o la eficiencia en la distribución de la misma.

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1. Elementos del modelo**

Tanto desde el lado de la oferta como de la demanda, el modelo considera varios elementos. Por parte de la oferta se han considerado como recursos convencionales el agua superficial (S) y el agua subterránea (B). Mientras que como recursos no convencionales, el modelo integra el agua regenerada (R) y el agua desalada (D). Además se ha considerado el agua procedente de trasvases entre cuencas hidrográficas como un tercer tipo de oferta de agua. Desde el lado de la demanda, se han considerado tres usuarios: i) urbano (U); ii) industrial (I); y iii) agrícola (A).

Debido a que el modelo desarrollado integra aspectos cualitativos, no todas las fuentes de agua pueden suministrar todas las demandas. En la Figura 1 se muestra el esquema general de la distribución de agua.

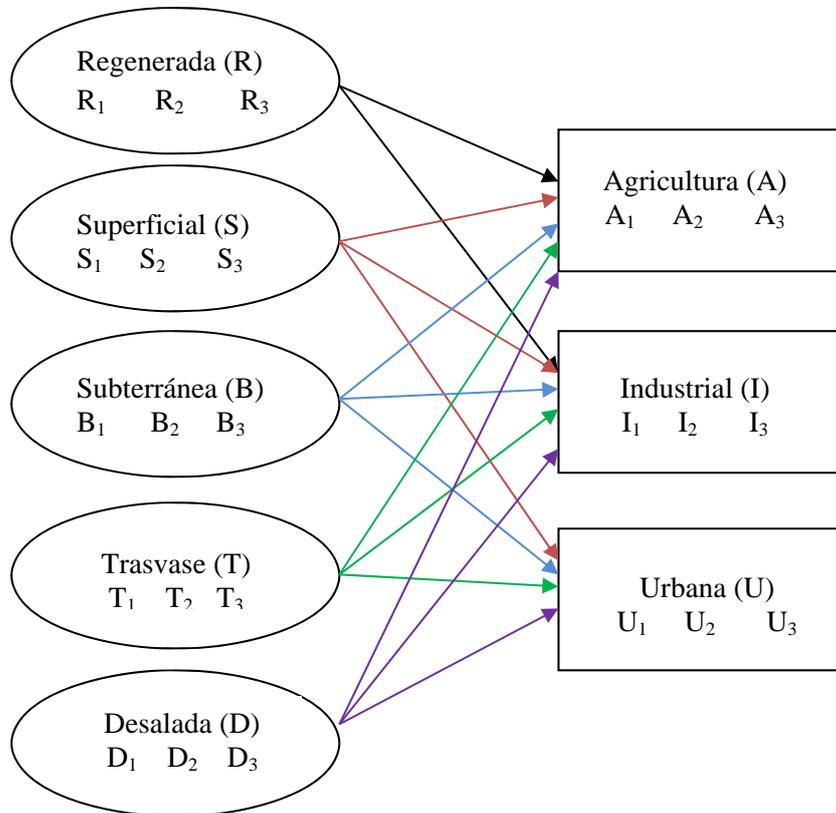


Figura 1. Esquema general de asignación de agua.

Las tres demandas de agua (urbana, agrícola e industrial) pueden ser suministradas con agua superficial, subterránea, desalada y procedente de trasvases. Sin embargo y debido a su elevada variabilidad en cada caso es necesario evaluar la calidad de cada fuente de agua. En relación al agua regenerada, el Real Decreto 1620/2007 no permite el uso de agua reutilizada para uso urbano potable. Aunque está permitido el uso de agua regenerada tanto para uso agrícola como industrial, los estándares de calidad que debe cumplir el agua reutilizada son diferentes. Por lo tanto, al igual que para las otras fuentes de agua, la calidad de la misma debe ser evaluada previamente.

## 2.2. Función objetivo

El objetivo del modelo es maximizar los beneficios del uso del agua. Por ello, la función a maximizar (Ec. 1 y 4) es la diferencia entre los ingresos totales y los costes totales. El problema de optimización debe resolverse para un determinado horizonte temporal que dependerá del objetivo del planificador y del problema específico a resolver. En la Tabla 1 se muestran las variables del modelo.

