

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Reparto de costos y establecimiento de precios en el uso del agua. Aplicación en zonas de la cuenca del Guadalquivir.

Autor: Gabriel Pastor Dorado

Tutores: Andrés Jiménez Losada
Manuel Ordoñez Sánchez

Dep. De Matemática Aplicada II
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Reparto de costos y establecimiento de precios en el uso
del agua. Aplicación en zonas de la cuenca del
Guadalquivir.

Autor: Gabriel Pastor Dorado

Tutores: Andrés Jiménez Losada

Manuel Ordoñez Sánchez

Departamento de Matemática Aplicada II

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017

Trabajo Fin de Grado: Reparto de costos y establecimiento de precios en el uso del agua.
Aplicación en zonas de la cuenca del Guadalquivir.

Autor: Gabriel Pastor Dorado

Tutores: Andrés Jiménez Losada
Manuel Ordoñez Sánchez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Quisiera agradecerles a mis tutores, Andrés y Manuel, su amabilidad, implicación, colaboración y valiosísima ayuda durante toda la elaboración el proyecto. Sin duda, la realización de este proyecto no hubiera sido posible sin ellos y sin el gran tiempo que me han dedicado.

Desde luego debo acordarme de quiénes han sido fundamentales en esta etapa universativa: mis amigos. Principalmente a mis compañeros con los que he compartido tantísimas horas de clases prácticas o biblioteca, pero sin olvidarme de los momentos externos como fiestas, viajes y cenas. Sin ellos estos cuatro años de mi vida no hubieran significado tantísimo para mí.

Sin dudarlo debo terminar, agradeciéndole a mi familia todo el esfuerzo que ha hecho para que día a día sienta su cariño y la absoluta confianza que tenían en mí, no dejando que bajará los brazos en ningún momento, y por su considerable paciencia, comprensión y cariño.

Gabriel Pastor Dorado

Sevilla, 2017

Resumen

La importancia del agua y su uso tanto para el consumo como para la agricultura e industria exige actualmente el uso de modelos adecuados para su gestión y distribución. Estos modelos, que deben ser eficientes y sostenibles implican una cantidad importante de variables de diversa naturaleza incluidas las legales.

En este trabajo se ha aplicado una metodología para la asignación de los costes de los servicios del agua a escala de la provincia de Sevilla usando optimización de caminos junto a la teoría de juegos cooperativos. La teoría de juegos cooperativos permite analizar de forma eficiente problemas de costes o beneficios en muchas situaciones y en particular, en nuestro trabajo, poder distribuir de manera eficiente y equitativa los costes entre los diversos agentes que usan del agua disponible teniendo en cuenta tanto las inversiones en servicios hidráulicos como los beneficios derivados de la cooperación de estos agentes.

Su éxito reside en la posibilidad de crear modelos matemáticos que mantienen principios de eficiencia e igualdad, que implican el reparto justo de costes y en el hecho de que el comportamiento de un jugador pueden afectar en las decisiones de otros jugadores.

El método consiste en el estudio de los caminos óptimos entre jugadores para usar un determinado servicio y la definición de un juego de coste definido sobre todo el conjunto de posibles coaliciones entre los jugadores. Luego se calcula el valor de Shapley de dicho juego el cual nos lleva a asignar de manera eficiente y efectiva uno para a cada jugador los cuales a su vez se benefician de manera óptima del uso de las infraestructuras disponibles y de la posibilidad de coalicionarse con otros para un usufructo más favorable a sus intereses.

Se supone en todo momento que la infraestructura de la que disponen los usuarios es óptima para satisfacer sus necesidades. En este sentido se disponen de programas de simulación (SIMGES, Andreu et al. 1996) y de optimización (WARGI, Sechi G.M. y Zuddas P., 2002) para este tipo de gestión de recursos.

El resultado de la aplicación de la metodología es el cálculo de un insumo de pagos, que corresponden a la contribución de cada uno de los usuarios a los costes de los servicios del agua del sistema en condiciones de eficiencia de la gestión y de equidad en el reparto de costes.

Se propone la aplicación de la metodología al caso de estudio del sistema hídrico del Guadalquivir en su paso por la provincia de Sevilla, en particular su influencia en la zona centro sur.

Abstract

The importance of water and its use for both consumption and farming or industry require now the use of appropriate models for management and distribution. These models, that they must be efficient and sustainable, imply a significant number of variables of diverse nature involving the legal ones.

In this work a methodology for cost allocation of water services at Seville province level was applied using way optimization in concert with cooperative game theory. Cooperative game theory allows to analyze efficiently cost o profit problems in a lot of situations, and particularly, in our work, allows to allocate in an efficient and equitable way the costs among different agents who use the water available taking into account both the hydraulic service investments and the benefits derived from the cooperation among the agents.

Its success is base on the possibility of establishing mathematical models which verify efficiency and equal treatment principles implying a fairness allocation of costs and also the fact that the activity of a player can affect to the decision making of the others.

The method consists in studying of the optimum ways among the agents to use a determine service and the definition of a cost game over the feasible coalitions. Later the Shapley value of the game is calculated obtaining an efficient payoff for each agent and also assuring an optimal use of the facilities.

It is assumed all the time that the facilities available for the users is optimum to meet their needs. In this sense simulation (SIMGES, Andreu et al. 1996) and optimization (WARGI, Sechi G.M. y Zuddas P., 2002) programs are available for this kind of resource mangement.

The result of the application of this methodology is the calculation of an input of payments, that correspond to the contribution of each user to the costs of the water services in the system, under efficient conditions of the management and equitable allocation of the costs. The application of the methodology to the case of the Guadalquivir water system across Seville province is proposed, particularly the influence in the central-southern zone.

Índice

| | | |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1. | Introducción..... | 15 |
| 2. | Financiación del servicio del agua | 16 |
| 2.1. | <i>El marco normativo europeo</i> | <i>16</i> |
| 2.1.1. | Directiva Marco de Aguas..... | 16 |
| 2.1.2. | Artículo 5. Análisis económico del uso del agua | 16 |
| 2.1.3. | Artículo 9. Recuperación del coste de los servicios | 16 |
| 2.1.4. | Artículo 11. Programa de medidas | 17 |
| 2.1.5. | Anexo III. Contenidos del análisis económico | 17 |
| 2.2. | <i>Organización de los servicios del agua en España</i> | <i>18</i> |
| 2.2.1. | Servicios de captación, embalse y transporte..... | 19 |
| 2.2.2. | Servicios de abastecimiento, alcantarillado y depuración de aguas urbanas | 20 |
| 2.2.3. | Servicios de distribución del agua de riego | 20 |
| 2.3. | <i>Régimen económico-financiero de las aguas continentales en España</i> | <i>20</i> |
| 2.3.1. | Tributos sobre el uso del dominio público hidráulico | 20 |
| 3. | La teoría de juegos cooperativos | 21 |
| 3.1. | <i>La teoría de juegos</i> | <i>21</i> |
| 3.2. | <i>Juegos cooperativos de utilidad transferible. Juegos de costos</i> | <i>21</i> |
| 3.2.1. | Jugadores y coaliciones | 21 |
| 3.2.2. | Concepto de juego cooperativo..... | 22 |
| 3.2.3. | Propiedades de los juegos | 22 |
| 3.2.4. | Definición de juego de costos | 23 |
| 3.3. | <i>Soluciones para juegos de costos</i> | <i>23</i> |
| 3.3.1. | Reglas de distribución de costos | 24 |
| 3.3.2. | Contribuciones marginales..... | 24 |
| 3.3.3. | El valor de Shapley | 25 |
| 3.3.4. | El valor de Shapley como regla de reparto de costos | 25 |
| 4. | Explicación de la metodología..... | 27 |
| 4.1. | <i>Análisis del sistema hídrico</i> | <i>28</i> |

| | | |
|-----------|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.2. | <i>Definición del juego cooperativo</i> | 28 |
| 4.3. | <i>Cálculo de la función característica</i> | 29 |
| 4.3.1. | Solución del juego cooperativo..... | 29 |
| 5. | Aplicación de la metodología al caso del río Guadalquivir | 30 |
| 5.1. | <i>El sistema hídrico del río Guadalquivir</i> | 30 |
| 5.1.1. | Descripción general del sistema | 31 |
| 5.1.2. | Prioridades y reglas de gestión | 32 |
| 5.1.3. | Demandas del Sistema | 33 |
| 5.1.4. | Tomas fuera de comisión de desembalse..... | 34 |
| 5.1.5. | Infraestructuras presentes en el Sistema..... | 34 |
| 5.2. | <i>Caracterización económica de la cuenca</i> | 34 |
| 5.3. | <i>Cálculo de las funciones de coste</i> | 35 |
| 5.3.1. | Embalses..... | 35 |
| 5.3.2. | Canales..... | 40 |
| 5.3.3. | Bombeos..... | 40 |
| 5.3.4. | Reutilización de las aguas residuales del área urbana | 42 |
| 5.3.5. | Desalinización..... | 42 |
| 5.3.6. | Laminación de avenidas | 43 |
| 5.4. | <i>Definición del juego y formación de las coaliciones</i> | 44 |
| 5.4.1. | Demandas consuntivas..... | 44 |
| 5.5. | <i>Aplicación del modelo de optimización</i> | 45 |
| 5.5.1. | Aclaraciones del modelo | 45 |
| 5.5.2. | Optimización de las coaliciones | 46 |
| 5.5.3. | Función característica | 52 |
| 5.5.4. | Asignación de costes..... | 55 |
| 6. | Conclusiones | 58 |
| 7. | Referencias | 59 |

Índice de Tablas

| | |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 2.1. Organización de los servicios del agua en España (MIMAM, 2007) | 19 |
| Tabla 5.1. Demandas por municipios del río Guadalquivir | 33 |
| Tabla 5.2. Características del embalse del Huesna | 36 |
| Tabla 5.3 Características del embalse de Melonares | 38 |
| Tabla 5.4. Costes bombeos en Sevilla | 42 |
| Tabla 5.5. Abastecimiento de agua | 46 |
| Tabla 5.6. Precios unitarios | 46 |
| Tabla 5.7. Coalición 1 | 47 |
| Tabla 5.8. Coalición 2 | 48 |
| Tabla 5.9. Coalición 3 | 48 |
| Tabla 5.10. Coalición 4 | 48 |
| Tabla 5.11. Coalición 12 | 49 |
| Tabla 5.12. Coalición 13 | 49 |
| Tabla 5.13. Coalición 14 | 49 |
| Tabla 5.14. Coalición 23 | 50 |
| Tabla 5.15. Coalición 24 | 50 |
| Tabla 5.16. Coalición 34 | 50 |
| Tabla 5.17. Coalición 123 | 51 |
| Tabla 5.18. Coalición 124 | 51 |
| Tabla 5.19. Coalición 134 | 51 |
| Tabla 5.20. Coalición 234 | 52 |
| Tabla 5.21. Coalición 1234 | 52 |
| Tabla 5.22. Función característica | 54 |

| | |
|----------------------------------------------------|----|
| Tabla 5.23. Componente factorial, Valor de Shapley | 55 |
| Tabla 5.24. Valor de Shapley | 57 |

Índice de Figuras

| | |
|------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.1. Esquema de la metodología | 27 |
| Figura 5.1. Demanda por municipios | 34 |
| Figura 5.2. Planos del embalse del Huesna | 37 |
| Figura 5.3. Función Volumen-Coste del embalse de Huesna | 37 |
| Figura 5.4. Dimensiones del embalse de Melonares | 39 |
| Figura 5.5. Función Volumen-Coste del embalse de Melonares | 39 |
| Figura 5.6. Función de coste, Canal del Bajo Guadalquivir | 40 |
| Figura 5.7. Parametrización de costes (MIMAM, 2002) | 41 |
| Figura 5.8. Volumen anual del embalse Huesna | 43 |
| Figura 5.9. Volumen anual del embalse de Melonares | 43 |
| Figura 5.10. Esquema de abastecimiento | 45 |
| Figura 5.11. Función característica | 54 |
| Figura 5.12. Valor de Shapley, asignación de costes | 57 |

1. INTRODUCCIÓN.

El agua puede ser considerada como un bien indispensable para el hombre. Por ello, y principalmente en el siglo pasado se ha construido la infraestructura necesaria para poder disponer de ella de forma rápida y asequible.

Por otro lado los cambios demográficos, sociales y tecnológicos sufridos en la última centuria han sido un reto para los distintos gobiernos en su intento de que sean abastecidas de manera eficiente tanto a las personas como a la industria y al sector agrario.

La concienciación ciudadana sobre temas ecológicos, la falta de infraestructuras adecuadas en algunas de las zonas del mundo y la carestía de agua en otras, son problemas actuales que intentan ser solventados por los diversos países.

Por otro lado la implantación de nuevas políticas económicas más restrictivas, por parte de los gobiernos nacionales y de los organismos financieros europeos, impone sensibles restricciones al tradicional modelo de financiación del dominio público hidráulico basado principalmente en subvenciones públicas.

Actualmente, debido a las restricciones sobre el uso del agua impuestas por los gobiernos, se ha pasado de la financiación del dominio público hidráulico basado principalmente en subvenciones públicas a las actuales técnicas de facturación por servicio, denominada economía madura del agua.

