



Título del Trabajo Fin de Máster:

Herramientas y modelos para el análisis de la aplicación de instrumentos económicos en la gestión de sistemas de recursos hídricos. Caso de estudio del sistema del río Júcar.

Intensificación:

RECURSOS HÍDRICOS

Autor:

LÓPEZ NICOLÁS, ANTONIO FRANCISCO

Director/es:

DR. PULIDO VELÁZQUEZ MANUEL

Fecha: JULIO, 2014

Título del Trabajo Fin de Máster:

Herramientas y modelos para el análisis de la aplicación de instrumentos económicos en la gestión de sistemas de recursos hídricos. Caso de estudio del sistema del río Júcar

Autor: **LÓPEZ NICOLÁS, ANTONIO FRANCISCO**

Tipo	A <input type="checkbox"/> B <input checked="" type="checkbox"/>	Lugar de Realización	VALENCIA
Director	MANUEL PULIDO VELÁZQUEZ	Fecha de Lectura	JULIO, 2014
Codirector1			
Codirector2			
Tutor			

Resumen:

Resumen:

Los modelos hidroeconómicos pueden ayudar en la gestión de los sistemas de recursos hídricos bajo la óptica de la eficiencia económica. Estos modelos analizan simultáneamente hidrología, economía e ingeniería a escala de cuenca. Por otra parte, la Comisión Europea a través del BLUEPRINT (EC, 2012) se fija como objetivo el disponer de una cantidad de agua suficiente, de buena calidad, para las necesidades humanas y el medio ambiente. Para alcanzar este objetivo propone, entre otros aspectos, el empleo de instrumentos económicos para alcanzar una eficiencia en el uso agua.

En este trabajo se han desarrollado dos herramientas genéricas, SIMGAMS y OPTIGAMS, que permiten diseñar y simular el efecto de políticas de precios y de mercados del agua. Ambas herramientas se han desarrollado bajo el enfoque de modelos hidroeconómicos. La herramienta SIMGAMS permite desarrollar modelos de simulación que gestionan los recursos según prioridades, reglas de operación y diversos objetivos (como caudales ecológicos). La herramienta OPTIGAMS permite desarrollar modelos de optimización que gestionan los recursos hídricos con criterios económicos. Ambas herramientas permiten obtener tanto resultados de gestión (volúmenes, suministros, etc), como resultados económicos (costes de escasez y valor marginal del agua).

El enfoque seguido para calcular políticas de precios del agua, se basa en el volumen embalsado en los embalses del sistema. Para ello se emplea el valor marginal del agua, concretamente el concepto de Coste Marginal de Oportunidad del Recurso (CMOR), que es el beneficio para el sistema de disponer de una unidad adicional de agua en un punto y en un tiempo determinado. En este trabajo se han simulado mercados del agua ideales, que se corresponden con la optimización económica.

El caso de estudio es el sistema de explotación del río Júcar, los resultados muestran el efecto positivo de aplicar instrumentos económicos en la gestión de sistemas de recursos hídricos.

Resum:

Els models hidro-econòmics poden ajudar en la gestió dels sistemes de recursos hídrics baix l'òptica de l'eficiència econòmica. Aquests models analitzen simultàniament la hidrologia,

L'economia i l'enginyeria a escala de conca. Per altra banda, la Comissió Europea a través del BLUEPRINT (EC, 2012) es fixa com a objectiu disposar d'una quantitat d'aigua suficient, de bona qualitat, per a les necessitats humanes i el medi ambient. Per aconseguir aquest objectiu proposa, entre altres aspectes, l'utilització d'instruments econòmics per aconseguir una eficiència en l'ús de l'aigua.

En aquest treball s'han desenvolupat dues ferramentes genèriques, SIMGAMS i OPTIGAMS, que permeten dissenyar i simular l'efecte de polítiques de preus i de mercats de l'aigua. Ambdues ferramentes s'han desenvolupat baix l'enfocament de models hiro-econòmics. La ferramenta SIMGAMS permet desenvolupar models de simulació que gestionen els recursos segons prioritats, regles d'operació i diversos objectius (com cabals ecològics). La ferramenta OPTIGAMS permet desenvolupar models d'optimització que gestionen els recursos hídrics amb criteris econòmics. Ambdues ferramentes permeten obtenir tant resultats de gestió (volums, subministraments, etc.), com resultats econòmics (cost d'escassetat i valor marginal de l'aigua).

L'enfocament seguit per calcular polítiques de preus de l'aigua, es basa en el volum embassat als embassaments del sistema. Per a això, s'utilitza el valor marginal de l'aigua, concretament el concepte de Cost Marginal d'Oportunitat del Recurs (CMOR), que és el benefici per al sistema de disposar d'una unitat addicional d'aigua en un punt i en un temps determinat. En aquest treball s'han simulat mercats de l'aigua ideals, que es corresponen amb l'optimització econòmica.

El cas d'estudi és el sistema d'explotació del riu Xúquer, els resultats mostren l'efecte positiu d'aplicar instruments econòmics en la gestió de sistemes de recursos hídrics.

Abstract:

Hydro-economic models can help in managing water resources systems within an economic approach. As these models simultaneously analyse engineering, hydrology and economic aspects of water resources systems. The Blueprint to safeguard Europe's Water Resources (European Commission, 2012) focuses on securing the availability of good-quality water for human and environmental requirements. In order to achieve this main goal, different issues are proposed such as Economic Instruments to achieve Water Efficiency.

In this research project, two new generic tools have been developed, SIMGAMS and OPTIGAMS (within hydro-economic modelling approach), to design and simulate the effect of water pricing policies and ideal water markets.

SIMGAMS allocates water resources according to priorities, operating rules and different targets (as environmental flows), within a simulation approach. OPTIGAMS allocates water resources with economic criteria, within an optimization approach. The main outputs of SIMGAMS and OPTIGAMS are water management (as volumes, deliveries, etc.) and economic results (water scarcity costs and marginal value of water).

In this research Project, a scarcity-based (depending on water storage) water pricing policies methodology has been presented. The Marginal Resource Opportunity Cost (MCOR) at a specific location and time, is calculated as the systemwide benefit of having available one additional unit of resource at that location and time. I have simulated the effect of ideal water markets on water resources management.



The case study is the Jucar river basin. The results show the potential of economic instruments in order to deal with water management of water resources systems.

Palabras clave:

**SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS, MODELOS HIDRO-ECONÓMICOS,
INSTRUMENTOS ECONÓMICOS Y SISTEMA JÚCAR**

ÍNDICE

FIGURAS	7
TABLAS	11
Agradecimientos.....	13
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	15
1.1 Contexto y motivación.....	15
1.2 Objetivos del estudio.....	17
1.3 Estructura del documento	18
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	21
2.1 Sistemas de ayuda a la decisión	21
2.2 Modelos hidroeconómicos	23
2.2.1 Aplicación de la economía a la gestión de recursos hídricos	23
2.2.2 Definición modelos hidroeconómicos	24
2.2.3 Diseño modelos hidroeconómicos.....	25
2.3 Estimación funciones económicas de demandas	28
2.3.1 Curvas de demanda para uso urbano	28
2.3.2 Curvas de demanda para uso agrícola	30
2.4 Instrumentos económicos	33
2.4.1 Políticas de Precios del agua	34
2.4.2 Mercados del agua.....	35
CAPÍTULO 3. SISTEMA DE EXPLOTACIÓN DEL RÍO JÚCAR	39
3.1 Descripción General de la cuenca	39
3.1.1 Características físicas de la cuenca.	39
3.1.2 Masas de Agua	43
3.1.3 Caracterización de los usos del agua.....	46
3.1.4 Inventario de Recursos Hídricos	49

3.1.5 Zonas sensibles	52
3.2 Problemas ETI	53
3.3 El marco Plan Hidrológico de cuenca y el sistema Júcar.....	57
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍAS Y HERRAMIENTAS AUXILIARES.....	59
4.1 Herramientas que permiten diseñar y simular el efecto de Instrumentos económicos en la gestión de sistemas de recursos hídricos	59
4.2 Diseño y simulación de instrumentos económicos	61
4.2.1 Coste marginal de oportunidad del recurso.....	61
4.2.2 Diseño de políticas de precios a partir del CMOR.....	62
4.2.3 Mercados del agua.....	64
4.3 Herramientas auxiliares	64
4.3.1 Programa GAMS	64
4.3.2 Programa HYDROPLATFORM	66
4.3.3 SAD AQUATOOL.....	69
CAPÍTULO 5. HERRAMIENTAS SIMGAMS Y OPTIGAMS	71
5.1 Configuración general del SAD.....	71
5.2 Herramienta SIMGAMS.	74
5.2.1 Caracterización de los elementos de un sistema de recursos hídricos	74
5.2.2 Formulación hidrológica del SAD	77
5.2.3 Función objetivo	79
5.2.4 Reglas de gestión y prioridades	83
5.2.5 Módulo de economía del agua	83
5.3 Herramienta OPTIGAMS.	86
CAPÍTULO 6. CASO DE ESTUDIO. SISTEMA DE EXPLOTACIÓN DEL RÍO JÚCAR	89

6.1 Caracterización sistema Júcar	89
6.1.1 Esquema conceptual.....	89
6.1.2 Demandas y usos del sistema	93
6.1.3 Infraestructuras	95
6.2 Funciones económicas de demanda sistema Júcar	97
6.2.1 Curvas de demanda uso urbano	97
6.2.2 Curvas de demanda uso agrícola	97
6.3 Resultados Sistema Júcar con SIMGAMS.....	103
6.3.1 Resultados de gestión.....	103
6.3.2 Resultados económicos	108
6.3.3 Políticas de Precios.....	111
6.3.4 Aplicación de políticas de precios al sistema Júcar.....	117
6.4 Resultados Sistema Júcar con OPTIGAMS.....	119
6.4.1 Resultados de gestión.....	120
6.4.2 Resultados económicos. Mercados del agua.....	123
6.5 Comparativa de resultados de instrumentos económicos.....	126
CAPÍTULO 7. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES	131
7.1 Herramientas SIMGAMS y OPTIGAMS.....	131
7.2 Instrumentos económicos	132
7.3 Conclusiones de la aplicación al sistema Júcar	133
7.4 Limitaciones y Líneas futuras	134
Referencias	137
ANEXO I. ESQUEMA SISTEMA DE EXPLOTACIÓN RÍO JÚCAR.....	145
ANEXO II. PROGRAMA HYDROPLATFORM.....	147
Creación de una red dentro de un proyecto.....	151
Definición tipología de objetos	152
Definición tipología de links	157

Generación de una red	158
Exportación de datos	161
Interpretación de los ficheros de datos generados por el exportador a GAMS	162
ANEXO III. VALIDACIÓN DE SIMGAMS VS SIMGES.....	165
ANEXO IV. RESULTADOS DE GESTIÓN CON OPTIGAMS	171

FIGURAS

Figura 1. Objetivos BLUEPRINT (Fuente: Arqued, V. 2013).....	17
Figura 2. Demarcación Hidrográfica del Júcar (Fuente: CHJ, 2013).....	40
Figura 3. Mapa de precipitación media anual en la DHJ (CHJ, 2013).....	42
Figura 4. Mapa de temperaturas medias anuales en DHJ (CHJ, 2013).....	42
Figura 5. Índice de aridez en Demarcación Hidrográfica de Júcar (CHJ, 2013).....	43
Figura 6. Masas de Agua Superficiales Sistema Júcar; (elaboración propia con bases de datos OPH-CHJ).	45
Figura 7. Aguas subterráneas DHJ (Fuente: CHJ, 2012).....	45
Figura 8. Usos del agua Sistema Explotación Júcar (Fuente: elaboración propia a partir de datos de CHJ, 2009)	46
Figura 9. Superficie de regadío de DHJ (Fuente: elaboración propia con datos CHJ, 2009)	48
Figura 10. Distribución de cultivos leñosos y herbáceos (Fuente: CHJ, 2009)	49
Figura 11. Aportaciones acumuladas en la red fluvial para series corta y larga (CHJ, 2013).....	49
Figura 12. Precipitación anual. Sistema Júcar (CHJ, 2013).....	50
Figura 13. Aportación anual. Sistema Júcar (CHJ, 2013)	50
Figura 14. Identificación zonas sensibles (elaboración propia con bases de datos OPH-CHJ)	52
Figura 15. Riegos tradicionales sistema Júcar (CHJ, 2010).....	55
Figura 16. Situación de la masa de agua subterránea 080.129 Mancha Oriental (CHJ, 2010).....	56
Figura 17. Herramientas SIMGAMS y OPTIGAMS	60
Figura 18. Simulación carga extra para cálculo CMOR.....	61
Figura 19. CMOR en función del volumen embalsado (fuente: Álvarez-Mendiola, 2010).....	63
Figura 20. Variación de la demanda con el precio	63
Figura 21. HYDROPLATFORM-GAMS	67
Figura 22. Interfaz de HYDROPLATFORM.....	67
Figura 23. Sistema Adra simplificado con HYDROPLATFORM.....	68
Figura 24. Sistema Adra con SIMGES	70
Figura 25. Esquema modelo de simulación SIMGAMS.....	73
Figura 26. Gestión de embalses (Fuente: Andreu et al., 2007).....	75
Figura 27. Modelo Unicelular acuíferos (Fuente: Pulido-Velázquez, 2003).....	76
Figura 28. Modelo Pluricelular acuíferos (Fuente: Pulido-Velázquez, 2003)....	76
Figura 29. Zonificación de los embalses para la gestión.....	80
Figura 30. Cálculo del coste de escasez.....	84
Figura 31. Esquema cálculo de CMOR en SIMGAMS	85
Figura 32. Esquema Herramienta OPTIGAMS.....	87
Figura 33. Esquema Sistema Júcar aguas arriba de Tous.....	90
Figura 34. Acuífero Mancha Oriental.....	90

Figura 35. Esquema Sistema Júcar aguas arriba de Tous.....	91
Figura 36. Bombeos acuífero Plana Sur para cultivos Acequia Real del Júcar	92
Figura 37. Acuífero Plana Sur para bombeo Acequia Real Júcar / Albufera ...	92
Figura 38. Demandas urbanas sistema Júcar (Fuente: GIRH-IIAMA, 2006)....	93
Figura 39. Demandas agrarias sistema Júcar aguas arriba Tous (Fuente: GIRH-IIAMA, 2006)	93
Figura 40. Demandas industriales sistema Júcar (Fuente: GIRH-IIAMA, 2006)	94
Figura 41. Demandas agrarias arroz sistema Júcar aguas abajo Tous (Fuente: GIRH-IIAMA, 2006)	94
Figura 42. Demandas agrarias cítricos sistema Júcar aguas abajo Tous (Fuente: GIRH-IIAMA, 2006).....	95
Figura 43. Embalse de Alarcón (Fuente: http://www.pueblos-espana.org)	95
Figura 44. Embalse de Tous (Fuente: http://servicios2.marm.es/sia).....	96
Figura 45. Curvas de demanda uso urbano	97
Figura 46. Niveles de tarifas adoptados para las curvas de demanda (Fuente: Deidda, 2004).....	98
Figura 47. Curvas demanda cítricos-huerta	98
Figura 48. Curvas demanda arroz.....	99
Figura 49. Curvas de demanda de los regadíos de La Mancha Oriental	100
Figura 50. Sistema Explotación Júcar aguas arriba de Tous	101
Figura 51. Comparativa volúmenes SIMGAMS vs SIMGES	104
Figura 52. Comparativa suministros SIMGAMS vs SIMGES.....	105
Figura 53. Serie de aportaciones de Alarcón y Contreras.....	106
Figura 54. Déficits Sistema Júcar.....	106
Figura 55. Caudales turbinados por centrales hidroeléctricas.....	107
Figura 56. Costes de escasez vs déficits Acequia Real arroz.....	108
Figura 57. Costes de escasez vs déficits Acequia Real cítricos.....	109
Figura 58. Costes de escasez vs déficits Cullera cítricos.....	109
Figura 59. Costes de escasez vs déficits Cullera arroz.....	109
Figura 60. Beneficios Centrales Hidroeléctricas.....	110
Figura 61. CMOR en embalse de Alarcón.....	110
Figura 62. CMOR en embalse de Contreras	110
Figura 63. Volumen de Alarcón vs CMOR	111
Figura 64. CMOR vs Volumen de Alarcón	112
Figura 65. Función de precios escalonada en Alarcón.....	112
Figura 66. Frecuencia de aplicación política de precios sistema Júcar.....	113
Figura 67. Volumen de Contreras vs CMOR.....	113
Figura 68. CMOR vs Volumen de Contreras	114
Figura 69. Función de precios escalonada en Contreras	114
Figura 70. Frecuencia de aplicación política de precios sistema Júcar.....	115
Figura 71. CMOR vs Volumen Alarcón+Contreras.....	115
Figura 72. Función de precios escalonada con Alarcón y Contreras	116

Figura 73. Costes de escasez Sistema Júcar con políticas de precios	117
Figura 74. Simulación política de precios sólo cultivos tipo cítricos	118
Figura 75. Volúmenes embalses OPTIGAMS	120
Figura 76. Relación río-acuífero con OPTIGAMS	121
Figura 77. Déficits Sistema Júcar	122
Figura 78. Caudales turbinados Centrales Hidroeléctricas	122
Figura 79. Costes de escasez vs déficits en mercados del agua Cullera.....	124
Figura 80. Costes de escasez vs déficits en mercados del agua Sueca.....	124
Figura 81. Costes de escasez vs déficits en mercados del agua Cuatro Pueblos	124
Figura 82. Beneficios Centrales Hidroeléctricas.....	125
Figura 83. CMOR embalse de Alarcón.....	125
Figura 84. CMOR embalse de Contreras	125
Figura 85. Sistema Júcar con HYDROPLATFORM	146
Figura 86. Interfaz HYDROPLATFORM.....	148
Figura 87. Pantalla Principal de HYDROPLATFORM	149
Figura 88. Conectar a la base de datos	149
Figura 89. Ubicación de la base de datos	150
Figura 90. Definición de un nuevo proyecto 1/2	150
Figura 91. Definición de un nuevo proyecto 2/2	150
Figura 92. Características del proyecto 1/2	151
Figura 93. Características del proyecto 2/2.....	151
Figura 94. Generación de una red.....	151
Figura 95. Red generada	152
Figura 96. Definición de los tipos de objeto.....	152
Figura 97. Cuadro de opciones para creación de objetos	153
Figura 98. Generación de objetos. Características generales.....	153
Figura 99. Editor de Símbolos	154
Figura 100. Generación de objetos. Caracterización de datos.....	154
Figura 101. Generación de objetos. Tipología de datos.....	155
Figura 102. Generación de objetos. Unidades de los datos	155
Figura 103. Generación de objetos	156
Figura 104. Generación de objetos. Botones para introducir los objetos en la red	156
Figura 105. Definición de los tipos de links	157
Figura 106. Botones para introducir los links en la red.....	157
Figura 107. Esquema Red de Flujo HYDROPLATFORM	158
Figura 108. Editar los datos de un nudo.....	158
Figura 109. Introducción de datos en los nudos 1/3	159
Figura 110. Introducción de datos en los nudos 2/3.....	159
Figura 111. Introducción de datos en los nudos 3/3.....	160
Figura 112. Modificación de la red	160
Figura 113. Exportación de datos.....	161

Figura 114. Función exportadora de HYDROPLATFORM	161
Figura 115. Ejemplo HYDROPLATFORM explicación de las matrices	162
Figura 116. Tipos de datos del nudo tipo Reservoir	162
Figura 117. Tipos de datos del nudo tipo Dem.....	163
Figura 118. Gráficas de Validación SIMGAMS vs SIMGES	166
Figura 119. Gráficas de Validación SIMGAMS vs SIMGES	167
Figura 120. Gráficas de Validación SIMGAMS vs SIMGES	168
Figura 121. Gráficas de Validación SIMGAMS vs SIMGES	169
Figura 122. Gráficas de Validación SIMGAMS vs SIMGES	170
Figura 123. Suministros demandas con OPTIGAMS	172
Figura 124. Suministros demandas con OPTIGAMS	173
Figura 125. Suministros demandas con OPTIGAMS	174

TABLAS

Tabla 1. Aplicaciones de modelos hidroeconómicos (Fuente: adaptada de Harou et al., 2009).....	27
Tabla 2. Análisis para el estudio de curvas de demanda agraria (Fuente: Deidda, 2004).....	31
Tabla 3. Tipos de instrumentos económicos (Adaptado de EPI Water report, 2013)	33
Tabla 4. Diferentes EPIs en EU (Fuente: Adaptado de EPI Water, 2013).....	37
Tabla 5. Series de aportaciones Sistema Júcar (CHJ, 2013).....	50
Tabla 6. Depuradoras por sistema de explotación (hm ³ /año),(CHJ, 2013).....	51
Tabla 7. Asignación Plan Hidrológico Júcar (CHJ, 2013).....	58
Tabla 8. Caudales ecológicos	93
Tabla 9. Caudales objetivo centrales hidroeléctricas (Fuente: GIRH-IIAMA, 2006)	94
Tabla 10. Cultivos de la Mancha Oriental (Fuente: Deidda, 2004)	99
Tabla 11. Caudal Objetivo Centrales Hidroeléctricas	101
Tabla 12. Cumplimiento caudales ecológicos	107
Tabla 13. Costes de escasez sistema Júcar por usuarios	108
Tabla 14. Valor promedio CMOR vs rango volúmenes en Alarcón	112
Tabla 15. Valor promedio CMOR vs rango volúmenes en Contreras.....	114
Tabla 16. Valor promedio CMOR (€/m ³) vs rango volúmenes de Alarcón + Contreras (Hm ³)	116
Tabla 17. Costes de escasez Sistema Júcar con mercados del agua	123
Tabla 18. Comparativa entre simulación y políticas precios.....	126
Tabla 19. Reducción coste de escasez con aplicación de Políticas de Precios	127
Tabla 20. Políticas de precios vs Mercados del agua	128
Tabla 21. Matriz de Conectividad	163

Agradecimientos

Quiero agradecer especialmente a mi director, el profesor Manuel Pulido, por todas sus enseñanzas en el campo de la Economía de Sistemas de Recursos Hídricos, por todo su apoyo, ánimos y buenos consejos durante el desarrollo de este trabajo, y por su gran calidad humana.

A todos los compañeros de despacho: AnaFé, Andrea, Corentin, David, Edgar, Héctor, Mario, María, y Néstor, por su compañerismo y por los buenos momentos compartidos.

A todos los compañeros del Máster de la Intensificación de Análisis de Sistemas de Recursos Hídricos, con quienes compartí largas jornadas de trabajo y de estudio, por su compañerismo y amistad.

Al ingeniero y amigo Gabriel Lozano, con quien compartí mis inicios en la programación con GAMS.

A mis padres, hermano, cuñada y sobrinos por todo su apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

Muchas Gracias

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe el contexto en el que se ha desarrollado este trabajo final de máster, los objetivos y la estructura del documento.

1.1 Contexto y motivación

Actualmente se está produciendo un incremento de la demanda de agua debido al rápido crecimiento de las poblaciones. Por otra parte, se tiene una alta incertidumbre en la disponibilidad futura de los recursos hídricos debido, entre otros factores, al efecto del cambio climático. Por ello, se prevé que se producirán conflictos en la gestión de los recursos hídricos en el futuro.

Por otra parte, como consecuencia de la escasez del recurso hídrico se pueden producir pérdidas económicas de gran magnitud (coste de escasez del recurso). La agricultura suele ser uno de los sectores inicialmente más afectados, con notables reducciones de cosechas tanto en la agricultura de secano, como en la de regadío, cuando la sequía meteorológica se transforma en agrícola / hidrológica.

Por ello, es necesario introducir criterios económicos en la gestión de los recursos hídricos. En condiciones de escasez de agua y recursos alternativos, y con creciente competencia entre usuarios, la eficiencia económica se convierte en un objetivo social básico, y los valores de eficiencia pueden tener

una contribución importante en la resolución de conflictos (Young, 2004; p. 25).

La Economía puede contribuir a la toma de decisiones en el ámbito de la gestión de los recursos hídricos en varios niveles: análisis de políticas del agua, gestión y asignación óptima del agua entre usos en competencia; y priorización y selección de proyectos e infraestructuras.

Los principales mecanismos de asignación del agua son: coste marginal, asignación pública y mercados del agua (Dinar et al. 1997).

Se van a describir una serie de criterios (Howe et al., 1986) para comparar la bondad de diferentes mecanismos de asignación de los recursos hídricos:

- *Flexibilidad* en la asignación del recurso, de forma que se pueda cambiar de uso o de lugar, a medida que las condiciones de oferta y demanda cambian, haciendo posible igualar valores marginales entre los usos al menor coste.
- *Seguridad de tenencia* para los usuarios actuales, de forma que puedan tomar las medidas oportunas para utilizar el recurso de manera eficiente.
- *Repercusión del coste de oportunidad real* a los usuarios, de forma que otras demandas o externalidades sean internalizadas.
- *Previsibilidad* de los resultados del proceso de asignación, de forma que la incertidumbre sea mínima.
- *Equidad* del proceso de asignación, que debe ser percibida por los usuarios potenciales.
- *Aceptabilidad* política y pública, de forma que la asignación responda a los objetivos de varios sectores de la sociedad.

Estos criterios responden al concepto de eficiencia económica, incorporando el de equidad o justicia. En toda región los criterios de asignación del agua dependen de una serie de objetivos y prioridades muy diversas. En cada caso, los criterios están influenciados por marco legal e institucional vigente, condicionantes sociales, políticos y económicos.

A continuación se recogen algunos documentos en los que se especifica la necesidad de incorporar criterios económicos en la gestión del agua.

La Directiva Marco del Agua 2000/60/CE (en adelante la DMA) recoge en su artículo 9º la necesidad de aplicar políticas de precios con un doble objetivo: como incentivo para propiciar un uso eficiente del agua (como instrumento económico) y como instrumento financiero para la recuperación de costes de los servicios del agua (tanto ambientales como del recurso).

En el Plan para salvaguardar los recursos hídricos de Europa (EC, 2012), denominado BLUEPRINT (véase figura 1), la Unión Europea recoge que para garantizar la disponibilidad de agua de buena calidad para un uso sostenible y equitativo del agua, una de las medidas a tomar sea el uso eficiente del agua. Para lograr este objetivo uno de los medios que se proponen es la aplicación de instrumentos económicos.

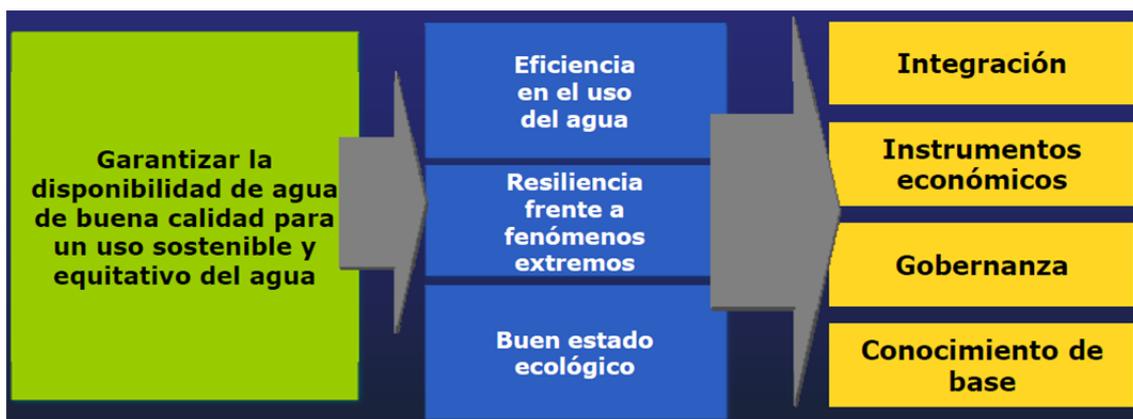


Figura 1. Objetivos BLUEPRINT (Fuente: Arqued, V. 2013)

1.2 Objetivos del estudio

El objetivo general que se pretenden alcanzar en el desarrollo de esta tesina es desarrollar nuevas herramientas y métodos, que permitan gestionar los sistemas de recursos hídricos bajo la óptica de la economía, con los enfoques tanto de simulación como de optimización. Con estas herramientas se podrán diseñar y simular el efecto de instrumentos económicos, políticas de precios y mercados del agua, en la gestión de sistemas de recursos hídricos.

Los objetivos específicos a alcanzar son:

- Implementación de una herramienta genérica (SIMGAMS) que permita desarrollar modelos hidroeconómicos de simulación basados en prioridades y reglas de operación a escala mensual. Se parte de una versión preliminar que se presentó en Lopez-Nicolas, (2012).
- Implementación de una herramienta genérica (OPTIGAMS) que permita desarrollar modelos hidroeconómicos de optimización basados en criterios económicos. Se parte de una versión preliminar que se presentó en Lopez-Nicolas (2012).
- Programación de dos módulos en la herramienta SIMGAMS, que permitan el diseño y la simulación de políticas de precios, basadas en el valor marginal del agua.
- Caracterización del caso de estudio, sistema de explotación del río Júcar, mediante la herramienta HYDROPLATFORM (Harou et al., 2010).
- Aplicación de una nueva metodología, presentada en Pulido-Velazquez et. al, 2013, que permite diseñar los precios del agua en función del volumen embalsado en los embalses.
- Diseño de mercados del agua ideales, mediante el empleo de la herramienta OPTIGAMS.
- Análisis de los resultados obtenidos con políticas de precios y mercados del agua.

1.3 Estructura del documento

El presente documento se ha estructurado de la siguiente manera:

- Introducción: en este capítulo se analizan el marco en el que se va a realizar este estudio, la motivación, los objetivos que se pretenden alcanzar con el desarrollo de esta tesina y la estructura del documento.
- Estado del arte: en este capítulo se realiza tanto una descripción teórica como de los principales casos de aplicación y desarrollo, de los Sistemas de Ayuda a la Decisión (SAD), modelos hidroeconómicos e instrumentos económicos.

- Descripción del Sistema de Explotación del Júcar: en este capítulo se describe el caso de estudio, concretamente los siguientes ítems:
 - Descripción general de la cuenca: características físicas de la cuenca, masas de agua, caracterización de los usos del agua, inventario de recursos hídricos e identificación de zonas sensibles.
 - Principales problemas del Esquema de Temas Importantes
- Metodologías y Herramientas desarrolladas en este trabajo de investigación: en este capítulo se presenta una descripción de los principales aspectos de las nuevas herramientas desarrolladas: SIMGAMS y OPTIGAMS.
- Aplicación de las herramientas y metodologías al sistema de explotación Júcar. Comparativa de resultados: en este capítulo se presentan los principales resultados obtenidos en el caso del estudio, con la aplicación de las nuevas metodologías y herramientas.
- Síntesis y Conclusiones: en este capítulo se realiza una síntesis de las principales conclusiones obtenidas con la realización del presente trabajo final de máster.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

Los sistemas de recursos hídricos son muy complejos: gran número de embalses, acuíferos, relación río-acuífero, múltiples demandas de uso consuntivo: urbano, agrícola e industrial, demandas de uso no consuntivo: centrales hidroeléctricas, elementos de retorno de aguas superficiales, etc. A la complejidad espacial de los sistemas de recursos hídricos se añade la necesidad de analizar escenarios futuros (variabilidad temporal), por ello se requiere de algoritmos complejos de optimización que sean capaces de resolverlos. En esta línea surge el concepto de SAD (Sistema de ayuda a la decisión): conjunto de herramientas para analizar sistemas consistentes en modelos de simulación y optimización de uso general. En los últimos 20 años se han desarrollado una gran variedad de SAD, pero que, en general, no suelen incluir información económica.

2.1 Sistemas de ayuda a la decisión

Se define formalmente el concepto de Sistema de Ayuda a la Decisión (SAD) como la integración de herramientas genéricas para analizar sistemas de recursos hídricos (tanto con enfoque de simulación como de optimización) con bases de datos, sistemas de información geográfica (SIG) y post-procesadores desarrollados en un entorno amigable. (Loucks y DaCosta, 1991; Reitsma et al., 1996; Simonovic, 1996; Andreu et al., 2001)

A lo largo de la historia de han desarrollado multitud de soportes de ayuda a la decisión, pero que, en general, no incluyen la economía como criterio de gestión. A continuación se citan algunos de estos trabajos:

- El modelo MODSIM (Labadie, 1988; Fredericks et al., 1998) permite introducir los datos espaciales mediante un SIG, empleándose éstos para una versión modificada del modelo de diferencias finitas MODFLOW que genera las funciones de respuesta de la relación río-acuífero. Estas funciones se introducen en el modelo de simulación, que resuelve la red de flujo mediante un método iterativo de aproximaciones sucesivas. Este modelo no emplea parámetros económicos, sino penalizaciones a las desviaciones de suministros objetivo, caudales mínimos y producción energética.
- El modelo IRAS, Interactive River-Aquifer Simulation (Loucks et al; 1995; Loucks, 2002) además de simular el flujo permite obtener parámetros de calidad de aguas y de producción hidroeléctrica, usando indicadores económicos, ambientales y ecológicos que definirá el usuario.
- El modelo HEC-Res Sim (US Army Corps of Engineer,2007) es un modelo único entre los que simulan embalses porque pretende reproducir el proceso de toma de decisiones que los operadores de embalses deben usar para realizar las sueltas de éstos. Admite la consideración de objetivos múltiples como suministro de agua, generación de energía hidroeléctrica, calidad de agua e impacto económico de los daños por avenidas.
- El modelo SIMGES del SAD AQUATOOL (Andreu et al. 1992 y 1996) ha sido desarrollado en el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia, permite gestionar los recursos disponibles de acuerdo con una serie de prioridades y/o reglas de gestión. Es un modelo que se basa en un proceso de optimización pura (redes conservativas) basado en el algoritmo Out-Of-Kilter (Bazaraa et al., 1990). La función objetivo se basa en minimizar la suma ponderada de los déficits de las demandas y caudales mínimos, desviaciones en objetivos de volumen embalsado y producción hidroeléctrica.