Variable	Description
Índice $j$	Indica cada origen de agua de las cinco fuentes
Índice $k$	Indice el destino del agua en cada uno de las tres demandas
$R_{kt}$	Productividad del agua recibida por el usuario $k$ en el intervalo $t$ ( $\text{€m}^3$ )
$Dem_{kt}$	Demanda de agua del usuario $k$ en el intervalo $t$ ( $\text{m}^3$ )
$Def_{kt}$	Déficit (demanda no satisfecha) de agua del usuario $k$ en el intervalo $t$ ( $\text{m}^3$ )
$C_{jkt}$	Coste del suministro de agua desde el origen $j$ al destino $k$ en el intervalo $t$ ( $\text{€m}^3$ )
$X_{jkt}$	Agua enviada desde el origen $j$ al destino $k$ en el intervalo $t$ ( $\text{m}^3$ )
$P_{kt}$	Penalización por no satisfacer toda la demanda del usuario $k$ en el intervalo $t$ ( $\text{€m}^3$ )
$MC_{jkt}$	Matriz de conexión entre el origen $j$ y el destino $k$ en el intervalo $t$
$ME_{jkt}$	Matriz de eficiencia entre el origen $j$ y el destino $k$ en el intervalo $t$
$AVAI_{jt}$	Disponibilidad de agua en el origen $j$ en el intervalo $t$ ( $\text{m}^3$ )
$Min_{jkt}$	Cantidad mínima de agua que debería ser transportada desde el origen $j$ al destino $k$ en el intervalo $t$ ( $\text{m}^3$ )
$Max_{jkt}$	Cantidad máxima de agua que podría ser transportada desde el origen $j$ al destino $k$ en el intervalo $t$ ( $\text{m}^3$ )
$Z_{jkt}$	Variable binaria que indica si se usa o no la conexión entre el origen $j$ y el destino $k$ en el intervalo $t$
$Dmin_{ut}$	Demanda mínima de agua que debe ser satisfecha del destino urbano $u \in k$ en el intervalo $t$ ( $\text{m}^3$ )

Tabla 1. Descripción de las variables del modelo.

En áreas con escasez de recursos hídricos a menudo la demanda total de agua excede la disponibilidad y por lo tanto no se pueden satisfacer todos los requerimientos. En otras palabras, hay déficit de agua. Es bien sabido que la falta de agua no afecta igual a todos los usuarios y tal como se ha establecido en los planes de cuenca, en España existe una jerarquía bien definida a la hora de establecer las prioridades de abastecimiento. Además, dentro de un mismo uso, el déficit de agua afecta de distinta forma a cada usuario. Por ejemplo, las pérdidas económicas asociadas a la escasez de agua en cultivos plurianuales son mucho mayores que las sufridas en caso de que sean cultivos anuales los que no puedan ser regados. En este sentido, el coste asociado al

déficit de agua para cada uso ha sido introducido en la función objetivo en forma de penalizaciones.

El ingreso total obtenido por el uso del agua tiene en cuenta la productividad del agua para el destino  $k$  ( $R_k$ ) y la cantidad de agua usada que es la diferencia entre la cantidad demandada ( $Dem_k$ ) y el déficit de agua ( $Def_k$ ) en cada destino.

$$Max Ben = Ingreso total - Coste total \quad (1)$$

$$Ingreso total = \sum_t \sum_k R_{kt} (Dem_{kt} - Def_{kt}) \quad (2)$$

$$Coste total = \sum_t \sum_j \sum_k C_{jkt} X_{jkt} + \sum_t \sum_k P_{kt} Def_{kt} \quad (3)$$

El coste total implica dos conceptos. El primero hace referencia al coste de suministrar agua desde el origen  $j$  hasta el destino  $k$ . Este término incluye los costes derivados de la construcción y mantenimiento de las infraestructuras de abastecimiento como son los canales, las plantas de regeneración de agua residual o las plantas desalinizadoras. Los costes del transporte del agua también están incluidos en este primer término. El segundo término hace referencia a los costes de escasez de agua. Para cada destino  $k$  se ha definido una penalización ( $P_k$ ) que tiene en cuenta el coste de no suministrar toda el agua demandada.