Las políticas tarifarias se fundamentan en técnicas de asignación de costes lo cual es considerado fundamentales para el buen uso del agua por todos los agentes participantes.

En este trabajo presentaremos un modelo de asignación de costes, basado en la aplicación de la teoría de juegos cooperativos a un conjunto de agentes o jugadores que representan los distintos usuarios del agua dentro de una comarca o zona de la provincia de Sevilla. El valor usado para asignar los costes será eficiente en el sentido de que el coste total del proceso sea completamente asignado al conjunto de jugadores en función del uso que hagan del servicio.

2. FINANCIACIÓN DEL SERVICIO DEL AGUA

En el presente capítulo se pretende realizar un análisis del marco normativo que regula la gestión de los recursos hídricos, con principal atención hacia los aspectos económicos. Se llevará a cabo una revisión de la normativa nacional en materia de políticas tarifarias y de asignación del agua, tratando de cumplir con la normativa europea vigente.

2.1. El marco normativo europeo

2.1.1. Directiva Marco de Aguas

La *Directiva 2000/60/CE* del Parlamento Europeo y del Consejo de Europa, de 23 octubre de 2000, comúnmente conocida como la Directiva Marco Europea de Aguas (DMA) nace ante la necesidad de unificar las actuaciones en materia de gestión del agua en la Unión Europea (UE). Es uno de los grandes aspectos que ha generado el cambio de orientación de la política de los Estados miembros de la UE.

La DMA, con gran referencia a [1], contempla la necesidad de establecer en cada demarcación hidrográfica un programa de medidas (Art.11) con el objetivo de alcanzar objetivos ambientales previstos en el artículo 4, que incluye los aspectos relativos de la recuperación de los costes de los servicios relacionados con el agua, incluidos los costs medioambientales y los relativos a los recursos (Art.9), teniendo en cuenta los resultados del análisis económicos del uso del agua (Art.5 y Anexo III)

2.1.2. Artículo 5. Análisis económico del uso del agua

Este artículo de la DMA establece que cada Estado miembro será responsable de velar por que se efectúe en cada demarcación los siguientes requisitos:

- un análisis de las características de la demarcación;
- un estudio de las repercusiones de la actividad humana en el estado de las aguas superficiales y de las aguas subterráneas;
- un análisis económico del uso del agua, de conformidad con las especificaciones técnicas fijadas en el anexo III.

2.1.3. Artículo 9. Recuperación del coste de los servicios

“Los Estados miembros tendrán en cuenta el principio de la recuperación de los costes de los

servicios relacionados con el agua, incluidos los costes medioambientales y los relativos al recurso, a la vista del análisis económico efectuado con arreglo al anexo III, y en particular de conformidad con el principio de que quien contamina paga.”

Según el artículo 2 de la DMA se entiende por servicios relacionados con el agua todos los servicios en beneficio de los hogares, las instituciones públicas o cualquier actividad económica, consistentes en:

- La extracción, el embalse, el depósito, el tratamiento y la distribución de aguas superficiales o subterráneas;
- La recogida y depuración de aguas residuales, que vierten posteriormente en las aguas superficiales.

Como se puede observar, no se tiene como objetivo la recuperación íntegra de costes ni siquiera a largo plazo, lo que se considera lógico considerando los objetivos ambientales de la Directiva y la naturaleza no comercial del agua. La lógica dicta que unos precios adecuados, capaces de reflejar el efectivo del coste de servicio del agua para cada usuario, conllevarían un uso más eficiente del recurso, y en consecuencia un menor consumo y mejores condiciones ambientales. Esto es lo que se puede llegar a entender como el principio de transparencia en la economía del agua.

Además éste artículo recoge la necesidad de una contribución adecuada de los diversos usos del agua basado en el análisis económico efectuado en concordancia con el anexo III, que más tarde se definirá.

2.1.4. Artículo 11. Programa de medidas

“Los Estados miembros velarán por que se establezca para cada demarcación hidrográfica, o para la parte de una demarcación hidrográfica internacional situada en su territorio, un programa de medidas, teniendo en cuenta los resultados de los análisis exigidos con arreglo al artículo 5, con el fin de alcanzar los objetivos ambientales planteados en el artículo 4. Estos programas de medidas podrán hacer referencia a medidas derivadas de la legislación adoptada a nivel nacional y que cubran la totalidad del territorio de un Estado miembro. En su caso, un Estado miembro podrá adoptar medidas aplicables a todas las demarcaciones hidrográficas y/o a las partes de demarcaciones hidrográficas internacionales situadas en su territorio.”

Las medidas básicas son los requisitos mínimos que deberán cumplirse y consistirán, entre otros, en la *“las medidas que se consideren adecuadas a efectos del artículo 9”*.

2.1.5. Anexo III. Contenidos del análisis económico

“El análisis económico contendrá información lo suficientemente detallada (teniendo en

cuenta los costes asociados con la obtención de los datos pertinentes) para:

- efectuar los cálculos necesarios para tener en cuenta, de conformidad con el artículo 9, el principio de recuperación de los costes de los servicios relacionados con el agua, tomando en consideración los pronósticos a largo plazo de la oferta y la demanda de agua en la demarcación hidrográfica y, en caso necesario, las previsiones del volumen, los precios y los costs asociados con los servicios relacionados con el agua, y

- estudiar la combinación más rentable de medidas que, sobre el uso del agua, deben incluirse en el programa de medidas de conformidad con el artículo 11, basándose en las previsiones de los costes potenciales de dichas medidas.”

En él se define el objetivo del análisis económico previsto en el artículo 5 así como el de generar los datos necesarios para poder efectuar los cálculos de recuperación de costes y para poder estudiar la combinación óptima de medidas básicas en sus previsiones de costes.

2.2. Organización de los servicios del agua en España

Las prestaciones de los servicios del agua en España están caracterizada por la gran participación de numerosos agentes públicos y privados, como se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 2.1. Organización de los servicios del agua en España (MIMAM, 2007)

| Servicio | Agentes (Competentes o financiadores de infraestructuras) | Instrumentos de “Recuperación de Costes” |
|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Embalses y transporte en alta (aguas superficiales) | Organismos de Cuenca, Sociedades Estatales y otros agentes | Canon de Regulación Tarifa de Utilización de Agua |
| Aguas subterráneas | Organismos de Cuenca, colectivos de riego y usuarios privados (autoservicios) | Las fijadas por los ayuntamientos Las fijadas por las CCAA |
| Abastecimiento urbano | Ayuntamientos, Mancomunidades, Comunidades Autónomas y otros | Tarifa de abastecimiento |
| Recogida de Aguas Residuales Urbanas | Ayuntamientos, Mancomunidades, Comunidades Autónomas y otros | Tasa de Alcantarillado |
| Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas | Ayuntamientos, Mancomunidades Comunidades Autónomas y otros | Canon de saneamiento Tarifas de servicio |
| Distribución de agua de riego | Organismos de Cuenca, Comunidades de Regantes y otros colectivos de riego | Derramas y tarifas/cuotas de los colectivos de riego (Que incluyen el importe del pago de Canon y Tarifa a los Organismos de Cuenca) |
| Control de vertidos | Organismos de Cuenca | Canon de Control de Vertidos |

2.2.1. Servicios de captación, embalse y transporte

Conforme la Ley de Aguas y El Reglamento del Dominio Público Hidráulico, tanto la

extracción, el embalse y el transporte es competencia de las Confederaciones Hidrográficas en las cuencas intercomunitarias y por las Comunidades Autónomas (CCAA) en las cuencas intracomunitarias.

2.2.2. Servicios de abastecimiento, alcantarillado y depuración de aguas urbanas

Los servicios de abastecimientos (tratamiento y distribución del agua potable), alcantarillado y depuración de las aguas urbanas son competencia de los municipios como se indica en los artículos 25 y 26 de la Ley 7/1985 de Bases de Régimen Local). Éstas a su vez pueden dar el servicio directamente o a través de concesiones a empresas públicas, privadas o mixtas. Cabe objetar que la depuración de las aguas residuales urbanas en algunos casos son tratadas por las administraciones autonómicas mediante empresas especializadas.

2.2.3. Servicios de distribución del agua de riego

Los usuarios del agua superficial destinada al riego que posean la misma toma o concesión están constituidos en comunidades de regantes desde el año 1879 (Ley de Aguas de 13 de junio). Las comunidades de regantes se encargan de gestionar la distribución, mantenimiento y reparto de las redes que llevan el agua desde los canales hasta las parcelas particulares.

2.3. Régimen económico-financiero de las aguas continentales en España

El Régimen económico-financiero de las aguas continentales en España se estructura en tres bloques de tributos:

- Tributos sobre el uso del dominio público hidráulico
- Tributos recuperadores del coste de infraestructuras
- Tributos ambientales

2.3.1. Tributos sobre el uso del dominio público hidráulico

En el artículo 112 del Texto Refundido de la Ley de Aguas (TRLA, 20 julio de 2001) se afirma que la utilización, ocupación o aprovechamiento de los bienes de dominio público hidráulico (DPH) requieren autorización administrativa por parte del organismo de cuenca competente, el cual debe de adquirir una tasa denominada canon de utilización de los bienes del dominio público hidráulico, con el fin de destinarse a la mejora y protección de dicho dominio.

3. LA TEORÍA DE JUEGOS COOPERATIVOS

3.1. La teoría de juegos

La Teoría de Juegos surge en 1944, introducida por Morgenster y von Neumann [2]. Está centrada en modelizar situaciones conflictivas en las que existen varios agentes denominados jugadores que buscan objetivos particulares pero cuyas decisiones influyen en el resto.

Se divide en dos ramas principales: juegos cooperativos y no cooperativos. Los segundos analizan las estrategias de cada jugador en búsqueda de encontrar la solución más beneficiosa para sus intereses, y sus posibilidades para llevarlas a cabo teniendo en cuenta las acciones del resto de jugadores. Los juegos cooperativos consideran que los jugadores actúan con una estrategia común que beneficia al grupo y establecen los pagos individuales para dichos agentes.

Se dice que un juego cooperativo es de utilidad transferible si el valor obtenido por la cooperación, su utilidad, consiste en una cantidad distributable entre los agentes de cualquier manera. La utilidad no es transferible si cada jugador tiene una forma diferente de medir la utilidad y por lo tanto el valor de la cooperación se mide mediante magnitudes individuales.

Resolver un juego cooperativo de utilidad transferible significa encontrar un reparto lógico de los beneficios obtenidos por el grupo. Por lo tanto una solución debe indicar para cada jugador un pago individual.

Los juegos cooperativos de utilidad transferible reflejan de manera clara la situación que se analiza en este trabajo. Los agentes son los usuarios del agua en determinada zona de una cuenca hidrográfica y el valor de la cooperación el coste del uso del agua. Por lo tanto, en las siguientes secciones se explican los aspectos necesarios de dicha teoría que se aplicarán en los posteriores capítulos.

3.2. Juegos cooperativos de utilidad transferible. Juegos de costos

Las notas que se incluyen a continuación están extraídas de los siguientes libros que ilustran de manera más profunda la teoría de juegos cooperativos y en particular los juegos de utilidad transferible: Driessen [3], Owen [4], Bilbao [5] y González-Díaz [6].

3.2.1. Jugadores y coaliciones

Un juego cooperativo de utilidad transferible se define mediante el conocimiento no sólo del valor de la cooperación del grupo de agentes sino que también el valor de situaciones similares con cada uno de los subgrupos de estos jugadores. Denotamos por $N = \{1, \dots, n\}$ un conjunto finito de

agentes que denominamos jugadores.

La familia de poder del conjunto anterior la forman los diferentes subconjuntos de N , que se denota por 2^N . Cada uno de estos subgrupos, incluido el vacío, es interpretado como una coalición de jugadores. El conjunto completo de jugadores es denominado la gran coalición.

3.2.2. Concepto de juego cooperativo

Considerado fijo el conjunto N de jugadores, un juego cooperativo de utilidad transferible sobre N (juego cooperativo) es una aplicación de la familia de coaliciones en los números reales, $v: 2^N \rightarrow \mathbb{R}$, llamada función característica, que verifica $v(\emptyset) = 0$. La familia de juegos cooperativos sobre el conjunto N es denotada por G^N .

La interpretación de los valores de la función característica puede determinar las consideraciones a tener en cuenta para la determinación de soluciones. La teoría clásica de juegos está descrita para juegos donde los valores de la función característica son beneficios, es decir cuanto mayores sean mejor.

Sin embargo, en este trabajo trataremos con juegos donde los valores se interpretan como los costos para la realización de un determinado proyecto común para todos los agentes. En un juego de este tipo el valor de una coalición es el costo de un proyecto similar al estudiado para la gran coalición., por lo tanto cuanto menor sea este número mejor para el grupo. En una situación de costos existen pagos que son claramente atribuibles a cada uno de los jugadores ya que no pueden modificarse por la actividad conjunta de los agentes. Normalmente estos costos deben ser pagados sin más por cada uno de los jugadores, por lo que los juegos se montan para repartir gastos no separables.