2.2 Modelos hidroeconómicos

La ingeniería y la economía han compartido a lo largo de la historia ideas fundamentales (Lund et al., 2006). Por ejemplo, los ingenieros hidráulicos han incorporado principios de economía (en el marco del análisis de sistemas) a lo largo de los siglos XIX y XX, concretamente economía e ingeniería mantienen ancestros comunes con la escuela francesa de ingeniería del siglo XIX (entre otros Dupuit). En el campo de la ingeniería hidrológica los principios económicos pueden contribuir a la toma de decisiones en la gestión de un sistema de recursos hídricos (gestión flexible e integrada), evaluación de alternativas, finanzas y diseño institucional (Griffin, 1998; Braden, 2000; Lund et al., 2006). De estas relaciones de colaboración surgieron los modelos hidroeconómicos. Los primeros en emplear las curvas económicas de demanda (son aquellas curvas que relacionan el suministro del agua con el valor económico de ésta) para la gestión de los recursos disponibles de un sistema fueron, entre otros, Jacob Bear, Oded Levin y otros (1964, 1966, 1967 y 1970).

Bear y su equipo, crearon unos modelos que realizaban un análisis integrado a escala regional de los recursos disponibles con el criterio económico de maximizar el beneficio neto, a partir de las curvas de demanda. Desde entonces, los investigadores han usado diferentes terminologías para referirse a la combinación de la hidrología y de la economía, entre otros: hidrológico-económico (Gisser y Mercado, 1972), hidroeconómico (Noel y Howitt, 1982), económico-hidrológico-agronómico (Lefkoff and Gorelick, 1990b). En este trabajo de investigación se va a emplear la terminología modelos hidroeconómicos.

2.2.1 Aplicación de la economía a la gestión de recursos hídricos

La Economía puede contribuir a la toma de decisiones en el ámbito de la gestión de los recursos hídricos en varios niveles. Tres grandes aplicaciones son: análisis de políticas del agua, gestión y asignación óptima del agua entre usos en competencia; y priorización y selección de proyectos e infraestructuras.

En referencia al análisis de políticas de aguas puede contribuir a resolver una variedad de problemas como por ejemplo, si es preferible aumentar la

oferta o seguir estrategias de gestión de la demanda. El aumento de la oferta implica nuevas fuentes de recurso (estrategia dominante en la era moderna), mientras que la gestión de la demanda implica operar dentro de unos límites de los recursos disponibles (en este caso es fundamental la economía).

En cuanto a la gestión y asignación óptima del agua entre usos en competencia la economía nos da a conocer el valor del agua en los distintos usos alternativos. Por ejemplo gestionar un embalse con dos usos en conflicto: riego y uso recreativo.

Finalmente, en la priorización y selección de proyectos de infraestructura la economía es fundamental cuando se tiene un presupuesto limitado y hay que priorizar las inversiones.

2.2.2 Definición modelos hidroeconómicos

Estos modelos incorporan de manera explícita la economía, la ingeniería y la hidrología, realizando un análisis integrado a escala de cuenca de masas de agua (superficiales y subterráneas), demandas o usuarios del agua e infraestructura disponible para los suministros del agua (Pulido-Velazquez et al. 2008, Harou et al., 2009). Los resultados obtenidos con estos modelos son más relevantes para la toma de decisiones porque:

- Traducen los impactos de la gestión del agua en términos económicos. El fenómeno de la escasez del agua que se pone de manifiesto por una disminución de los beneficios económicos e intensificado por el aumento de las demandas (mayor requerimiento hídrico), requiere de un marco de análisis robusto que tenga en cuenta los factores económicos adecuados, que permitan justificar las decisiones de gestión recogidas en los planes de cuenca.
- Permiten capturar las relaciones de interacción entre los subsistemas natural, económico y el marco legal/institucional. Estos subsistemas son sobre los que hay que influir para poder gestionar los recursos de un sistema.

Para poder caracterizar económicamente los sistemas de recursos hídricos pueden emplearse las curvas de demanda o funciones de beneficio y los costes de operación variables. Hay que tener en cuenta que el agua tiene un valor económico para distintos usos, tanto usos en el mismo cauce como usos fuera del cauce, por ejemplo uso doméstico, agricultura, industria, uso recreativo, asimilación de contaminantes y mantenimiento de hábitats.

2.2.3 Diseño modelos hidroeconómicos

Los modelos hidroeconómicos de sistemas de recursos hídricos pueden programarse ad-hoc para un sistema, o bien utilizar herramientas genéricas que faciliten el desarrollo de estos modelos para cualquier sistema.

El investigador tiene muchas opciones para diseñar la formulación matemática y escoger el algoritmo de cálculo. Dos criterios básicos a tener en cuenta son:

- El modelo sea capaz de responder a las preguntas que tratamos de responder.
- El modelo ofrezca resultados que ayuden a comprender mejor el problema de análisis y que por lo tanto faciliten la tarea de gestión a los agentes implicados.

Para diseñar los modelos hidroeconómicos se han de considerar los siguientes ítems:

- Enfoque de simulación o de optimización
- Representación variación temporal
- Integración de submodelos

Enfoque de simulación o de optimización

Los modelos de simulación modelizan la respuesta del sistema bajo distintos supuestos o alternativas. Se trata de una técnica descriptiva sin encontrar la solución óptima, pero permiten escoger la mejor alternativa de entre varias. En general suelen incluir un algoritmo interno de optimización para asignar los recursos disponibles mes a mes (o en la escala temporal en que se trabaje) de acuerdo con las prioridades y/o reglas de gestión establecidas. Por el contrario,

los modelos de optimización si que pueden buscar la solución factible óptima para el período de estudio escogido, de acuerdo con un objetivo o varios objetivos simultáneos. En general, la optimización está más limitada que la simulación para representar la complejidad de sistemas reales complejos.

En definitiva, el modelo de simulación responde a la pregunta “¿Qué pasa si?” y el de optimización a la pregunta ¿qué es lo mejor?

Representación variación temporal

Para la representación temporal se puede optar por un modelo determinístico o por un modelo estocástico. En el modelo determinista los datos de entrada y las variables de decisión son series temporales históricas o generadas sintéticamente. Su mayor ventaja es la facilidad de implementación, pero tienen algunas limitaciones como los datos de entrada podrían no reflejar las condiciones futuras y constituyen una representación muy limitada de la incertidumbre hidrológica.

El enfoque del modelo estocástico se fundamenta en el empleo de las distribuciones de probabilidad de los parámetros o datos de entrada y en el uso de múltiples secuencias de entrada (por ejemplo mediante el empleo de técnicas Monte Carlo). La principal ventaja es que se tiene en cuenta la estocacidad inherente en los sistemas reales.

Integración submodelos

Se tienen dos enfoques el modular y el holístico. Con el enfoque modular el problema original se subdivide en módulos que se resuelven independientemente. Mientras que con el enfoque holístico todos los componentes del sistema se analizan en un único modelo.

Aplicaciones de modelos hidroeconómicos

Los modelos hidroeconómicos se han aplicado para analizar el impacto económico y ambiental de distintas estrategias de gestión de los sistemas de recursos hídricos, evaluar el efecto tanto de planes de gestión de sequías y de inundaciones, para implementar políticas de gestión en los planes de cuenca y evaluar efectos de medidas de adaptación al cambio climático. (tabla 1)

Problema	Localización	Enfoque	Cita
Optimización económica de uso conjunto	San Joaquín River Valley, California. USA	Maximizar los beneficios netos por la producción agrícola, con programación dinámica estocástica	Burt (1964)
Infraestructuras para suministro de agua para riego	Proyecto Tista, Pakistán	Uso conjunto de agua superficial y subterránea para riego con criterios económicos	Rogers and Smith (1970)
Diseño de un sistema de redes para riego en un sistema de uso conjunto	Indus Basin, Pakistan	Simulación conjunta del efecto del reparto del agua y tasas por bombear agua de pozos, bajo criterios de eficiencia económica	O'mara and Duloy (1984)
Diseño de un plan de bombeos estable que sea económicamente óptimo	Madera County, California, USA	Aproximación de la cantidad óptima de bombeo en un sistema multi-acuífero bajo un enfoque estocástico	Provencher and Burt (1994)
Desarrollo de reglas de operación	Río Missouri y Río Columbia. USA	Optimización estocástica con criterios económicos	Lund y Ferreira (1996)
Gestionar los recursos disponibles a escala de cuenca	Colorado	Optimización no lineal, analizando la viabilidad o no de redistribuir el agua entre usos alternativos	Diaz et al. (2000)
Evaluar políticas de agua, planificación, impacto de cambio climático y social	California	Modelo de optimización que integra tanto economía como ingeniería. Modelo CALVIN	Jenkis et al. (2001)
Análisis tanto de la calidad como de la cantidad del agua	Grecia	Modelo de simulación con criterios de eficiencia económica y distribución equitativa de recursos y costes	Assimacopoulos (2004)
Gestión de los recursos disponibles con criterios económicos	España	Desarrollo de las herramientas Mevalges y Ecoges para evaluación económica con curvas de demanda	Collazos (2004)
Descenso de los niveles piezométricos y daños ambientales	India	Precios para el agua subterránea dependiendo de la altura piezométrica	Brown and Rogers (2006)
Aumento de la demanda agrícola e intrusión marina	Cuenca del río Adra. España	Programación no lineal, método de autovalores para resolución del flujo subterráneo	Pulido-Velazquez et al. (2006)
Efectos del cambio climático en economías a gran escala	California. USA	Comparativa de pérdidas por sequías entre usos no consuntivos y usos consuntivos	Tanaka et al. (2006)
Impacto económico de políticas para gestión de sequías	Cuenca de Río Grande	Políticas de adaptación al cambio climático	Ward et al. (2006)
Aumento de la capacidad de las infraestructuras con disponibilidad variable del agua	Jordania	Programación entera mixta estocástica	Rosenberg et. Al (2008)
Diseño, evaluación e implementación de Políticas de Precios	Cuenca de Río Grande	Impactos económicos de políticas de precios con criterios de equidad y restricciones de calidad	Ward and Pulido-Velazquez (2008)

Tabla 1. Aplicaciones de modelos hidroeconómicos (Fuente: adaptada de Harou et al., 2009)

2.3 Estimación funciones económicas de demandas

En función del tipo de demanda (urbana, agrícola,...), las curvas de demanda o funciones económicas tendrán diferentes tipologías de ecuaciones: lineal, cúbica,...

Estas curvas de demanda se pueden definir a escala anual (demanda agregada anualmente) o a escala mensual. En este trabajo se han estimado previamente las curvas de demanda a escala anual. Posteriormente, se ha realizado la desagregación de cada una de las curvas anuales a escala mensual, empleando para ello el calendario de riegos o de suministro urbano.

2.3.1 Curvas de demanda para uso urbano

Según la Instrucción de Planificación Hidrológica, (IPH, 2008) para definir las unidades de demanda urbana se han de unir todas las aglomeraciones urbanas que obtenga el recurso del mismo punto de toma (subcuenca, masa de agua,...). La demanda urbana se descompone en uso residencial, uso industrial (pequeñas y medianas industrias), comercial y otros usos. Salvo en zonas turísticas, los patrones de distribución temporal suelen ser muy uniformes. La calidad del agua tendrá unas condiciones muy exigentes y altos valores de las garantías.

El suministro a la demanda para uso urbano debe presentarlas siguientes características de acuerdo con la IPH:

- El déficit de un mes no será superior al 10% de la demanda mensual (IPH, 2008).
- La suma del déficit en 10 años consecutivos, no será superior al 8% de la demanda anual (IPH, 2008).

Para la obtención de las funciones económicas, hay que tener en cuenta el concepto de elasticidad-precio de la demanda, que se define como la variación de la cantidad de agua demanda cuando se produce una variación del precio del agua. La elasticidad-precio del agua modeliza el comportamiento esperado en el consumidor: elasticidad-precio negativa (si aumenta el precio disminuirá

el consumo) y elasticidad-precio positiva; por ello se puede afirmar que el agua es un bien normal (Bauman y Boland, 1998)

En el Libro Blanco del Agua (MIMAM, 2000), se presenta una curva de demanda para uso doméstico, con un valor de elasticidad-precio de -0.57. Este valor podría ser empleado para la obtención de las funciones económicas de usos urbanos.

Los modelos econométricos pueden ser empleados para obtener las curvas de demanda urbana, con la inclusión de diferentes variables explicativas: pueden ser modelos simples que tan sólo incluyan el precio o modelos más complejos que consideren variables como la renta, condiciones climáticas, frecuencia de tarificación, etc.

En referencia a las formas funcionales pueden emplearse:

- Funciones lineales. Por ejemplo Trujillo (1994) empleó funciones de demanda lineales para obtener una tarifa óptima en la ciudad de Las Palmas.
- Función de Cobb-Douglas, es de tipo potencial asumiendo una elasticidad constante a lo largo de toda la curva. Con ello, se obtiene la siguiente expresión:

$$Q = c \cdot P^\varepsilon$$

Siendo: c un factor de escala, $c > 0$, y ε la elasticidad-precio de la demanda, $\varepsilon < 0$

Para poder calibrar la fórmula se requiere un valor de elasticidad, ya se ha comentado que se va a emplear -0.57, y un par de puntos precio-cantidad. Para obtener el par de puntos precio-cantidad, nos basamos en el coste unitario por metro cúbico facturado que el Ministerio de Medio Ambiente recoge en su informe del 2005 (1.06 €). Con todo ello, sólo quedaría como incógnita la constante “ c ”, que puede ser estimada mediante el empleo de la hoja EXCEL.

2.3.2 Curvas de demanda para uso agrícola

Para calcular la demanda de agua de una Unidad de Demanda Agrícola (UDA) se evalúa el valor del agua para las comunidades de regantes bajo condiciones de escasez.

En una curva de demanda típica se diferencian tres tramos:

- Un tramo inicial claramente inelástico: el regante no responde frente al cambio de precio, por ello mantendrá sus cultivos y dotaciones de riego con su propia renta.
- Un tramo intermedio elástico: el regante reduce los consumos, llegando a cambiar a cultivos de menor consumo o incluso de secano.
- Un tramo final inelástico: el nivel de precios obliga a la reducción de cultivos.

La respuesta del agricultor respecto al cambio de precios consiste en: reducir las dosis de riego, sustituir sus cultivos por otros de menor consumo, pasar a cultivos de secano, mejora de las técnicas de regadío y realizar un plan de mejora.

El sistema de tarifa es determinante en la influencia del precio como incentivo del ahorro. En este sentido se han realizado multitud de análisis como por ejemplo:

- Sumpsi et al. (1998) realizan un análisis empírico para estimar como influyen distintas formas de tarificación (variable, fijo, por hectárea,...) sobre la demanda, la renta de los regantes y la recaudación estatal en 15 comunidades de regantes con características muy distintas.
- García-Mollá (2000) realizó un análisis empírico para conocer el grado de influencia de diversos factores sobre la demanda del agua en la Comunidad Valenciana. Se obtuvo que los factores de mayor influencia eran: tipo de cultivo, clima, suelo, tradición de riego, origen del agua y variables instituciones de las propias comunidades de regantes.

A continuación se muestra una tabla resumen de los principales análisis realizados:

Tabla 2. Análisis para el estudio de curvas de demanda agraria (Fuente: Deidda, 2004)

Autor	Metodología	Contextos	Resultados
Sumpsi et al. (1988)	Encuestas y programación dinámica	15 CCRR de: Guadalquivir, Guadiana, Júcar-Segura	Inelasticidad de la demanda de agua, diversidad de resultados entre cuencas.
García Mollá (2000)	Encuestas y análisis econométrico	Muchas CCRR de la C. Valenciana	Tipificación de diferentes agriculturas: El precio-coste no es el factor determinante del consumo.
Arrojo y Bernal (1999)	Análisis de VAB y VAN y rentabilidad del agua.	Ebro	Total dependencia de las ayudas de la PAC para asegurar rentabilidad
Berbel et al.	Análisis multicriterio	Duero y Guadalquivir	Demandas inelásticas, políticas tarifarias perjudiciales para sectores con pocos beneficios
Hernández, Mora, Llamas (2001)	Meta-análisis	Aguas subterráneas	Rentabilidad de las aguas subterráneas superior a regadíos con aguas superficiales. Razones de esta superioridad.
Ministerio de Medio Ambiente (2000)	Meta-análisis	Toda España	Los análisis estudiados hasta 2000 no dan resultados muy dispares sobre la forma y elasticidad de la demanda de agua.
Blanco (1999)	Programación matemática discreta estocástica	Guadalquivir y Duero	Análisis de los programas de modernización de regadío. Problemas de incentivos económicos y ahorros de agua condicionado.

Como se deduce de la tabla 2 se han realizado multitud de análisis que ayudan a determinar correctamente la demanda económica de agua para riego, siendo ésta fundamental para el adecuado diseño de políticas de gestión de los recursos hídricos. El riego supone un porcentaje muy alto del consumo total del

agua (aproximadamente el 80% de la demanda de usos consuntivos; MMA, 2000a, p.40).

De los diferentes análisis realizados se deduce que la respuesta de los regantes frente a un cambio de precio del agua es función de un gran número de factores, hecho que dificulta la estimación de las curvas de demanda para riego, introduciéndose por ello una incertidumbre en el cálculo de las mismas.

Para obtener las curvas de demanda podría emplearse el modelo Modere (colaboración entre IMDEA y Universitat Politècnica de Valencia, coordinado por el Ministerio de Medio Ambiente)

El modelo pretende reproducir y describir las decisiones observadas de los agricultores españoles. Los regantes españoles tienen en cuenta una variedad de atributos a la hora de tomar sus decisiones. Concretamente en este modelo se han empleado los siguientes criterios: margen bruto, riesgo evitado, mano de obra total, mano de obra asalariada y costes directos como proporción de los costes totales. A priori, cabría pensar que el agricultor trataría, por encima del resto de posibilidades, de maximizar el margen bruto para de esta manera obtener el máximo beneficio posible como cualquier otro empresario.

Ésto no es así, sino que tiene en cuenta otros criterios como sacrificar parte del beneficio en favor de disminuir el riesgo asociado a su plan de cultivos. Por otra parte tratará de tomar una decisión que sea fácil de manejar, por ejemplo tratará de contratar la menor mano de obra asalariada (trabajadores ajenos). Para tratar de reproducir estos comportamientos se definen los siguientes atributos:

- Maximizar la rentabilidad financiera de la explotación. Para ello se ha empleado el indicador valor esperado del margen bruto estándar (π).
- Minimizar el riesgo de las decisiones de cultivo. Para ello se ha empleado como indicador la desviación estándar del margen bruto (σ).
- Minimizar la complejidad de la gestión de la explotación agraria.

2.4 Instrumentos económicos

La teoría económica considera diferentes estrategias de políticas e instrumentos para la gestión eficiente del agua en las cuencas hidrográficas (Heinz et al., 2007). En el año 1972, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) adoptó el la idea de quién contamina paga (principio que posteriormente fue adoptado por la UE como una política oficial). Desde que se introdujo esta idea, su uso se ha ampliado para incluir el uso de los recursos (OCDE, 1994b). Se puede afirmar que este principio ha motivado el creciente interés mundial de aplicar instrumentos económicos (Bernstein, 1997).

Por otra parte, tal y como ya se ha comentado, La Directiva Marco del Agua 2000/60/CE, propicia la aplicación de instrumentos económicos ya que recoge en su artículo 9º la necesidad de aplicar políticas de precios con un doble objetivo: como incentivo para propiciar un uso eficiente del agua (como instrumento económico) y como instrumento financiero para la recuperación de costes de los servicios del agua (tanto ambientales como del recurso).

La idea de aplicar instrumentos económicos es la de adaptar las decisiones individuales a los objetivos comunes a través de unos incentivos para los usuarios. En la tabla 3, se muestra una clasificación de instrumentos económicos.

Tabla 3. Tipos de instrumentos económicos (Adaptado de EPI Water report, 2013)

Tipos de Instrumentos Económicos	
Tasas e impuestos	Precios del agua
	Tasas ambientales
Subsidios	Subsidios en productos
	Subsidios en prácticas
Mercados para bienes medioambientales	Permisos y Licencias
	Mecanismos de compensación
Otros instrumentos basados en mercados	Mercados del agua
	Banco de hábitat
Asociación público-privada	Compra temporal derechos del agua
Instrumentos financieros	Seguros para sequías
Acuerdos voluntarios	

2.4.1 Políticas de Precios del agua

En todo diseño de políticas de precios los objetivos que habitualmente se persiguen son (Griffin, 2006):

- Suficiencia de ingresos. Cantidad suficiente de ingresos que permitan sufragar la totalidad de los gastos.
- Eficiencia económica. Los precios deben maximizar los beneficios netos de los usuarios del agua o maximizar el valor presente neto de todos los usuarios del recurso.
- Equidad y justicia. Los usuarios con características similares deberían pagar precios similares y percibir que son precios justos.
- Simplicidad. Todo usuario tiene que ser capaz de entender el sistema de precios
- Legalidad. Los precios tienen que ser legalmente aceptados.

Actualmente en España para el establecimiento de la tarifa del agua, siempre se tienen presentes una serie de principios como son:

- Recuperación de costes, tanto de suministro, como ambientales como de recurso según la *Directiva Marco del Agua*
- Se debe de asegurar un reparto equitativo entre los distintos usuarios en función del grupo poblacional y de su nivel de consumo según la *Directiva Marco del Agua*
- Debe de ser asequible, de forma que se permita a los consumidores más modestos satisfacer sus necesidades vitales.

A los usuarios del sistema se les cobra el canon de regulación que se descompone en:

- El total previsto de gastos de funcionamiento y conservación de obras realizadas
- Los gastos de administración del organismo gestor imputables a dichas obras.

- Amortización del sistema.

El enfoque que planteamos en este trabajo final de máster consiste en aplicar los precios del agua para gestionar las demandas. Por ello, planteamos una combinación del actual enfoque, precios para recuperación de costes, y del nuevo enfoque que planteamos.

2.4.2 Mercados del agua

Los mercados se basan en el intercambio voluntario de bienes y/o servicios con un precio acordado de antemano. Los mercados perfectamente competitivos son aquellos en los que tanto los compradores como los vendedores actúan en su propio beneficio, alcanzándose de esta manera la máxima eficiencia económica en la asignación del recurso (óptimo de Pareto). El óptimo de Pareto indica que una asignación es económicamente eficiente si y sólo si, ningún individuo puede mejorar su situación sin que empeore la del otro. La otra definición, más utilizada en la realidad, dice que una asignación A es eficiente con respecto a B si y sólo si, al pasar de B a A los que tienen ganancias pueden compensar plenamente a los que pierden, y aún así resultar ganadores.

En este tipo de mercados se supone que hay multitud de compradores y de vendedores sin poder de mercado, con productos homogéneos, no existen barreras ni a la entrada ni a la salida del mercado, y sin costes de transacción.

Algunas causas de fallo en la asignación del agua en los mercados son: existen externalidades negativas que no quedan internalizadas (por ejemplo la contaminación a terceros), el agua es un bien público y las economías de escala (que claramente favorecen a los monopolios).

Por todo esto, para que el mercado sea un instrumento eficiente en la asignación del agua, los derechos de propiedad deben cumplir las siguientes características: especificidad, exclusividad, transferibilidad, integrabilidad, y exigibilidad (Lee y Juralev, 1998).

Aplicaciones Prácticas

En la tabla 4, se muestran algunas de las aplicaciones prácticas de instrumentos económicos a lo largo de los últimos 20 años. Como puede observarse se han realizado estudios con todo tipo de instrumentos económicos: precios, mercados del agua, tasas y subsidios.

Nombre del estudio	Tipo de Instrumento Económico	Enfoque del estudio
Booker & Young (1994) Modeling intrastate and interstate markets for Colorado River water resources	Transferencias con Mercados	Se desarrolló un modelo de optimización para analizar beneficios de posibles transferencias de agua entre usuarios
Bernstein (1997) Economic instruments	Todos	Realizó un “paper” descriptivo de los diferentes instrumentos existentes
McKinney et al. (1999) Modeling Water Resources Management at the Basin Level: Review and Future Directions. Technical Report	Mercados, precios del agua y subsidios	Modelo hidrológico-económico integrado considerando los usos tanto agrícolas como no agrícolas (por ejemplo hidroeléctrico)
Andersen (2001) Economic instruments and clean water: why institutions and policy design matter	Subsidios para construcción de plantas depuradoras y precios	Desarrollo institucional como pre-condición para implementación de instrumentos económicos
Cai et al. (2003) Integrated hydrologic-agronomic-economic model for river basin management	Tasas y subsidios para incentivar un reparto eficiente del agua	Modelo hidrológico-agronómico-económico integrado a escala de cuenca
MacDonald (2004) The use of economic instruments for managing water quality	Instrumentos basados en precios (tasas medio ambientales y acuerdos de compensación)	Definen un diagrama indicando que instrumentos son factibles en cada contexto. Definen distintos segmentos de la sociedad (permiten escoger diferentes instrumentos económicos)
Bazzani et al. (2005) The sustainability of irrigated agricultural systems under the Water Framework Directive: first results	Políticas de Precios	Programación matemática a nivel de usuario agrícola
Ward & Pulido-Velázquez (2008) Efficiency, equity, and sustainability in a holistic water quantity — quality optimization model in the Rio Grande basin	Políticas de Precios en el sector urbano	Modelos hidroeconómicos holísticos
Blanco et al. (2009) Groundwater development and wetlands preservation: assessing the impact of water conservation policies	Políticas de precios y mercados del agua	Programación matemática no lineal para realizar un análisis coste-eficacia
Grafton et al. (2010) An integrated assessment of water markets: Australia, Chile, China, South Africa and the USA	Mercados del agua	Marco integrado con criterios económicos cuantitativos
Álvarez Mendiola, (2010). Diseño de un política eficiente de precios del agua integrando costes de oportunidad del recurso a escala de cuenca	Políticas de Precios	SAD AQUATOOL (Módulos SIMGES y ECOWIN) y modelo ad-hoc en GAMS. Enfoque combinado de modelos de simulación y optimización
Howitt et al. (2010) Economic Modeling of Agriculture and Water in California using the Statewide Agricultural Production Model	Mercados del agua aplicados a sequías	Programación Matemática Positiva

Tabla 4. Diferentes EPIs en EU (Fuente: Adaptado de EPI Water, 2013)

CAPÍTULO 3. SISTEMA DE EXPLOTACIÓN DEL RÍO JÚCAR

En este capítulo se describen las características físicas, masas de agua (superficiales y subterráneas), caracterización de usos del agua, zonas sensibles y descripción de los problemas ETI del sistema de explotación del río Júcar.

3.1 Descripción General de la cuenca

3.1.1 Características físicas de la cuenca.

El sistema Júcar se encuentra dentro del ámbito de la Confederación hidrográfica del Júcar (CHJ), la cual está constituida por 9 sistemas de explotación: Cenia-Maestrazgo, Mijares-Plana de Castellón, Palancia-Los Valles, Turia, Júcar, Serpis, Marina Alta, Marina Baja y Vinalopó-Alacantí (véase figura 2)

El Sistema Júcar comprende la totalidad de la cuenca del río Júcar, además del área y servicios efectivamente atendidos por el Canal Júcar-Turia y las subcuencas litorales comprendidas entre la Gola de El Saler y el límite de los términos municipales de Cullera y Tavernes de Valldigna. Tiene una extensión de 22378,51 km².

La red hidrográfica está constituida por el río Júcar y sus afluentes, entre los que destacan los ríos Cabriel, Valdemembra, Arquillo, Magro, Albaida, Reconque y Sellent.

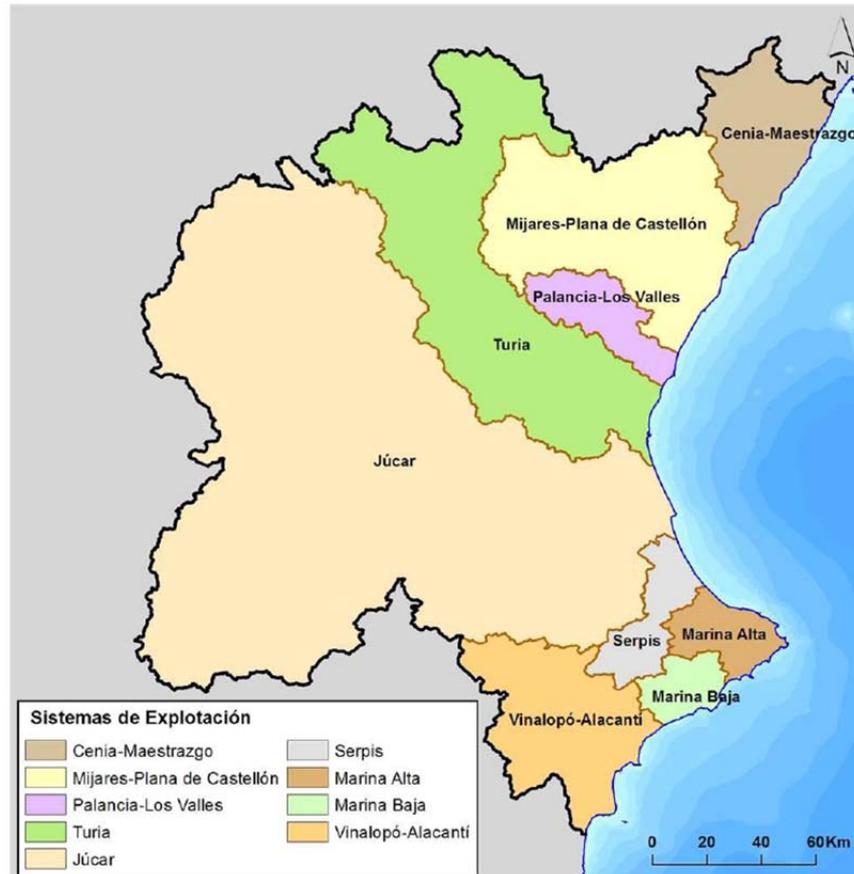


Figura 2. Demarcación Hidrográfica del Júcar (Fuente: CHJ, 2013)

El río Júcar nace en la Cordillera Ibérica, a 1585 m de altitud. En este primer tramo discurre en dirección E-O hasta llegar a Villalba de la Sierra desde donde se dirige al Sur. En su camino hacia el sur atraviesa la Serranía de Cuenca, dominio calizo frecuentemente karstificado. En la Mancha conquense, la red de drenaje tiene los cauces poco definidos, debido al recubrimiento detrítico terciario y las pendientes suaves. Este tramo del río finaliza en el embalse de Alarcón. Este embalse tiene un volumen de 1112 Hm³ y una superficie de 6480 hectáreas, siendo el primer embalse de gran tamaño en el curso fluvial. El uso al que está destinado es el riego y la producción de energía eléctrica. A partir de este punto, el río sigue discurrendo por materiales cretácicos hasta llegar a la central de Picazo. Pasado Batanejos, el río gira

hacia el oeste, discurriendo en su mayor parte por terrenos miocenos que, a partir de la central de Tranco del Lobo, presenta alternancias en el Cretácico y Jurásico, hasta llegar al Trías, donde se encaja. Este tramo finaliza en el embalse de embarcaderos, donde se produce la confluencia con el río Cabriel. En este tramo hay un gran número de pequeñas centrales para la producción de energía hidroeléctrica: Central de La Losa, Central de las Casas del Batanejo, Central Gosálvez en Villagordo del Júcar, Central La Manchega y central de El Torcido. En este tramo la red hidrográfica es bastante densa por su margen izquierda, dadas las fuertes pendientes y el predominio de materiales poco permeables, destacando los afluentes Ledaña y Valdemembra. Por la margen derecha los cursos de agua son prácticamente inexistentes, debido a la horizontabilidad y permeabilidad de la zona (Llanos de Albacete). Cabe destacar el Canal de M^a Cristina que drena el acuífero de los Llanos, y el río Reconque, con confluencia próxima al embalse de Embarcaderos. El Canal de María Cristina da continuidad al río del Arquillo, enlazándolo con el Júcar.