En base a las ecuaciones (1), (2) y (3), la función objetivo (Ec. 4) se define como:

$$Max Ben = [\sum_t \sum_k R_{kt} (Dem_{kt} - Def_{kt})] - [\sum_t \sum_j \sum_k C_{jkt} X_{jkt} + \sum_t \sum_k P_{kt} Def_{kt}] \quad (4)$$

donde,

$$j = \{r_1, \dots, r_{nr}\} \cup \{s_1, \dots, s_{ns}\} \cup \{b_1, \dots, b_{nb}\} \cup \{t_1, \dots, t_{nt}\} \cup \{d, \dots, d_{nd}\}$$

$$k = \{a_1, \dots, a_{ma}\} \cup \{i_1, \dots, i_{mi}\} \cup \{u_1, \dots, u_{mu}\}$$

Un aspecto importante que debe ser considerado es la existencia de infraestructuras de conexión entre los orígenes y los destinos, es decir, no todas las ofertas pueden suministrar agua a todos los destinos. Por ejemplo, el agua regenerada suele utilizarse para abastecer a los destinos que están más cerca de las instalaciones de

regeneración del agua residual. Es por ello que se ha definido una matriz de conexión ( $MC_{jkt}$ ). Se trata de una matriz binaria que toma el valor cero si no hay conexión entre el origen  $j$  y el destino  $k$  mientras que toma el valor de 1 si el origen y el destino están conectados.

Además de las conexiones, hay que tener en cuenta las pérdidas de agua fundamentalmente asociadas a fugas en las redes de distribución pero también por evaporación. En este sentido, no toda el agua enviada inicialmente desde el origen  $j$  llega al destino  $k$ . Para integrar esta cuestión en el modelo de optimización, se ha definido una matriz de eficiencia ( $ME_{jkt}$ ) que representa el porcentaje de agua enviada desde el origen  $j$  que llega al destino  $k$ . Es por ello que para cuantificar el coste de suministro de agua se ha utilizado como variable la cantidad de agua enviada ( $X_{jkt}$ ) mientras que para el caso de los ingresos, los cálculos se han realizado en base a la cantidad de agua que llega al destino ( $Dem_{kt} - Def_{kt}$ ) (ver ec. 6).

### 2.3. Restricciones

#### *Restricciones de disponibilidad de agua*

En relación a la disponibilidad de agua, hay dos restricciones fundamentales: i) la suma del agua enviada desde cada origen a los distintos destinos no puede exceder la disponibilidad total de agua en cada origen (Ec. 5); y ii) la cantidad de agua que llega a cada destino  $k$  debe ser igual a la suma del agua recibida desde los distintos orígenes  $j$  teniendo en cuenta la eficiencia en la distribución del agua (Ec. 6).

$$\sum_k X_{jkt} MC_{jkt} \leq AVA_{jt} \quad \forall j, t \quad (5)$$

$$\sum_j X_{jkt} ME_{jkt} = Dem_{kt} - Def_{kt} \quad \forall k, t \quad (6)$$

#### *Restricción técnica*

Además de la existencia de conexiones físicas entre los orígenes y los destinos ( $MC_{jkt}$ ) debe tenerse en cuenta tanto la mínima como la máxima cantidad de agua que éstas pueden transportar. La cantidad de agua enviada desde el origen  $j$  hasta el destino  $k$  debe estar comprendida entre la capacidad mínima y máxima de la conexión.

$$Min_{jkt} Z_{jkt} \leq X_{jkt} MC_{jkt} \leq Max_{jkt} Z_{jkt} \quad \forall k, t \quad (7)$$

### *Restricción legal*

La legislación sobre abastecimiento de agua potable establece una cantidad mínima de agua que debe ser suministrada por persona y día (100 l/hab/día en el caso de España). Se trata de una cuestión de salud pública que debe ser considerada en el modelo de optimización. La cantidad de agua que llega a cada unidad de demanda urbana ( $Dem_{ut} - Def_{ut}$ ) debe ser igual o mayor que el requerimiento legal ( $Dmin_{ut}$ ).

$$Dmin_{ut} \leq Dem_{ut} - Def_{ut} \quad \forall u, t \quad (8)$$

## **3. CASO DE ESTUDIO**

El modelo desarrollado ha sido aplicado en la Cuenca del Río Serpis (CRS) perteneciente a la Cuenca del Río Júcar. Dado que es una cuenca típicamente mediterránea presenta importantes problemas de déficit de agua. La CRS tiene una extensión aproximada de 984 Km<sup>2</sup> con una población permanente de 231.285 habitantes más una población estacional de unos 30.000 habitantes (CHJ, 2008).

La demanda total de agua es de unos 122,6 hm<sup>3</sup>/año mientras que la oferta es de unos 169,3 hm<sup>3</sup>/año. Sin embargo, debido a las pérdidas de agua, no se puede satisfacer toda la demanda. De forma específica, el déficit de agua es de 9,5 hm<sup>3</sup>/año.