3.2.3. Propiedades de los juegos

Sea $v \in G^N$ un juego. Se dice que v es un juego monótono si para todo par de coaliciones $S \subseteq T$ ocurre que $v(S) \leq v(T)$. Es decir si cuanto mayor es el grupo de jugadores mayor es el presupuesto necesario para llevar el proyecto a cabo. Esta condición es habitual en un juego de costo. Implica en particular que los valores de las coaliciones son positivos, es decir que $v(S) \geq 0$ para cualquier coalición S .

Se está suponiendo que la gran coalición es en realidad la que se quiere analizar, mientras que el resto de valores nos sirven como información para más adelante establecer soluciones. Sin embargo parece razonable que los jugadores estén incentivados para ello. Este incentivo para los juegos de costo se define mediante la propiedad de subaditividad. El juego v es subaditivo si dos

coaliciones S, T disjuntas, es decir $S \cap T = \emptyset$, entonces el costo del proyecto para la unión es menor que el total de los proyectos por separado de ambas coaliciones, esto es

$$v(S \cup T) \leq v(S) + v(T).$$

3.2.4. Definición de juego de costos

Teniendo en cuenta todo lo que hemos comentado anteriormente se define unos juegos de costos como un juego cooperativo de utilidad transferible que es monótono y subaditivo, y cuyos valores se interpretan como costos. La familia de juegos de costos sobre N se denota por G_0^N , además usaremos habitualmente la letra c para referirnos a un juego de costo en vez de la clásica v .

3.3. Soluciones para juegos de costos

Como se comentó anteriormente, una solución de un juego cooperativo de utilidad transferible determina el pago individual que cada jugador obtiene por la cooperación entre ellos. En este sentido para un juego sobre un conjunto fijo finito de jugadores N una solución se entiende como un vector de pagos es decir $x \in \mathbb{R}^N$ de forma que para cada jugador $i \in N$ la coordenada x_i es el pago individual de ese agente.

En caso de que el juego $c \in G_0^N$ sea un juego de costos y $x \in \mathbb{R}^N$ un vector de pagos suyo entonces x_i es el pago que debería realizar dicho agente por la realización del proyecto común de la gran coalición. Las siguientes propiedades parecen lógicas exigirselas a un vector de pagos x en un juego de costo $c \in G_0^N$

- *Principio de Eficiencia.* El vector debería ser un reparto eficiente del costo del proyecto común de la gran coalición, esto es

$$\sum_{i \in N} x_i = c(N).$$

- *Principio de Positividad.* Nadie debería de recibir cobros por cooperar, es decir todos deben pagar. Si $v \in G_0^N$ e $i \in N$ entonces $x_i \geq 0$.
- *Principio de Racionalidad Individual.* El pago de cada jugador debería ser también individualmente razonable, es decir para cada jugador i

$$x_i \leq c(\{i\}).$$

Esto significa que la solución es estable individualmente ya que ningún jugador

- *Principio de Racionalidad Coalicional.* El principio anterior puede generalizarse a todas las coaliciones. Así, la solución es coalicionalmente estable si para toda coalición

S ocurre que

$$\sum_{i \in S} x_i \leq c(S).$$

3.3.1. Reglas de distribución de costos

Un valor es una función sobre el conjunto de juegos cooperativos, o alguna subfamilia suya que otorga un vector solución para cada juego.

Una regla de distribución de costos es una aplicación que asigna a cada juego de costos un determinado vector de pagos, es decir $f: G_0^N \rightarrow \mathbb{R}^N$. Las reglas de distribución son Lo ideal sería que dicha regla satisfaga los principios anteriores, esto es para cada $c \in G_0^N$ ocurre que

$$f(c) \in \left\{ x \in \mathbb{R}_+^N : \sum_{i \in N} x_i = c(N), \sum_{i \in S} x_i \leq c(S) \forall S \in 2^N \right\}.$$

El conjunto anterior de vectores de pagos se denomina core positivo. Existen diversas reglas de distribución de costos aunque algunas no verifican estas condiciones o sólo lo hacen para ciertos juegos de costos.

Una axiomatización de una regla de distribución de costo o un valor v es un conjunto de propiedades que creemos razonables y que determinan unívocamente nuestra regla. En general, los principios anteriores pueden ser satisfechos por muchas reglas de distribución de costos, por ninguna o sólo por una.

3.3.2. Contribuciones marginales

La cuestión principal en la definición de valores o reglas de distribución de costos es como medir la aportación de un jugador en las coaliciones donde participa y como pesa dicha aportación.

Una forma de medir las aportaciones de los agentes a una coalición determinada es mediante las denominadas contribuciones marginales. Si $v \in G^N$, S es una coalición e $i \notin S$, la contribución marginal del jugador i en la coalición S es

$$m^v(S, i) = v(S \cup \{i\}) - v(S),$$

esto es la diferencia entre el valor de la coalición junto con el jugador y el valor de la propia coalición.

Un jugador $i \in N$ es *nulo* para un juego $v \in G^N$ si para toda coalición que no contenga al

jugador, S con $i \notin S$, se verifica que $m^v(S, i) = 0$. Es decir, los jugadores nulos son aquellos que realizan ninguna aportación a las coaliciones con su participación.

Dos jugadores $i, j \in N$ son simétricos en el juego v si sus aportaciones al juego son las mismas para todas las coaliciones, esto es $m^v(S, i) = m^v(S, j)$ para toda coalición con $i, j \notin S$.

3.3.3. El valor de Shapley

Shapley [6] definió un valor sobre la familia de todos los juegos cooperativos sencillo, con una axiomatización muy lógica y razonable. Un libro muy completo sobre este valor, el cuál ha sido el más utilizado de los conocidos, es [7].

El valor de Shapley es el valor ϕ dado para cada juego cooperativo $v \in G^N$ y para cada jugador $i \in N$ como

$$\phi_i(v) = \sum_{\{S \subseteq N: i \notin S\}} \frac{|S|! (n - |S| - 1)!}{n!} m^v(S, i).$$

A continuación se describe una axiomatización del valor de Shapley. El valor de Shapley es el único que satisface las siguientes propiedades.

- *Eficiencia.* Los pagos de los juegos son eficientes sobre el valor de la gran coalición, es decir

$$\sum_{i \in N} \phi_i(v) = v(N).$$

- *Jugador nulo.* Si i es un jugador nulo para un juego v entonces $\phi_i(v) = 0$.
- *Igual tratamiento.* Si i, j son simétricos entonces $\phi_i(v) = \phi_j(v)$.
- *Aditividad.* El valor verifica que si $v, w \in G^N$ entonces

$$\phi(v + w) = \phi(v) + \phi(w).$$

3.3.4. El valor de Shapley como regla de reparto de costos

Shapley introdujo inicialmente su valor pensando en juegos de beneficios. Pero su aplicación es, como se ha indicado antes, global para todos los juegos. Por lo tanto podemos aplicar el valor a los juegos de costos y tratarlo como regla de reparto de costos, es decir tomar $\phi(c)$ para cada $c \in G_0^N$.

Los axiomas son lógicos en el ámbito de los juegos de costos. La eficiencia coincide con uno de los principios deseables para las reglas de reparto. Si un jugador es nulo en un jugador nulo es aquel que no conlleva costos al incorporarse a ninguna coalición, ni siquiera al formar la coalición

individual, por lo tanto parece razonable que no pague. Si dos jugadores provocan el mismo costo con su incorporación lo lógico es que la regla los trate igual. La aditividad es la condición más criticada del valor de Shapley, la idea es que si se resuelven dos proyectos para el mismo conjunto los pagos son independientes y no se producen transferencias entre los pagos de ambos juegos.

La regla de reparto de costos de Shapley satisface los principios de eficiencia, positividad y racionalidad individual. Sin embargo no es una regla perfecta ya que no tiene porque ser estable para todas las coaliciones, es decir no tiene porque verificar el principio de racionalidad coalicional. Si el juego de costos satisface concavidad, una propiedad generalizada de la subaditividad, entonces la regla obtiene un vector de pagos estable para todas las coaliciones. Ahora se consideran coaliciones no necesariamente disjuntas pero en este caso hay que tener en cuenta que la intersección aparece en ambos proyectos. Un juego de costos $c \in G_0^N$ es cóncavo cuando para todo par de coaliciones S, T ocurre que

$$c(S \cup T) \leq c(S) + c(T) - c(S \cap T).$$

4. EXPLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

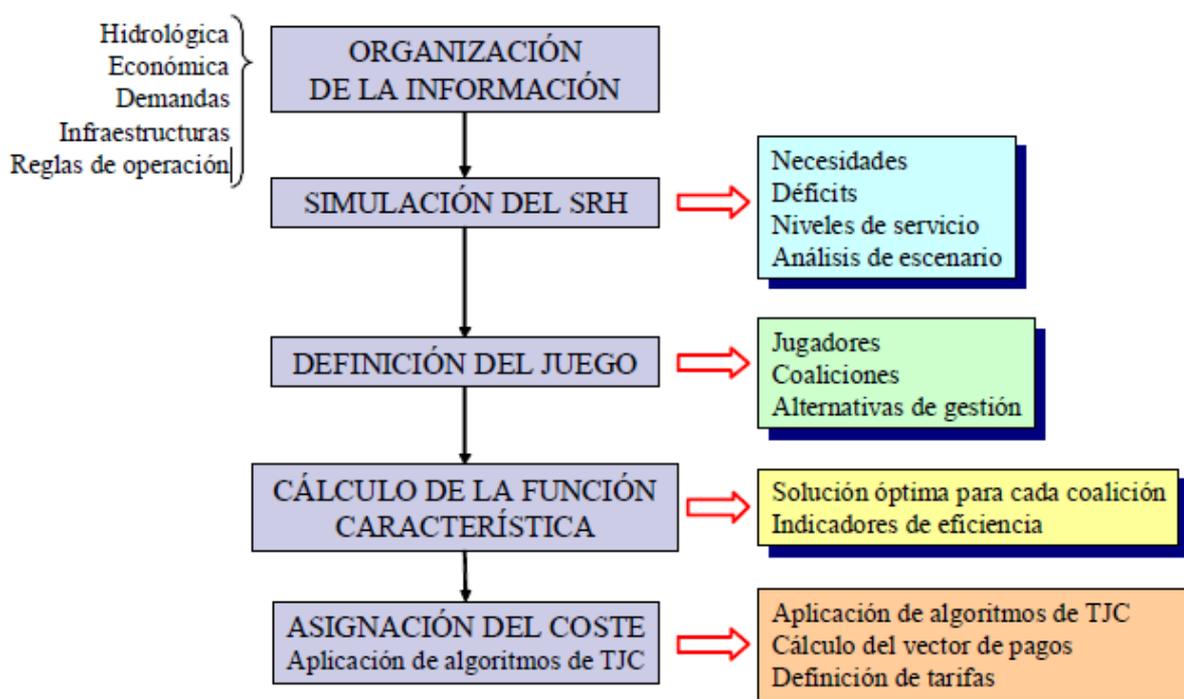
En esta sección, se explica la metodología a seguir en la asignación de costes de los servicios del agua basada en la aplicación conjunta de modelos de gestión de sistemas hídricos y de la TJC.

La metodología desarrollada se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Análisis del sistema hídrico: desarrollo de las necesidades y conjunto de las alternativas de gestión de los niveles de servicio.
2. Definición del juego cooperativo: identificación de los agentes independientes y formación de coaliciones.
3. Cálculo de la función característica: de tal manera que se llegue a las alternativas de gestión de menor coste para cada coalición.
4. Solución del juego: aplicación de los algoritmos de TJC.

En la figura que se encuentra a continuación se muestra el proceso de la aplicación de la metodología esquemáticamente.

Figura 4.1. Esquema de la metodología



4.1. Análisis del sistema hídrico

El proceso de análisis del sistema hídrico tiene como objetivo principal la identificación de los niveles de servicio que se quiere alcanzar y la definición de las actuaciones que se llevan a cabo en el servicio hídrico.

El estudio de sistemas hídricos complejos plantea la necesidad de manejar gran cantidad de información, entre las que se pueden destacar: niveles de embalses y acuíferos, usos de agua, recargas subterráneas, caudales, costes fijos y variables y niveles de eficiencia del sistema.

Existen modelos de simulación de sistemas hídricos, que permiten organizar toda esta información, analizar las relaciones entre los elementos y efectuar predicciones de los comportamientos bajo diferentes hipótesis.

En este proyecto se ha utilizado el modelo de simulación SIMGES para la modelización del sistema. Este permite una representación detallada del sistema hídrico, incluyendo datos físicos, las infraestructuras, las demandas, la hidrología y las reglas de la cuenca. Esta simulación ha sido aplicada en particular al caso del río Guadalquivir, que será el aspecto estudiado en este proyecto.

4.2. Definición del juego cooperativo

Esta tarea es bastante compleja, en la cual se debe determinar a los usuarios interesados por los servicios, cuyo número dependerá del tipo de agente y de sus objetivos. Se debe tener en cuenta que a medida que se elija un nivel mayor de discretización esto conlleva complejidades en aspectos económicos que a menudo no están compensados.