A partir del embalse de Tous, el valle del río Júcar se abre paso a la zona de la Plana de Valencia, desembocando en el mar Mediterráneo en las cercanías de Cullera. Recibe en este tramo las aportaciones de los ríos Sellent y Albaida, por la derecha, y del río Magro por la izquierda. A lo largo de su recorrido por la Plana, el nivel del acuífero está por encima del cauce del río, por lo que éste recibe las descargas del acuífero en su recorrido, localizándose las descargas más importantes en las cercanías de Alcira.

En el sistema Júcar se diferencian tres zonas geográficas climatológicamente distintas: las cuencas del Alto Júcar, incluyendo la Mancha Oriental, y el río Cabriel, hasta su confluencia en el embalse de Embarcaderos, de clima continental, que se acentúa o suaviza según predominen o no las condiciones del interior; las zonas de los ríos Magro, Albaida y Sellent, y la cuenca del río Júcar entre los embalses de Embarcaderos y Tous, con un clima intermedio entre los tipos continental y litoral, con importantes fluctuaciones tanto pluviométricas como termométricas en sentido Este-Oeste; por último, la zona localizada aguas abajo del embalse de Tous, caracterizada por un clima de tipo litoral mediterráneo. La precipitación media anual de la cuenca es de

510 mm., siendo la temperatura media de 13,6 °C, aunque las diferencias entre las distintas zonas geográficas son grandes: la pluviometría media en el Alto Júcar es de 630 mm/año, mientras que en la cuenca intermedia la pluviometría desciende hasta valores medios de 450 mm/año; por su parte, la temperatura media anual en el Alto Júcar es de 11,6 °C, mientras en la zona litoral se eleva hasta un valor medio de 17 °C. En la figura 3 se muestra un mapa de la distribución espacial de la precipitación, en todo el ámbito de la Demarcación Hidrográfica del Júcar, tanto para la serie corta como para la serie larga. En la figura 4 se muestra un mapa de la distribución espacial de las temperaturas en todo el ámbito de la Demarcación Hidrográfica del Júcar, tanto para la serie corta como para la serie larga.

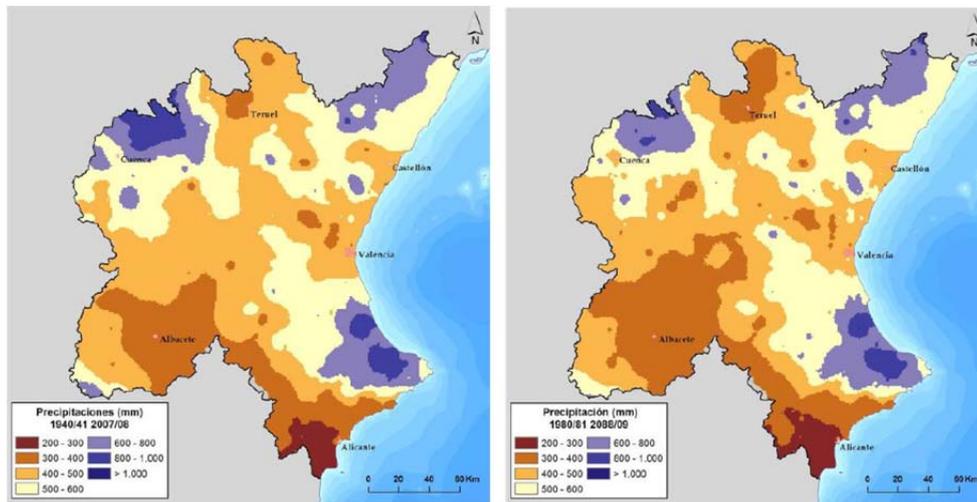


Figura 3. Mapa de precipitación media anual en la DHJ (CHJ, 2013)

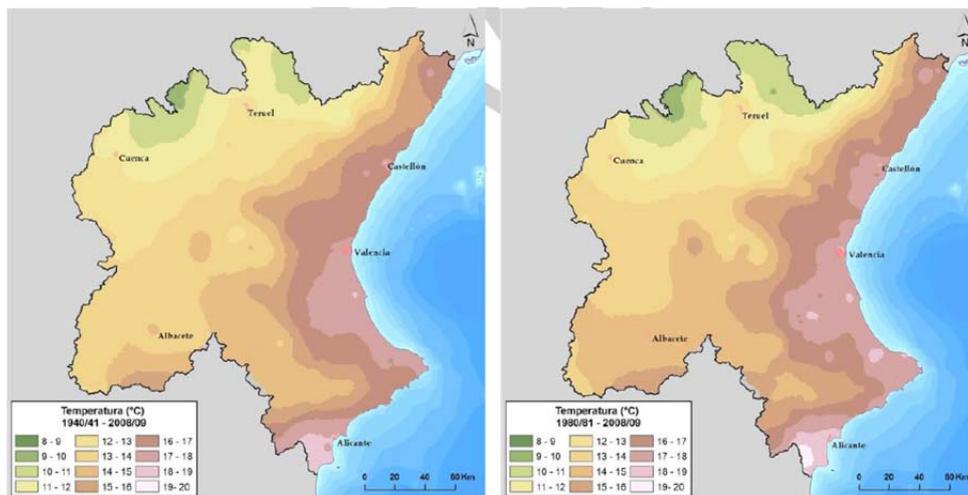


Figura 4. Mapa de temperaturas medias anuales en DHJ (CHJ, 2013)

Tanto la temperatura como la precipitación, son las responsables del grado de aridez de una región o territorio. Si se emplea el índice propuesto por la UNESCO en 1979, las regiones pueden clasificarse en áridas, semiáridas, subhúmedas y húmedas. Para calcular dicho índice se calcula el cociente entre la precipitación media anual y la evapotranspiración media anual. En la figura 5, se muestra un mapa con la distribución espacial del índice de aridez para la Demarcación Hidrográfica del Júcar.

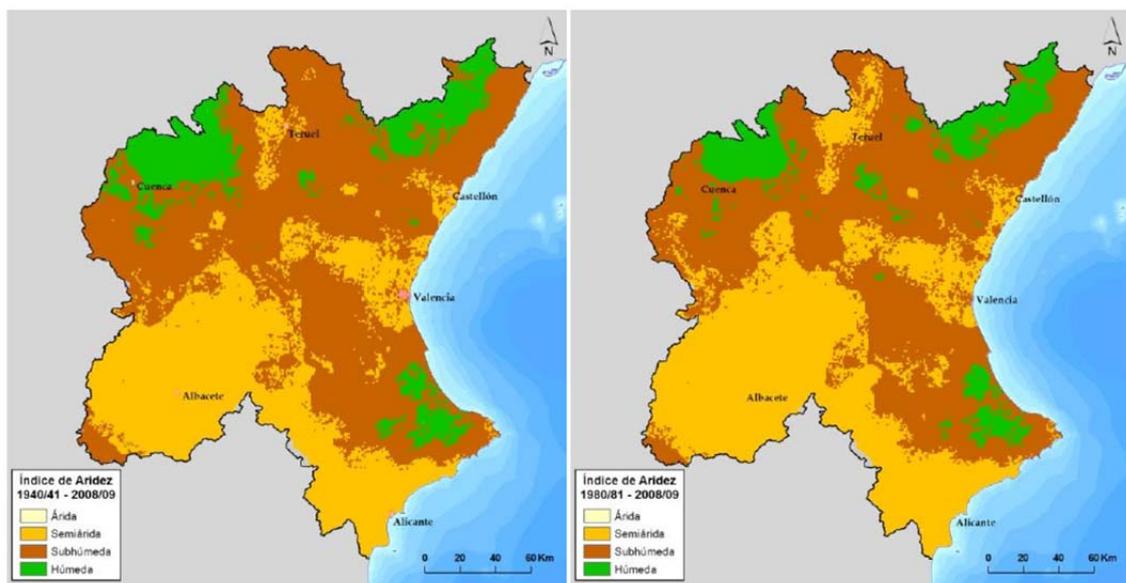


Figura 5. Índice de aridez en Demarcación Hidrográfica de Júcar (CHJ, 2013)

Como puede observarse parte del sistema de explotación del Júcar discurre por zona semi-árida.

3.1.2 Masas de Agua¹

De acuerdo con la Instrucción de Planificación Hidrológica (MARM, 2008), en adelante IPH, para describir la demarcación hidrográfica hay que incluir, entre otros aspectos, mapas con los límites y localización de las masas de agua superficial y de las masas de agua subterránea. Entendiendo por masa superficial (art. 2 de la DMA), una parte diferenciada y significativa de agua superficial, como un lago, un embalse, una corriente, río o canal, unas aguas de transición o un tramo de aguas costeras; y por masa subterránea, un

¹ Información de Instrucción de Planificación Hidrológica, 2008 y CHJ 2009

volumen claramente diferenciado de aguas subterráneas en un acuífero o acuíferos.

En el documento técnico de referencia “*Identificación y delimitación de masas de agua superficial y subterránea*” (CHJ, 2009), se delimitan las masas de agua superficiales y subterráneas. La definición de la red hidrográfica básica la realizó el CEDEX. Se siguieron los siguientes criterios: en cualquier punto de la red debe existir un área de cuenca vertiente mayor de 10 km² y una aportación media anual en régimen natural mayor de 0,1 $\frac{m^3}{s}$. Se empleó un modelo digital del terreno de resolución de 500m x 500m.

Para exponer los criterios que siguieron en las Confederaciones Hidrográficas para la identificación de las masas de agua superficial (que son con las que se va a trabajar en el presente proyecto), hay que tener en cuenta su clasificación, que según la IPH comprende: Ríos, Lagos, Aguas de transición y Aguas costeras.

Para las masas de agua tipo río, se siguen los siguientes criterios:

- Los cambios en la hidromorfología del cauce tanto naturales como producidos por la actividad antrópica, supone un límite entre masas de agua.
- La existencia de presiones significativas que suponen un cambio de riesgo de alcanzar objetivos medioambientales, como vertidos, derivaciones, etc.
- Los cambios en el indicador de calidad de vegetación de ribera (QBR).
- La presencia de espacios de la red NATURA 2000: LIC (lugares de interés comunitario) y ZEPA (zona de especial protección de aves).
- Las confluencias de ríos con aportaciones importantes.
- La existencia de zonas protegidas por ser de uso prepotable, piscícola o de baño.

El sistema de explotación Júcar está constituido por 143 masas de agua superficiales, con una longitud de unos 2900 km (véase figura 6).

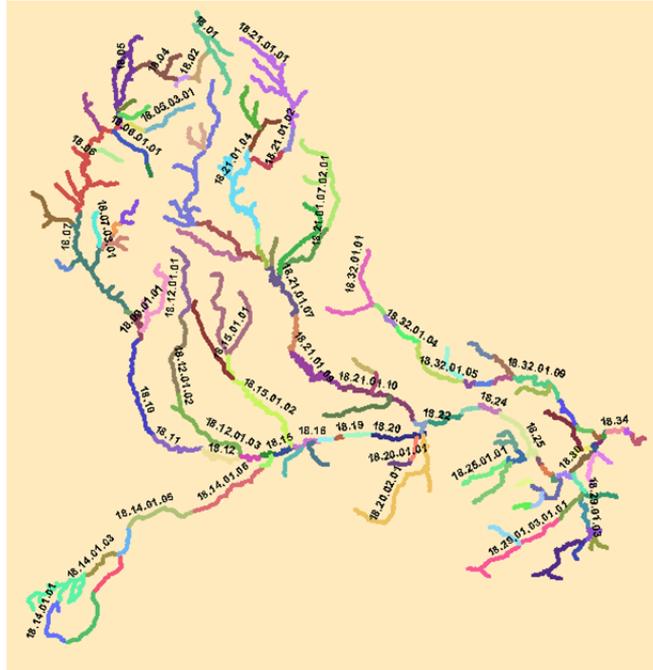


Figura 6. Masas de Agua Superficiales Sistema Júcar; (elaboración propia con bases de datos OPH-CHJ).

En referencia a las masas de agua subterránea (véase figura 7), se adscriben 41 masas de agua subterránea al Sistema de Explotación Júcar.

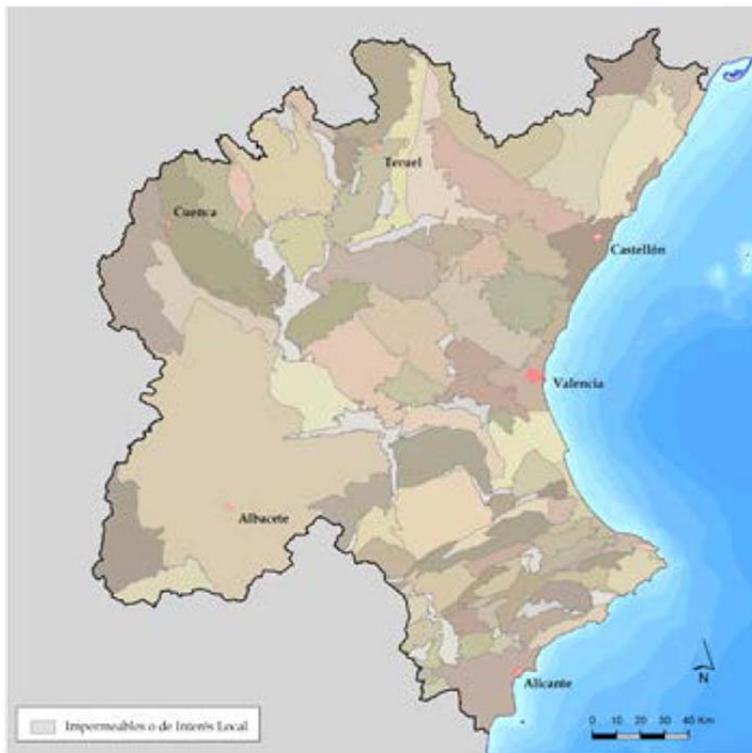


Figura 7. Aguas subterráneas DHJ (Fuente: CHJ, 2012)

3.1.3 Caracterización de los usos del agua²

Para caracterizar la demanda consuntiva del agua, se hace una subdivisión de la misma en urbana, agraria, industrial y recreativa. En el caso del sistema Júcar, se obtienen los siguientes valores (CHJ, 2009):

- Demanda urbana: 222 Hm³.
- Demanda agraria: 1405.26 Hm³.
- Demanda industrial: 49.85 Hm³.
- Demanda recreativa: 1.59 Hm³.
- Demanda total: 1678.92 Hm³.

Se deduce de los datos anteriores, que la demanda principal es la agraria. Ésta representa un 83.70 % de la demanda total, va seguida de la demanda urbana, la cual representa un 13.23 % de la demanda total. La demanda del sistema de explotación Júcar, constituye un 53 % respecto de la total de la CHJ. (véase figura 8)

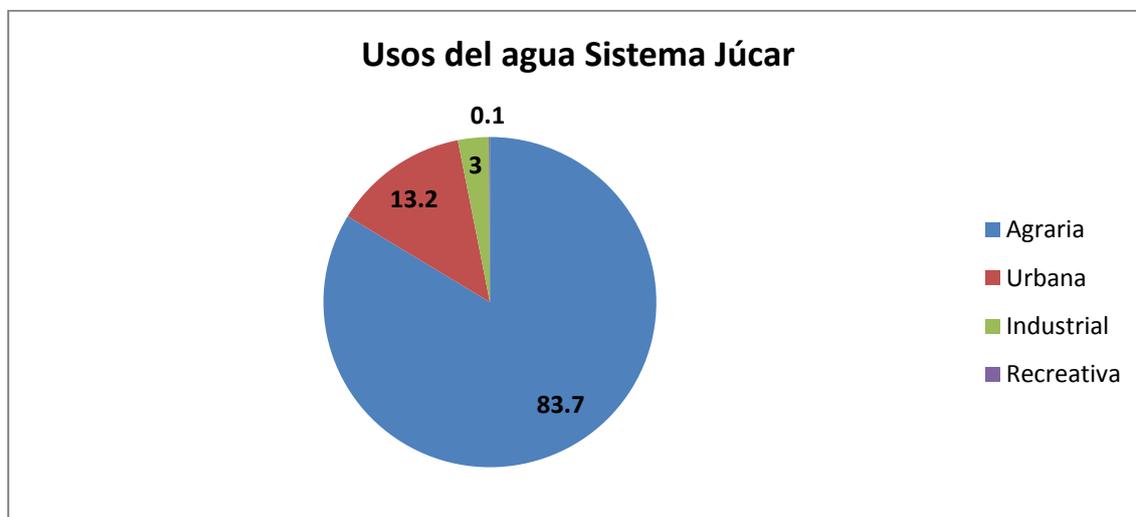


Figura 8. Usos del agua Sistema Explotación Júcar (Fuente: elaboración propia a partir de datos de CHJ, 2009)

Seguidamente se detallan las demandas (CHJ, 2009) según su origen:

² Información de “Metodología y Resultados de estimación de Demandas” (CHJ, 2009) y “Plan Hidrológico del Júcar (CHJ, 1999).

- Superficial: 904.15 Hm³.
- Subterráneo: 768.22 Hm³.
- Reutilización: 12.38 Hm³.
- Desalación: 0 Hm³.
- Transferencia: 0 Hm³.
- Total: 1684.75 Hm³.

Se deduce de los datos anteriores, que la parte de demanda que es satisfecha con agua superficial y subterránea está muy igualada: 53.67 % y 45,60 % respectivamente. Por otro lado, en lo que hace referencia a los recursos no convencionales, concretamente a la desalación, poco a poco van incrementando su uso en otros sistemas de la Demarcación: Turia, Marina Baja y Vinalopó-Alicantí, aunque no en el sistema Júcar.

Los principales regadíos son:

- Alto Júcar: Regadíos Alto Júcar.
- Mancha Oriental: Canal de Albacete y Manchuela, Riegos Albacete y Pequeños regadíos.
- Júcar Medio: Riegos de Almansa y Pequeños regadíos.
- Sellent y Albaida: Regadíos del Sellent, Riegos de Albaida y Zona de Cárñoles.
- Magro: Zona del canal del Magro, Hoya de Buñol y Riegos del Alto Magro.
- Bajo Júcar: Riegos tradicionales, Canal Júcar-Turia y Resto zona Canal Júcar-Turia.

Del total de la superficie de regadío, más de la mitad (58 %) se encuentra en la provincia de Valencia, mientras que el 37 % pertenece a la provincia de Albacete y tan sólo un 5% a Cuenca. Las grandes zonas de regadío corresponden a la cuenca baja del Júcar, aguas debajo del embalse de Tous, y la zona de la Mancha Oriental, que abarca la cuenca de los ríos Júcar y Cabriel, desde los embalses de Alarcón y Contreras hasta su confluencia en el

embalse de Embarcaderos, con porcentajes de 41 y 38 % respectivamente. Los cítricos constituyen el cultivo predominante en la cuenca baja del Júcar, con un porcentaje del 61% de la superficie de regadío de la citada zona, mientras que los cultivos de tipo herbáceo ocupan un 31 % de la superficie de regadío, siendo su mayor parte arrozales. En la zona de la Mancha Oriental, si bien la superficie total cultiva es importante, representa únicamente el 10% de la superficie total cultivada en dicha zona. En la zona de los ríos Albaida y Sellent, la superficie destinada secano es superior a la de regadío, siendo la ocupada por el regadío únicamente el 3%, frente a un 97% ocupado por el secano. En la cuenca del río Magro, la superficie destinada a secano es superior a la de regadío (91% frente a 9%), con un reparto muy igualado de cultivos (32% cítricos, 25% herbáceos y 20% frutales). En la cuenca media del Júcar, entre los embalses de Embarcaderos y Tous, la superficie cultivada representa el 28 % del total de la zona, mayoritariamente de secano (95%) y destinándose la de regadío fundamentalmente a cultivos de tipo herbáceo (59%) y barbecho de regadío (21%). Se presenta una distribución gráfica de los cultivos en las figuras 9 y 10.

A continuación se muestra una distribución de la superficie regada de toda la Demarcación Hidrográfica:

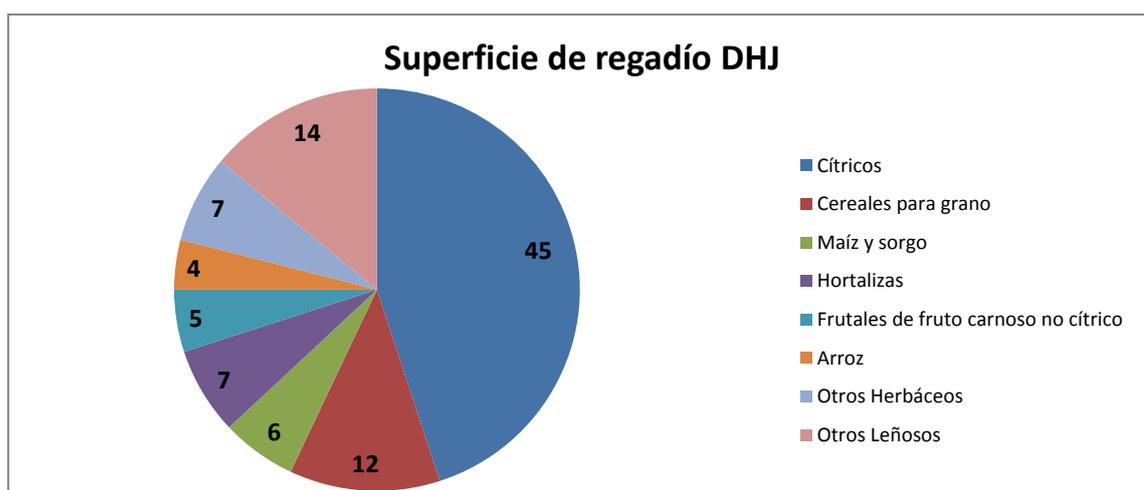


Figura 9. Superficie de regadío de DHJ (Fuente: elaboración propia con datos CHJ, 2009)

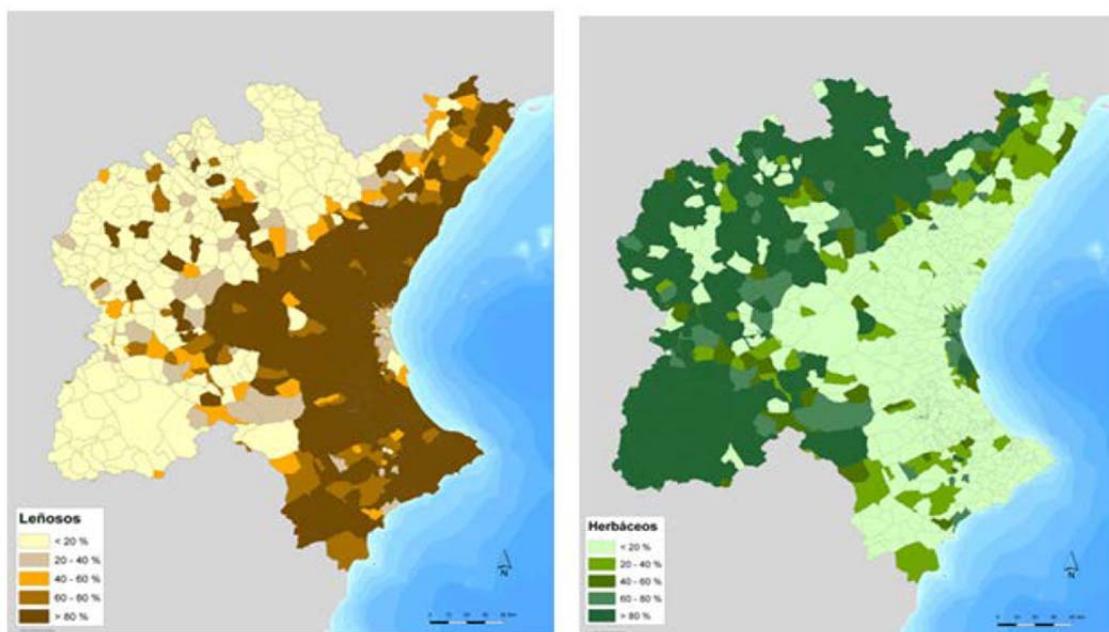


Figura 10. Distribución de cultivos leñosos y herbáceos (Fuente: CHJ, 2009)

3.1.4 Inventario de Recursos Hídricos

Para obtener las aportaciones acumuladas en cada punto de la red fluvial, se han de sumar las esorrentías de todos los puntos situados aguas arriba de cada punto de la red fluvial, obteniéndose los siguientes mapas:

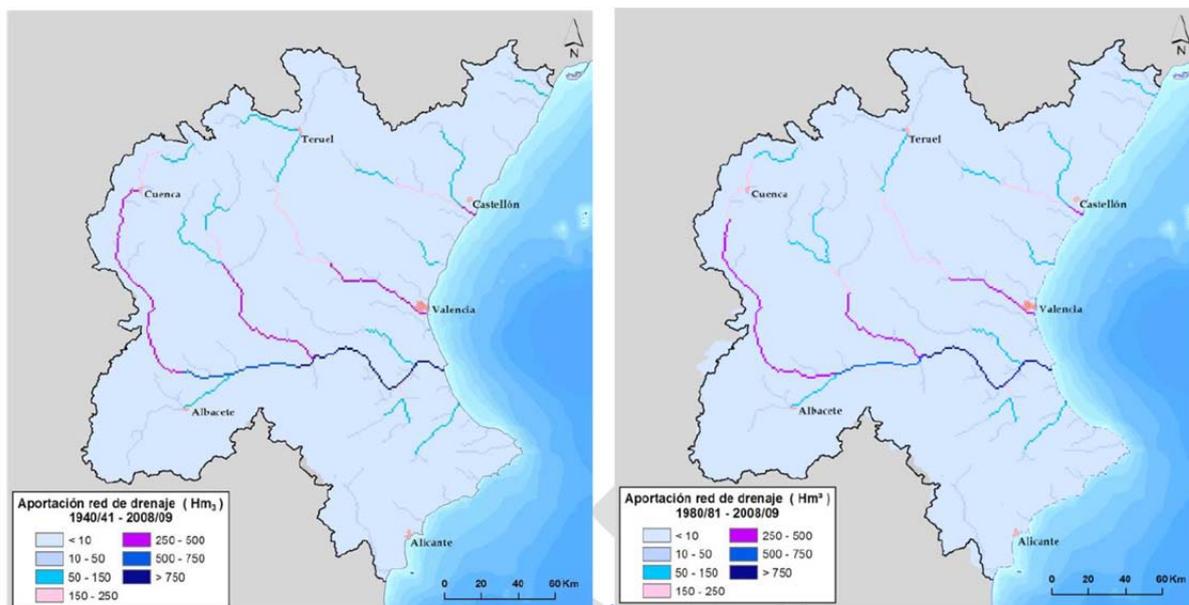


Figura 11. Aportaciones acumuladas en la red fluvial para series corta y larga (CHJ, 2013)

A continuación, se muestran los resultados de las series anuales de aportaciones acumuladas a lo largo de la red fluvial, tanto para la serie corta como para la serie larga:

Tabla 5. Series de aportaciones Sistema Júcar (CHJ, 2013)

	Media aritmética	Máximo	Mínimo
Serie 1940/41 - 2008/09	1747	3362	675
Serie 1980/81 - 2008/09	1548	3362	675

Como puede observarse en la tabla 5, el valor medio de las aportaciones en la serie corta es inferior al obtenido para la serie larga. Ésto es debido al denominado efecto 80, es decir a partir del año 1980 se produce un cambio importante en la hidrología de la Demarcación Hidrográfica del Júcar como puede apreciarse en las figuras 12 y 13:

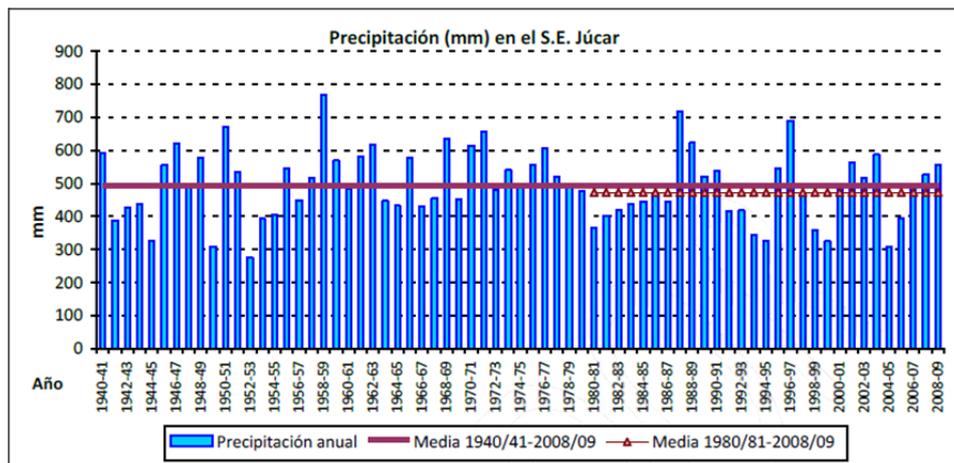


Figura 12. Precipitación anual. Sistema Júcar (CHJ, 2013)

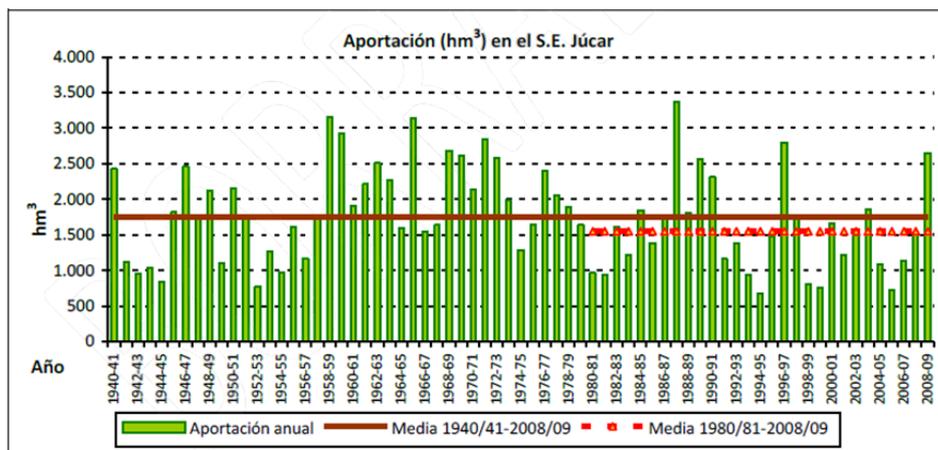


Figura 13. Aportación anual. Sistema Júcar (CHJ, 2013)

También hay que considerar los recursos hídricos no convencionales:

- Los retornos procedentes de reutilización de aguas residuales regeneradas. El agua tratada por las EDARs puede ser empleada para una serie de usos, siempre que se cumplan los umbrales de calidad, incrementándose de esta manera el recurso disponible. Evidentemente este incremento de recurso será función de los volúmenes de efluentes tratados y de las EDARs disponibles. En la tabla 6 se presentan los volúmenes reutilizados disponibles anuales, por sistema de explotación.

Tabla 6. Depuradoras por sistema de explotación (hm³/año),(CHJ, 2013)

Sistema de Explotación	Vol. depurado	Vol. regenerado	Vol. reutilizado total	Total consuntivo	Nº EDAR
Cenia-Maestrazgo	19,3	0,7	0,7	0,7	35
Mijares-Plana de Castellón	60,7	3,8	3,0	3,0	58
Palancia-Los Valles	9,8	3,3	2,6	2,6	13
Turia	224,8	83,8	81,8	50,2	74
Júcar	166,1	37,1	19,2	19,2	178
Serpis	35,8	0,5	0,5	0,5	47
Marina Alta	19,2	1,4	1,3	1,3	61
Marina Baja	23,6	11,5	9,6	9,6	13
Vinalopó-Alacantí	65,8	31,0	27,3	27,6	38
TOTAL	625,0	172,9	145,8	114,2	517

Como se deduce de la tabla 6, en el sistema Júcar el volumen disponible no es muy elevado (19.2 Hm³/año); siendo éste valor muy superior en el sistema de explotación del Turia.

- Las desalinizadoras. La capacidad de desalinización en toda la Demarcación Hidrográfica del Júcar es prácticamente despreciable, de hecho tan sólo hay una planta de desalinización en funcionamiento: planta de Jávea con una capacidad de producción de 9.49 Hm³/año.

- Transferencias externas, superficiales o subterráneas, entre los diferentes territorios.

3.1.5 Zonas sensibles

Según IPH serán zonas protegidas aquellas zonas que hayan sido declaradas sensibles en aplicación de las normas sobre tratamiento de las aguas residuales urbanas. En el ámbito de aplicación de la IPH, cuando ocurra lo que en el sistema Júcar, es decir que se trate de cuencas intercomunitarias, las zonas sensibles serán aquellas declaradas por el Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino mediante resolución 10 julio de 2006, de la Secretaría General para el Territorio y la Biodiversidad. En aguas de transición y costeras son las declaradas de forma oficial por las diferentes comunidades. En la figura 14 se muestra un mapa con las zonas sensibles del sistema Júcar.