Tal y como se muestra en la Tabla 2, los recursos convencionales son 159 hm<sup>3</sup>/año lo cual representa el 94% del total de recursos hídricos mientras que los recursos no convencionales se cifran en 10,3 hm<sup>3</sup>/año (6% del total). En relación a la demanda, el mayor uso de agua está asociado a la agricultura representando un 45% del total y la menor demanda de agua es para usos industriales ya que representa únicamente el 16%. La demanda urbana es el 39% del total. Estas cifras no tienen en cuenta la eficiencia en las redes de distribución que en general es peor en el ámbito agrícola que en el industrial y urbano.

Previamente a la resolución del modelo se han definido tres matrices: i) matriz de conexiones entre orígenes y destinos. Se ha comprobado que cada destino puede ser abastecido al menos por un origen; ii) matriz de eficiencia que proporciona información

sobre las pérdidas de agua entre los orígenes y los destinos; y iii) matriz de costes que indica el coste total de distribución del agua.

		Número de unidades	Cantidad de agua (hm <sup>3</sup> /año)
<b>Oferta</b>	<b>Agua superficial (S)</b>	15	96
	<b>Agua subterránea (B)</b>	18	63
	<b>Agua regenerada (R)</b>	3	4,5
	<b>Agua desalada (D)</b>	1	5,8
	<b>Agua de trasvases (T)</b>	0	0
<b>Demanda</b>	<b>Agricultura (UDA)</b>	6	55,2
	<b>Industria (UDI)</b>	3	19,6
	<b>Urbana (UDU)</b>	5	47,8

Tabla 2. Caracterización del sistema hídrico en la CRS.

El problema se ha resuelto considerando un horizonte temporal de un año. En el caso de que el objetivo del estudio fuera evaluar los efectos de la estacionalidad sobre la asignación del agua debería haberse utilizado un horizonte temporal más corto (estación húmeda-seca o mensual). En nuestro caso, la elección del periodo de tiempo ha estado condicionada por la disponibilidad de datos. La resolución del modelo se ha realizado con GAMS.

La resolución del modelo ( menos de un segundo) muestra que para el caso de la CRS, la función objetivo toma el valor de 91.271.041,30 €/año. La productividad media del agua es de 1,50 €/m<sup>3</sup> cuando las pérdidas de agua no son consideradas. Sin embargo, si se tiene en cuenta la eficiencia en la distribución, la productividad disminuye hasta 1,0 €/m<sup>3</sup>. Así mismo, el déficit de agua se cuantifica en 9.546.444,85 hm<sup>3</sup>/año siendo la UDA2 la única en la que no se satisface toda la demanda. Es decir, en base al objetivo de maximizar el valor del uso del agua, el mayor beneficio se obtiene cuando todo el déficit de agua se concentra en la UDA2. Esto es debido tanto a los altos costes de suministro de esta unidad como a su baja productividad asociada a las elevadas pérdidas de agua en las redes de distribución.

Dado que no toda el agua enviada desde los orígenes llega a los destinos, la solución global del modelo adopta dos perspectivas en función de si se toma como referencia el origen o el destino. La primera (Figura 2 y Tabla A1) se refiere a la

cantidad de agua enviada desde cada origen a cada destino mientras que la segunda (Figura 3 y Tabla A2) hace referencia a la cantidad de agua que llega a cada destino desde cada origen. Algunas fuentes de agua abastecen únicamente a un destino mientras que otras como la B<sub>10</sub> proporcionan agua hasta tres destinos distintos. Todos los usuarios son suministrados al menos por dos fuentes de agua distintas y en algunos casos el número de fuentes para satisfacer la demanda es de hasta seis.