Por lo tanto, en el proceso de definición del juego se considera una tarea fundamental la identificación de los agentes independientes, que consiste en agrupar racionalmente los usuarios del sistema en función de algunas características comunes, como por ejemplo:

- La localización geográfica
- El uso compartido de infraestructuras
- Los niveles de servicio requeridos
- La demanda mensual y anual

- La actividad económica del uso del agua

Cuando se tengan agrupados los usuarios en agentes independientes se considera que comparten los mismos intereses en el juego. Cabe destacar que la definición de un agente independiente está vinculada a la escala y contexto, pudiendo varios usuarios actuar como agentes independientes y en otros casos agruparse para formar de esta manera un único jugador.

Una vez identificados los N-jugadores es posible definir el sistema de $2^N - 1$ coaliciones[7]. Los usuarios que forman parte de una coalición conservan los objetivos particulares pero en la coalición buscan la posibilidad de satisfacerlos a través de un proyecto común que les permita ahorrar parte de los costes de una actividad particular.

4.3. Cálculo de la función característica

La función característica representa el conjunto de soluciones de menor coste calculadas para cada coalición, independientemente de las actuaciones realizadas por los jugadores que no pertenecen a la coalición. Al estar los usuarios interconectados y al beneficiarse de un bien público, se plantea la necesidad de determinar unos criterios para evaluar los niveles de servicios obtenidos por los jugadores pertenecientes a una coalición y al mismo tiempo controlar las posibles afecciones sobre los usuarios que no pertenecen a ella.

4.3.1. Solución del juego cooperativo

Una vez calculados los valores de la función característica, la solución del juego cooperativo se halla mediante la aplicación de los algoritmos descritos más adelante.

El método de resolución adoptado en este proyecto es el valor de Shapley, que responde a la necesidad de garantizar una solución aceptable frente a características peculiares del sistema hídrico, como por ejemplo la incertidumbre en los costes finales del proyecto, la necesidad de proceder a la realización y financiación de proyecto por fases o la existencia de jugadores nulos. El valor de Shapley representa una forma directa y simple de encontrar una solución racional y eficiente para un juego cooperativo de estas características, con independencia del número de jugadores.

El resultado de la aplicación del juego es un vector de pagos asociados a cada jugador presente en la gran coalición y relativo a la realización de las actuaciones contenidas en el proyecto de coalición más eficiente durante el período de tiempo considerado.

5. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA AL CASO DEL RÍO GUADALQUIVIR

En este capítulo se resume la descripción del modelo utilizado para la asignación del coste de los servicios en el sistema de explotación del río Guadalquivir y se procede a la definición de un criterio de reparto de los costes de las infraestructuras existentes en la cuenca, basado en la estimación de la responsabilidad de cada usuario en el uso de las mismas.

A partir del estudio del esquema conceptual de la cuenca del río Guadalquivir se plantea el juego cooperativo mediante un proceso de racionalización y agrupación de usuarios y se define el modelo de optimización económica a partir del cual es posible calcular la función característica. Finalmente se procede al cálculo del valor de Shapley para obtener el vector de pagos y al análisis de los resultados.

El carácter experimental del estudio concede una cierta libertad a la hora de definir la información económica del modelo, que no pretende reflejar fielmente y de forma detallada la realidad del sistema, sino permitir una representación, lo más objetiva posible, del problema con el fin de ofrecer un ejemplo de aplicación de la metodología a un caso de estudio. Por lo tanto, se advierte el lector que muchos aspectos del sistema hídrico han sido objeto de simplificaciones e idealizaciones y que los resultados obtenidos no pretenden ser una propuesta formal de tarifación. Para una aplicación práctica real, debería mejorarse la representación del sistema y estimarse con mayor precisión algunas características del mismo, entre ellas las funciones características.

5.1. El sistema hídrico del río Guadalquivir

El modelado del sistema es el primer paso para la aproximación al conocimiento del mismo, siendo éste el paso más largo y costoso debido a la cantidad de información a considerar. De hecho la definición de un esquema conceptual es un proceso que constituye un estudio por sí mismo. Siendo el sistema del río Guadalquivir muy estudiado, concretamente en la provincia de Sevilla, ya que es el estudio principal de este proyecto. En el presente documento se encontrará modelos de las diferentes partes que conforman el esquema de gestión de nuestro río, entre los que cabe destacar los siguientes:

- Las infraestructuras fundamentales (presas, canales, retornos, bombeos)
- Las conexiones entre elementos puntuales (tramos de río, conducciones, canales, tomas)
- Las demandas

- Las aportaciones hidrológicas
- Los acuíferos conectados hidráulicamente con el sistema superficial

5.1.1. Descripción general del sistema

El río Guadalquivir se encuentra localizado al sur de la Península Ibérica. Es el quinto río por longitud de la península. Recorre la comunidad autónoma de Andalucía de este a oeste. En cuanto a su nacimiento se considera que el Guadalquivir nace en la Cañada de las Fuentes en la Sierra de Cazorla (Jaén). Aunque el manantial más alejado que vierte aguas al río se sitúa en las cercanías de la aldea almeriense de Topares, donde nace el arroyo de la Cañada del Salar. Cuenta con 657 km de recorrido hasta su desembocadura y una superficie de la cuenca de 57.071 km² y un caudal medio en la provincia de Sevilla de 164,3 m³/s.

Su cuenca hidrográfica comprende territorios de las ocho provincias andaluzas, así como algunas comarcas de las provincias de Badajoz, Ciudad Real, Albacete y Murcia. Desemboca en el Océano Atlántico por Sanlúcar de Barrameda, en un amplio estuario entre la provincia de Cádiz y la de Huelva. Entre Sevilla y el estuario, se sitúa una amplia zona húmeda: las Marismas del Guadalquivir.

Una vez centrados en la provincia sevillana, el curso del río por ella es conocido como el curso bajo. El Guadalquivir entra en la provincia de Sevilla y pasa por Peñaflor, Lora del Río, Alcolea del Río, Tocina y Cantillana junto al cual recibe por la derecha al río Viar. Seguidamente sigue pasando por Villaverde del Río, Brenes, Alcalá del Río, La Rinconada y La Algaba bajo el cual recibe por la derecha al río Rivera de Huelva y por la izquierda el cauce artificial del Tamarguillo.

Pasa por el lado oeste de Sevilla. Al este el río cuenta con una gran dársena donde se encuentra el Puerto de Sevilla y, al final de esta, existe un tapón de tierra en el barrio de San Jerónimo. Prosigue por el Aljarafe, donde deja a la derecha Camas, San Juan de Aznalfarache y Gelves, localidad en la que existe un puerto deportivo, y posteriormente recibe por la izquierda al río Guadaíra.

Dejando a la derecha Coria del Río y la La Puebla del Río, se divide por debajo de estos en varios brazos y zonas semipantanosas llamadas las marismas del Guadalquivir, por donde pasa por la última ciudad de la provincia de Sevilla: la localidad de Lebrija. Al oeste se encuentra el Parque Nacional de Doñana. Formando línea divisoria entre las provincias de Cádiz y Huelva, desemboca en el océano Atlántico junto a los términos municipales de Almonte y Sanlúcar de Barrameda.

Posteriormente se tiene el embalse Huesna ubicado en el cauce del río Rivera del Huesna, se encuentra en los términos municipales de Constantina y El Pedroso. Es la principal fuente de abastecimiento del Consorcio de Aguas del Huesna, que gestiona el suministro de 18 municipios de la provincia –El Madroño, El Pedroso, El Real de la Jara, Villanueva del Río y Minas, Alcolea del

Río, Cantillana, Tocina, Brenes, Carmona, El Viso del Alcor, Utrera, Los Molares, El Coronil, Lebrija, Las Cabezas de San Juan, Los Palacios y Villafranca, y El Cuervo—.

La presa acabó de construirse en 1990 y cuenta con un volumen de embalse de 134,6 hm³, de los que el consorcio tiene asignados 30,2 hm³. El embalse tiene 796,31 hectáreas de superficie y una superficie de cuenca de 479 km².

Se tendrá en cuenta otro embalse de la cuenca del Guadalquivir, llamado embalse de Melonares. En su concepción, la construcción tenía como objetivo aumentar el abastecimiento de agua potable al Área metropolitana de Sevilla, especialmente por el impacto de la sequía de 1992-1995. En 2001 se aprueba definitivamente el proyecto después de en 1997 se resolviera como favorable la Declaración del Impacto Ambiental. Las obras para la construcción de la presa se llevaron a cabo desde 2003 hasta 2007, año en que se iniciarían las obras de la red de tuberías necesarias para unir el embalse a la red de suministro de Emasesa. La capacidad del embalse es de 180,4 hectómetros cúbicos, la superficie inundada es de 1.467 ha.

En cuanto a acuíferos se puede destacar la unidad Sevilla-Carmona que se extiende sobre unos 1.150 km² en el margen derecho del Guadalquivir. Entre las ciudades de Lora del Río, Cantillana, Carmona, Dos Hermanas y Sevilla. La alimentación se realiza por infiltración directa del agua de lluvia y por influencia del río Guadalquivir en las crecidas. Los recursos propios, calculados a partir de la lluvia útil, son de 174 hm³/año, y las extracciones para regadío y abastecimiento del orden de 40 hm³/año.

5.1.2. Prioridades y reglas de gestión

En este apartado se describen las reglas de gestión establecidas para el Sistema de recursos hídricos en el caso del río Guadalquivir:

- En primer lugar, no se vulnerarán en la medida que sea posible los valores mínimos de embalses establecidos por motivos medioambientales
- Se intentan mantener en lo posible los caudales mínimos ecológicos
- Se procede al suministro de las demandas en el siguiente orden de prioridad: en primer lugar, se asegura el abastecimiento urbano para Sevilla, Dos Hermanas, Utrera y Lebrija; en segundo lugar, se abastece los riegos tradicionales de
- Una vez abastecidas todas las demandas del sistema y satisfecho los caudales ambientales, el agua sobrante se conserva en los embalses.

5.1.3. Demandas del Sistema

Se diferencian dos tipos de demandas en el caso del sistema hídrico del río Guadalquivir:

Demandas urbanas: en las cuales solo se tienen en cuenta la cantidad de agua suministrada para el uso doméstico.

- Abastecimiento de la ciudad de Sevilla
- Abastecimiento del municipio de Dos Hermanas
- Abastecimiento de Utrera
- Abastecimiento del área de Lebrija

Demandas agrícolas:

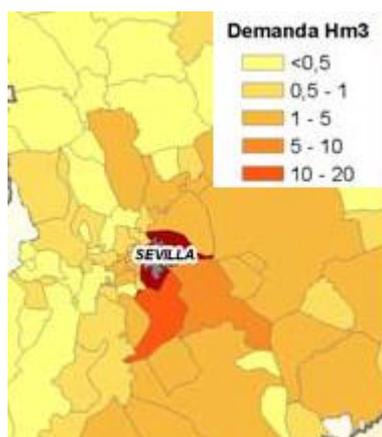
- Riego de los Campos de Girasol
- Riego de Los Palacios y Villafranca
- Riego de Coría del Río

En la siguiente tabla se observan los valores medios anuales y mensuales de las demandas consideradas en el modelo.

Tabla 5.1. Demandas por municipios del río Guadalquivir

| Municipio | Demanda ($hm^3/año$) | Tipo | Prioridad |
|-------------------------------|---------------------------|----------|-----------|
| Sevilla | 74,53 | Urbana | 1 |
| Dos Hermanas | 9,03 | Urbana | 1 |
| Utrera | 3,09 | Urbana | 1 |
| Lebrija | 1,61 | Urbana | 1 |
| Los palacios y Villafranca | 2,05 | Agrícola | 2 |
| Coría del Río | 1,89 | Agrícola | 2 |
| Campos de Girasol | 2,22 | Agrícola | 2 |

Figura 5.1. Demanda por municipios



5.1.4. Tomas fuera de comisión de desembalse

Los usuarios citados en el apartado anterior forman parte de la Comisión de Desembalse y en cada actividad hidrica estan sujetos a sus disposiciones sobre el régimen de llenado y vaciado en función de los distintos usos demandados. Sin embargo existen otros usuarios minoritarios en la Cuenca que no están presents en la comisión pero tienen derecho a la toma de cierto caudal circulante por el río. Estos usuarios no participant en la gestión y financiación de los embalses pero pueden beneficiarse indirectamente al deriver parte de los caudales desembalsados para otros usuarios.

La medida de las demandas de las tomas de fuera de comisión (TFC) son muy complejas, ya que no están sometidas a volúmenes y no está controlada. Pero los balances hidrológicos sugieren la valoración del orden de 10 hm³ anuales. En el modelo se han simulado las TFC como una unidad de demanda de 10 hm³ anuales situada aguas abajo de los embalses principales de la cuenca, cuya distribución mensual coincide con los riegos tradicionales.