Figura 14. Identificación zonas sensibles (elaboración propia con bases de datos OPH-CHJ)

3.2 Problemas ETI

La Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ) ha publicado el documento oficial con los denominados Esquemas de Temas Importantes (CHJ, 2012).

Éstos se pueden agrupar en cuatro categorías:

- Aspectos medioambientales.
- Atención a las demandas y racionalidad del uso.
- Seguridad frente a fenómenos meteorológicos extremos.
- Conocimiento y gobernanza.

Aspectos medioambientales

Como ya se ha indicado en el capítulo anterior la Directiva Marco del Agua, establece como objetivo asegurar el buen estado o el buen potencial ecológico de las masas de agua para el 2015. Las principales causas del mal estado de las aguas son: acumulación de vertidos y baja eficacia de los sistemas de depuración, acumulación de nitratos de origen agrícola, alteración morfológica de las masas de agua superficial, alteración de la morfología de la ribera, alteración de la morfología litoral, proliferación de especies invasoras.

Atención de las demandas y racionalidad del uso

Dentro de este grupo se consideran todas aquellas cuestiones que puedan afectar a la atención sostenible de las demandas y su relación con el objetivo de alcanzar el buen estado cuantitativo de las masas de agua subterránea.

Seguridad frente a fenómenos extremos

Se consideran en este grupo las cuestiones relacionadas con el riesgo de daños humanos y materiales generados por las inundaciones, con los problemas generados por las sequías y con los temporales y efecto del cambio climático en la costa, como pueden ser el deterioro de la calidad de las aguas.

Conocimiento y gobernanza

Se hace referencia a aquellos temas que denotan una ausencia de conocimiento o de herramientas de gestión para resolver problemas importantes en la Demarcación.

Concretamente se han definido las siguientes fichas de temas importantes: caudales ecológicos, requerimientos ambientales, restauración de ecosistemas fluviales, calidad de las masas de agua, atención de las demandas y racionalidad del uso, fenómenos extremos; y conocimiento-gobernanza.

A continuación se describe para el caso del sistema de explotación del Júcar los casos que se estudian dentro de cada una de las fichas:

➤ **Caudales ecológicos y requerimientos ambientales**

- Adecuación del régimen de caudales ecológicos en el río Júcar y su relación con las garantías de los usos del sistema.
- Consecución del buen potencial ecológico en l'Albufera de Valencia.
- Caudal ecológico en el estuario del Júcar.

➤ **Restauración de ecosistemas fluviales**

- Control de especies invasoras: macrófitos en los ríos Albaida, Barcheta, Verde y en el tramo bajo del río Júcar.
- Regeneración vegetal en zonas naturales y forestales en el tramo alto de los ríos Júcar y Gabriel y en el tramo medio de los ríos Serpis, Mijares y Magro.
- Restauración en tramos con presión antrópica agrícola y urbana.

➤ **Calidad masas de agua**

- Adecuación del tratamiento y mejora de la capacidad de la depuración en los municipios de Albacete, La Roda y Almansa y en los núcleos urbanos de la cuenca del río Valdemembra.
- Control de la contaminación y mejora de la calidad físico-química de las aguas y sedimentos del tramo bajo del río Júcar.

- Actuaciones de reducción de aportes de nitratos a las masas de agua subterránea con concentración significativa.
- Control de la contaminación y reducción de eutrofización en las cuencas de los ríos Albaida y Serpis.
- Presencia de productos fitosanitarios en las zonas de transición: Estany de Cullera y desembocadura del río Júcar

➤ **Atención de las demandas y racionalidad del uso**

- Mejora de la garantía y eficiencia de los riegos tradicionales de la Ribera del Júcar. En la figura 15 se muestran estos riegos.

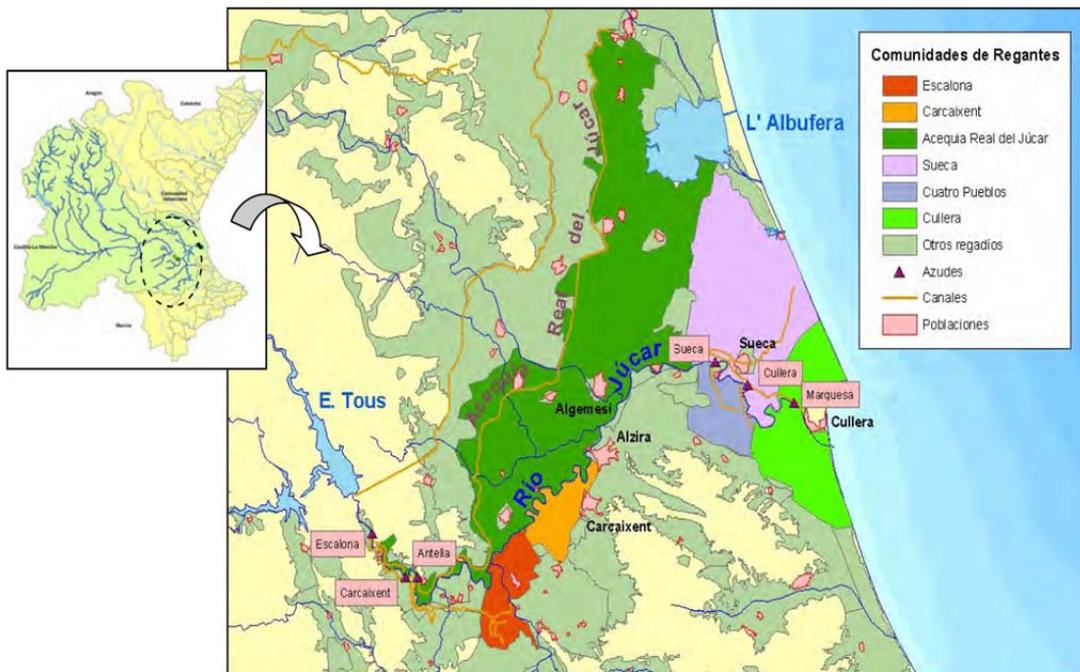


Figura 15. Riegos tradicionales sistema Júcar (CHJ, 2010)

- Explotación sostenible del acuífero de la Mancha Oriental y sus aprovechamientos. Debido al aumento de los caudales bombeados de este acuífero, en algunas zonas la relación río-acuífero se ha invertido pasando de río ganador a río perdedor. En la figura 16 se muestra la extensión del acuífero de la Mancha Oriental:



Figura 16. Situación de la masa de agua subterránea 080.129 Mancha Oriental (CHJ, 2010)

- Mejora de la garantía y calidad del agua del abastecimiento del área metropolitana de Valencia.
 - Mejora de la garantía y calidad del abastecimiento urbano en las comarcas de la Ribera del Júcar.
- **Fenómenos extremos**
- Reducción del riesgo de inundación del tramo bajo del río Júcar: comarcas de la Ribera Alta y Ribera Baja.
 - Reducción del riesgo de inundación en Albacete y sus zonas de influencia.
 - Planificación y Gestión de las situaciones de sequía en los sistemas de explotación.

➤ **Conocimiento-gobernanza**

- Principalmente consiste en normas de explotación en el sistema Júcar, análisis de requerimientos hídricos en zonas húmedas y elaboración y seguimiento del Plan Hidrológico de cuenca: acceso a la información, participación pública y coordinación entre administraciones competentes.

En el desarrollo de este trabajo de investigación, se van a tratar los temas de “atención a las demandas y racionalidad del uso” y de “caudales ecológicos”.

3.3 El marco Plan Hidrológico de cuenca y el sistema Júcar

El nuevo plan hidrológico recoge los contenidos de carácter normativo del Reglamento de Planificación Hidrológica, aprobado por el Real Decreto 907/2007 de 6 julio. También recoge los contenidos requeridos por el texto refundido de la Ley de Aguas, El reglamento de Dominio Público Hidráulico y otras normas.

A continuación se recogen algunas de las aportaciones incorporadas al plan (Estrela Monreal, 2014):

- Se proponen masas de agua compartidas
- Se han realizado ajustes en las asignaciones y reservas de recursos
- Modificación valores de caudales ecológicos y aumento del número de puntos de control
- Nuevas reservas fluviales
- Se define el potencial ecológico de la Albufera
- Programa de medidas para alcanzar objetivos medioambientales y para la seguridad y garantía de los suministros

En referencia a las asignaciones de recursos hídricos, el plan contempla los siguientes valores:

Tabla 7. Asignación Plan Hidrológico Júcar (CHJ, 2013)

Usuario	Asignación (Hm ³ /año)
Ribera Alta	248.1
Ribera Baja	276
Mancha Orienta	460
Canal Júcar-Turia	95
Abastecimiento Valencia	126
Abastecimiento Albacete	24
Abastecimiento Sagunto	17.1
Abastecimiento Ribera	10

Algunos de los temas relevantes mencionados son:

- En referencia al acuífero de la Mancha Oriental, se establece que con el fin de recuperar los niveles piezométricos del acuífero, que la asignación subterránea del Plan de 1998 de 320 Hm³/año, deberá de ir reduciéndose paulatinamente hasta 260 Hm³/año en el año 2027. De hecho, según los modelos matemáticos que empela la Confederación Hidrográfica del Júcar, con extracciones inferiores a los 300 Hm³/año se puede ver en algunos puntos de control como el acuífero comienza a recuperarse.
- El trasvase del sistema de explotación Júcar al sistema de explotación Vinalopó. Concretamente se asigna un volumen máximo anual de 80 Hm³/año. (12 Hm³/año procederán de recursos superficiales no asignados generados en afluentes del río Júcar (aguas debajo de Tous)).
- Se establecen unos requerimientos hídricos mínimos a la Albufera de 167 Hm³/año. Estos requerimientos hacen referencia a un volumen mínimo en el lago para mantener los hábitats existentes en el lago.
- Se ha realizado una evaluación del estado de las masas de agua, tanto superficiales como subterráneas, a la vez que se ha definido un programa de medidas para aquellas masas que no cumplan con los objetivos ambientales.

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍAS Y HERRAMIENTAS AUXILIARES

En este capítulo se va a realizar una descripción de las metodologías y herramientas desarrolladas, que permiten llevar a cabo la gestión de un sistema de recursos hídricos bajo la óptica de la economía, y la evaluación del efecto de la aplicación de diversos instrumentos económicos, como son las políticas de precios y los mercados del agua, a la gestión. Así mismo se va a realizar una descripción de las herramientas base que se han empleado para la creación de las nuevas herramientas desarrolladas: SIMGAMS y OPTIGAMS.

4.1 Herramientas que permiten diseñar y simular el efecto de Instrumentos económicos en la gestión de sistemas de recursos hídricos

La idea fundamental de esta tesina es desarrollar unas herramientas que permitan analizar el efecto de la aplicación de instrumentos económicos, políticas de precios y mercados del agua, a la gestión de sistemas de recursos hídricos. Para el desarrollo de estos programas se han empleado las siguientes herramientas base: GAMS (Brooke et al., 1998), HYDROPLATFORM (Harou et al., 2010) y AQUATOOL (Andreu et al., 1996).

En la figura 17 se muestra el esquema de las nuevas herramientas desarrolladas. Como puede observarse se han desarrollado dos herramientas que permiten gestionar los sistemas de recursos hídricos: SIMGAMS (enfoque de simulación) que gestiona el recurso disponible basándose en prioridades entre los usuarios, diferentes objetivos (volúmenes de embalse, caudales ecológicos, etc.) y las reglas de operación del sistema; y OPTIGAMS (enfoque de optimización) que gestiona el recurso disponible con criterios económicos. Ambas herramientas permiten obtener tanto resultados de gestión del agua (volúmenes, suministros, etc.) como económicos (costes de escasez y CMOR). En el capítulo 5, se realiza una descripción detallada de ambas herramientas.

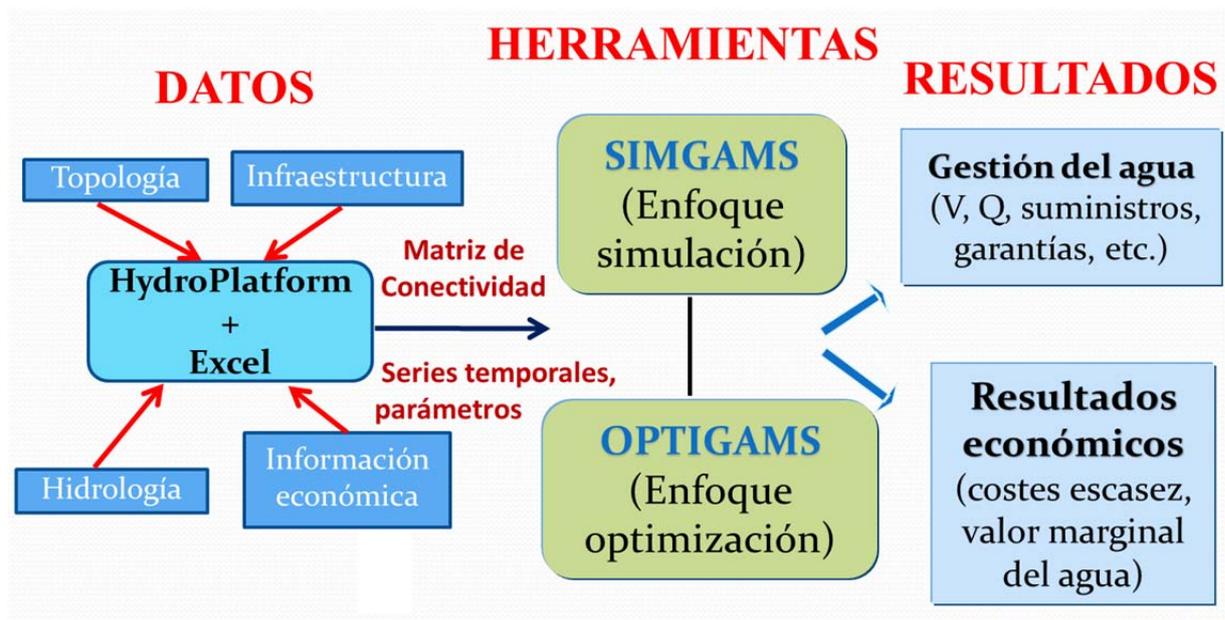


Figura 17. Herramientas SIMGAMS y OPTIGAMS

A partir de los valores del CMOR y mediante la metodología desarrollada en Pulido-Velázquez et al., 2013, pueden calcularse políticas de precios del agua. Permittiendo SIMGAMS simular el efecto de las políticas de precios desarrolladas en el sistema (variación en el coste de escasez). Finalmente con OPTIGAMS, se simulan mercados del agua perfectamente competitivos. En el apartado 4.2 se van a describir las metodologías seguidas para el diseño y simulación de políticas de precios y mercados del agua.

4.2 Diseño y simulación de instrumentos económicos

4.2.1 Coste marginal de oportunidad del recurso

Se ha calculado el coste marginal de oportunidad del recurso (CMOR en adelante) con un doble enfoque: simulación y optimización.

Para calcular el **CMOR** con **enfoque de simulación** se emplea la siguiente metodología:

- Se introduce una carga extra, generalmente unitaria, en un nudo del sistema donde pudiera almacenarse esa cantidad de agua
- Se vuelve a simular el modelo correspondiente con la carga extra aplicada el primer mes del período temporal de estudio
- Se calcula el valor del CMOR mediante la siguiente expresión:

$$CMOR = \frac{Coste_{base} - Coste_{modificado}}{Carga\ extra}$$

Siendo "Coste_{base}" el coste de escasez total del sistema sin haber aplicado carga extra alguna y "Coste_{modificado}" es el coste de escasez total del sistema habiendo aplicado una carga extra en un nudo del sistema en un período determinado.

- Se vuelve a simular el modelo, sólo que ahora la carga extra se supone aplicada en el segundo mes (véase figura 18); y de nuevo se calcula el CMOR con la ecuación descrita anteriormente

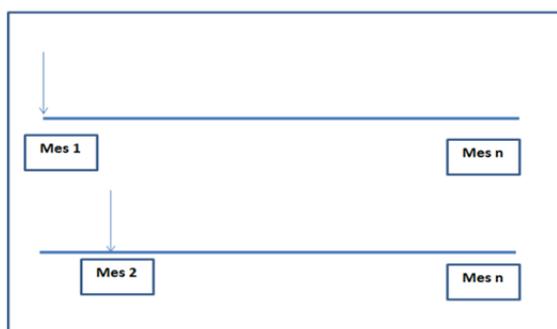


Figura 18. Simulación carga extra para cálculo CMOR

- En definitiva, se establece un bucle que desplaza la carga extra un mes en cada paso, calculándose para cada paso el valor del CMOR.

Para calcular el CMOR con el enfoque de optimización, se emplea el concepto de valor o precio sombra del modelo de optimización. Los valores óptimos de las variables del problema dual (precios sombra), reflejan el cambio en el valor óptimo de la función objetivo como consecuencia de un cambio marginal unitario del término independiente de la restricción que corresponde a la variable dual. Si se tiene en cuenta que la función objetivo es el valor agregado del coste de escasez de los diferentes usuarios del sistema, los precios sombra de las restricciones de balance en los nudos del sistema representan la disminución del coste de escasez por incremento unitario del recurso en ese nudo y en ese instante; es decir representa el Coste Marginal de Oportunidad del Recurso (Pulido-Velazquez, 2003,2006a).

4.2.2 Diseño de políticas de precios a partir del CMOR

Se va a describir la metodología desarrollada en Pulido-Velazquez et al., 2013 para la obtención de Políticas de Precios en función del volumen de los embalses. (véase figura 19). Es decir, lo que se propone es una política de precios basada en la escasez del agua.

Primeramente se han de graficar los valores de CMOR asociados a cada volumen de embalse durante el período de estudio. Lógicamente cuando los volúmenes embalsados sean menores, el valor del CMOR es mayor (estaríamos hablando de situaciones de escasez de agua); ocurriendo el efecto contrario cuando los volúmenes embalsados se encuentran próximos a la capacidad máxima de los embalses. A continuación, se van a definir diferentes rangos de volúmenes (físicamente posibles), y se asociará a cada rango todos los CMORs correspondientes. Finalmente, se tomarán estadísticos (valor medio, mínimo, etc) de los valores de CMORs asociados a cada rango de volúmenes, obteniéndose de esta manera una política de precios escalonados en función del volumen de agua disponible en los embalses.

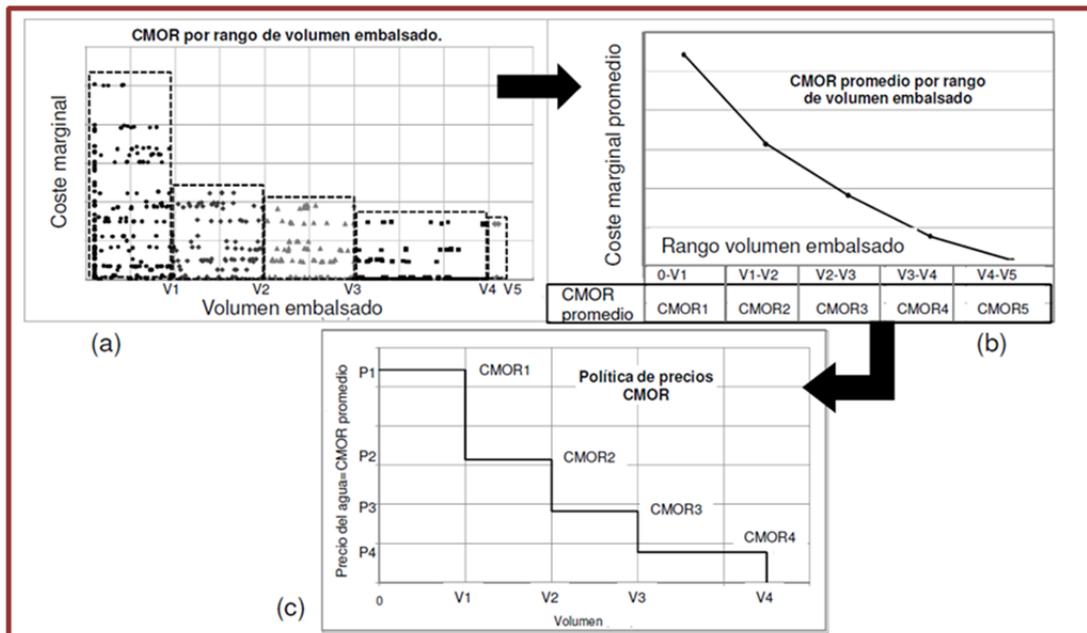


Figura 19. CMOR en función del volumen embalsado (fuente: Álvarez-Mendiola, 2010)

Por otra parte se ha desarrollado un módulo que, con el enfoque de simulación (SIMGAMS), permite modificar la demanda máxima de cada uno de los usuarios en función del precio del agua; y simular el efecto de estas variaciones en el coste total del sistema. Para ello, se van a emplear las curvas de demanda (véase figura 20); en este caso el dato es el precio (eje de ordenadas), que a su vez dependerá del volumen embalsado en cada instante, y la incógnita es el caudal demandado (eje de abscisas) por cada uno de los usuarios.

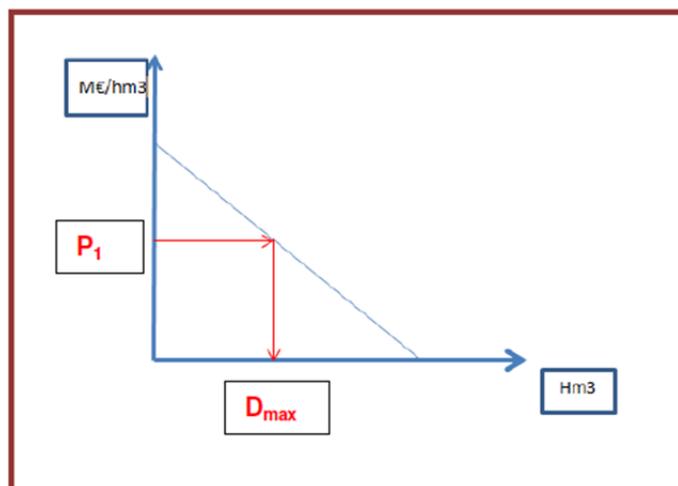


Figura 20. Variación de la demanda con el precio

4.2.3 Mercados del agua

Los mercados del agua se basan en el intercambio voluntario de bienes o servicios por un precio que ha sido acordado por ambas partes. Según la Economía, en un mercado perfectamente competitivo se alcanzaría la máxima eficiencia económica en la asignación del recurso (óptimo de Pareto). Sin embargo, es cierto que en el caso del agua, factores como las importantes externalidades que se generan en una cuenca, la existencia de bienes públicos o los altos costes de transacción nos alejan de esas condiciones ideales.

En este caso, se ha planteado como hipótesis de trabajo un mercado de competencia perfecta sin transferencias externas. El beneficio que cada uno de los usuarios del sistema obtiene por la adquisición de derechos adicionales de agua se obtiene a partir de las curvas de demanda. Es decir, se emplea la herramienta OPTIGAMS, obteniéndose en vez de los beneficios por derechos de agua, los costes de escasez asociados.

4.3 Herramientas auxiliares

Como ya se ha indicado para el desarrollo de SIMGAMS y OPTIGAMS se han empleado los programas GAMS, HYDROPLATFORM y AQUATOOL (módulo SIMGES).

La herramienta GAMS se ha empleado para el desarrollo de los códigos genéricos de las nuevas herramientas (SIMGAMS y OPTIGAMS). Para caracterizar el sistema de explotación (topología, hidrología, etc.) se han empleado las herramientas HYDROPLATFORM y EXCEL. Para la validación de la herramienta SIMGAMS se ha empleado el módulo SIMGES de AQUATOOL.

4.3.1 Programa GAMS

El programa GAMS (General Algebraic Modeling System) se engloba dentro de los lenguajes algebraicos de modelado, desarrollados para el análisis y la resolución de problemas de optimización. Fue desarrollado por Brooke et al. en el año 1998 (www.GAMS.com).

Cabe destacar su potencia y eficiencia en la resolución de problemas de optimización no lineales, debido a los solvers que tiene implementados (principalmente MINOS y CONOPT) y también por las características del lenguaje de programación. Las últimas versiones de estos solvers son CONOPT3 versión 3.15G (ARKI, 2012) y MINOS 5.51 (Murtagh, Sanders y Wright, 2004).

Entre sus características destacan:

- El programa permite pasar de la resolución de un problema de poca entidad (pocas variables y restricciones) a un problema muy complejo tan sólo con unas pequeñas variaciones del código. Por ejemplo, cuando se diseña un modelo, en general, se suele probar con un caso sintético muy sencillo, pues bien para pasar de la resolución de este caso sintético a un caso real complejo como es el sistema de explotación del Júcar, puede que no haya que cambiar ninguna ecuación si el programador ha desarrollado eficientemente el código.
- Permite leer los datos de entrada de ficheros externos, como puedan ser hojas de Excel o ficheros “txt”, facilitando de esta manera la introducción de los mismos.
- Es un programa muy extendido, por ello se dispone de una extensa literatura, páginas webs, foros,.. en los que poder consultar dudas o implementar el aprendizaje del mismo.
- Los comandos que se emplean para el desarrollo del código son similares a los de otros lenguajes, por ejemplo la opción “loop” que permite realizar un bucle, la opción “sum” que equivale a “for”, hecho que acelera el proceso de aprendizaje del mismo.

A continuación se detalla cómo se estructura un modelo, de modo general, en GAMS:

- **Sets.** Se definen todos los índices de las variables del modelo, como pueda ser el número de meses a analizar.

- **Parámetros y Matrices.** Aportaciones, tasas de evaporación,...Se pueden escribir ad-hoc en GAMS o que exportar de hojas de Microsoft Excel (mediante la función LIBINCLUDE)
- **Variables.** Definición de todas las variables del modelo: positivas, binarias,...
- **Ecuaciones:** definición y desarrollo de ecuaciones. Tanto ecuaciones de balance hídrico como restricciones del modelo:
- **Función Objetivo.** Se escribe la función que GAMS debe minimizar o maximizar, mediante la variedad de solvers que el programa tiene implementados; la elección de éste dependerá del tipo de programación empleada.

En resumen, GAMS es una herramienta muy potente y versátil para la resolución de problemas de optimización y simulación. Siendo de gran utilidad para la toma de decisiones en la gestión de los recursos de un sistema hídrico.

4.3.2 Programa HYDROPLATFORM

HYDROPLATFORM (Harou et al., 2010) es una plataforma que sirve como soporte a los modelos de gestión del agua como puedan ser los SAD (Sistemas de Apoyo a la Decisión).

Dentro de los objetivos del modelo cabe destacar el de permitir al usuario desarrollar de manera eficiente las matrices que representan el esquema de la red o topología de una cuenca o sistema de recursos hídricos; y gestionar el almacenamiento y exportación de datos para el modelo de simulación u optimización en GAMS (véase figura 21).

HYDROPLATFORM es un programa en desarrollo, y su primera fase (totalmente completada, aunque en versión de prueba aún) se basa en almacenar, mostrar y exportar en diferentes formatos todos los datos del modelo desarrollado, disponiendo de una interfaz gráfica muy amigable. Para poder representar una red hidrográfica básicamente se requieren nudos y tramos de río y/o canales entre éstos; por ello HYDROPLATFORM permite definir diferentes nodos y links entre éstos con la función Object Type Editor,

sobre un mapa que puede ser un ráster georreferenciado, en forma vectorial o no georreferenciado.

El tipo de datos que puede asociarse tanto a los nodos como a los links puede ser: parámetros, parámetros de variación estacional, series temporales y tablas de cualquier dimensión. A cada tipo de nodo se le puede asociar la información que uno desee, por ejemplo si es un embalse se puede requerir la tasa de evaporación, volumen inicial,... Toda la información que se introduce en el modelo es almacenada en una base de datos. Cuando se emplea la función de exportar también se genera un fichero con todos los links que existen en el sistema, pudiéndose representar de esta manera cualquier red de un sistema de explotación por muy compleja que sea.

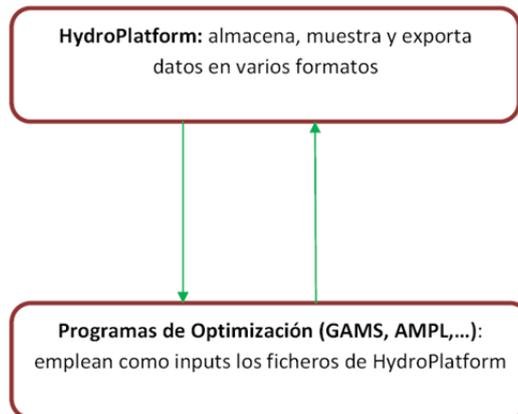


Figura 21. HYDROPLATFORM-GAMS

A continuación se muestra la interfaz del programa HYDROPLATFORM:

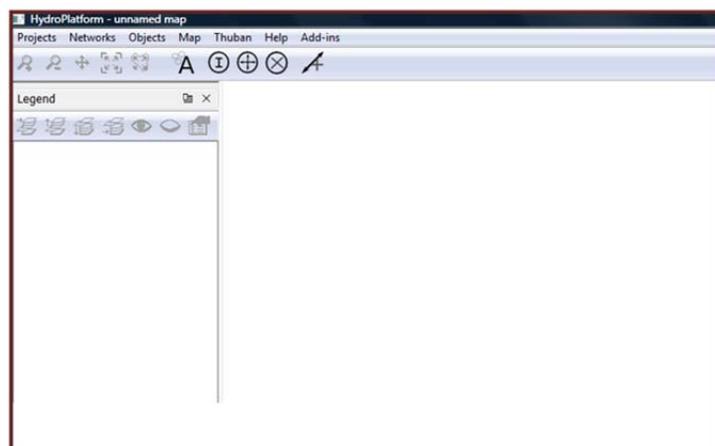


Figura 22. Interfaz de HYDROPLATFORM

HYDROPLATFORM se organiza de la siguiente manera: **proyectos, redes de trabajo, escenarios, tipos de objetos y objetos.**

Un **proyecto** tiene las siguientes características: tiempo horizonte de modelación, escala temporal de trabajo (mensual, diaria,...), unidades, proyección geográfica y set de tipos de objetos.

Una **red de trabajo** es un conjunto de nudos unidos mediante links. Un proyecto puede contener más de una red de trabajo.

Un **escenario** está asociado a una red de trabajo, y se compone de un conjunto de parámetros, tablas y series temporales asociadas a la red de trabajo. Una red de trabajo puede tener uno o más escenarios. Cuando HYDROPLATFORM exporta datos lo hace de un determinado escenario.

Los diferentes **tipos de objetos** hacen referencia por ejemplo a nudos que pueden almacenar agua (embalses), nudos genéricos que conectan dos masas de agua,...

Dentro de cada tipo de objeto, se encuentran los elementos pertenecientes a esa categoría (los objetos); por ejemplo dentro de los nudos que pueden almacenar agua serían los diferentes embalses de la cuenca.

A continuación se muestra una red de trabajo a modo de ejemplo:

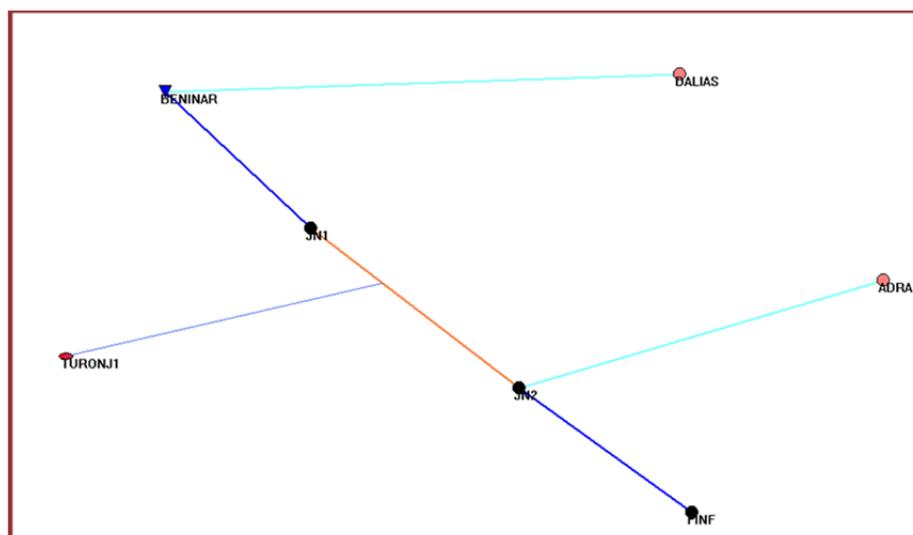


Figura 23. Sistema Adra simplificado con HYDROPLATFORM

Como puede observarse se han definido los siguientes tipos de objeto:

- Tipo **embalse**: en concreto se ha definido el embalse de Beninar.
- Tipo **demanda**: en concreto se han definido Dalias y Adra.
- Tipo **acuífero**: en concreto se ha definido el acuífero de Turón.
- Link tipo **tramo de río**: Beninar-jn1, jn1-jn2, jn2-Finf.
- Link tipo **toma a demanda**: Beninar-Dalias y Jn2-Adra.