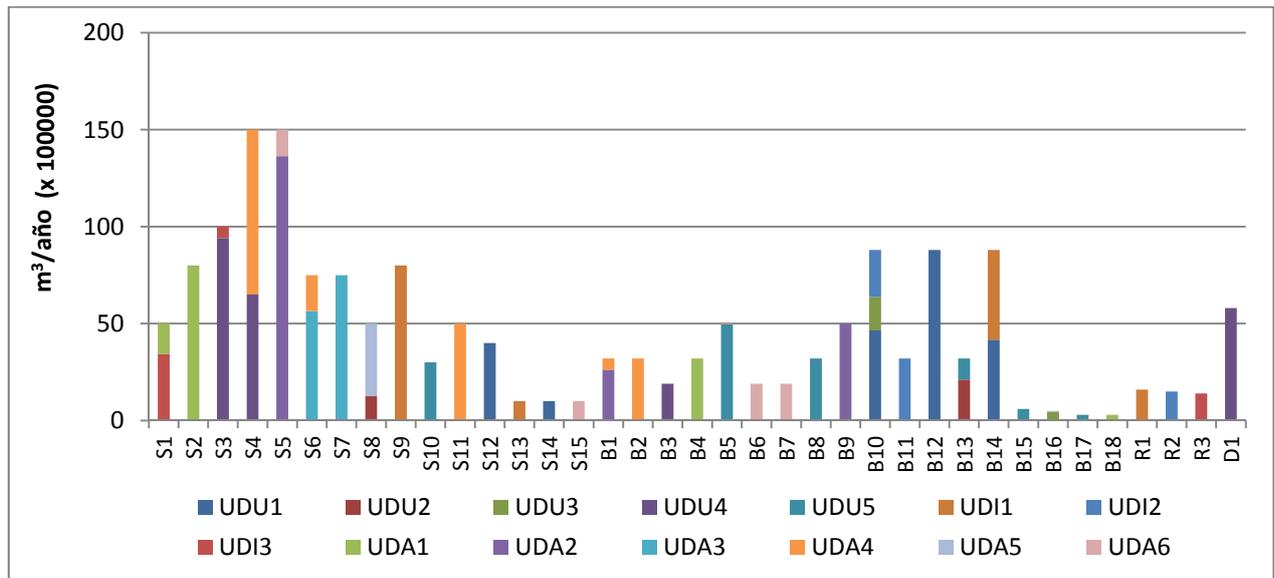


Figura 2. Destino del agua desde cada origen

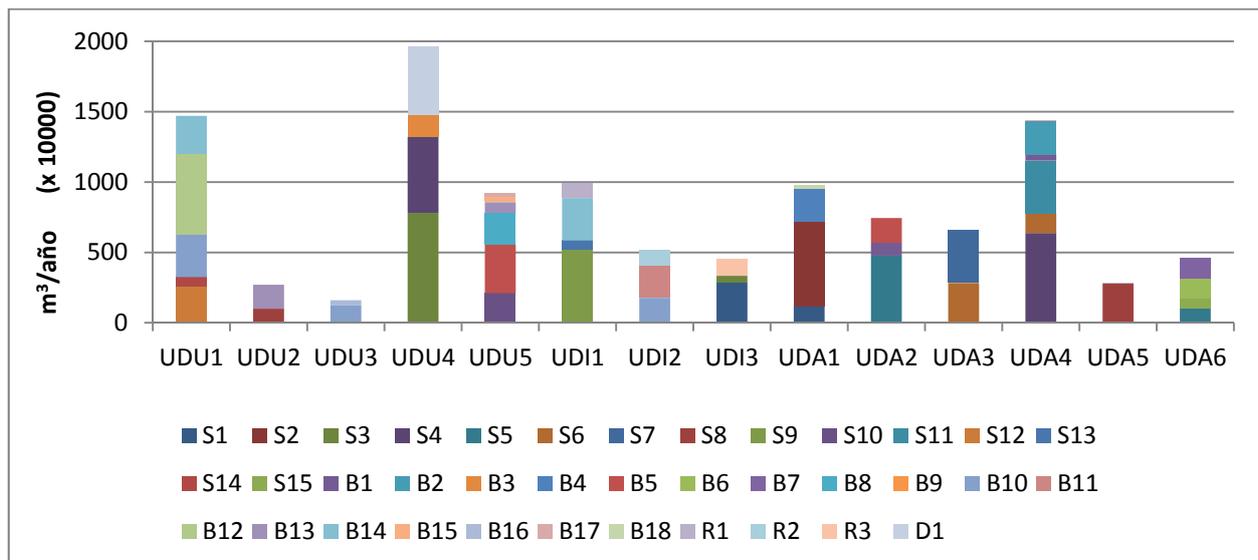


Figure 3. Fuente de agua para cada usuario

Desde el punto de vista de la demanda, tal y como se muestra en la Figura 4, el modelo muestra que en el caso de los usos urbanos, aproximadamente la mitad de la demanda debería ser abastecida con agua subterránea y el 40% con agua superficial. El 10% restante de la demanda debería ser suministrada a través de agua desalada. En relación a los usos industriales, la fuente más importante de agua es la superficial (47%). Por otra parte, el 36% de la demanda debe ser suministrada con agua subterránea mientras que el agua regenerada contribuiría con un 16%. En base al modelo de optimización, la demanda agrícola podría satisfacerse sólo con recursos convencionales, principalmente con agua superficial (76%) y el restante con agua subterránea (24%).