5.1.5. Infraestructuras presentes en el Sistema

Las obras hidráulicas presentes en el sistemas y consideradas en el análisis son las siguientes:

- 2 embalses (Melonares y Huesna)
- Los retornos de las aguas depuradas de la provincia de Sevilla
- Los sistemas de pozos
- Ua red capilar de distribución en baja para los sistemas de regadío

5.2. Caracterización económica de la cuenca

En este apartado se recogen la información económica del sistema que es requerida para

realizar la asignación de costes de manera eficiente. La representación del sistema permite una cierta flexibilidad a la hora de definir la información económica, puesto que el fin del proyecto no es reflejar fielmente la realidad económica sino realizar una representación lo más objetiva posible. Por lo tanto, no se tendrán en cuenta todas las infraestructuras del sistema hídrico real. Se seleccionarán las infraestructuras que se consideren más representativas y se definirán una función de coste según los criterios disponibles en la literatura científica.

El proceso de cálculo se basa en el uso de las funciones de coste de las infraestructuras, que representan una relación directa entre los costes de inversión, mantenimiento y explotación de los servicios hídricos a estudiar. La definición de una función de coste requiere que se identifiquen parámetros de diseño, que dependen de la naturaleza y finalidad de las infraestructuras.

El uso de funciones de costes constituye un avance en el proceso de planificación de los servicios del agua, en cuanto que permite efectuar previsiones a medio y largo plazo sobre los costes de las medidas y su eficiencia económica. Su aplicación se ha desarrollado en las últimas décadas en paralelo con el uso de modelos de simulación y de optimización de la gestión de los recursos hídricos, como se puede observar en los estudios realizados por el Ministerio de Medio Ambiente en el Plan Hidrológico Nacional (MIMAM, 2000) y los documentos publicados más recientemente por el CEDEX (2011) [8].

Debido que el trabajo correspondiente a la definición de las funciones de costes se encuentra fuera de los objetivos de este trabajo, pues se ha decidido utilizar la información ya existente debido a que se halla una gran diversidad bibliográfica al respecto.

5.3. Cálculo de las funciones de coste

5.3.1. Embalses

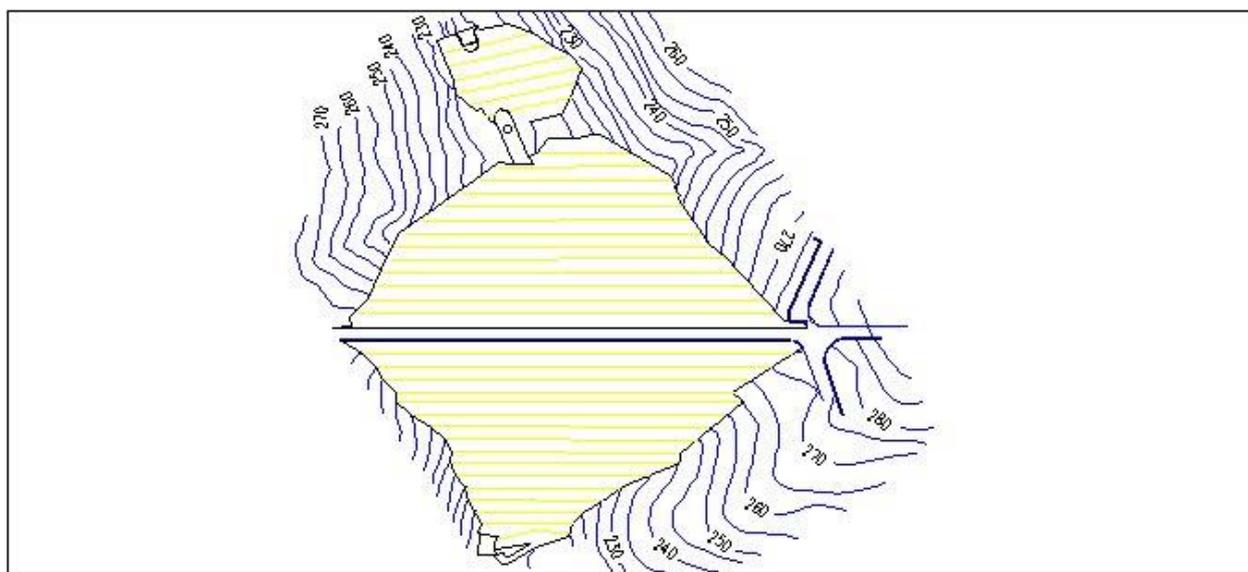
A continuación se presenta las características técnicas de los embalses que se han elegido en este proyecto, los cuales son el embalse del Huesna y de Melonares.

Además, se deberá incrementar un coste por el mantenimiento del 1,2% sobre los costes de inversión y una vida útil de 50 años (CEDEX, 2011)

Tabla 5.2. Características del embalse del Huesna

| Características del embalse | |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------|
| Superficie de la cuenca hidrográfica (km ²): | 459,000 |
| Aportación media anual (hm ³): | 85,000 |
| Precipitación media anual (mm): | 107,000 |
| Caudal punta avenida de proyecto (m ³ /s): | 780,000 |
| Superficie del embalse a NMN (ha): | 738,000 |
| Capacidad a NMN (hm ³): | 134,600 |
| Cota del NMN (m): | 275,500 |
| Tipo de presa: | Materiales sueltos P asfáltica |
| Cota coronación (m): | 280 |
| Altura desde cimientos (m): | 73,000 |
| Longitud de coronación (m): | 278 |
| Cota cimentación (m): | 207,000 |
| Cota del cauce en la presa (m): | 210,600 |
| Volumen del cuerpo presa (1000 m ³): | 1.100,000 |
| Volumen útil (hm ³): | 131,4 |
| Volumen total(hm ³): | 135 |

Figura 5.2. Planos del embalse del Huesna



A continuación, se muestra la función de costes que se ha llegado relacionando volumen y costes mediante una interpolación con los datos que se tienen de la presa, en los cuales se han utilizado los datos de volumen del año 2016, recogidos en la Figura 5.8 y siguiendo las instrucciones expuestas en las Normas de Explotación de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir.

Figura 5.3. Función Volumen-Coste del embalse de Huesna

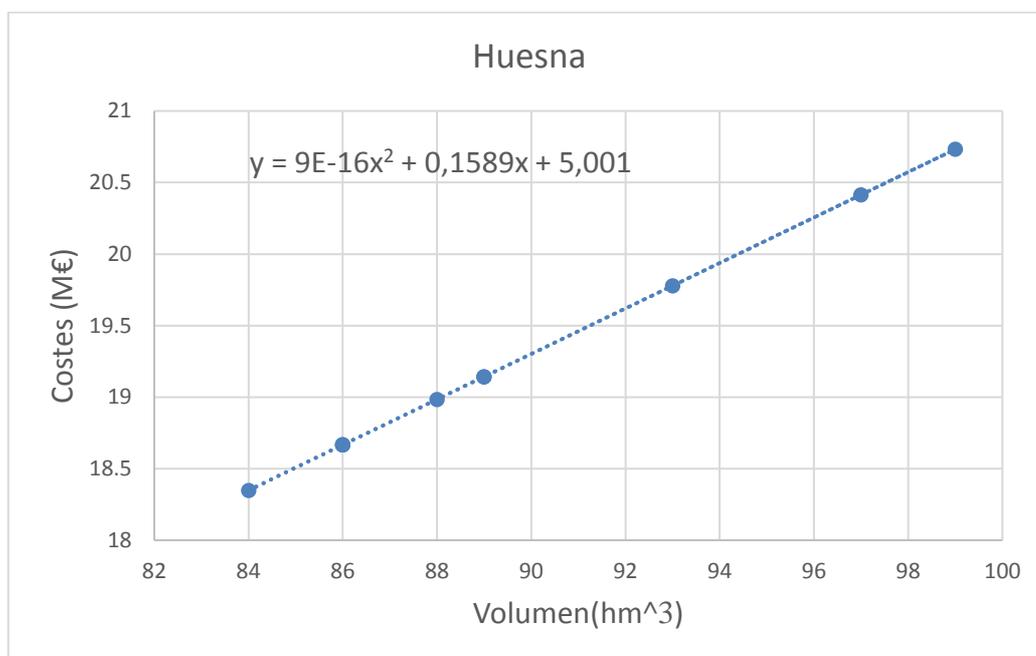


Tabla 5.3 Características del embalse de Melonares

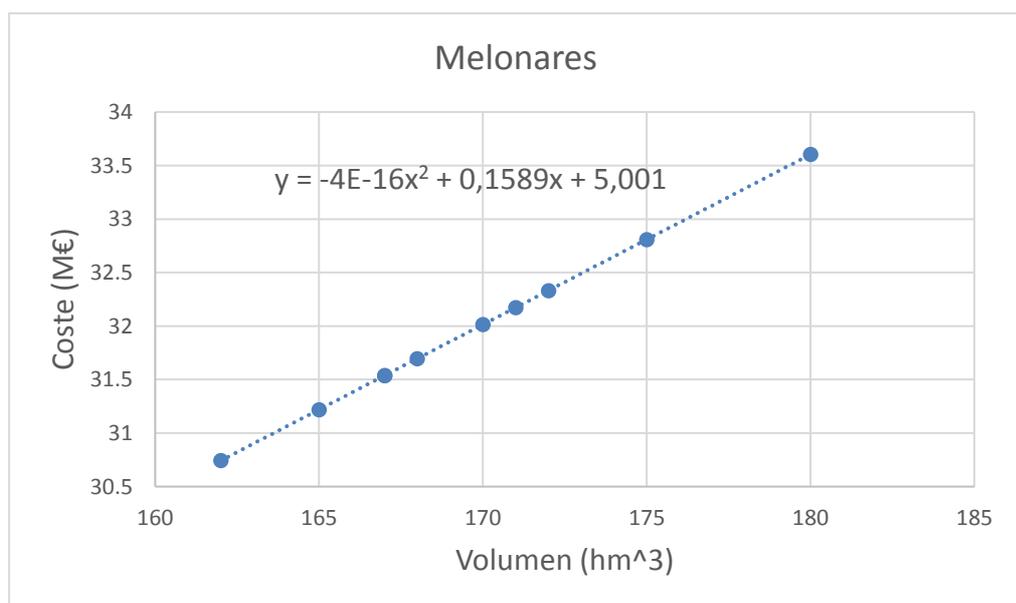
| Características del embalse | |
|----------------------------------------------------------|-----------------|
| Superficie de la cuenca hidrográfica (km ²): | 558,000 |
| Precipitación media anual (mm): | 800,000 |
| Caudal punta avenida de proyecto (m ³ /s): | 1.414,000 |
| Superficie del embalse a NMN (ha): | 1.460,000 |
| Capacidad a NMN (hm ³): | 180,000 |
| Cota del NMN (m): | 82,000 |
| Tipo de presa: | Aco de Gravedad |
| Cota coronación (m): | 87 |
| Altura desde cimientos (m): | 50,250 |
| Longitud de coronación (m): | 525 |
| Cota cimentación (m): | 37,000 |
| Cota del cauce en la presa (m): | 42,000 |
| Volumen útil (hm ³): | 162,2 |
| Volumen total(hm ³): | 185,6 |

Figura 5.4. Dimensiones del embalse de Melonares



En cuanto a la función de volumen-coste del embalse de Melonares se ha llevado a cabo con la misma metodología que en el anterior caso: una interpolación con los datos que se han recogidos y teniendo en cuenta las Normas de Explotación de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y con el volumen del embalse del año 2016, recogidos en la Figura 5.9.

Figura 5.5. Función Volumen-Coste del embalse de Melonares



5.3.2. Canales

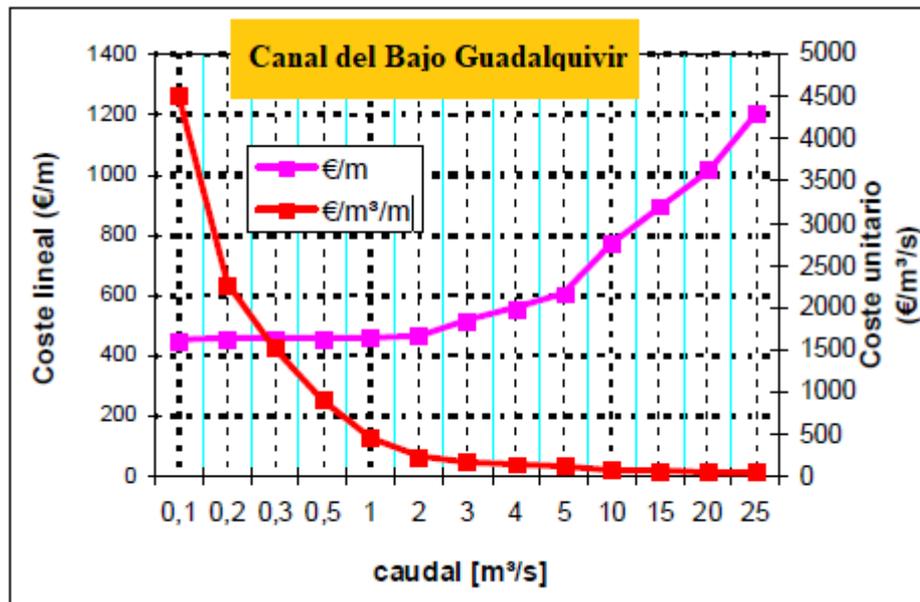
El coste asociado a los canales depende en gran medida de las características del entorno, siendo fundamental la geología del terreno. Existe una relación directa entre los caudales de diseño y el coste de la obra, debido al encarecimiento de los trabajos de excavación y impermeabilización como consecuencia del aumento de la sección del paso de agua.