Puede consultarse un manual de instrucciones de las funciones básicas de HYDROPLATFORM, realizado por el autor del presente trabajo en el Anexo I.

4.3.3 SAD AQUATOOL

El SAD AQUATOOL ha sido desarrollado por el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia. Es un programa que permite tanto la simulación (módulo SIMGES), como la optimización (módulo OPTIGES) para la gestión de cualquier sistema de recursos hídricos a escala de cuenca. También dispone de un módulo de evaluación económica (ECOWIN), que a partir de los resultados de simulación de SIMGES, permite evaluar económicamente la gestión desarrollada.

4.3.3.1 AQUATOOL DMA

En el presente proyecto se ha empleado la versión de AQUATOOL que se denomina AQUATOOLDMA. Esta versión permite tanto la simulación de la gestión a escala de cuenca como la simulación de la calidad de las aguas. Los siguientes programas son incluidos en esta versión:

- SIMGES: simulación de la gestión de cuencas (Andreu et al., 2007)
- GESCAL: simulación de la calidad de aguas (Paredes et al., 2007)
- Grafdma: sirve para el tratamiento de resultados gráficos de SIMGES y Gescal.
- Ges2dma: actualizar esquemas desarrollados en versiones anteriores a AQUATOOL DMA.

4.3.3.2 Módulo SIMGES

Mediante el módulo SIMGES se pueden modelar todos los elementos representativos de un sistema de recursos hídricos: embalses, acuíferos, demandas consuntivas, demandas no consuntivas y distintos tipos de conducciones. Para gestionar los recursos disponibles efectúa la simulación a escala mensual, repartiéndolos con unas prioridades entre las diferentes demandas y/o reglas de gestión que el usuario puede establecer ad-hoc. En el caso de los subsistemas superficiales el flujo se calcula por continuidad o balance, mientras que en el caso de los subsistemas subterráneos el flujo se calcula con modelos de celda uni o pluricelulares. También se evalúan las pérdidas por evaporación y filtración, así como las relaciones río-acuífero. SIMGES emplea un algoritmo de optimización de redes de flujo conservativo.

A continuación se muestra un ejemplo de un sistema de recursos hídricos modelizado con SIMGES:

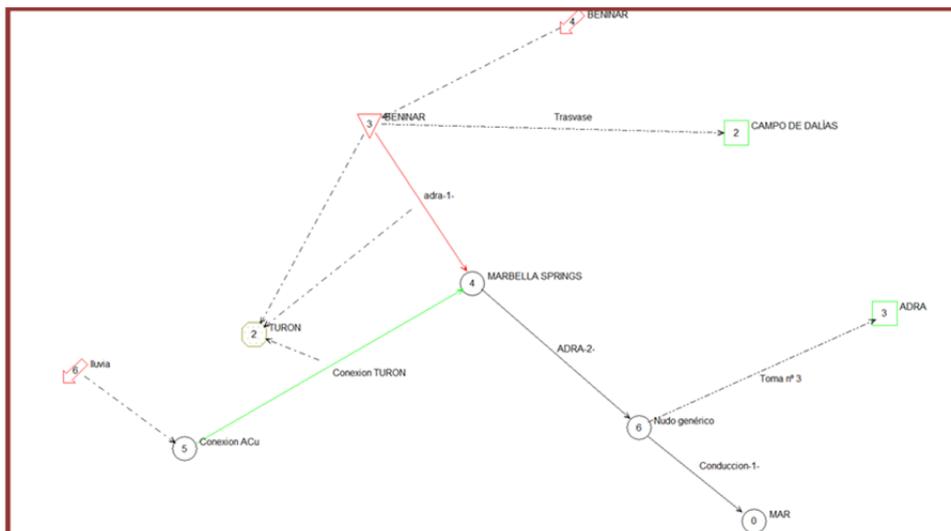


Figura 24. Sistema Adra con SIMGES

La simulación se realiza a escala mensual mediante un algoritmo de optimización de redes de flujo conservativo.

CAPÍTULO 5. HERRAMIENTAS SIMGAMS Y OPTIGAMS

En este capítulo se describen con detalle las herramientas SIMGAMS y OPTIGAMS, desarrolladas con GAMS y HYDROPLATFORM.

5.1 Configuración general del SAD

Para el desarrollo de un Soporte de Ayuda a la Decisión (véanse figuras 25 y 32), para la gestión eficiente de un sistema de recursos hídricos, se hace necesaria una fase previa de obtención de datos del sistema a analizar. El siguiente paso consiste en desarrollar las ecuaciones que representen los fenómenos físicos que se dan en el sistema como evaporación, filtración, etc.; desarrollo de ecuaciones de balances hídricos, modelización de acuíferos tanto unicelulares como pluricelulares (uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas), restricciones del sistema como caudales máximos y/o mínimos que deben darse en un tramo determinado del río y ecuaciones de reglas de operación que el usuario pueda decidir.

El último paso para configurar el SAD consiste en definir la función objetivo del modelo, pudiendo ser una función a maximizar o a minimizar. Cabe

destacar que cada uno de los elementos que constituyen el sistema hídrico contribuirá de una manera distinta a la función objetivo del SAD.

Finalmente, en función del tipo de programación empleada se debe escoger un solver u otro. Es decir, se debe de aplicar un algoritmo de optimización para que todos los meses el programa decida la gestión de los recursos del sistema en función de las prioridades y/o reglas de operación establecidas.

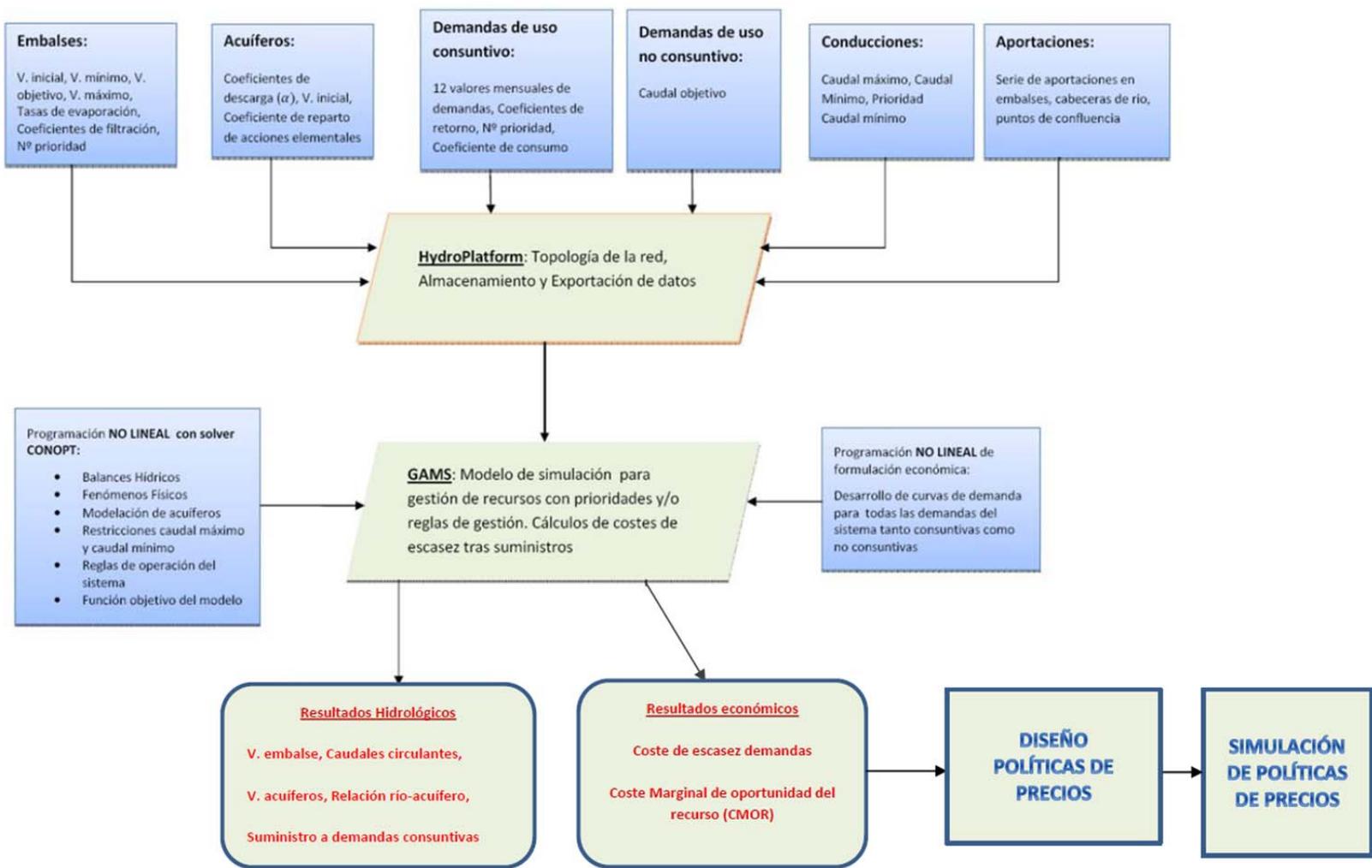


Figura 25. Esquema modelo de simulación SIMGAMS

5.2 Herramienta SIMGAMS.

Todo sistema de recursos hídricos se puede modelizar por una red compuesta por una serie de nudos y una serie de conducciones. Los nudos pueden tener capacidad de almacenamiento (embalses) o no tenerla (como la confluencia de un río con un tramo de afluente). Las conducciones pueden ser tramos de río o conducciones artificiales como los canales de riego o para ejecutar trasvases.

La hidrología se introduce en el modelo a través de las aportaciones, series históricas o sintéticas que van vinculadas a un nudo de la red. Estas son las aportaciones de la subcuenca de aguas arriba del punto de aplicación de ésta.

En este apartado se van a definir tanto los elementos del sistema a caracterizar como la formulación que se ha de programar para el desarrollo del SAD.

5.2.1 Caracterización de los elementos de un sistema de recursos hídricos

Para poder analizar un sistema de recursos hídricos, se han de caracterizar los siguientes elementos:

- Elementos que permiten almacenar agua: embalses y acuíferos.
- Elementos de demanda consuntiva: demanda urbana, demanda agrícola y demandas industriales.
- Elementos de demanda no consuntiva: centrales hidroeléctricas.
- Elementos de transporte de flujo: conducciones, canales,...

• Caracterización de embalses

De acuerdo con el procedimiento seguido en el módulo SIMGES de AQUATOOL, los embalses se van a discretizar en diferentes intervalos según un volumen inicial, mínimo, objetivo y máximo; tal y como se muestra en la siguiente figura:

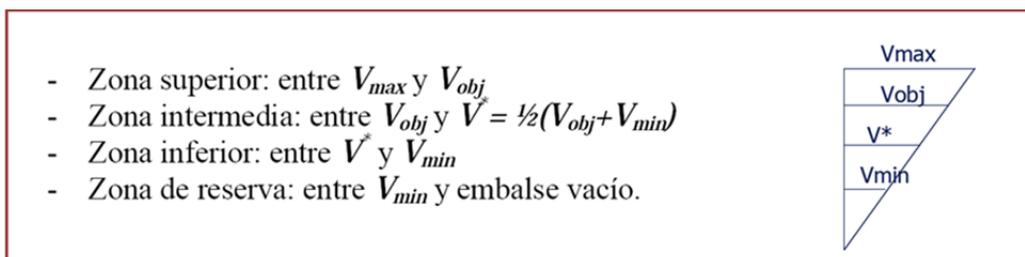


Figura 26. Gestión de embalses (Fuente: Andreu et al., 2007)

El cálculo del área libre de embalse es necesario para evaluar las pérdidas por evaporación, de acuerdo con la fórmula:

$$P_{\text{evaporación}} = \frac{(Area_t + Area_{t-1})}{2} \cdot e \cdot 10^{-5}$$

siendo “e” la tasa media de evaporación mensual, en mm

Para poder caracterizar el fenómeno físico de la filtración se han de definir tres coeficientes A, B y C para el empleo de la siguiente formulación:

$$P_{\text{filtración}} = A + B \cdot Volumen^C$$

- **Caracterización de acuíferos**

Primeramente se ha de decidir si se va a modelar como un acuífero unicelular (véase figura 27) o como pluricelular (véase figura 28). Se habla de acuífero pluricelular de “n” celdas cuando el comportamiento del acuífero se modela mediante “n” depósitos o embalses lineales (con caudal de descarga linealmente proporcional al volumen almacenado por encima del umbral de salida).

Para cada una de las celdas se ha de definir el volumen inicial “ V_o ”, el coeficiente de descarga alfa “ α ” y el coeficiente beta “ β ” de reparto de las acciones elementales sobre cada una de las celdas o depósitos virtuales.

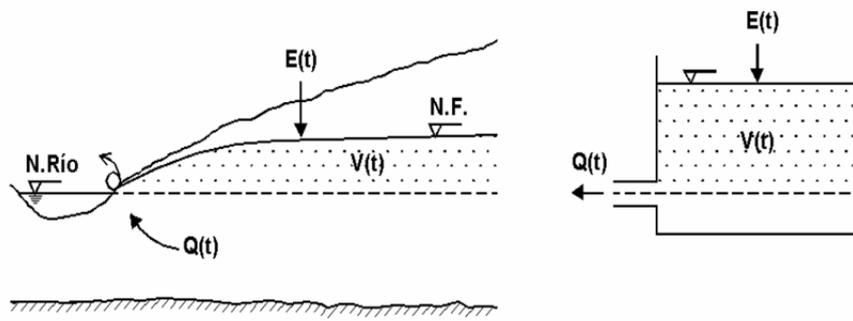


Figura 27. Modelo Unicelular acuíferos (Fuente: Pulido-Velázquez, 2003)

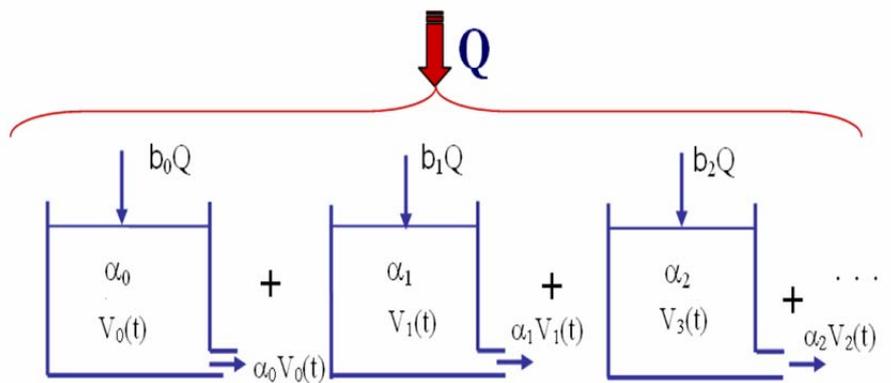


Figura 28. Modelo Pluricelular acuíferos (Fuente: Pulido-Velázquez, 2003)

- **Caracterización de demandas consuntivas**

Tanto las demandas urbanas como las demandas agrícolas se caracterizarán como demandas consuntivas. Se definirá el coeficiente de consumo que indica el porcentaje del agua suministrado que es consumido por la demanda y que por ello no vuelve al sistema. Para caracterizar las demandas se definirá una serie temporal de 12 valores.

- **Caracterización de demandas no consuntivas**

Como demandas no consuntivas se caracterizarán las centrales hidroeléctricas, que derivan un caudal “q” del río que tras ser turbinado (y generación hidroeléctrica) se devuelve al mismo. Se define el caudal objetivo de turbinación, como el máximo caudal que admite la central.

- **Caracterización de elementos de transporte de flujo: conducciones, canales**

Se va a definir caudales máximos y caudales mínimos de circulación por cada tramo. Los caudales máximos responden a la capacidad física de la infraestructura de transporte o cauces, mientras que los caudales mínimos generalmente vienen ligados a objetivos de caudal ecológico a mantener.

5.2.2 Formulación hidrológica del SAD

La formulación matemática del modelo debe de ser capaz de reproducir todos los fenómenos físicos, como evaporación de los embalses, que se producen y todos los balances hídricos del sistema.

Se van a definir balances hídricos del sistema en nudos tipo embalse, en nudos tipo acuífero, en nudos de confluencia de varias masas de agua, en nudos que materializan la relación río-acuífero, nudos de posicionamiento de las tomas a las demandas tanto consuntivas como no consuntivas y nudos que materialicen los retornos del sistema. Para incluir la hidrología se generará el vector de aportaciones en los diferentes puntos del sistema, siendo éste un input para nuestro modelo.

A continuación se van a describir todas las tipologías de ecuaciones de balance:

- Ecuación de balance para **un embalse con restricción de capacidad:**

$$V_t - V_{t-1} = Q_{e,t} - Q_{s,t} - P_{e,t} - P_{f,t} + Apo_t$$

siendo " V_t " el volumen en el tiempo " t ", " V_{t-1} " el volumen en el tiempo " $t-1$ ", " $Q_{e,t}$ " el caudal de entrada de las masas de agua que están conectadas con el embalse en el tiempo " t ", " $Q_{f,t}$ " el caudal de salida de las masas de agua que están conectadas con el embalse en el tiempo " t ", " $P_{e,t}$ " son las pérdidas por evaporación en el tiempo t , " $P_{f,t}$ " son las pérdidas por filtración en el tiempo t , " Apo_t " son las aportaciones del sistema en el embalse.

- Ecuación de balance para **un acuífero**:

$$V_{t_i} = V_{t-1_i} e^{-\alpha_i \cdot t} + \sum_j \frac{\beta_{t,j} \cdot R_{t,j}}{\alpha_i} \cdot (1 - e^{-\alpha_i \cdot t})$$

siendo " V_{t-1_i} " el volumen de la celda "i" del acuífero en el tiempo "t-1", " V_{t_i} " el volumen de la celda "i" del acuífero en el tiempo "t", " α_i " es el coeficiente de descarga de la celda "i" y " $R_{t,j}$ " efecto de cada una de las acciones elementales, " β_i " el coeficiente de repartode la acción elemental "j" sobre la celda "i".

Para calcular la recarga neta se empleará la siguiente expresión:

$$R_{t,j} = R_{natural_{t,j}} + R_{artificial_{t,j}} - Bombeo_{t,j}$$

siendo " $R_{natural_t}$ " es la recarga natural del sistema, " $R_{artificial_t}$ " es la recarga artificial del sistema y " $Bombeo_t$ " es el bombeo del acuífero para satisfacer una demanda.

- Ecuación de cálculo de la **relación río-acuífero**:

Se obtiene por balance en cada celda (depósito virtual)

$$Q_t = V_{t-1} - V_t + R_t$$

siendo " V_t " el volumen en el acuífero en el tiempo "t", " V_{t-1} " el volumen en el tiempo "t-1", " Q_t " el caudal de la relación río-acuífero, pudiendo ser positivo o negativo, y " R_t " la recarga neta al acuífero. En caso de modelo pluricelular, se aplica la misma ecuación a cada depósito.

- Ecuación de balance para **un nudo genérico** del sistema con posible interacción del acuífero (relación río-acuífero).

$$Q_e - Q_s - C_{neto} \cdot Suministro_t + Q_{acuifero} + DI + Apo_t = 0$$

siendo " Q_e " el caudal de entrada de las masas de agua que están conectadas con el nudo, " Q_f " el caudal de salida de las masas de agua que están conectadas con el nudo " Apo_t " son las aportaciones del sistema en el embalse, " Q_{acui} " el caudal de la relación río-acuífero (téngase en cuenta que

este caudal puede resultar positivo o negativo, es decir que puede ser que el acuífero aporte agua al río o que el acuífero extraiga agua del río), “ DI ” son las detracciones imposibles del acuífero,” C_{neto} ” representa el porcentaje del agua suministrada al nudo que es consumida por el mismo,” $Suministro_t$ ” es la suma de caudales entrantes al nudo.

Cabe destacar el término de las detracciones imposibles, ya que el acuífero puede aportar un caudal al río o extraerlo del mismo. En el caso de las detracciones de caudal puede ocurrir que el río no disponga de caudal suficiente para satisfacer el caudal negativo de relación río-acuífero obtenido de la ecuación de simulación del acuífero; matemáticamente se ha de corregir dicha deficiencia con el término de las detracciones imposibles. Físicamente lo que sucede es que el acuífero no recibe todo el caudal del río que debería según la relación río-acuífero, por ello se ha de corregir el volumen con la siguiente expresión:

$$V_{t_i} = V_{t_i} - DI$$

En caso de tratarse de un acuífero pluricelular, dicha corrección se ha de realizar en la celda rápida que es la de mayor valor de alfa “ α ”.

➤ Ecuación de balance de un **nudo con demanda consuntiva**

$$Q_e - Q_s - C_{neto} \cdot Delivery_t + Q_{bombeo_t} = 0$$

Siendo “ Q_e ” el caudal de entrada de las masas de agua que están conectadas con el nudo, “ Q_s ” el caudal de salida de las masas de agua que están conectadas con el nudo,” C_{neto} ” representa el porcentaje de agua suministrada a la demanda que es consumida por ésta y “ Q_{bombeo} ” es el caudal que se bombea del acuífero para satisfacer una demanda.

5.2.3 Función objetivo

Una vez que se han definido todas las ecuaciones requeridas para modelizar el comportamiento del sistema, hay que definir la función objetivo del sistema.

Es decir, se trata de definir una función a maximizar o minimizar (según sea un problema de maximizar beneficios o de minimizar costes) mediante el algoritmo de optimización; en este caso se trata de un problema de minimizar costes.

Como ya se ha comentado previamente, la función objetivo de SIMGAMS es análoga a la del módulo SIMGES del programa AQUATOOL, para poder realizar el proceso de validación. Toda la formulación de la contribución de cada elemento a la función objetivo, descrita a continuación está recogida en (Andreu et al., 2007).

1. Contribución de los embalses a la función objetivo

Para la gestión de un elemento tipo embalse, se divide éste en cuatro zonas como puede observarse en la figura adjunta:

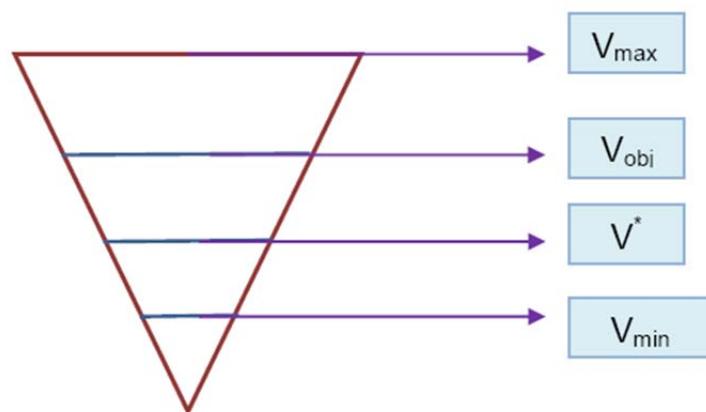


Figura 29. Zonificación de los embalses para la gestión

Las cuatro zonas son: zona de reserva, zona inferior, zona intermedia y la zona superior. La zona de reserva se define entre cero y el volumen mínimo, la zona inferior entre el volumen mínimo y el volumen asterisco, la zona intermedia entre el volumen asterisco y el volumen objetivo; y la zona superior entre el volumen objetivo y el volumen máximo.

A su vez cada uno de los embalses lleva asociado un número de prioridad.

A cada una de estas zonas se le asociará un coste distinto:

$$C_{reserva} = -1700, C_{inferior} = -1100, C_{intermedia} = -1000 \text{ y } C_{superior} = -700$$

La zonificación del embalse y el número de prioridad de éste va a generar el siguiente modo de gestión: primeramente se producirán las sueltas de la zona superior de cada uno de los embalses en orden de prioridad, mientras quede agua en una zona superior de cualquiera de los embalses no se producirán sueltas de una zona inferior de ninguno de los embalses sea cual sea su prioridad.

Finalmente, la expresión matemática de la función objetivo de un embalse es:

$$F.O. = \sum_{i=1}^{nemb} \left(\sum_{j=1}^4 V_{i,j} \cdot CE_{i,j} \right)$$

Siendo " $V_{i,j}$ " el volumen de cada una de las zonas para cada uno de los embalses y " $CE_{i,j}$ " es el coste ficticio asociado a la zona "j" del embalse "i".

2. Contribución de las conducciones de tipo 1 a la función objetivo

Para definir la función objetivo de las conducciones tipo1 se emplea el concepto de caudal ecológico. Se define como tal el caudal mínimo necesario para que las especies acuáticas puedan desarrollarse de una manera óptima. Se va a emplear el concepto de déficit sobre dicho caudal ecológico. La expresión matemática es:

$$F.O. = \sum_{i=1}^{ntramos} (D_i \cdot CD_i + (Q - Q_{eco}) \cdot CQ_i)$$

$$CD_i = KD - NP_i$$

siendo " D_i " el déficit sobre el caudal ecológico, " CD_i " es el coste ficticio debido al déficit de caudal ecológico, " Q " es el caudal circulante, " Q_{eco} " es el caudal ecológico, " CQ_i " es el coste ficticio asociado al caudal circulante, " KD " es una constante de valor 2000 y " NP_i " es el número de prioridad del caudal ecológico.

3. Contribución de las conducciones de tipo 3 a la función objetivo

Para definir la función objetivo de las conducciones tipo 3 se emplea el concepto de caudal ecológico. Se define como tal el caudal mínimo necesario para que las especies acuáticas puedan desarrollarse de una manera óptima. Se va a emplear el concepto de déficit sobre dicho caudal ecológico. La expresión matemática es:

$$F.O. = \sum_{i=1}^{n_{tramos}} (D_i \cdot CD_i + 1)$$
$$CD_i = KD - NP_i$$

Siendo " D_i " el déficit sobre el caudal ecológico, " CD_i " es el coste ficticio debido al déficit de caudal ecológico, " Q " es el caudal circulante, " Q_{eco} " es el caudal ecológico, " KD " es una constante de valor 2000 y " NP_i " es el número de prioridad del caudal ecológico.

4. Contribución de las demandas de uso consuntivo a la f. o.

Para las demandas de uso consuntivo se empleará la siguiente expresión matemática:

$$F.O. = \sum_{i=1}^{ndc} \left(D_i \cdot CK + \sum_{t=1}^{nto} SN_{ti} \cdot CT_{ti}' \right)$$

$$CT_{ti}' = -CTC + (NP_{ti} - 1) \cdot CDC + 1$$

Siendo " ndc " el número de demandas consuntivas, " nto " el número de tomas que satisface la demanda, " D_i " el déficit sobre el caudal ecológico, " CTC " es una constante que vale 750, " CDC " es una constante que vale 5 y " NP_i " es el número de prioridad de la demanda.

5. Contribución de las demandas de uso no consuntivo a la función objetivo

Para las demandas de uso consuntivo se empleará la siguiente expresión matemática:

$$F.O. = \sum_{i=1}^{ndnc} (DO_i \cdot CN_i)$$

$$CN_i = CKN - (Np_i - 1) \cdot CDN$$

Siendo “ndnc” el número de demandas no consuntivas, “ DO_i ” el déficit sobre el caudal objetivo, “CKN” es una constante que vale 1500 y “CDN” es una constante que vale 5.

6. Contribución de los bombeos adicionales a la función objetivo

Para las demandas de uso consuntivo se empleará la siguiente expresión matemática:

$$F.O. = \sum_{i=1}^{nba} (QB_i \cdot CB_i)$$

5.2.4 Reglas de gestión y prioridades

La gestión del sistema viene condicionada por:

- Contribución a la función objetivo del modelo por parte de cada uno de los elementos del sistema hídrico.
- Reglas de operación en los elementos seleccionados.
- Objetivos de demandas y caudales ecológicos

Las reglas de operación permiten al planificador escribir reglas de gestión ad-hoc. Mediante este tipo de reglas se pueden limitar los caudales circulantes por las tomas de las demandas o por una conducción cualquiera. Para ello se introducen condiciones del tipo: cuando el volumen de uno o de varios embalses sea inferior a un umbral que el caudal se restrinja en un porcentaje determinado.

5.2.5 Módulo de economía del agua

Como resultados económicos se obtienen, después de realizar la gestión de los recursos hídricos disponibles, según prioridades y/o reglas de operación, el coste de escasez y el coste marginal de oportunidad del recurso (CMOR).

5.2.5.1 Coste de escasez. Curvas de demanda.

Como ya se ha comentado previamente, para poder calcular el coste de escasez es necesario caracterizar las curvas de demanda de todos los usos del sistema a estudiar (véase figura 30). Se define el coste de escasez como las pérdidas económicas asociadas a un suministro inferior a la demanda.

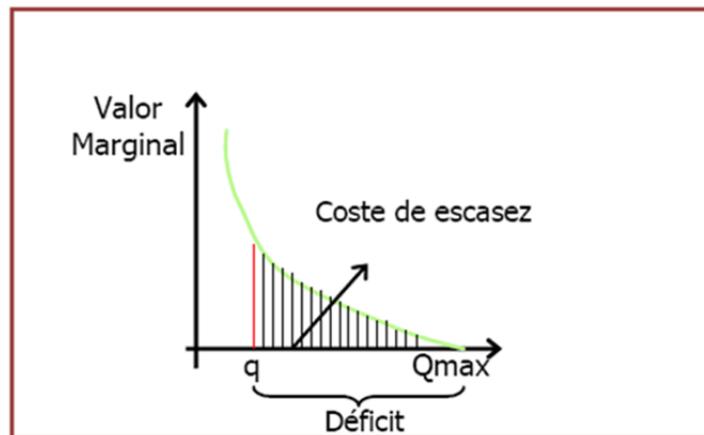


Figura 30. Cálculo del coste de escasez

A continuación se detallan las tipologías de funciones de demanda, que se han implementado tanto en la herramienta SIMGAMS como en la herramienta OPTIGAMS:

- Para la demanda urbana: $y=a+b \cdot x$
- Para la demanda agrícola tipo cítricos: $y=a+b \cdot x+c \cdot x^d$
- Para la demanda agrícola tipo arroz: $y=a+b \cdot x$
- Para las demandas de uso no consuntivo se calcula el beneficio obtenido por cada hm^3 turbinado

5.2.5.2 Coste Marginal de oportunidad del recurso

Para poder obtener el coste marginal de oportunidad del recurso (CMOR), se ha programado un nuevo módulo en SIMGAMS, que permite resolver de manera iterativa el problema base con la aplicación, mes a mes, de una carga extra de recurso hídrico disponible en el punto de estudio (por ejemplo en un embalse). La estructura base de este nuevo módulo responde a la típica de un "loop", como puede verse en la figura 31.

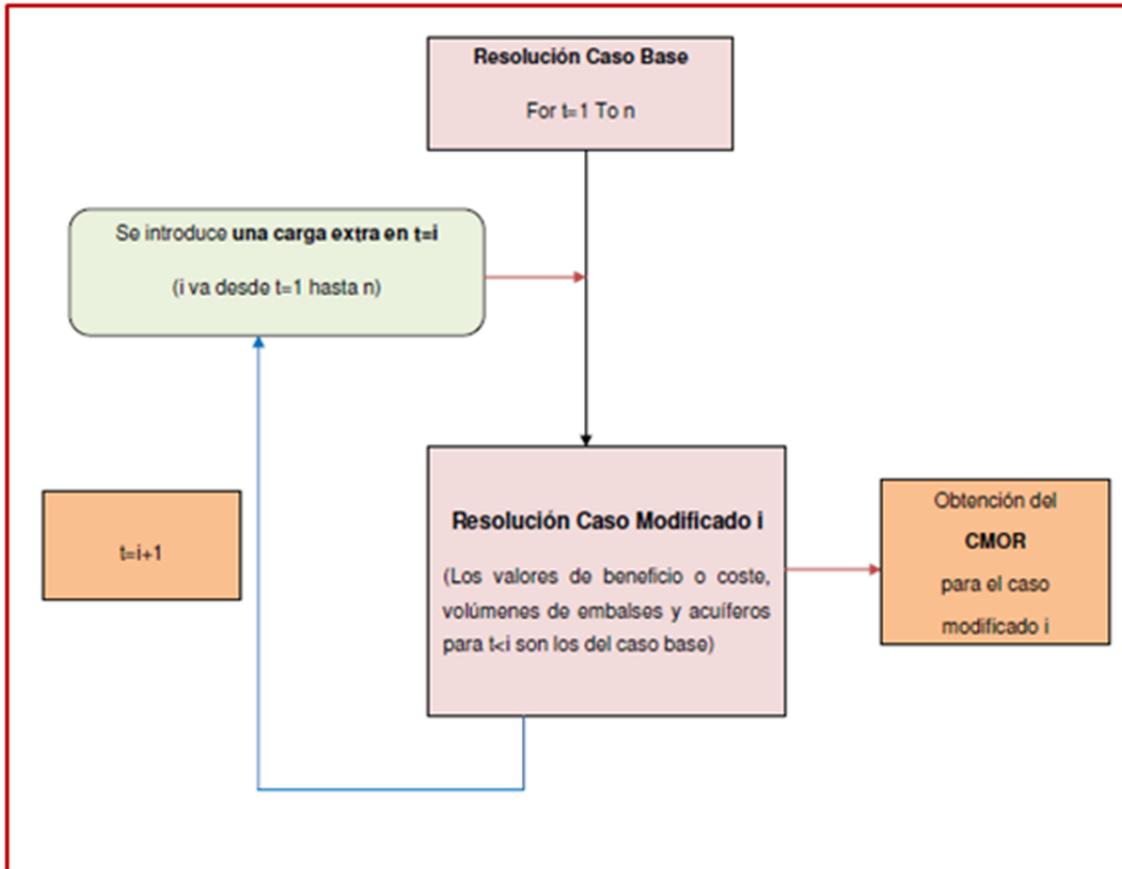


Figura 31. Esquema cálculo de CMOR en SIMGAMS

5.2.5.3 Políticas de Precios

La herramienta SIMGAMS permite introducir un valor económico al recurso hídrico suministrado, precio que será función del volumen embalsado en uno o varios embalses al principio de cada intervalo de tiempo de la simulación. Este precio lo que produce es una disminución en la demanda de recurso hídrico por parte de los distintos usuarios.