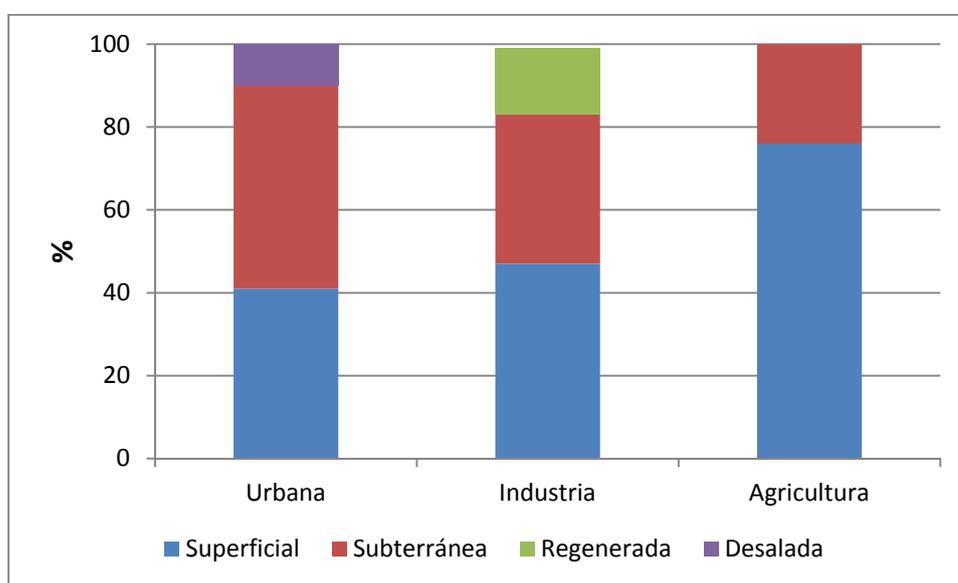


Figura 4. Fuente de abastecimiento de agua para cada demanda

Desde el punto de vista de la oferta (Figura 5), los recursos convencionales pueden ser utilizados para satisfacer los tres tipos de demanda. Por una parte, el agua superficial debería usarse principalmente para uso agrícola. Por otra parte, el usuario más importante del agua subterránea es el urbano. En relación a los recursos no convencionales, aunque el modelo permite el uso de agua desalada para los tres usos, teniendo en cuenta su coste de producción y su productividad, toda el agua desalada debería utilizarse en uso urbano. En contra de lo que se esperaría a priori, el agua regenerada debería ser utilizada para uso industrial y no agrícola que es su uso más común. La razón es que las plantas de regeneración del agua se encuentran localizadas en la zona más industrializada de la CRS.

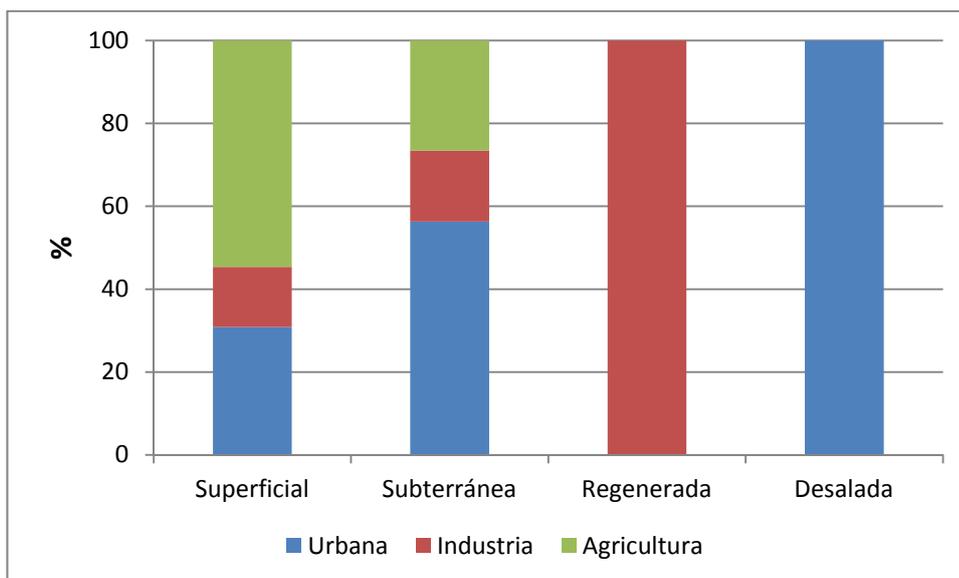


Figura 5. Destino de cada fuente de agua

#### 4. CONCLUSIONES

En áreas con escasez de recursos hídricos, las técnicas de optimización son una herramienta de gran utilidad para la asignación de agua contribuyendo al uso sostenible del agua y mejorando su gestión y planificación.