Se han considerado las funciones de costes definidas en (MIMAM, 2000) para un diseño tipo, distinguiéndose si el canal discurre por el suelo o por roca y si la pendiente del terreno supera o no el 50%, estos son los aspectos con más importancia en el cálculo de los costes.

Los costes de explotación y mantenimiento se estiman en una cuantía fija anual del 1,2% sobre el coste de inversión (CEDEX 2011) y una vida útil de las obras civiles de 50 años.

Se ha tenido en cuenta el Canal del Bajo Guadalquivir, conocido como el Canal de los Presos, el cual su objetivo fundamental es el abastecimiento para el regadío. Actualmente riega una superficie de 80.000 hectáreas. El caudal circulante por este canal es muy variante dependiendo de la época del año. Recorre 158 km, pero en el caso estudiado el canal recorre alrededor de 60 km hasta Coría del Río.

Figura 5.6. Función de coste, Canal del Bajo Guadalquivir



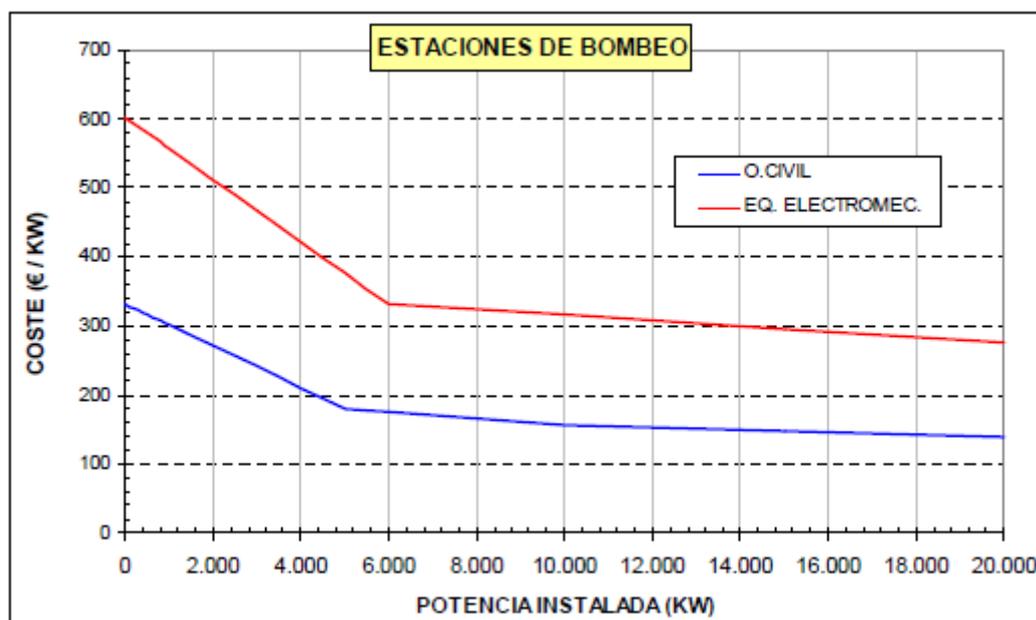
5.3.3. Bombeos

Las estaciones de bombeo son instalaciones electromecánicas, destinadas a elevar o transportar el agua desde el nivel de llegada en la estación de bombeo, a alturas superiores a la salida de ésta.

Son necesarias para elevar el flujo de agua cuando dicho transporte no puede realizarse por gravedad, con su consiguiente consumo de energía eléctrica.

En la siguiente gráfica (MIMAM, 2002) se refleja una parametrización de los costes de obras civiles y de los equipos electromecánicos en función de la potencia instalada.

Figura 5.7. Parametrización de costes (MIMAM, 2002)



Como en casos anteriores se los costes de mantenimiento se consideran un 1,2% respecto a los costes de inversión. Mientras que los costes de explotación están asociados en gran parte a la potencia consumida. Una estimación razonable puede encontrarse entre 0,08 y 0,1 €/kwh (CEDEX, 2011). La vida útil de la instalación se suele estimar en 50 años para las obras civiles y 25 años para los equipos electromecánicos. Sin embargo, teniendo en cuenta que estos últimos son los elementos caracterizantes de la instalación, se puede optar por asignar una vida útil de 25 años al conjunto de la inversión.

En la siguiente tabla se han reflejados los datos de los costes fijos y variables correspondientes a unas instalaciones tipo localizadas en la provincia de Sevilla, en particular los datos de las bombas situadas en el embalse de Melonares.

Tabla 5.4. Costes bombeos en Sevilla

| Bombeos en la provincia de Sevilla | |
|------------------------------------------------|--------|
| Datos de la estación | |
| Profundidad de bombeo (m) | 75 |
| Caudal instalado(m ³ /s) | 0.1 |
| Horas diarias de funcionamiento | 8 |
| Costes | |
| Obra Civil (€) | 50000 |
| Coste sondeo (€) | 4000 |
| Coste inversión unitario (€/m ³ /s) | 180000 |
| Explotación (€/m ³) | 0.07 |

5.3.4. Reutilización de las aguas residuales del área urbana

En cuanto al análisis económico, un coste de explotación de 0,12 €/m³ producido y un coste debido a la inversión de 0,5 €/m³, en el cual está incluido los costes de mantenimiento y personal. Cabe destacar que se ha decidido tratar el máximo nivel de tratamiento del agua, es decir, el tratamiento de tipo 4, con la finalidad de simplificar el cálculo de los costes.

Además, el suministro de agua regenerada está vinculada con la capacidad de la red de distribución existente, a la cual se deben de realizar nuevas infraestructuras que suponen un coste adicional que se estima en 0,05 €/m³.

Por lo tanto se ha concluido con que el gasto de reutilización de agua en la provincia de Sevilla es de alrededor de 0,67 €/m³ (670.000 €/hm³).

5.3.5. Desalinización

Los costes en este aspecto se han determinado en la provincia de Sevilla en 0,50 €/m³ (500.000 €/hm³). Los costes se han determinado por la suma de la gran cantidad de diversos costes

que corresponden a la desalización del agua entre los que se puede destacar: costes de inversión, energía eléctrica, tratamientos, mantenimiento y personal.

5.3.6. Laminación de avenidas

Los servicios de laminación de avenidas son restricciones en la gestión del sistema que delimitan el volumen máximo de los embalses con el fin de asegurar un volumen suficiente para hacer frente a una avenida de un determinado período de retorno.

En las siguientes tablas se muestran los volúmenes de los embalses Huesna y Melonares respectivamente a lo largo de los últimos 10 años, y específicamente los de los últimos tres años.

Figura 5.8. Volumen anual del embalse Huesna

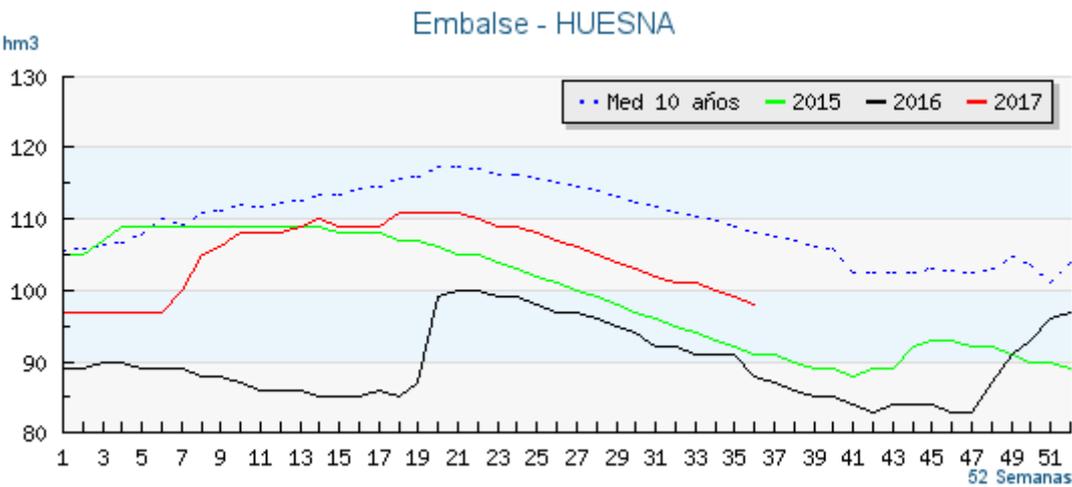
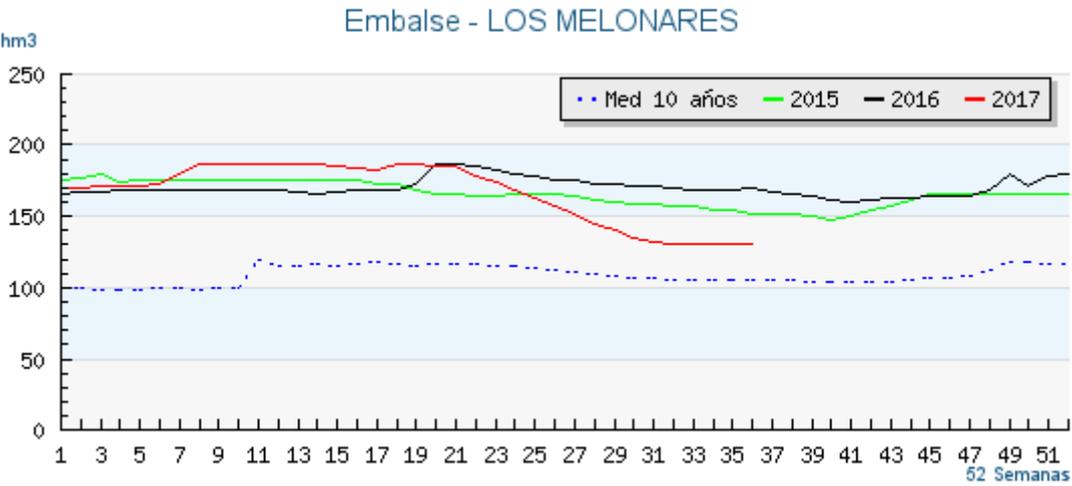


Figura 5.9. Volumen anual del embalse de Melonares



En cuanto al embalse de Huesna determinamos un volumen mínimo autorizado de 10 hm³ mientras que como volume máximo se tiene de 130 hm³.

Por otro lado en el embalse de Melonares se tiene un volumen autorizado del mínimo de 30 hm³ y un volume máximo de 220 hm³.

5.4. Definición del juego y formación de las coaliciones

Una vez caracterizado el sistema y definido los diferentes aspectos relacionados con el análisis económico, hidrológico y físico se procede a la definición del juego. En primer lugar se procede a identificar a los jugadores independientes.

5.4.1. Demandas consuntivas

Se han definido 4 jugadores correspondientes a las demandas de agua para uso consuntivo, 2 de ellos de aspectos urbanos y los otros agrícolas. Se ha decidido dividirlos puesto que las características de ellos les hacían ser jugadores independientes compuestos de ésta manera:

- Usos urbanos (Jugador 1): representados por las unidades de demanda urbana de Sevilla y Dos Hermanas, debido a que ambos están abastecidos por Emasesa, la cual suministra agua de varios embalses entre los que destaca el embalse de Melonares, seleccionado para el estudio de este trabajo.
- Usos urbanos (Jugador 2): representados por los usuarios de demanda de agua urbana de Utrera y Lebrija, los cuales son abastecidos por la empresa Aguas de Huesna. Empresa que suministra agua principalmente del embalse del Huesna, situado en el municipio sevillano de Constantina y El Pedroso.
- Usos agrícolas (Jugador 3): representados por los Campos de cultivo de Girasol, situados al norte de la localidad de Sevilla y por otro lado por Los Palacios y Villafranca, situado al sur. Los dos terrenos abastecidos por el embalse de Huesna mientras que los Campos de Girasol es abastecido también por el de Melonares, ya que es un área mucho mas extensa. Por lo tanto a la hora de aplicar la optimización la demanda del embalse de Huesna abarcará completamente la correspondiente a Los Palacios y Villafranca y la mitad de los Campos de Girasol mientras que Melonares solo abastecerá la mitad del Girasol.
- Usos agrícolas (Jugador 4): formado por el municipio de Coría del Río, el cual se abastece del embalse de Melonares. Éste tiene la particularidad de que para llegar el agua hasta este punto se utiliza el canal, aspecto que tendrá una gran influencia en los aspectos económicos.

Los cuatro jugadores comparten que son los mayores consumidores de agua de la Cuenca,

además de patrones de consumo y los niveles de servicio requeridos.