El efecto que sobre el sistema va a producir la introducción de precios, es similar al de una regla de operación que durante los períodos húmedos almacena una cantidad extra de recurso hídrico con respecto al escenario base, que estará disponible para los períodos de sequía. En resumen, la introducción de precios del agua produce un efecto económico positivo sobre los embalses (aumento de beneficios o disminución de costes).

5.3 Herramienta OPTIGAMS.

La herramienta OPTIGAMS permite desarrollar modelos de optimización de cualquier sistema de recursos hídricos, que gestionan los recursos disponibles con criterios exclusivamente económicos. Concretamente, se ha definido una función objetivo que trata de minimizar los costes de escasez de todos los usuarios del sistema. Como ya se ha comentado para su desarrollo se han empleado las herramientas HYDROPLATFORM, EXCEL y GAMS.

En la figura 32 se muestra un esquema general de la herramienta OPTIGAMS: datos de entrada requeridos, formulación empleada y tipología de resultados obtenidos.

Los datos de entrada son relativos, al igual que en SIMGAMS, a los embalses, acuíferos, demandas, conducciones o canales y aportaciones.

La formulación referente a balances hídricos, fenómenos físicos (como evaporación o filtración), modelación de acuíferos y relación río-acuífero; restricciones del sistema y curvas de demanda es la misma que la implementada en la herramienta SIMGAMS. La gran diferencia estiba en la función objetivo implementada y en el hecho de que esta herramienta implementa modelos de optimización frente a los de simulación que implementa SIMGAMS. La función objetivo de OPTIGAMS consiste en minimizar los costes de escasez asociados a los usuarios del sistema.

En referencia a la tipología de los resultados, al igual que en SIMGAMS, pueden ser hidrológicos o económicos. Entre los resultados económicos se encuentra el CMOR, a partir del cual se pueden diseñar políticas de precios.

Por otra parte, la simulación de mercados perfectos, sin costes de transacciones, se corresponde con una optimización económica. Es decir, OPTIGAMS reproduce el efecto o impacto que la aplicación de un mercado del agua tendría en la gestión de un sistema de recursos hídricos.

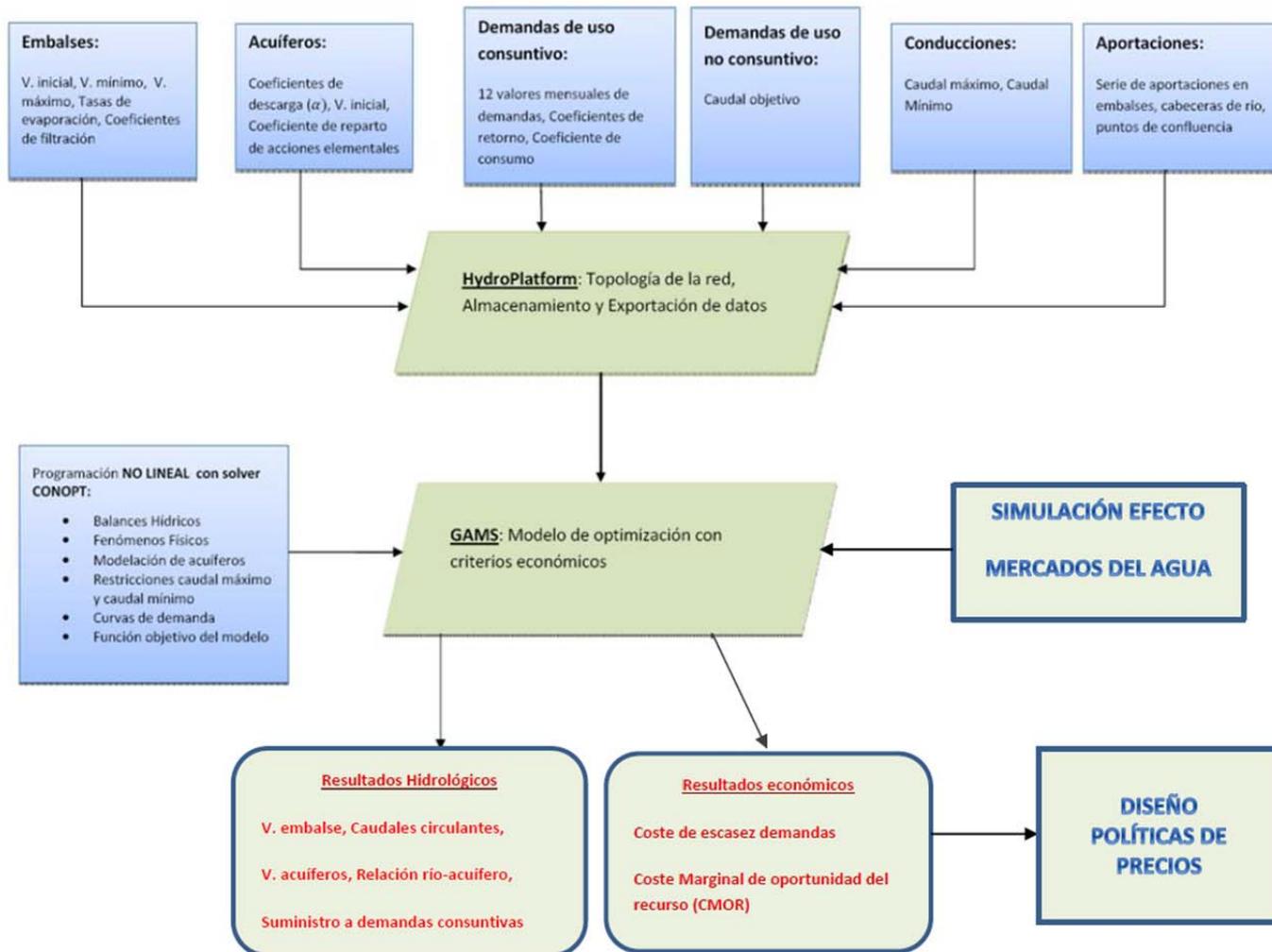


Figura 32. Esquema Herramienta OPTIGAMS

CAPÍTULO 6. CASO DE ESTUDIO. SISTEMA DE EXPLOTACIÓN DEL RÍO JÚCAR

En este capítulo se muestran los principales resultados obtenidos para el caso de estudio: sistema de explotación del río Júcar. Primeramente se hace una descripción del esquema conceptual del sistema. A continuación, se muestran tanto los resultados de gestión (volúmenes, suministros, etc.) como los económicos (costes de escasez y coste marginal de oportunidad del recurso). También se muestran las políticas de precios y el efecto de la aplicación de éstas sobre el sistema. Finalmente, se muestra una comparativa de los resultados obtenidos con los diferentes instrumentos económicos (políticas de precios y mercados del agua ideales).

6.1 Caracterización sistema Júcar

Como ya se ha descrito en el capítulo 3, el sistema Júcar es un sistema complejo muy regulado, con un alto porcentaje de demanda agraria (un 80% aproximadamente) y con una fuerte afección en su cabecera por parte del acuífero de la Mancha Oriental (pasando de río ganador a río perdedor).

6.1.1 Esquema conceptual

En la figura 33, se muestra el esquema conceptual del sistema aguas arriba del embalse de Tous.

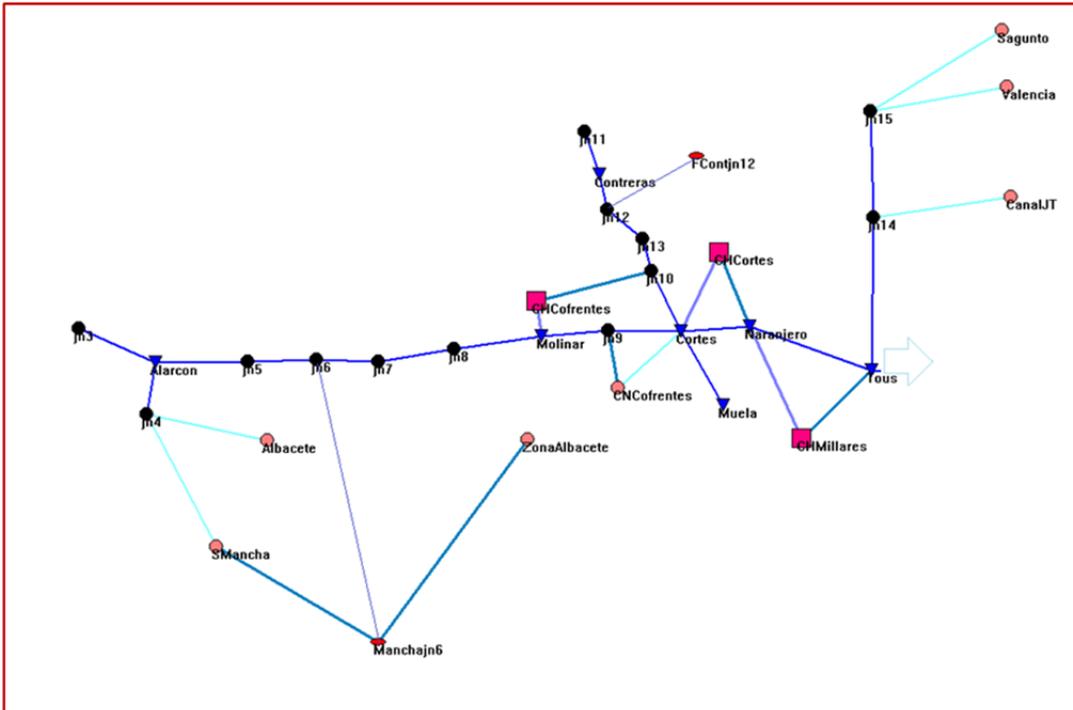


Figura 33. Esquema Sistema Júcar aguas arriba de Tous

Se han modelizado los embalses de Alarcón, Contreras, Tous, El Molinar, Cortes y El Naranjero. En referencia a los acuíferos se han modelizado los acuíferos de la Mancha Oriental y el que recibe las filtraciones del embalse de Contreras, que con un retardo vuelven al cauce.

En la cabecera del sistema Júcar se encuentra el acuífero de la Mancha Oriental. Debido al caudal bombeado se producen significativos descensos de los niveles piezométricos, con gran influencia sobre los caudales del Júcar aguas abajo debido a la interacción río-acuífero. Este acuífero se ha modelado como un acuífero pluricelular de dos celdas. (véase figura 34)

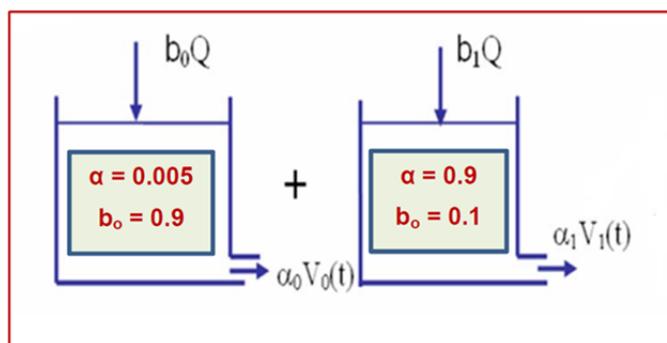


Figura 34. Acuífero Mancha Oriental

En la cabecera del río Cabriel se incluye el acuífero que recibe las filtraciones del embalse de Contreras, retornando este caudal al río con un retardo. Se ha modelizado como un acuífero unicelular con alfa igual a 0.9.

En el esquema del sistema Júcar se representan las siguientes demandas:

- Demandas urbanas del sistema son: Albacete, Valencia y Sagunto
- Demandas agrícolas del sistema son: Regadíos Mancha Oriental y Regadíos del Canal Júcar-Turia
- Demandas no consuntivas: centrales hidroeléctricas de Cofrentes, Cortes y Millares.
- Demandas industriales: demanda para refrigeración de la central nuclear de Cofrentes

En la figura 35, se muestra el esquema conceptual del sistema aguas abajo del embalse de Tous.

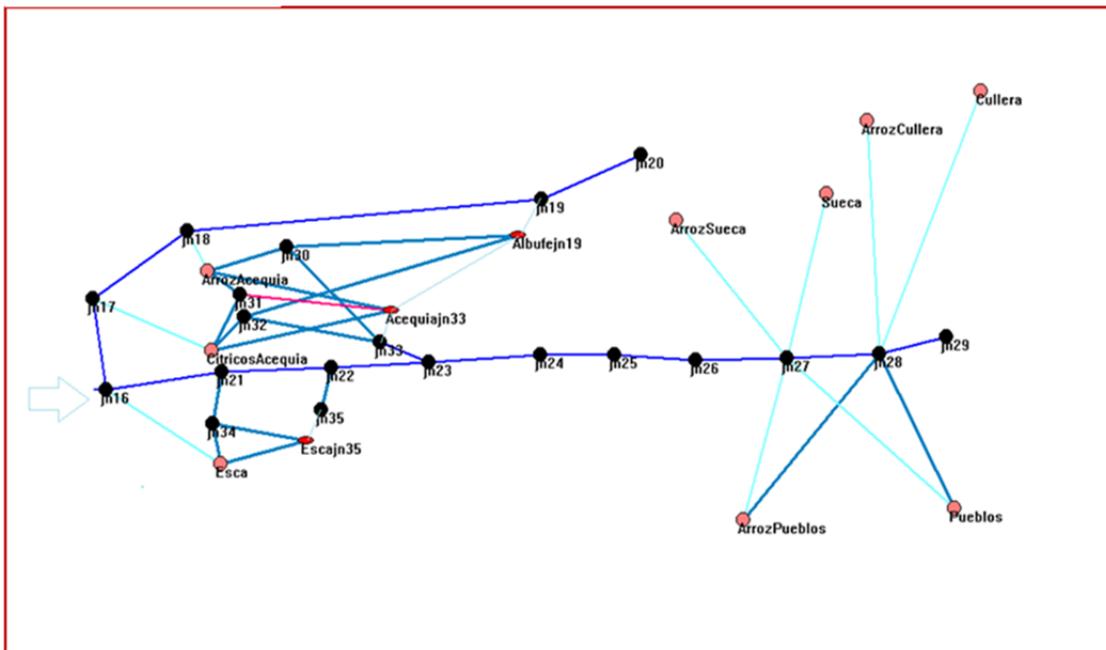


Figura 35. Esquema Sistema Júcar aguas arriba de Tous

Como se deduce de la figura 35, la zona de los riegos tradicionales de la Acequia Real del Júcar y Antella puede recibir suministro superficial y de bombeos del acuífero de la Plana Sur. Se producen tanto retornos a la Albufera

como al cauce del Júcar e infiltraciones al acuífero de la Plana Sur. (véase figura 36)

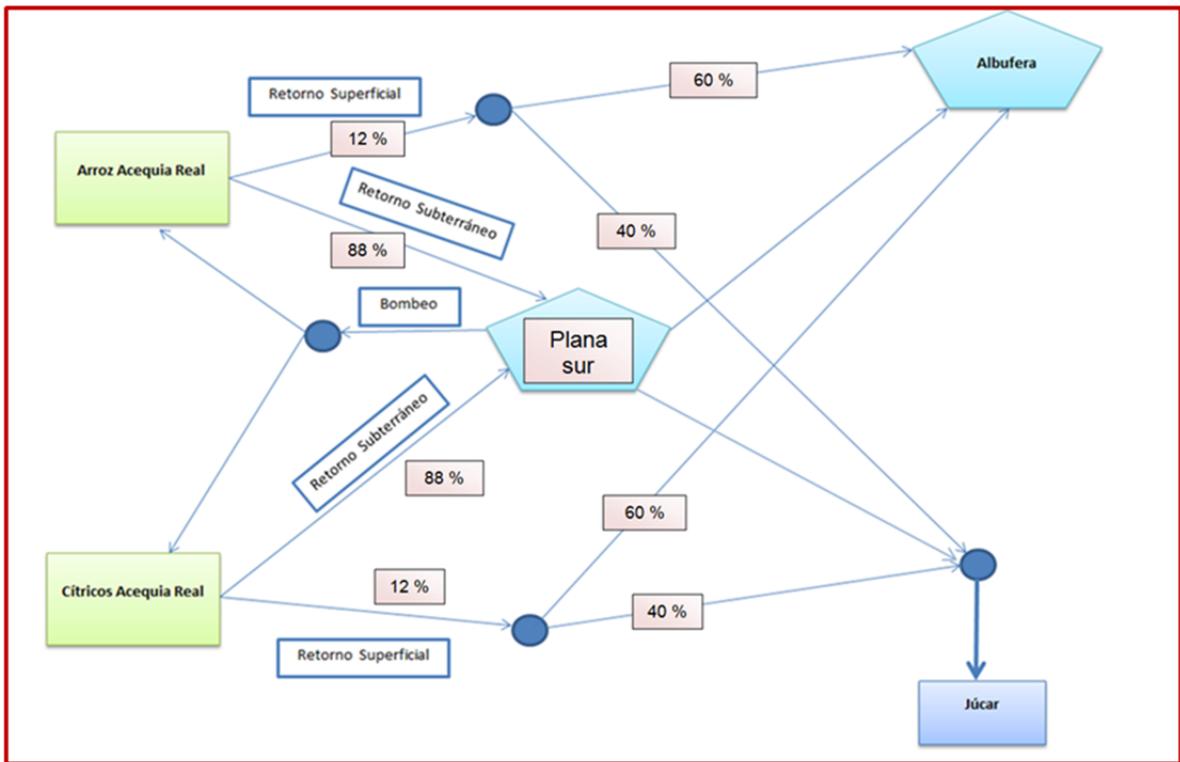


Figura 36. Bombeos acuífero Plana Sur para cultivos Acequia Real del Júcar

Tanto el acuífero de la Plana sur, como la Albufera se han modelado como acuíferos unicelulares (véase figura 37).

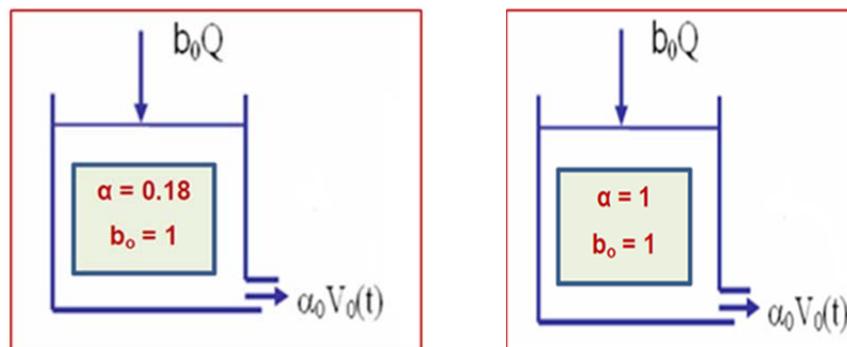


Figura 37. Acuífero Plana Sur para bombeo Acequia Real Júcar / Albufera

También se han modelado los cultivos de la Ribera Baja del Júcar, principalmente cítricos y arroz, de la zona de Cullera, Sueca y Cuatro Pueblos. En referencia a los caudales ecológicos, se han establecido los siguientes:

Tabla 8. Caudales ecológicos

Tramo	Caudal ecológico (m3/s)
Salidas embalse Alarcón	4.8-5.4
Río Cabriel	1
Salidas embalse Molinar	0.8
Entre embalses Naranjero y Tous	1.6
Aguas abajo embalse Tous	1.58

6.1.2 Demandas y usos del sistema

A continuación se describen los patrones de consumo de las demandas consuntivas del sistema aguas arriba del embalse de Tous:

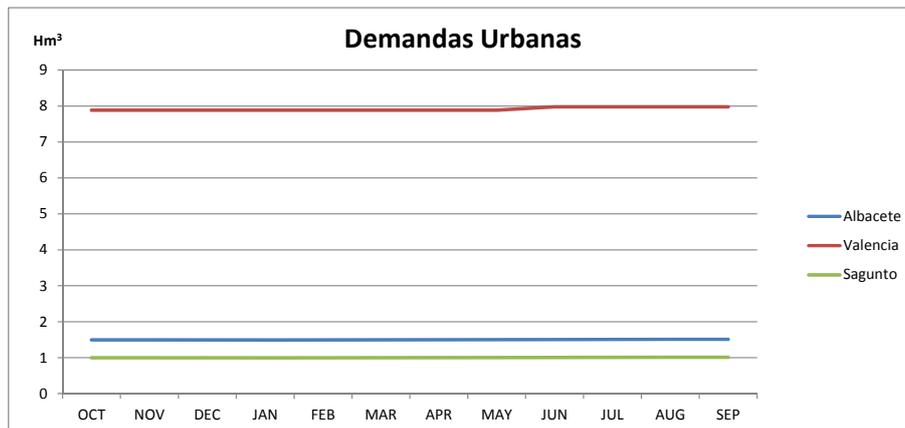


Figura 38. Demandas urbanas sistema Júcar (Fuente: GIRH-IIAMA, 2006)

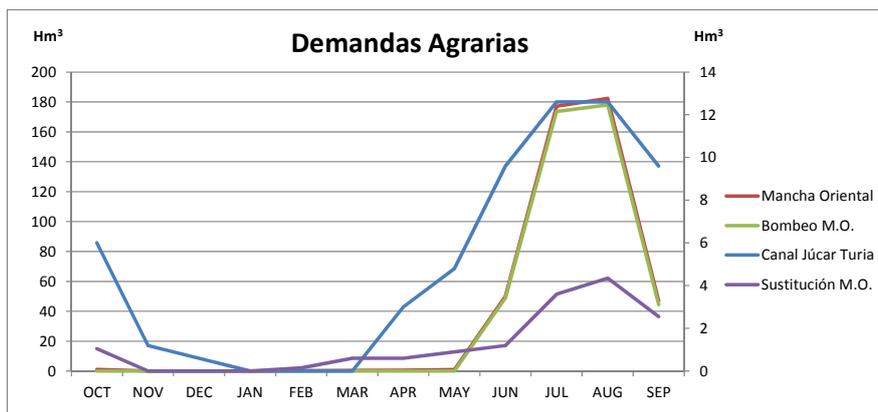


Figura 39. Demandas agrarias sistema Júcar aguas arriba Tous (Fuente: GIRH-IIAMA, 2006)



Figura 40. Demandas industriales sistema Júcar (Fuente: GIRH-IIAMA, 2006)

En la tabla 9 se pueden consultar los caudales objetivos de las centrales hidroeléctricas

Tabla 9. Caudales objetivo centrales hidroeléctricas (Fuente: GIRH-IIAMA, 2006)

Central	Caudal Objetivo (Hm³/mes)
Cofrentes	52
Cortes	285
Millares	48

Los patrones de consumo de las principales demandas consuntivas del sistema aguas abajo del embalse de Tous, se muestran en la figura 41.



Figura 41. Demandas agrarias arroz sistema Júcar aguas abajo Tous (Fuente: GIRH-IIAMA, 2006)

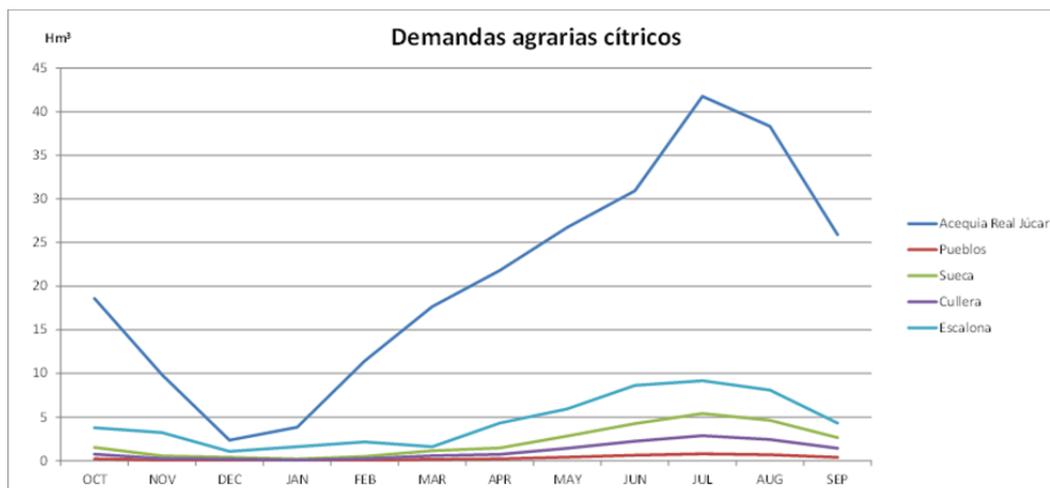


Figura 42. Demandas agrarias cítricos sistema Júcar aguas abajo Tous (Fuente: GIRH-IIAMA, 2006)

6.1.3 Infraestructuras

Aguas arriba de Tous se ubican los tres embalses principales del sistema: Alarcón, Contreras y Tous. También se han modelizado los embalses del Molinar, Cortes y el Naranjero. El embalse de Alarcón tiene una capacidad de 1112 Hm³, el de Contreras de 852 Hm³ (aunque nunca se ha llegado a esta cantidad por motivos de seguridad estructural) y el de Tous tiene una capacidad de 378 Hm³. En las figuras 43 y 44 se muestran unas imágenes de los embalses de Alarcón y Contreras respectivamente.



Figura 43. Embalse de Alarcón (Fuente: <http://www.pueblos-espana.org>)



Figura 44. Embalse de Tous (Fuente: <http://servicios2.marm.es/sia>)

También se han modelado los siguientes embalses: El Molinar, Cortes y El Naranjero. El embalse del Molinar tiene una capacidad de 4.3 hm^3 , desde este embalse se deriva agua para turbinar a la central hidroeléctrica de Cofrentes. El embalse de Cortes tiene una capacidad de 118 hm^3 , produciéndose la confluencia del río Cabriel. Se deriva agua para la central hidroeléctrica de Cortes II y para el depósito de la muela. El embalse del Naranjero tiene una capacidad de 18 hm^3 .

Como infraestructuras para riego destacan el Canal Júcar-Turia y la Acequia Real del Júcar. El Canal Júcar-Turia, suministra agua a las demandas urbanas de Valencia y Sagunto, y a los regadíos del Canal Júcar-Turia. La Acequia Real del Júcar satisface las demandas agrícolas de la Ribera Alta del Júcar.

6.2 Funciones económicas de demanda sistema Júcar

En este apartado se muestran las curvas de demanda que se han empleado para el caso de estudio.

6.2.1 Curvas de demanda uso urbano

En este caso se han empleado curvas de demanda lineales, considerando un precio de cierre de 6 €/m³.



Figura 45. Curvas de demanda uso urbano

6.2.2 Curvas de demanda uso agrícola

Los criterios adoptados para definir las curvas de demanda en el presente estudio se describen a continuación, teniéndose en cuenta que en el sistema de explotación del río Júcar se distinguen claramente dos zonas de regadíos: la zona de la **Mancha Oriental** y la zona de la **Ribera del Júcar**.

En la **zona de la Ribera Alta y Baja del Júcar** caben destacar los cultivos: cítricos, arroz y en menor medida la huerta. En el desarrollo del modelo se han agrupado los cultivos como sigue: cítricos-huerta y arroz.

Para estimar las curvas de demanda se ha empleado la figura 46 (Deidda, 2004) que representan la disposición de pago total (a pie de parcela) por parte de los agricultores e incluyen los costos de distribución y de aplicación del agua.

Figura 46. Niveles de tarifas adoptados para las curvas de demanda (Fuente: Deidda, 2004)

cultivo	subsidiado	1º punto [€/m³]	2º punto [€/m³]	punto final [€/m³]	observaciones
arroz	si	0,00	0,005	0,030	sin datos sólidos
cereales y oleaginosos	si	0,002	0,060	0,30	sin datos sólidos
cítricos	no	0,010	0,250	0,45	datos de Castellón (Sumpsi Viñas 1999)
hortalizas y otros	no	0,010	0,300	1,00	minorando datos de Almería

Para representar las curvas de cultivos tipo cítricos-huerta se ha empleado un ajuste de tipo exponencial:

$$y = a + b \cdot x + c \cdot x^d$$

Para representar las curvas de cultivos tipo arroz se ha empleado un ajuste de tipo exponencial:

$$y = a + b \cdot x$$

A continuación se muestran las curvas de demanda para cultivos tipo cítricos-huerta de la Acequia Real del Júcar:

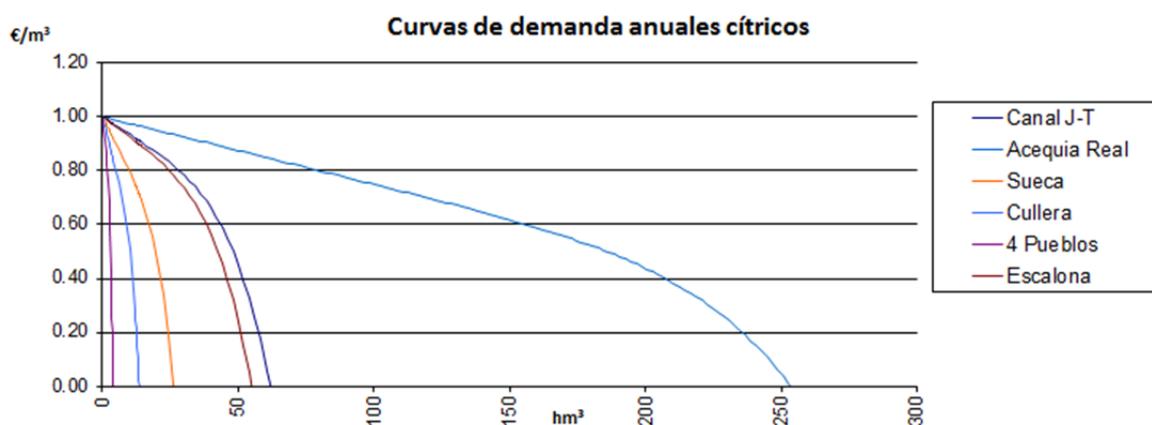


Figura 47. Curvas demanda cítricos-huerta

A continuación se muestran las curvas de demanda para cultivos tipo arroz de la Acequia Real del Júcar (las curvas de los otros usuarios tienen la misma forma, tan sólo varía el valor de la demanda):

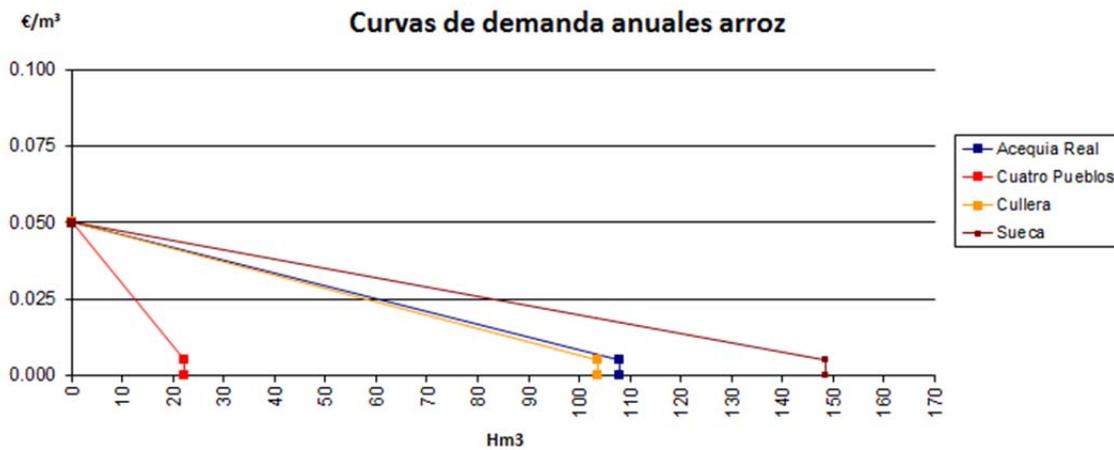


Figura 48. Curvas demanda arroz

Una vez obtenidas las curvas a escala anual, se desagregan a escala mensual mediante el calendario de riegos.