Tomando como base el concepto de Gestión Integral de Recursos hídricos, se ha desarrollado un modelo global de optimización para la asignación de agua que integra múltiples usuarios y múltiples fuentes de agua (convencionales y no convencionales). El objetivo del modelo es maximizar los beneficios del uso del agua. Sin embargo, tiene en cuenta la posibilidad de que no toda la demanda sea satisfecha. Para ello, junto con los costes y los ingresos, se han introducido penalizaciones causadas por la escasez de agua. Como aspectos novedosos, el modelo tiene en cuenta la calidad del agua, la eficiencia en la distribución del agua y la existencia de conexiones físicas entre los orígenes y los destinos.

El modelo propuesto se ha aplicado en una cuenca con problemas de escasez de agua (Cuenca del Río Serpis). La integración de la eficiencia en el modelo permite una doble interpretación de la solución global del modelo: i) cantidad de agua enviada desde cada origen a cada destino; y ii) cantidad de agua que llega a cada destino desde cada origen.

Un aspecto a tener en cuenta es la incertidumbre ya que algunas variables incluidas en el modelo como son tanto la demanda como la disponibilidad futura del agua o el coste de distribución del agua están sujetas a incertidumbre. En este sentido, la incertidumbre puede ser introducida en el modelo a través de la consideración de más de un escenario o modelos fuzzy.

A pesar de esta limitación, el modelo propuesto representa un enfoque innovador para la asignación de recursos hídricos contribuyendo a mejorar la gestión de este escaso recurso en cuencas deficitarias.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores quieren agradecer a la Confederación Hidrográfica del Júcar por el apoyo estadístico y a la Comisión Europea por la ayuda financiera a través de los proyectos EPI WATER-265213 y LIFE 10 ENV/ES 000520.

## **5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- CHJ (2008). “Desarrollo de una metodología y herramientas para la determinación de un programa de medidas para cumplir con la Directiva Marco del Agua. Estudio piloto en la Cuenca del Rio Serpis”. Working Paper, October 2008, Valencia.
- HAN, Y., XU, S.-G. y XU, X.-Z. (2008). “Modeling multisource multiuser water resources allocation”. *Water Resources Management*. 22(7), 911-923.
- KONDILI, E., KALDELLIS, J.K., y PAPAPOSTOULOU, C. (2010). “A novel systemic approach to water resources optimization in areas with limited water resources.” *Desalination*, 250, 297-301.
- LU, H.W., HUANG, G.H., ZHANG, Y.M. y HE, L. (2012). “Strategic agricultural land-use in response to water-supplier variation in a China’s rural region”. *Agricultural Systems*. 108, 19-28.
- MEDELLIN-AZUARA, J., MENDOZA-ESPINOSA, L.G., LUND, J.R. y RAMÍREZ-COSTA, R.J. (2007). “The application of economic-engineering optimisation for water management in Ensenada, Baja California, Mexico”. *Water Science and Technology*, 55(1), 339-347.

- ORTEGA ÁLVAREZ, J.F., DE JUAN VALERO, J.A., TARIUELO-BENITO, J.M. y LÓPEZ MATA, E. (2004) “MOPECO: An economic optimization model for irrigation water management”. *Irrigation Science*, 23(2), 61-75.
- RAY, P.A., KIRSHEN, P.H. y VOGEL, R.M. (2010). “Integrated optimization of a dual quality water and wastewater system” *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136, 37-47.
- RECA, J., ROLDÁN J., ALCAIDE, M., LÓPEZ, R. y CAMACHO, E. (2001). “Optimisation model for water allocation in deficit irrigation systems II. Application to the Bémbezar irrigation system” *Agricultural Water Management*, 48(2), 117-132.