5.5. Aplicación del modelo de optimización

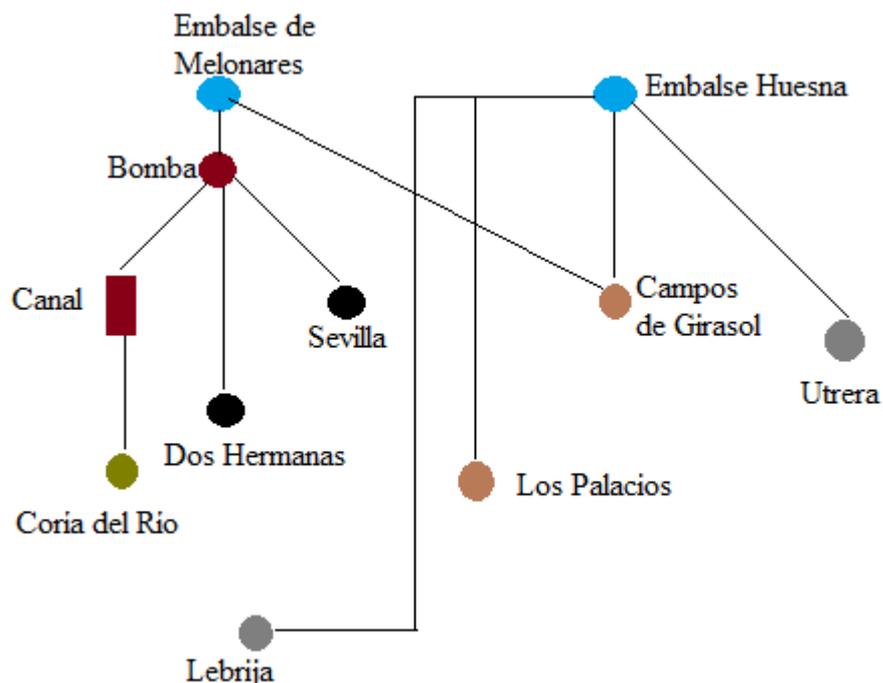
5.5.1. Aclaraciones del modelo

Se aclaran varios aspectos relevantes en la optimización. En cuanto a los costes de cada jugador, se han tenido en cuenta los costes que se pueden dividir entre los usuarios que conforman los jugadores, es decir, el coste del uso de consumo del agua no se ha tenido en cuenta puesto que son indivisible y corresponden a cada jugador.

Por otro lado, se tienen los costes separables que se corresponden con el de las infraestructuras que son los que se han tenido en cuenta y en los que se basa nuestro método, ya que que nuestro objetivo principal es la optimización de los costes para cada jugador.

En el siguiente esquema (Figura 5.5) se puede observar las infraestructuras que influyen en cada jugador, que de esta manera se simplifica los costes asociados a cada jugador y los que se tienen en cada coalición.

Figura 5.10. Esquema de abastecimiento



Cade destacar que solo existe un camino para el abastecimiento de cada una de las áreas por lo que no ha sido necesario la optimización del camino crítico.

Seguidamente se muestra una tabla simplificadora del esquema de abastecimiento.

Tabla 5.5. Abastecimiento de agua

| | J 1 | J 2 | J 3 | J 4 |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|
| Embalse Melonares | Sí | No | Sí | Sí |
| Bombeo | Sí | No | No | Sí |
| Embalse Huesna | No | Sí | Sí | No |
| Canal | No | No | No | Sí |
| Reutilización | No | No | Sí | Sí |
| Desalinización | No | No | Sí | Sí |

Tabla 5.6. Precios unitarios

| | Precios por 1 hm ³ (M€) |
|-------------------|------------------------------------|
| Embalse Melonares | 5,16 |
| Bombeo | 4,7 |
| Embalse Huesna | 5,22 |
| Canal | 1,16 |
| Reutilización | 0,67 |
| Desalinización | 0,5 |

5.5.2. Optimización de las coaliciones

El siguiente paso consiste en la aplicación del modelo de optimización para cada una de las 15 coaliciones (2^4-1). En cada una de las optimizaciones los usuarios presentes en la coalición están vinculados al conseguimiento de los niveles de garantía y tienen a disposición todas las alternativas de suministro con sus respectivas funciones de coste. La elección del conjunto de alternativas de

suministro más adecuado se realiza minimizando la función objetivo del sistema, que incluye las funciones de coste de las infraestructuras.

Los usuarios que no pertenecen a la coalición están vinculados al conseguimiento de los niveles de garantía. Siendo el coste de déficit inferior al coste de las infraestructuras del sistema el modelo no está incentivado a disponer la realización de nuevas infraestructuras para elevar el nivel de garantía por encima del valor de base.

El intervalo temporal establecido en el análisis es de 50 años, que corresponde a la vida útil estimadas para las obras civiles. Las inversiones que presentan una vida útil inferior serán reemplazadas al caducar el período de amortización suponiendo un valor residual nulo.

A continuación se ofrece un resumen de los resultados calculados para cada coalición. Se puede observar en las distintas tablas el dimensionamiento de las infraestructuras y el coste mínimo asociado a cada coalición.

Con el fin de agilizar la identificación de las coaliciones se ha propuesto la siguiente notación para los jugadores del sistema:

Jugador 1: (1), Sevilla y Dos Hermanas.

Jugador 2: (2), Utrera y Lebrija.

Jugador 3: (3), Campos de Girasol y Los palacios y Villafranca.

Jugador 4: (4), Coría del Río.

Tabla 5.7. Coalición 1

| Coalición 1 | | | | | | |
|------------------|-------------------|--------|---------|-------|---------------|----------------|
| Infraestructuras | Melonares | Huesna | Bombeos | Canal | Reutilización | Desalinización |
| Diseño | 1 hm ³ | | | | | |
| Coste (M€) | 1,72 | 0,00 | 2,35 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Total (M€) | 4,07 | | | | | |

Tabla 5.8. Coalición 2

| Coalición 2 | | | | | | |
|------------------|-------------------|--------|---------|-------|---------------|----------------|
| Infraestructuras | Melonares | Huesna | Bombeos | Canal | Reutilización | Desalinización |
| Diseño | 1 hm ³ | | | | | |
| Coste (M€) | 0,00 | 2,61 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Total (M€) | 2,61 | | | | | |

Tabla 5.9. Coalición 3

| Coalición 3 | | | | | | |
|------------------|-------------------|--------|---------|-------|---------------|----------------|
| Infraestructuras | Melonares | Huesna | Bombeos | Canal | Reutilización | Desalinización |
| Diseño | 1 hm ³ | | | | | |
| Coste (M€) | 1,72 | 2,61 | 0,00 | 0,00 | 0,335 | 0,25 |
| Total (M€) | 4,915 | | | | | |

Tabla 5.10. Coalición 4

| Coalición 4 | | | | | | |
|------------------|-------------------|--------|---------|-------|---------------|----------------|
| Infraestructuras | Melonares | Huesna | Bombeos | Canal | Reutilización | Desalinización |
| Diseño | 1 hm ³ | | | | | |
| Coste (M€) | 1,72 | 0,00 | 2,35 | 1,16 | 0,335 | 0,25 |
| Total (M€) | 5,815 | | | | | |

Tabla 5.11. Coalición 12

| Coalición 12 | | | | | | |
|------------------|-------------------|--------|---------|-------|---------------|----------------|
| Infraestructuras | Melonares | Huesna | Bombeos | Canal | Reutilización | Desalinización |
| Diseño | 1 hm ³ | | | | | |
| Coste (M€) | 1,72 | 2,61 | 2,35 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Total (M€) | 6,68 | | | | | |

Tabla 5.12. Coalición 13

| Coalición 13 | | | | | | |
|------------------|-------------------|--------|---------|-------|---------------|----------------|
| Infraestructuras | Melonares | Huesna | Bombeos | Canal | Reutilización | Desalinización |
| Diseño | 1 hm ³ | | | | | |
| Coste (M€) | 2,58 | 2,61 | 2,35 | 0,00 | 0,335 | 0,25 |
| Total (M€) | 8,125 | | | | | |

Tabla 5.13. Coalición 14

| Coalición 14 | | | | | | |
|------------------|-------------------|--------|---------|-------|---------------|----------------|
| Infraestructuras | Melonares | Huesna | Bombeos | Canal | Reutilización | Desalinización |
| Diseño | 1 hm ³ | | | | | |
| Coste (M€) | 2,58 | 0,00 | 4,7 | 1,16 | 0,335 | 0,25 |
| Total (M€) | 9,025 | | | | | |

Tabla 5.14. Coalición 23

| Coalición 23 | | | | | | |
|------------------|-------------------|--------|---------|-------|---------------|----------------|
| Infraestructuras | Melonares | Huesna | Bombeos | Canal | Reutilización | Desalinización |
| Diseño | 1 hm ³ | | | | | |
| Coste (M€) | 1,72 | 5,22 | 0,00 | 0,00 | 0,335 | 0,25 |
| Total (M€) | 7,525 | | | | | |

Tabla 5.15. Coalición 24

| Coalición 24 | | | | | | |
|------------------|-------------------|--------|---------|-------|---------------|----------------|
| Infraestructuras | Melonares | Huesna | Bombeos | Canal | Reutilización | Desalinización |
| Diseño | 1 hm ³ | | | | | |
| Coste (M€) | 1,72 | 2,61 | 2,35 | 1,16 | 0,335 | 0,25 |
| Total (M€) | 8,425 | | | | | |

Tabla 5.16. Coalición 34

| Coalición 34 | | | | | | |
|------------------|-------------------|--------|---------|-------|---------------|----------------|
| Infraestructuras | Melonares | Huesna | Bombeos | Canal | Reutilización | Desalinización |
| Diseño | 1 hm ³ | | | | | |
| Coste (M€) | 2,58 | 2,61 | 2,35 | 1,16 | 0,67 | 0,5 |
| Total (M€) | 9,87 | | | | | |

Tabla 5.17. Coalición 123

| Coalición 123 | | | | | | |
|------------------|-------------------|--------|---------|-------|---------------|----------------|
| Infraestructuras | Melonares | Huesna | Bombeos | Canal | Reutilización | Desalinización |
| Diseño | 1 hm ³ | | | | | |
| Coste (M€) | 2,58 | 5,22 | 2,35 | 0,00 | 0,335 | 0,25 |
| Total (M€) | 10,735 | | | | | |

Tabla 5.18. Coalición 124

| Coalición 124 | | | | | | |
|------------------|-------------------|--------|---------|-------|---------------|----------------|
| Infraestructuras | Melonares | Huesna | Bombeos | Canal | Reutilización | Desalinización |
| Diseño | 1 hm ³ | | | | | |
| Coste (M€) | 2,58 | 2,61 | 4,7 | 1,16 | 0,335 | 0,25 |
| Total (M€) | 11,635 | | | | | |

Tabla 5.19. Coalición 134

| Coalición 134 | | | | | | |
|------------------|-------------------|--------|---------|-------|---------------|----------------|
| Infraestructuras | Melonares | Huesna | Bombeos | Canal | Reutilización | Desalinización |
| Diseño | 1 hm ³ | | | | | |
| Coste (M€) | 5,16 | 2,61 | 4,7 | 1,16 | 0,67 | 0,5 |
| Total (M€) | 14,8 | | | | | |

Tabla 5.20. Coalición 234

| Coalición 234 | | | | | | |
|------------------|-------------------|--------|---------|-------|---------------|----------------|
| Infraestructuras | Melonares | Huesna | Bombeos | Canal | Reutilización | Desalinización |
| Diseño | 1 hm ³ | | | | | |
| Coste (M€) | 2,58 | 5,22 | 2,35 | 1,16 | 0,67 | 0,5 |
| Total (M€) | 12,48 | | | | | |

Tabla 5.21. Coalición 1234

| Coalición 1234 | | | | | | |
|------------------|-------------------|--------|---------|-------|---------------|----------------|
| Infraestructuras | Melonares | Huesna | Bombeos | Canal | Reutilización | Desalinización |
| Diseño | 1 hm ³ | | | | | |
| Coste (M€) | 5,16 | 5,22 | 4,7 | 1,16 | 0,67 | 0,5 |
| Total (M€) | 17,41 | | | | | |

5.5.3. Función característica

A partir de los datos de coste obtenidos para cada coalición y descritos en los apartados anteriores es posible definir la función característica del juego [9], [10].