Cultivos de la Mancha Oriental

La zona de la Mancha Oriental se caracteriza por una gran variedad de cultivos con ciclos estacionales, como puede verse en la tabla adjunta:

Tabla 10. Cultivos de la Mancha Oriental (Fuente: Deidda, 2004)

ciclo	cultivo
primavera	Cebada, trigo
verano	maiz, girasol, remolacha, cebolla, maíz forrajero, tomate, judía verde
primavera-verano	alfalfa

Los cultivos de esta zona se abastecen de aguas subterráneas (salvo sustitución de bombeos), concretamente del Acuífero de la Mancha Oriental (unidad hidrogeológica 08.29) mediante pozos. Las producciones se benefician de los subsidios procedentes de la Política Agrícola Comunitaria (PAC)

europea, que comienzan a otorgarse desde el 1986 y alcanzan particular relevancia a partir del 1992.

El grave problema de esta zona de regadíos es que en las últimas dos décadas se ha incrementado sustancialmente la superficie cultivada, con la correspondiente disminución de los niveles piezométricos del acuífero.

Como puede observarse en la tabla 10 hay una gran variedad de cultivos en la zona, por ello cuando se produce un encarecimiento del precio del agua se sustituyen los cultivos por otros más provechosos o que tengan un menor consumo de agua. Este hecho dificulta la estimación de las curvas de demanda de la zona. Por ello, se emplea una curva de demanda de forma continua (sin escalones), cuya ecuación se ha obtenido adaptando una curva lineal a tramos proporcionada por (MIMAM, 2000).

En la figura 49 se muestran la curvas de demanda empleadas para los cultivos de Mancha Oriental. La curva es del tipo $y = a + b \cdot x + c \cdot x^2 + \frac{d}{(x+e)}$

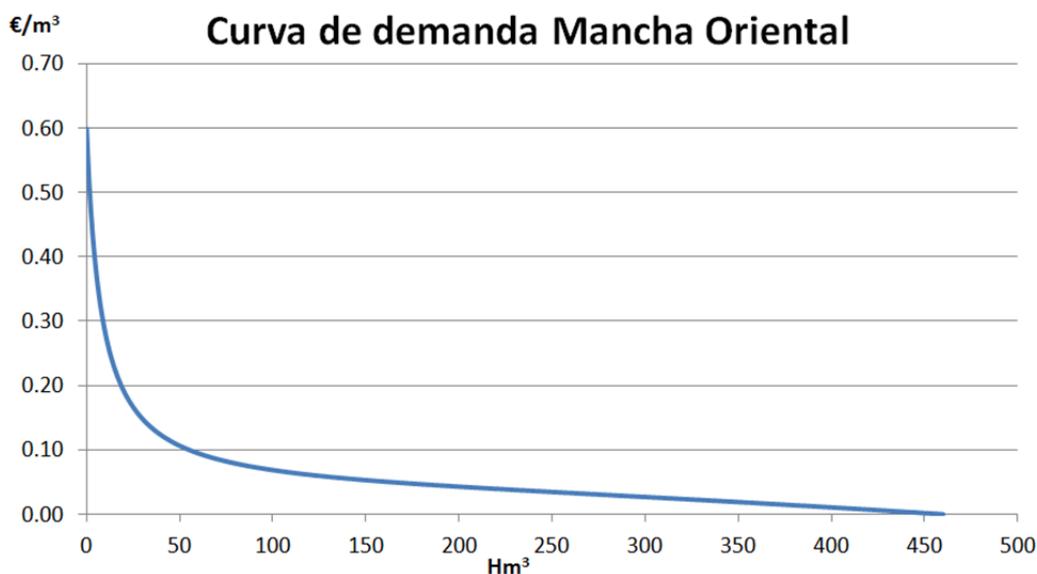


Figura 49. Curvas de demanda de los regadíos de La Mancha Oriental

Funciones de demanda para uso no consuntivo

En el esquema empleado para el sistema de explotación del río Júcar, se han representado las tres centrales hidroeléctricas de envergadura del sistema: Cofrentes, Cortes II y Millares III, ubicándose todas ellas aguas arriba del

embalse de Tous. Éstas utilizan el agua sin consumirla. No se consideran las mini-centrales hidroeléctricas fluyentes situadas a lo largo del cauce, puesto que no ejercen funciones de regulación del sistema (véase figura 50)

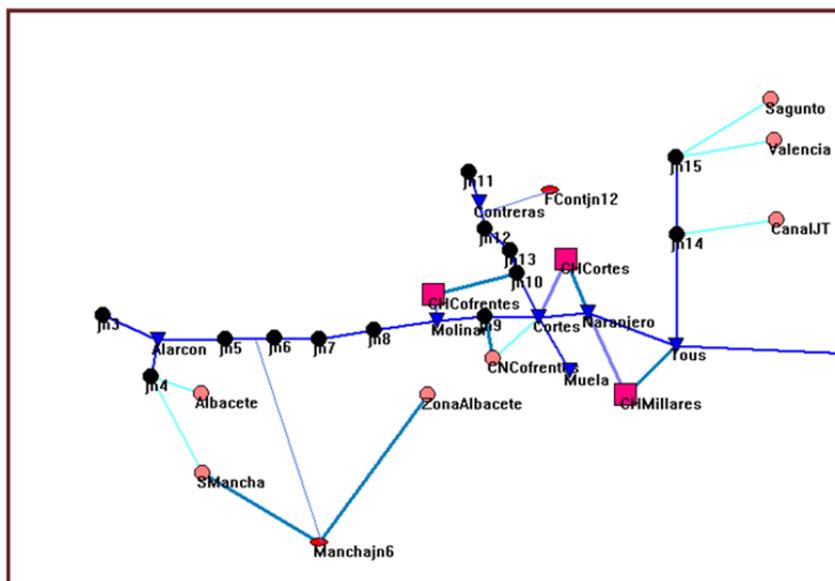


Figura 50. Sistema Explotación Júcar aguas arriba de Tous

Las centrales hidroeléctricas del sistema tienen definidos un caudal objetivo de turbinación:

Tabla 11. Caudal Objetivo Centrales Hidroeléctricas

Central Hidroeléctrica	Caudal Objetivo (hm ³ /mes)
Cofrentes	52
Cortes II	286
Millares III	48

Según Iberdrola, las tres centrales generan energía en hora punta, concentrando la producción entre las 6-8 horas diarias de mayor consumo.

Se define una curva de demanda constante a lo largo del mes. Para su cálculo se considera un precio medio unitario de producción eléctrica de 0.042 €/kw en los meses de verano y de 0.032 €/kw el resto de meses. Si se mantiene constante el beneficio neto y se considera que los valores de la producción eléctrica son función del agua suministrada, se obtiene una disponibilidad de pago de 0.025 €/m³ en los meses de verano y de 0.019 €/m³ en el resto de meses. Para el desarrollo del presente proyecto se ha realizado

un promedio anual considerándose que hay tres meses de verano, obteniéndose un valor de 0.0205 €/m^3 . Esta información procede de (Deida, 2004).

Curvas de demanda para uso industrial

En el esquema del sistema de explotación del Júcar se va a considerar la Central Nuclear de Cofrentes, ubicada aguas arriba del embalse de Tous.

La central tiene una demanda de 2.905 hm^3 , siendo este flujo de agua imprescindible para la refrigeración del reactor de la central. Como la central está conectada a una red de gran capacidad, ésta no tiene la capacidad de condicionar fuertemente el precio de la energía. Por todo ello se va a considerar una curva de demanda constante.

Para determinar el precio del agua se ha seguido el siguiente procedimiento (Deida, 2004):

- La central tiene una producción energética de 700 Gwh/mes.
- Se calcula una facturación de 15.4 millones euros/mes. (Precio de la energía según OMEL de 0.022€/kw).
- Se asume un beneficio neto para las empresas es del 15% y que la disponibilidad de pago sea del 45% del beneficio neto. Con todo ello se obtiene un valor del recurso de 1.155 M.€/mes.
- Finalmente se divide el valor del recurso entre el suministro de agua a la central, que se asume constante, **obteniéndose un valor de 0.032 €/m^3**

6.3 Resultados Sistema Júcar con SIMGAMS

Una vez definido el esquema conceptual del sistema Júcar se procede a su aplicación práctica. Con el programa SIMGAMS se pueden obtener tanto resultados de gestión como resultados económicos. A partir del valor marginal del agua, siendo uno de los resultados económicos que permite obtener SIMGAMS (concretamente se ha calculado CMOR), se pueden diseñar políticas de precios; permitiendo el programa simular el efecto de dichas políticas sobre el sistema.

6.3.1 Resultados de gestión

El programa permite calcular todo tipo de resultados relacionados con la gestión del sistema: volúmenes de embalse, relación río-acuífero, suministros a las demandas, etc. Para resolver el sistema Júcar con un período de 61 años, con un ordenador con procesador Intel Core i7 con 8 Gb de RAM se requiere un tiempo de computación de 3 minutos.

Como ya se ha comentado, para validar el modelo se han comparado los resultados del programa SIMGAMS con los del módulo de SIMGES del programa AQUATOOL.

En las figuras 51 y 52 se muestran algunos de los resultados obtenidos en este proceso de validación. Concretamente se muestran los volúmenes de los embalses de Alarcón, Contreras y Tous, y los suministros de las demandas del Canal Júcar-Turía (demandas urbanas de Sagunto y Albacete, y demanda agrícola del Canal Júcar-Turía). El resto de resultados pueden consultarse en el anexo III: relación río-acuífero de la Mancha Oriental y del acuífero que recibe las filtraciones del embalse de Contreras; suministros a las principales demandas de la Ribera Alta y de la Ribera Baja. Los resultados obtenidos validan el programa SIMGAMS, ya que las diferencias existentes son mínimas o inexistentes a lo largo de un período de análisis de 61 años. Estos resultados también refuerzan el empleo del programa OPTIGAMS, puesto que las ecuaciones son las mismas entre ambos programas, a excepción de la función objetivo.

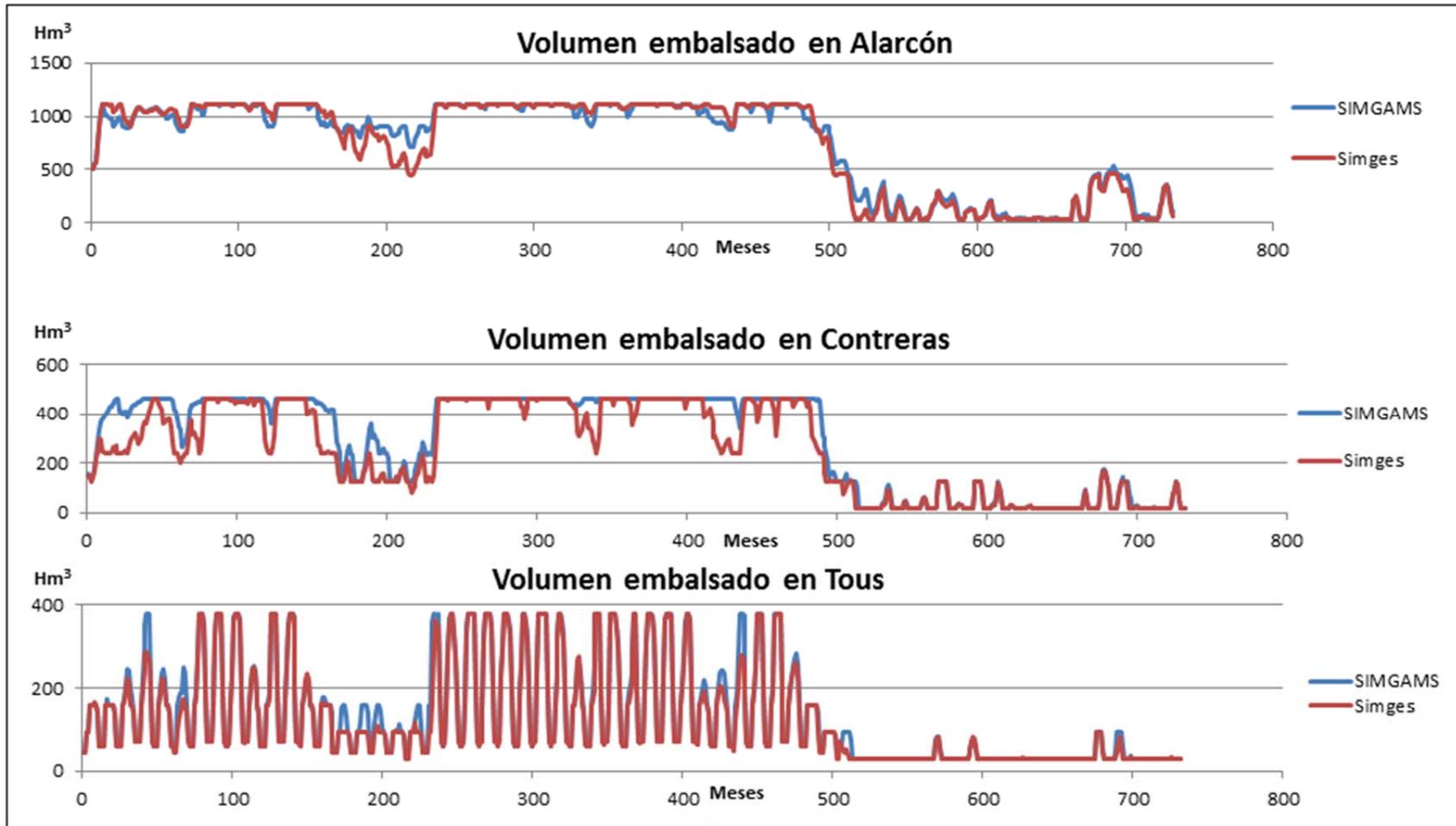


Figura 51. Comparativa volúmenes SIMGAMS vs SIMGES

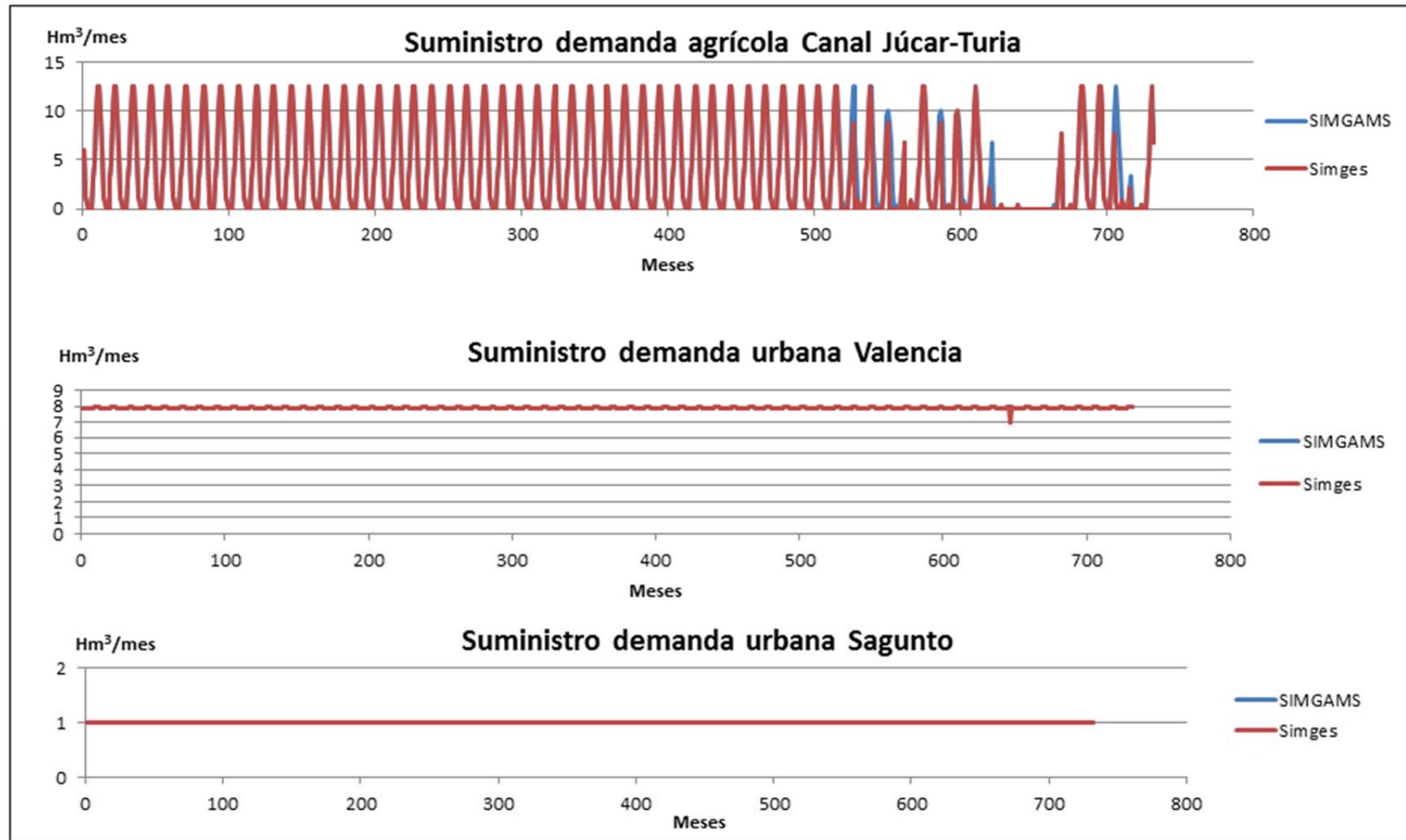


Figura 52. Comparativa suministros SIMGAMS vs SIMGES

Aunque para el proceso de validación se ha empleado un período de estudio de 61 años, para el análisis económico y de gestión realizado se usa un período de 21 años (a partir del año 1980 ya que previamente no existe déficit alguno en el sistema). Como se puede observar en la figura 53, la hidrología de la cuenca a partir del año 1980 cambia significativamente (es el denominado “efecto 80”).

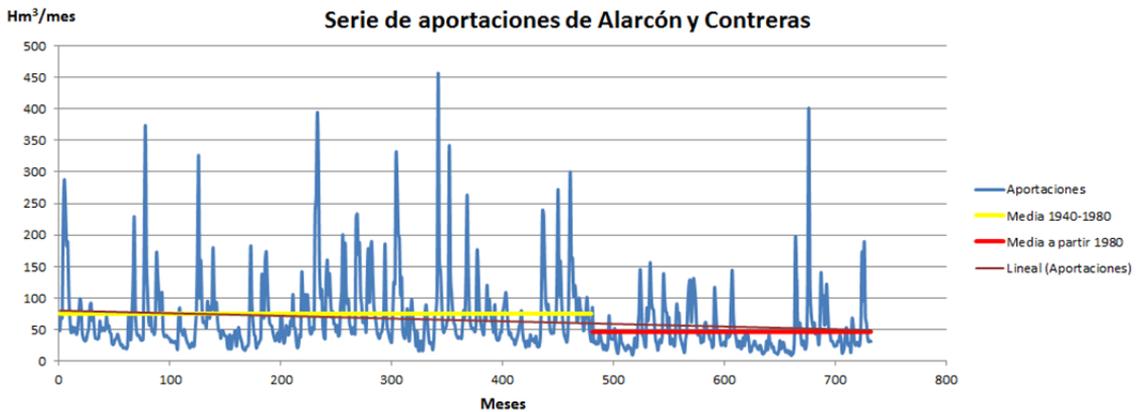


Figura 53. Serie de aportaciones de Alarcón y Contreras

En la figura 54 se muestran los déficits del sistema agrupados en: Ribera Alta, Ribera Baja, cultivos de la Mancha Oriental, demandas urbanas y demanda agrícola del Canal Júcar-Turia.

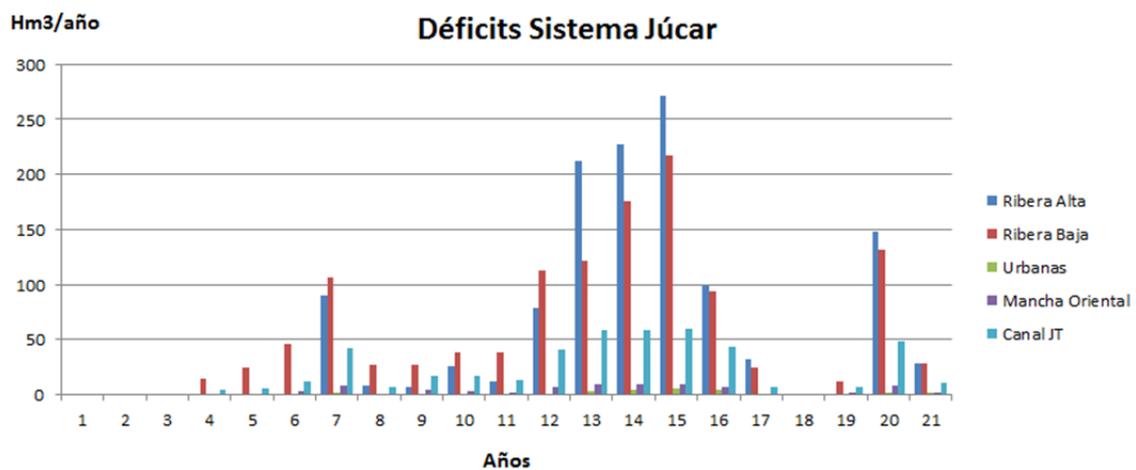


Figura 54. Déficit Sistema Júcar

Como puede observarse, tanto en la Ribera Alta como en la Ribera Baja se producen déficits significativos.

En la figura 55 se muestran los caudales turbinados por las principales centrales hidroeléctricas. En el sistema Júcar no se producen sueltas ad-hoc para turbinar, sino que las centrales aprovechan las sueltas que se producen para satisfacer las demandas consuntivas.

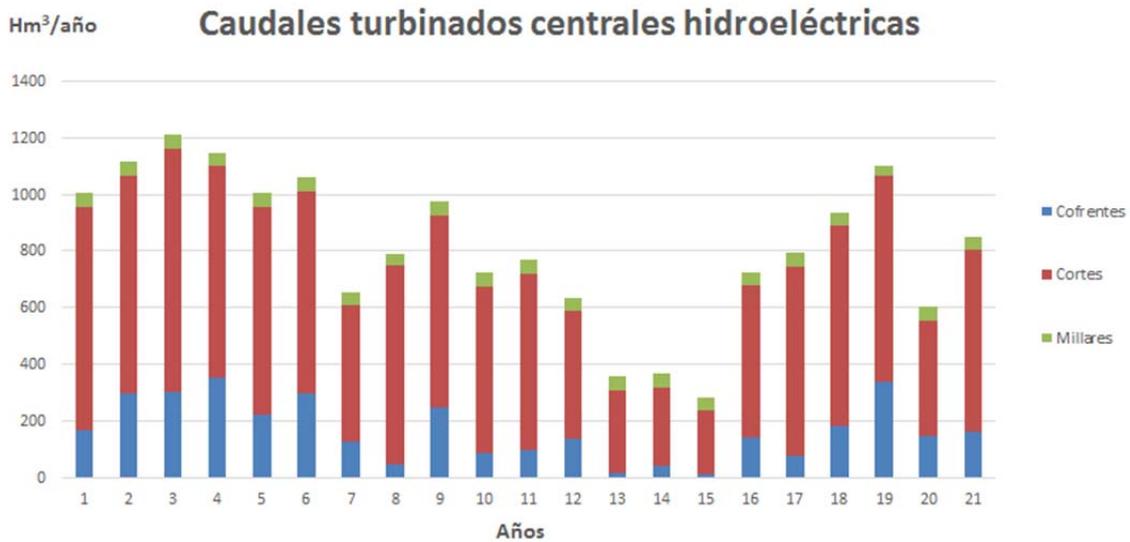


Figura 55. Caudales turbinados por centrales hidroeléctricas

En la tabla 12 se muestra el número de veces que se ha alcanzado el caudal mínimo necesario en los tramos en los que se han definido.

Tabla 12. Cumplimiento caudales ecológicos

Tramo	Fallo Qeco	No Fallo Qeco
Salidas embalse Alarcón	31	221
Río Cabriel	0	252
Salidas embalse Molinar	0	252
Entre embalses Naranjero y Tous	0	252
Aguas abajo embalse Tous	0	252

Como puede observarse, el único tramo en el que se producen algunos fallos (aun así la garantía es alta) en el caudal mínimo establecido es el tramo de salidas del embalse de Alarcón.

6.3.2 Resultados económicos

Como resultados económicos se obtienen tanto los costes de escasez como el coste marginal de oportunidad del recurso (CMOR) en los embalses (valor marginal del agua)

Tabla 13. Costes de escasez sistema Júcar por usuarios

Costes escasez (M.€) para 21 años	
Acequia Real Júcar Cítricos	349.56
Escalona	31.52
Sueca Cítricos	33.80
Cuatro Pueblos Cítricos	2.51
Cullera Cítricos	10.91
CJT	272.48
Acequia Real Júcar Arroz	6.56
Sueca Arroz	7.57
Cullera Arroz	5.36
Cuatro Pueblos Arroz	0.44
Regadíos Mancha Oriental	0.74
Albacete	15.66
Valencia	0.00
Sagunto	0.00

Como podemos observar los mayores costes de escasez se dan en los cítricos, resultado que era de esperar ya que estos cultivos tienen un beneficio neto marginal de 1 €/m³, mientras que el arroz tan sólo 0.05 €/m³. Se estima un coste de escasez de 721 millones de euros. A continuación se muestran las gráficas de costes de escasez vs déficits de algunas demandas del sistema.



Figura 56. Costes de escasez vs déficits Acequia Real arroz



Figura 57. Costes de escasez vs déficits Acequia Real cítricos

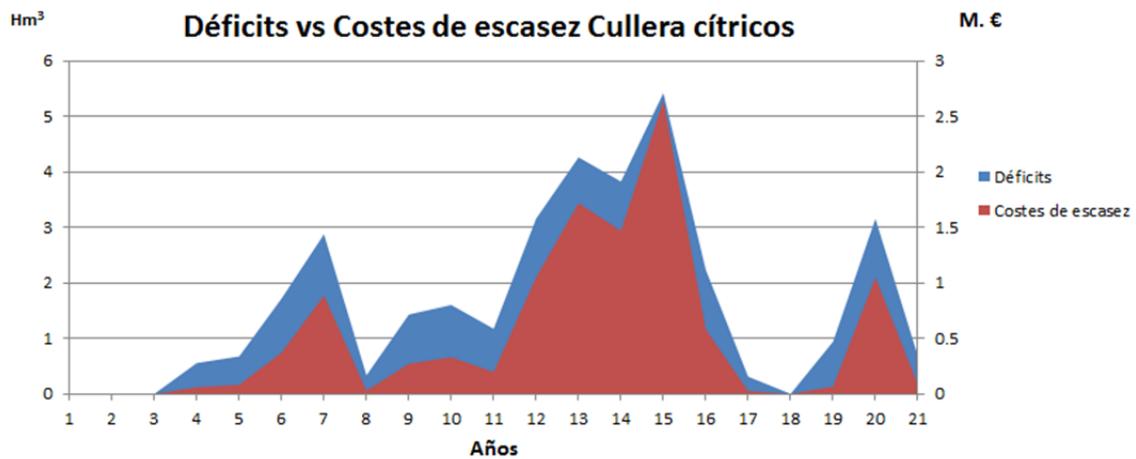


Figura 58. Costes de escasez vs déficits Cullera cítricos

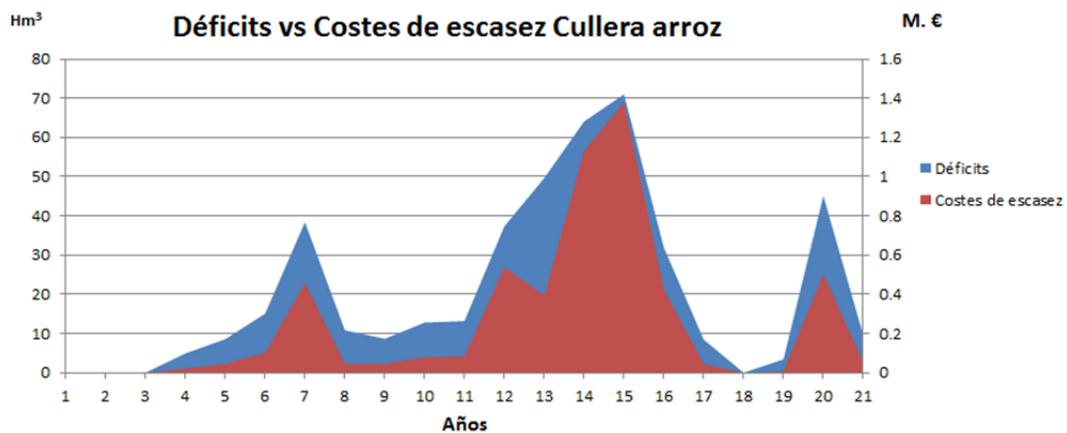


Figura 59. Costes de escasez vs déficits Cullera arroz

En la figura 60, se muestran los beneficios obtenidos por las principales centrales hidroeléctricas del sistema Júcar.

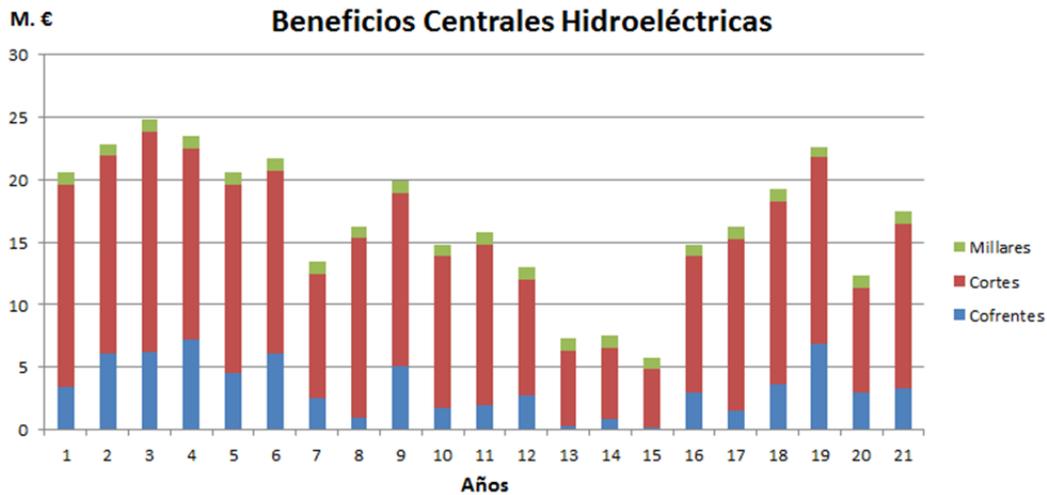


Figura 60. Beneficios Centrales Hidroeléctricas

El programa también permite obtener el coste marginal de oportunidad del recurso (CMOR), a continuación se muestran los valores de CMOR en los embalses de Alarcón y de Contreras:

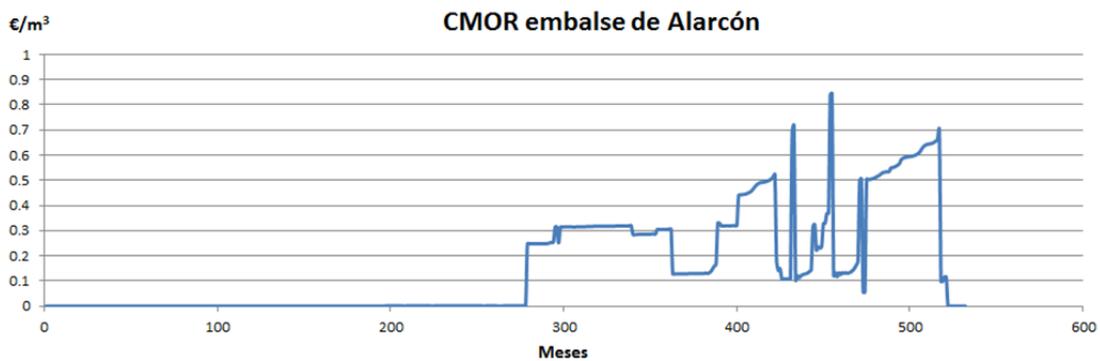


Figura 61. CMOR en embalse de Alarcón

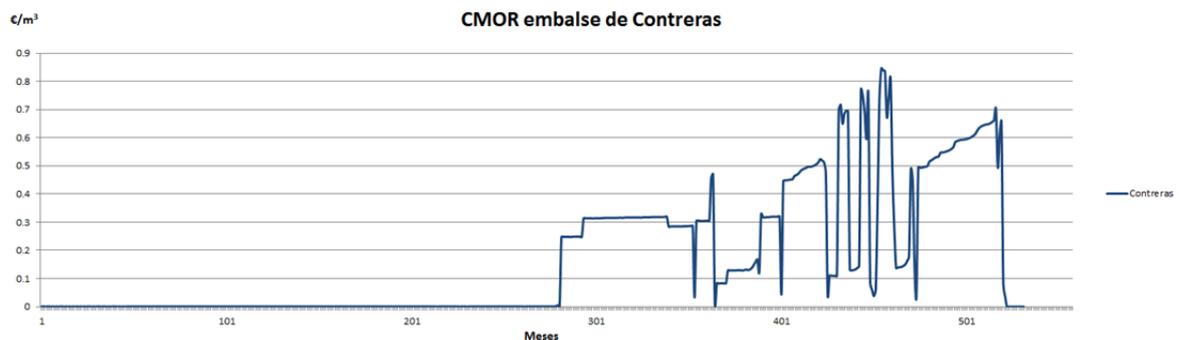


Figura 62. CMOR en embalse de Contreras

Como ya se ha comentado, estos valores se van a emplear para diseñar las políticas de precios.