**ANEXO**

	UDU1	UDU2	UDU3	UDU4	UDU5	UDI1	UDI2	UDI3	UDA1	UDA2	UDA3	UDA4	UDA5	UDA6	TOTAL (10 <sup>5</sup> )
S <sub>1</sub>								3435553	1564447						50
S <sub>2</sub>									8000000						80
S <sub>3</sub>				9413867				586133							100
S <sub>4</sub>				6500591								8499409			150
S <sub>5</sub>										13639441				1360559	150
S <sub>6</sub>											5648654	1851346			75
S <sub>7</sub>											7500000				75
S <sub>8</sub>		1257626												3742374	50
S <sub>9</sub>						8000000									80
S <sub>10</sub>					3000000										30
S <sub>11</sub>												5000000			50
S <sub>12</sub>	4000000														40
S <sub>13</sub>						1000000									10
S <sub>14</sub>	1000000														10
S <sub>15</sub>														1000000	10
B <sub>1</sub>										2621302		578698			32
B <sub>2</sub>												3200000			32
B <sub>3</sub>				1900000											19
B <sub>4</sub>									3200000						32
B <sub>5</sub>					4960231							39769			50
B <sub>6</sub>														1900000	19
B <sub>7</sub>														1900000	19
B <sub>8</sub>					3200000										32
B <sub>9</sub>										5000000					50
B <sub>10</sub>	4646154		1730558				2423288								88
B <sub>11</sub>							3200000								32
B <sub>12</sub>	8800000														88
B <sub>13</sub>		2117374			1082626										32

Optimización de la gestión de recursos hídricos en cuencas deficitarias

	UDU1	UDU2	UDU3	UDU4	UDU5	UDI1	UDI2	UDI3	UDA1	UDA2	UDA3	UDA4	UDA5	UDA6	TOTAL (10 <sup>5</sup> )
B <sub>14</sub>	4169231					4630769									88
B <sub>15</sub>					600000										6
B <sub>16</sub>			461222										38778		5
B <sub>17</sub>					300000										3
B <sub>18</sub>									300000						3
R <sub>1</sub>						1600000									16
R <sub>2</sub>							1500000								15
R <sub>3</sub>								1400000							14
D <sub>1</sub>				5800000											58

Tabla A1. Volumen de agua enviado desde cada origen a cada destino.

Molinos-Senante, M., Hernández-Sancho, F., Mocholí-Arce, M. y Sala-Garrido, R.

	UDU1	UDU2	UDU3	UDU4	UDU5	UDI1	UDI2	UDI3	UDA1	UDA2	UDA3	UDA4	UDA5	UDA6
S <sub>1</sub>								2851509	1173335					
S <sub>2</sub>									6000000					
S <sub>3</sub>				7813509				486491						
S <sub>4</sub>				5395491								6374557		
S <sub>5</sub>										4773804				1020419
S <sub>6</sub>											2824327	1388510		
S <sub>7</sub>											3750000			
S <sub>8</sub>		1006101											2806781	
S <sub>9</sub>						5200000								
S <sub>10</sub>					2100000									
S <sub>11</sub>												3750000		
S <sub>12</sub>	2600000													
S <sub>13</sub>						650000								
S <sub>14</sub>	650000													
S <sub>15</sub>														750000
B <sub>1</sub>										917456		434024		
B <sub>2</sub>												2400000		
B <sub>3</sub>				1577000										
B <sub>4</sub>									2400000					
B <sub>5</sub>					3472162					1750000		29826		
B <sub>6</sub>														1425000
B <sub>7</sub>														1425000
B <sub>8</sub>					2240000									
B <sub>9</sub>														
B <sub>10</sub>	3020000		1263308					1769000						
B <sub>11</sub>								2336000						
B <sub>12</sub>	5720000													
B <sub>13</sub>		1693899			757838									
B <sub>14</sub>	2710000					3010000								
B <sub>15</sub>					420000									
B <sub>16</sub>			336692										29083	
B <sub>17</sub>					210000									

*Optimización de la gestión de recursos hídricos en cuencas deficitarias*

	UDU1	UDU2	UDU3	UDU4	UDU5	UDI1	UDI2	UDI3	UDA1	UDA2	UDA3	UDA4	UDA5	UDA6
B <sub>18</sub>									225000					
R <sub>1</sub>						1040000								
R <sub>2</sub>							1095000							
R <sub>3</sub>								1162000						
D <sub>1</sub>				4814000										
Total (10 <sup>5</sup> )	147	27	16	196	92	99	52	45	98	74	66	144	28	46

Tabla A2. Volumen de agua que llega a cada destino desde cada origen.