A continuación se muestra las ecuaciones con las que se han calculado los costes de las diferentes coaliciones. Para calcular la función característica se empieza suponiendo que el coste del embalse del Huesna es h, del uso de la bomba es b, del embalse de melonares es m, del canal c, de la reutilización es r y de la desalinización es d. Se tiene por lo tanto las siguientes ecuaciones:

$$c(\{1\}) = \frac{b}{2} + \frac{m}{3}$$

$$c(\{2\}) = \frac{h}{2}$$

$$c(\{3\}) = \frac{h}{2} + \frac{m}{3} + \frac{r}{2} + \frac{d}{2}$$

$$c(\{4\}) = \frac{b}{2} + \frac{m}{3} + c + \frac{r}{2} + \frac{d}{2}$$

$$c(\{1,2\}) = \frac{h}{2} + \frac{b}{2} + \frac{m}{3}$$

$$c(\{1,3\}) = \frac{h}{2} + \frac{b}{2} + \frac{m}{2} + \frac{r}{2} + \frac{d}{2}$$

$$c(\{1,4\}) = b + \frac{m}{2} + c + \frac{r}{2} + \frac{d}{2}$$

$$c(\{2,3\}) = h + \frac{m}{3} + \frac{r}{2} + \frac{d}{2}$$

$$c(\{1,3\}) = \frac{h}{2} + \frac{b}{2} + \frac{m}{3} + c + \frac{r}{2} + \frac{d}{2}$$

$$c(\{3,4\}) = \frac{h}{2} + \frac{b}{2} + \frac{m}{2} + c + r + d$$

$$c(\{1,2,3\}) = h + \frac{b}{2} + \frac{m}{2} + \frac{r}{2} + \frac{d}{2}$$

$$c(\{1,2,4\}) = \frac{h}{2} + b + \frac{m}{2} + c + \frac{r}{2} + \frac{d}{2}$$

$$c(\{1,3\}) = \frac{h}{2} + b + m + c + r + d$$

$$c(\{1,3\}) = h + \frac{b}{2} + \frac{m}{2} + c + r + d$$

$$c(\{1,2,3,4\}) = c(N) = h + b + m + c + r + d$$

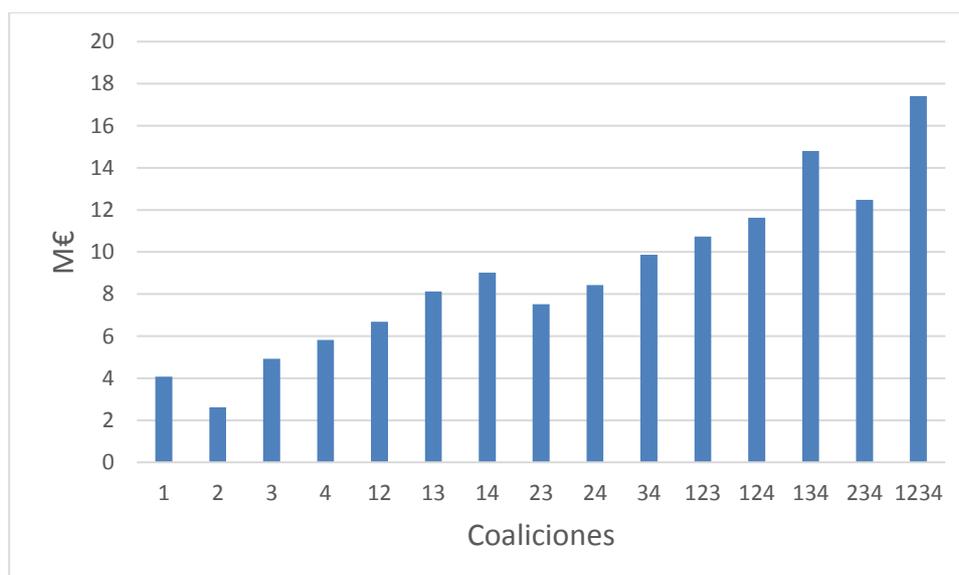
Se puede comprobar que se trata de un juego subaditivo y monótono, y por lo tanto un juego de costos. Además es un juego cóncavo.

En la Tabla 5.22 se resume el coste calculado para cada una de las coaliciones del juego y a continuación, en la Figura 5.11, se muestra el gráfico relativo a la función característica para el caso de estudio.

Tabla 5.22. Función característica

| Coalición | Coste (M€) |
|-----------|------------|
| 1 | 4,07 |
| 2 | 2,61 |
| 3 | 4,915 |
| 4 | 5,815 |
| 12 | 6,68 |
| 13 | 8,125 |
| 14 | 9,025 |
| 23 | 7,525 |
| 24 | 8,425 |
| 34 | 9,87 |
| 123 | 10,735 |
| 124 | 11,635 |
| 134 | 14,8 |
| 234 | 12,48 |
| 1234 | 17,41 |

Figura 5.11. Función característica



5.5.4. Asignación de costes

Una vez determinada la función característica del juego y comprobada la eficiencia de la gran coalición se procede a la aplicación de una regla de distribución de costos. Como el juego de costo es cóncavo el valor de Shapley verifica todos los principios deseados además de las propiedades ya comentadas. Se calcula entonces la asignación del coste de los servicios calculados mediante la aplicación del valor de Shapley.

$$\phi_i(c) = \sum_{\{S \subseteq N: i \notin S\}} \frac{s!(n-s-1)!}{n!} [c(S \cup \{i\}) - c(S)]$$

donde $\phi_i(c)$ es el coste asignado al jugador i , n el número de agentes y $s = |S|$, es decir la cardinalidad de la coalición S .

Sigue el cálculo del componente factorial del algoritmo de Shapley, cuyos valores se recogen en la Tabla 5.23:

$$Fact(s, n) = \frac{s!(n-s-1)!}{n!}$$

Tabla 5.23. Componente factorial, Valor de Shapley

| $ s $ | Fact (S,4) |
|-------|------------|
| 1 | 0,250 |
| 2 | 0,083 |
| 3 | 0,083 |
| 4 | 0,250 |

Finalmente se procede al cálculo del vector de pagos mediante el valor de Shapley, que corresponde a la asignación de los costes de la gran coalición entre los 4 jugadores.

Se estime el valor de Shapley mediante las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}\phi_1(c) = & \frac{1}{4}[c(\{1\}) - c(\emptyset)] + \frac{1}{12}[c(\{1,2\}) - c(\{2\})] + \frac{1}{12}[c(\{1,3\}) - c(\{3\})] + \frac{1}{12}[c(\{1,4\}) \\ & - c(\{4\})] + \frac{1}{12}[c(\{1,2,3\}) - c(\{2,3\})] + \frac{1}{12}[c(\{1,2,4\}) - c(\{2,4\})] \\ & + \frac{1}{12}[c(\{1,3,4\}) - c(\{3,4\})] + \frac{1}{4}[c(N) - c(\{2,3,4\})]\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\phi_2(c) = & \frac{1}{4}[c(\{2\}) - c(\emptyset)] + \frac{1}{12}[c(\{1,2\}) - c(\{1\})] + \frac{1}{12}[c(\{2,3\}) - c(\{3\})] + \frac{1}{12}[c(\{2,4\}) \\ & - c(\{4\})] + \frac{1}{12}[c(\{1,2,3\}) - c(\{1,3\})] + \frac{1}{12}[c(\{1,2,4\}) - c(\{1,4\})] \\ & + \frac{1}{12}[c(\{2,3,4\}) - c(\{3,4\})] + \frac{1}{4}[c(N) - c(\{1,3,4\})]\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\phi_3(c) = & \frac{1}{4}[c(\{3\}) - c(\emptyset)] + \frac{1}{12}[c(\{1,3\}) - c(\{1\})] + \frac{1}{12}[c(\{2,3\}) - c(\{2\})] + \frac{1}{12}[c(\{3,4\}) \\ & - c(\{4\})] + \frac{1}{12}[c(\{1,2,3\}) - c(\{1,2\})] + \frac{1}{12}[c(\{1,3,4\}) - c(\{1,4\})] \\ & + \frac{1}{12}[c(\{2,3,4\}) - c(\{2,4\})] + \frac{1}{4}[c(N) - c(\{1,2,4\})]\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\phi_4(c) = & \frac{1}{4}[c(\{4\}) - c(\emptyset)] + \frac{1}{12}[c(\{1,4\}) - c(\{1\})] + \frac{1}{12}[c(\{2,4\}) - c(\{2\})] + \frac{1}{12}[c(\{3,4\}) \\ & - c(\{3\})] + \frac{1}{12}[c(\{1,2,4\}) - c(\{1,2\})] + \frac{1}{12}[c(\{1,3,4\}) - c(\{1,3\})] \\ & + \frac{1}{12}[c(\{2,3,4\}) - c(\{2,3\})] + \frac{1}{4}[c(N) - c(\{1,2,3\})]\end{aligned}$$

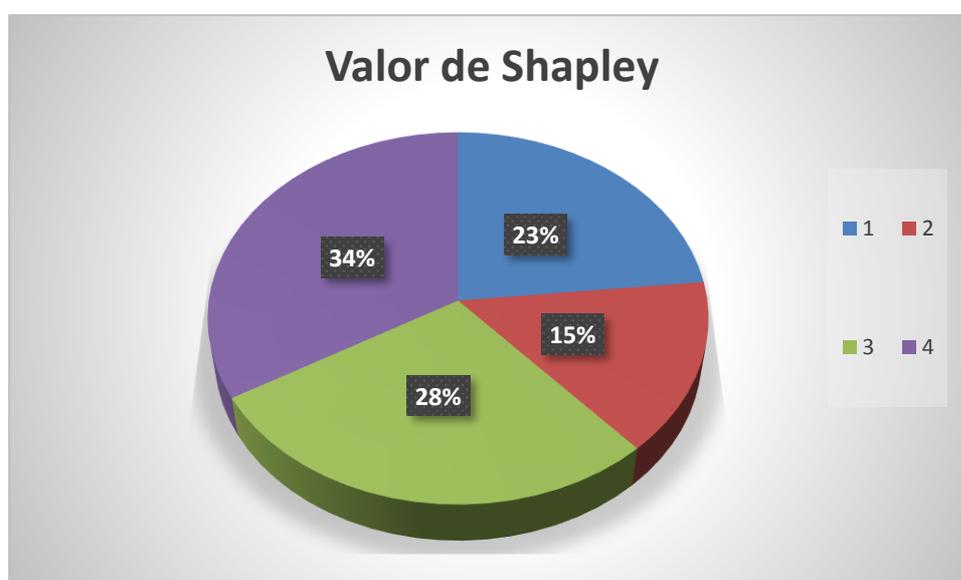
En la Tabla 5.24 se muestran los valores de pago asociados a los jugadores individuados en el juego.

Tabla 5.24. Valor de Shapley

| Valor de Shapley | Porcentaje correspondiente (%) | M€ |
|------------------|--------------------------------|-------|
| 1 | 23,38 | 4,07 |
| 2 | 14,99 | 2,61 |
| 3 | 28,23 | 4,915 |
| 4 | 33,40 | 5,815 |
| Total (M€) | | 17,41 |

La Figura 5.12 muestra el reparto de coste entre los jugadores, en el que se evidencia una asignación mayoritaria a los usos agrícolas correspondientes al Jugador 4, municipio de Coría del Río, esto se debe generalmente a que utiliza todas las infraestructuras excepto el embalse de Huesna.

Figura 5.12. Valor de Shapley, asignación de costes



6. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha abordado un problema de la asignación costes de los servicios del agua según criterios de eficiencia, racionalidad y equidad. Nuestra idea ha sido profundizar en los posibles procedimientos que definen la asignación de costes de los servicios entre los agentes del agua en función de su responsabilidad en el uso de las infraestructuras mediante la aplicación de la teoría de juegos cooperativos (TJC) a un sistema hídrico complejo.

El caso de estudio relativo a la asignación de costes de las infraestructuras existentes en el Guadalquivir a su paso por la provincia de Sevilla muestra una situación caracterizada por la existencia de un considerable caudal de agua, y evidencia una gran homogeneidad en el uso de los servicios por parte de los jugadores del sistema. Los usos agrarios la zona nordeste de representan las demandas que más responsabilidad tienen en el uso de las infraestructuras, por efecto de los mayores volúmenes consumidos.

La creación de un modelo de formación de coaliciones que muestra de manera razonable que el hecho de la coalición es rentable para los jugadores.

El juego de coste implantado está caracterizado por una estructura de costes subaditiva y presenta una solución cooperativa muy eficiente.

7.Referencias

[1] de la Orden Gómez, J.A. (2006). El análisis económico en la Directiva Marco del Agua: Incidencias e implicaciones para España, Instituto Geológico y Minero de España.

[2] Morgenster, O. y von Neumann, J (1944). *Theory of games and economic behaviour*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.

[3] Driessen, T.S.H. (1988). *Cooperative Games, Solutions and Applications*. Kluwer Academic Publishers.

[4] Owen, G. (1995). *Game Theory*. Academic Press.

[5] Bilbao, J. M. (2000) *Cooperative Games on Combinatorial Structures. Theory and Decision Library 26*, Springer-Verlag.

[6] González-Díaz, J., García-Jurado, I., Fiestras-Janeiro, M.G. (2010). *An Introductory Course on Mathematical Game Theory. Graduate Studies in Mathematics 115*, American Mathematical Society.

[7] Pérez, J. , Jimeno, J.L. , Cerdá, E. (2004): *Teoría de juegos*. Ediciones Pearson.

[8] CEDEX (2011). *Guía técnica para la caracterización de medidas*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.

[9] Deidda, D. (2009): *Metodología para la asignación de los costes de los servicios del agua basada en la teoría de juegos cooperativos: aplicación a la cuenca del río Turia (Tesis Doctoral)*. Universidad Politécnica de Valencia.

[10] Zucca, R. (2010): A cooperative game theory approach for cost allocation in complex water resource systems. Università degli Studi di Cagliari.

Referencias electrónicas:

<http://www.mapama.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/marco-del-agua/default.aspx>

<http://www.chguadalquivir.es>

<http://www.ecured.cu>

<https://www.wikanda.es>

<http://www.embalses.net/cuenca-4-guadalquivir.html>

<https://www.wikipedia.es>

<http://elcorreoweb.es>

<http://www.juntadeandalucia.es>

<http://sig.mapama.es/snczi/visor.html?herramienta=EstadisticasPresas>

<http://www.asajasevilla.es>