6.3.3 Políticas de Precios

Como ya se ha explicado en el capítulo de metodologías y herramientas para obtener políticas de precios basadas en la escasez del agua, se parte de las series temporales del Coste Marginal de Oportunidad del Recurso (CMOR). En este trabajo se han calculado políticas de precios tanto para el embalse de Alarcón como para el embalse de Contreras.

6.3.3.1 Política de precios en embalse de Alarcón

En la figura 63 se ha graficado el valor del CMOR versus volumen durante el período de análisis.

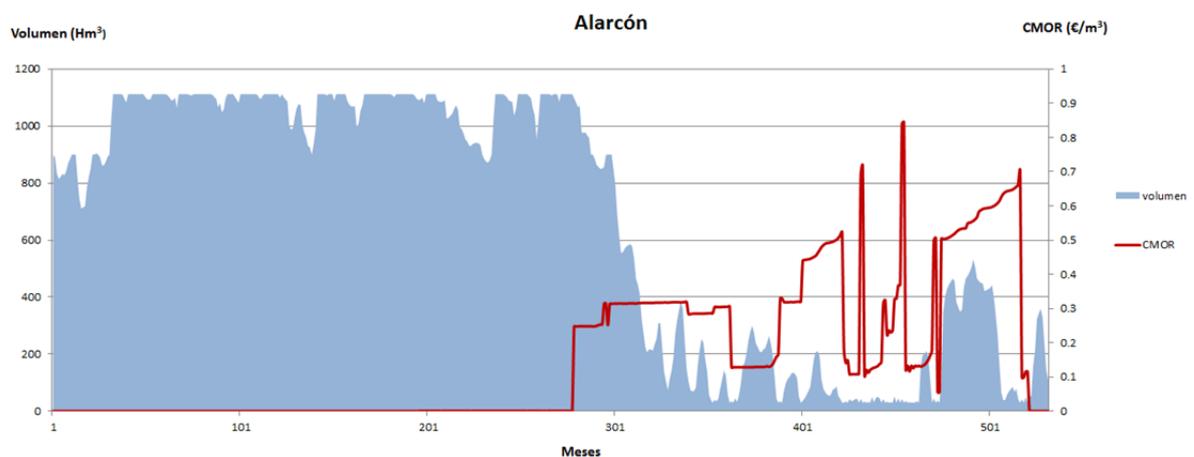


Figura 63. Volumen de Alarcón vs CMOR

Los resultados de la figura 63 son consistentes con la teoría económica ya que durante el período de sequías de los años 1995-1996 el valor del CMOR alcanza 0.84 €/m^3

El siguiente paso consiste en agrupar los valores del CMOR de acuerdo con una serie de intervalos de los volúmenes embalsados (véase figura 64).

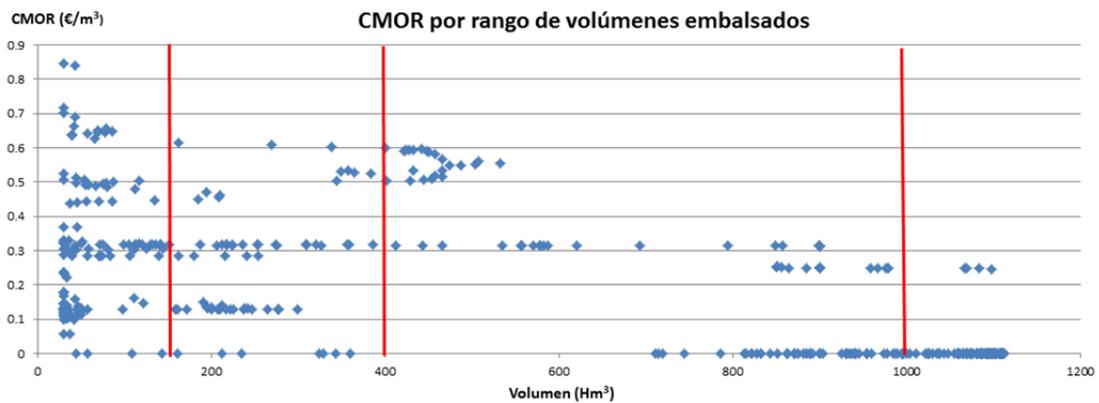


Figura 64. CMOR vs Volumen de Alarcón

En la tabla 14 se muestra el valor promedio y la desviación típica asociada a cada rango de volúmenes:

Tabla 14. Valor promedio CMOR vs rango volúmenes en Alarcón

Rango	0-150	150-400	400-1000	>1000
Promedio	0.31	0.26	0.18	0.00
Desviación típica	0.19	0.17	0.22	0.00

Con todo ello se obtiene la siguiente política de precios:

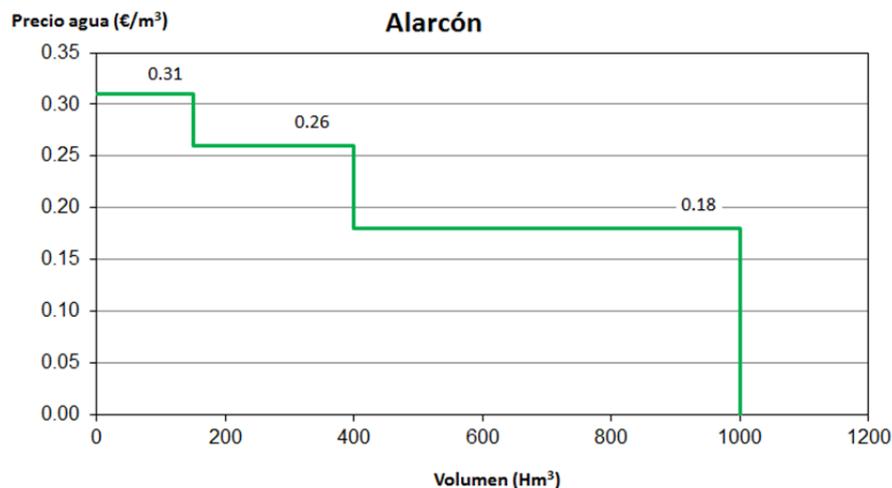


Figura 65. Función de precios escalonada en Alarcón

Como puede observarse, la política de precios es consistente con la teoría económica: cuando el volumen del embalse es bajo los precios son altos, y a la inversa.

A continuación se muestran los precios aplicados durante el período de análisis:



Figura 66. Frecuencia de aplicación política de precios sistema Júcar

6.3.3.2 Política de precios en embalse de Contreras

En la figura 67 se ha graficado el valor del CMOR asociado a cada volumen durante el período de análisis.

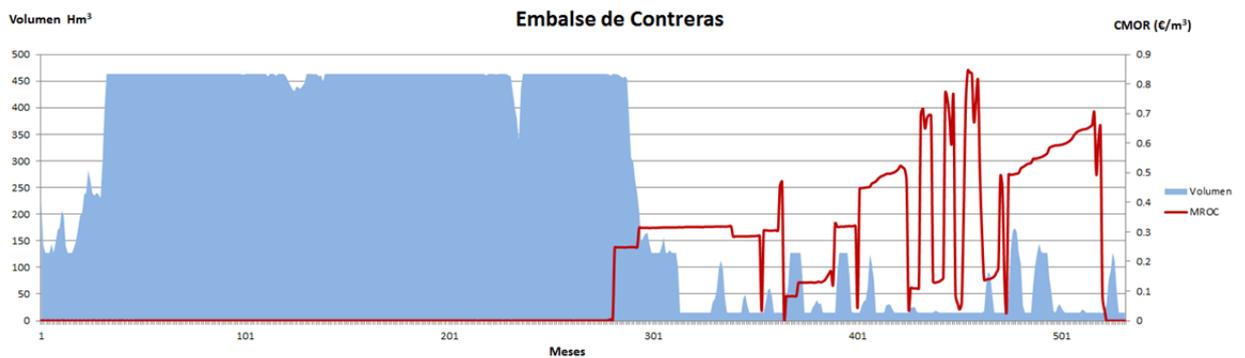


Figura 67. Volumen de Contreras vs CMOR

El siguiente paso consiste en agrupar los valores del CMOR según intervalos de los volúmenes embalsados que físicamente sean posibles:

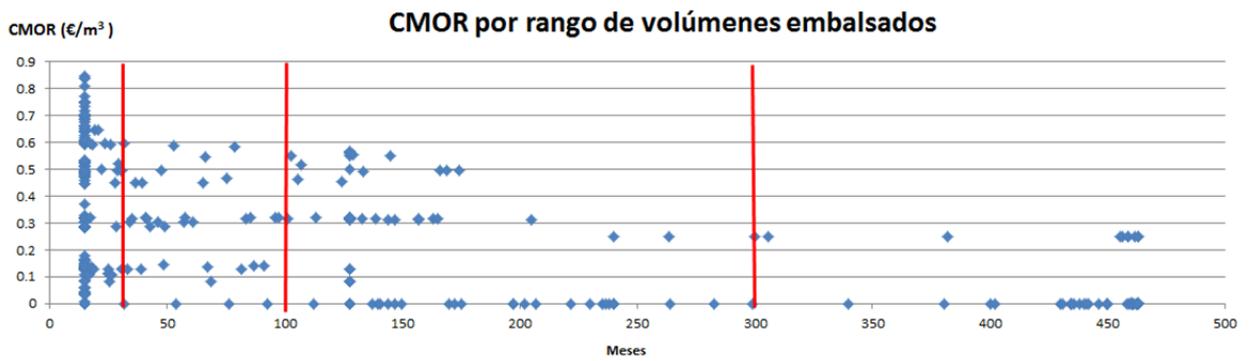


Figura 68. CMOR vs Volumen de Contreras

En la tabla 15 se muestra el valor promedio y la desviación típica asociada a cada rango de volúmenes:

Tabla 15. Valor promedio CMOR vs rango volúmenes en Contreras

Rango	0-30	30-100	100-300	300-463
Promedio	0.38	0.29	0.21	0.00
Desviación típica	0.23	0.18	0.20	0.00

Con todo ello se obtiene la siguiente política de precios:

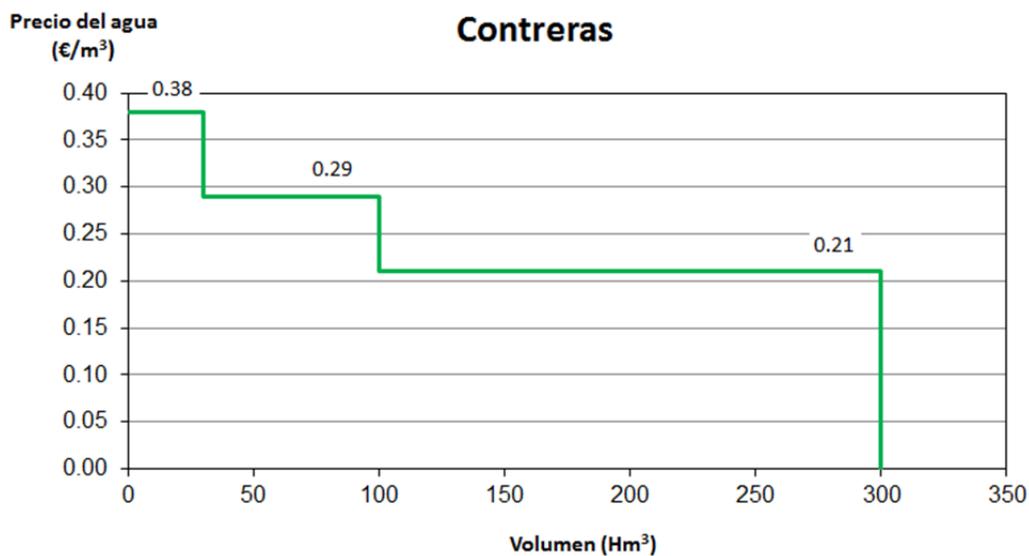


Figura 69. Función de precios escalonada en Contreras

Al igual que con la política de precios de Alarcón, se ha obtenido una política de precios escalonada que aplica precios altos cuando el volumen embalsado es bajo y viceversa.

A continuación se muestra la frecuencia de aplicación de cada uno de los precios durante el período de análisis:

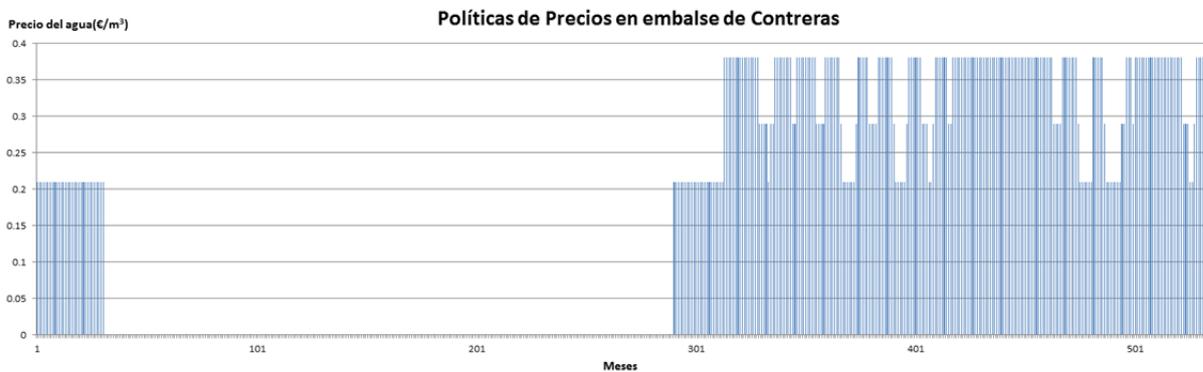


Figura 70. Frecuencia de aplicación política de precios sistema Júcar

6.3.3.3 Política de precios con embalses de Alarcón y de Contreras

Se plantea el dilema de qué política de precios aplicar, ya que se trata de un sistema multi-embalse. En esta tesina se plantea la siguiente opción: como volumen a considerar se tomará la suma de los volúmenes de Alarcón y de Contreras, y como valor de CMOR se plantean tres alternativas:

- Mínimo valor de CMOR entre Alarcón y Contreras
- Máximo valor de CMOR entre Alarcón y Contreras
- Valor medio de CMOR Alarcón y CMOR de Contreras

En la figura 71 se muestran los valores de CMOR obtenidos para las tres alternativas mencionadas en el párrafo anterior:

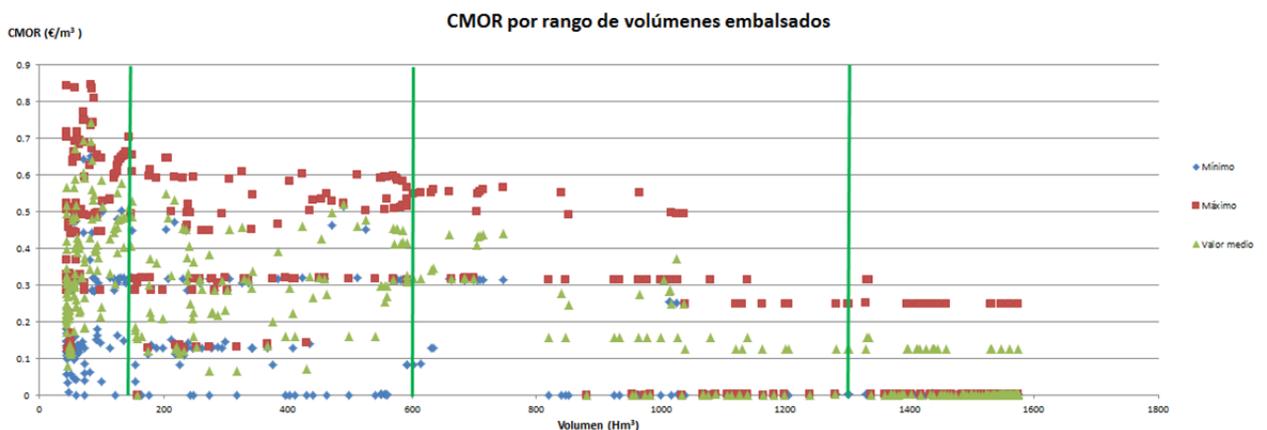


Figura 71. CMOR vs Volumen Alarcón+Contreras

En este caso los volúmenes son la suma de los de Alarcón y Contreras para cada mes, obteniéndose las siguientes políticas de precios (una por cada alternativa planteada):

Tabla 16. Valor promedio CMOR (€/m³) vs rango volúmenes de Alarcón + Contreras (Hm³)

Rango	0-150	150-600	600-1300	>1300
Criterio Mínimo	0.23	0.17	0.06	0.00
Criterio Máximo	0.48	0.42	0.22	0.00
Criterio Valor Medio	0.35	0.29	0.13	0

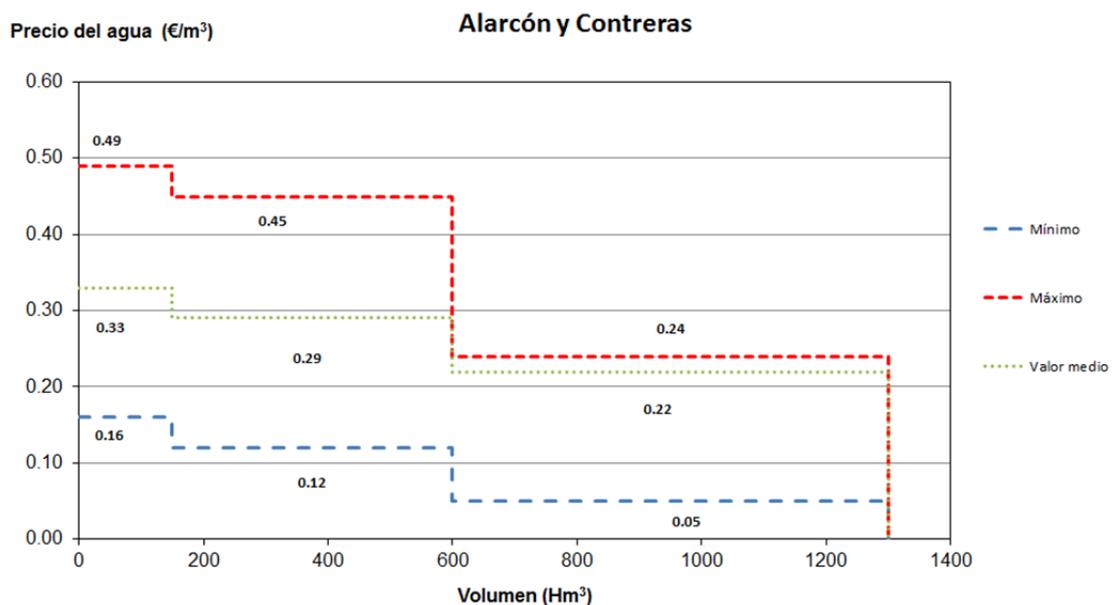


Figura 72. Función de precios escalonada con Alarcón y Contreras

Se han obtenido tres políticas de precios (véase figura 72), que son consistentes con las hipótesis planteadas: la obtenida con el criterio del valor máximo proporciona los precios más altos y la obtenida con el criterio del valor mínimo proporciona los precios más bajos. Todas las políticas son consistentes con la teoría económica: cuando los volúmenes embalsados son altos los precios son bajos y cuando los volúmenes embalsados son bajos los precios son altos.

Siendo las políticas de precios mostradas en la figura 72, las que se van a emplear para evaluar el efecto de aplicar políticas de precios sobre el sistema Júcar.

6.3.4 Aplicación de políticas de precios al sistema Júcar

Una vez diseñadas las políticas de precios, el siguiente paso es aplicar dichas políticas al sistema Júcar. Para ello, se ha empleado un período de análisis de 20 años (hidrología correspondiente al período de 1980 a 2001 recogiendo así el período de una de las sequías más severas que ha sufrido el sistema Júcar).

Para evaluar el efecto de las políticas de precios se va a emplear el programa SIMGAMS, es decir, modelo de simulación con prioridades y reglas de operación. Se han calculado los costes de escasez de las demandas agrarias del sistema en el Escenario Base, es decir sin aplicar ninguna política de precios y los Escenarios Modificados: uno por cada política de precios diseñada (véase figura 72). En la figura 73 se muestran los resultados obtenidos:

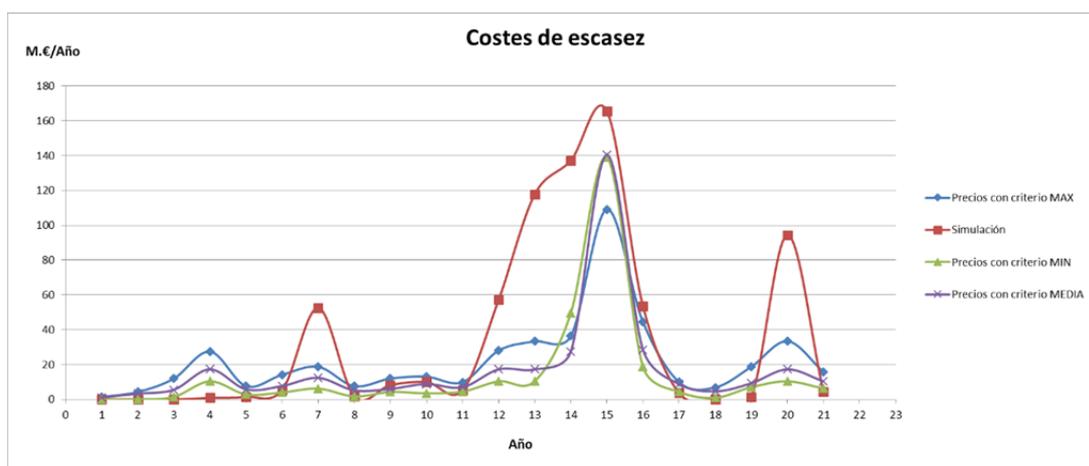


Figura 73. Costes de escasez Sistema Júcar con políticas de precios

Esta gráfica muestra la necesidad de redistribuir mejor los recursos disponibles en el tiempo para hacer frente a los períodos de sequías. Como puede observarse, existe una diferencia significativa en los costes de escasez entre el escenario base y los escenarios modificados. Ello se debe a que el valor marginal de los cultivos tipo arroz es de 0.05 €/m^3 , muy inferior a los precios marcados por las políticas de precios diseñadas. Por tanto, durante gran parte del período de análisis los agricultores de arroz no pueden comprar el agua, disponiéndose de gran cantidad extra de recurso hídrico para los cultivos tipo cítricos (valor marginal de 1 €/m^3).

Por tanto en el sistema Júcar se tienen, principalmente, dos grupos de cultivos con una diferencia significativa en el valor marginal del agua. Además el cultivo arroz (valor marginal del agua muy inferior al del cítrico) por lo general tiene una demanda de agua muy superior a la del cultivo tipo cítrico.

Si se aplicase esta política de precios al sistema se generaría una gran controversia entre los usuarios del sistema Júcar. Por ello, se decidió aplicarla sólo a los cultivos tipo cítricos. Esta hipótesis puede justificarse porque el arroz suele crecer en zonas protegidas como humedales, la Albufera desde abril de 1991 es una Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA), está incluida en la lista de humedales de importancia internacional del convenio RAMSAR desde mayo 1990, está recogida por el Protocolo de Ginebra, 3 abril 1982, sobre zonas especialmente protegidas del Mediterráneo y pertenece a la Red Natura 2000.

En la figura 74, se muestran los costes de escasez entre el escenario base y el escenario con política de precios obtenida con el criterio de mínimo.



Figura 74. Simulación política de precios sólo cultivos tipo cítricos

Como puede observarse también se obtiene una reducción del coste de escasez, aunque como era de esperar no tan significativa como la que se obtuvo al aplicar las políticas de precios tanto a los cultivos tipo cítricos como tipo arroz. Por ello, puede concluirse que la aplicación de políticas de precios tiene un efecto positivo en la gestión de sistemas de recursos hídricos.

6.4 Resultados Sistema Júcar con OPTIGAMS

Como ya se ha comentado, el programa OPTIGAMS permite desarrollar modelos hidroeconómicos con el enfoque de optimización. La herramienta gestiona el recurso hídrico disponible, con el criterio de minimizar los costes de escasez del sistema. Por ello, lo que hace OPTIGAMS es simular el efecto de un mercado perfecto sobre la gestión del sistema, en términos de reducción coste.

6.4.1 Resultados de gestión

A continuación se muestran los volúmenes embalsados de los principales embalses del sistema:

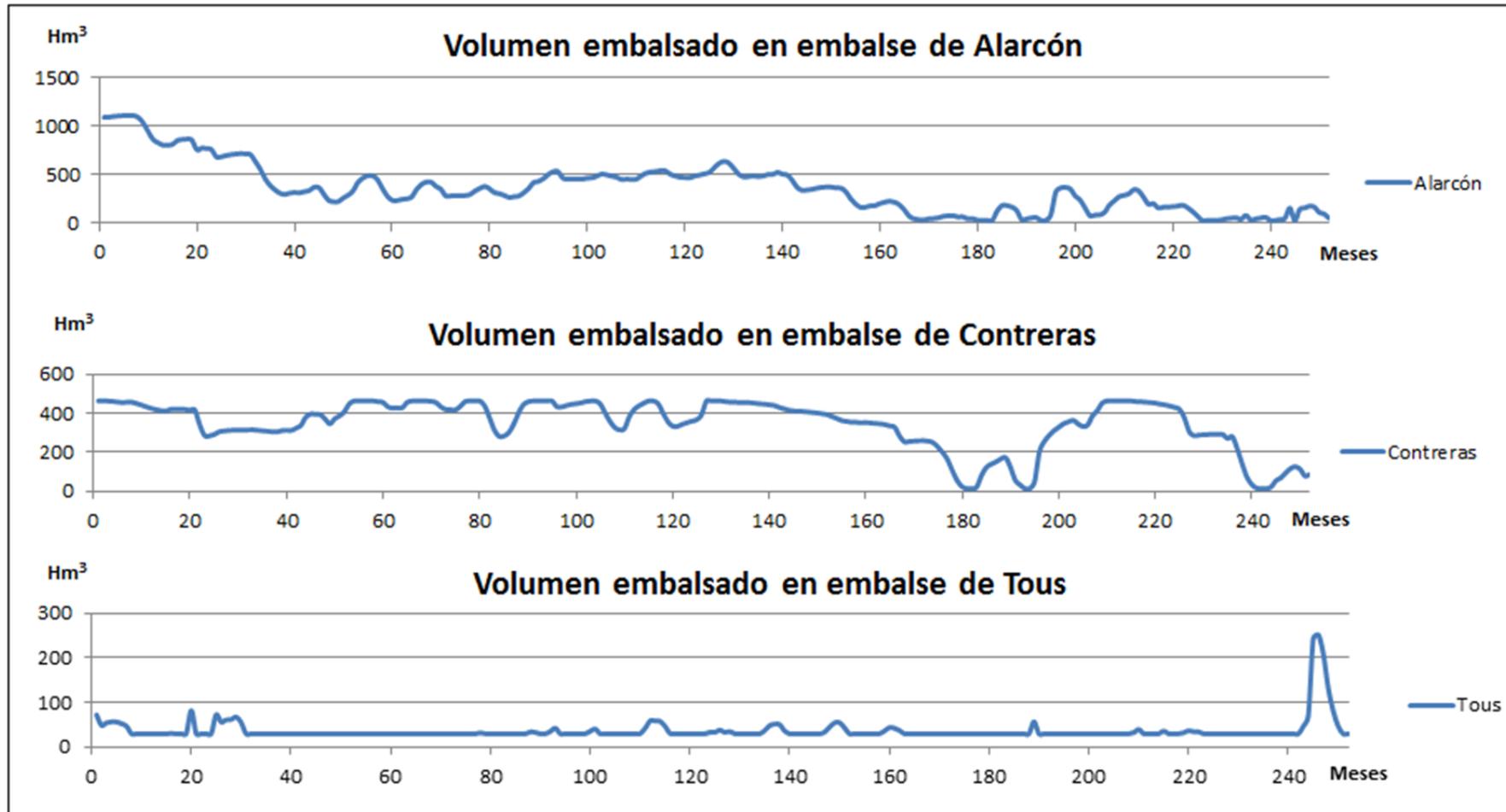


Figura 75. Volúmenes embalses OPTIGAMS

En la figura 76, se muestran los valores de la relación río-acuífero del acuífero de la Mancha Oriental y del que recibe las filtraciones del embalse de Contreras.

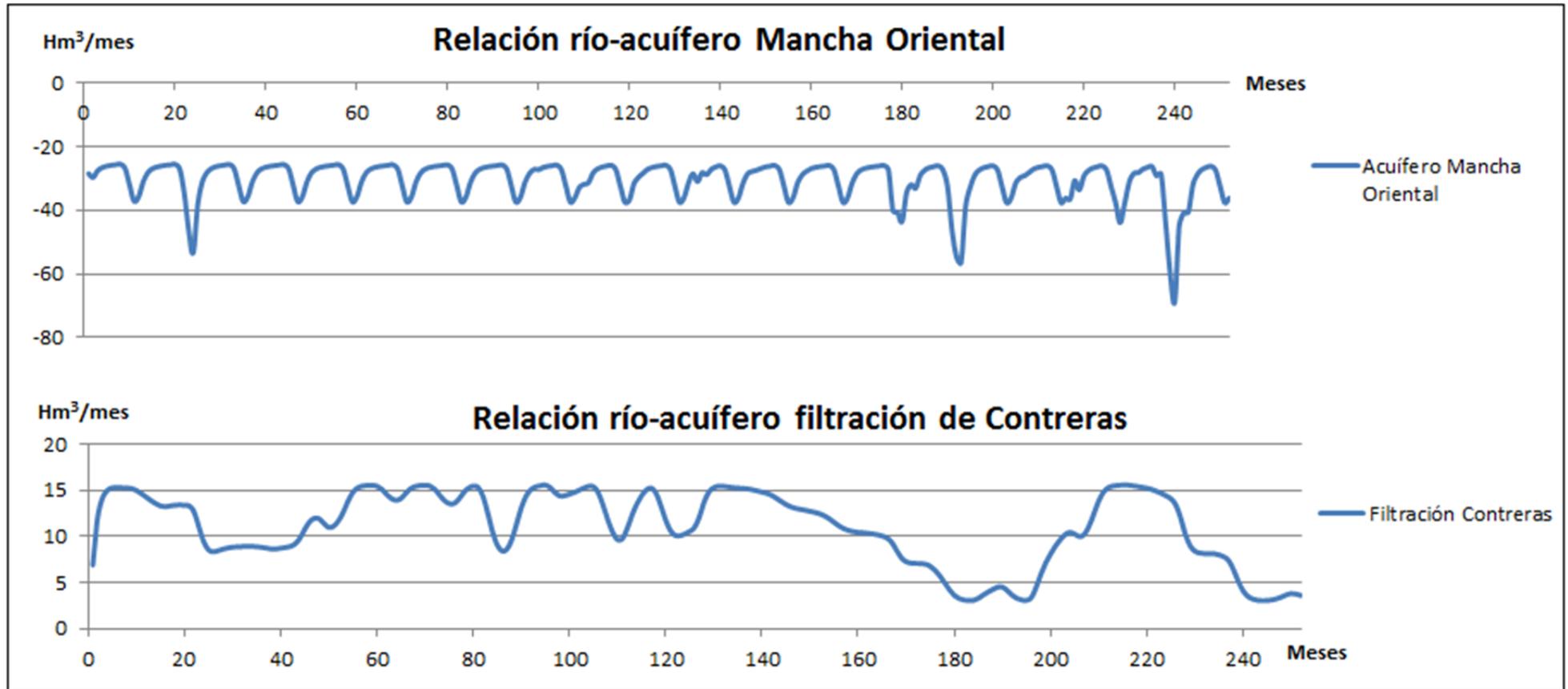


Figura 76. Relación río-acuífero con OPTIGAMS

A continuación se muestran los déficits de todas las demandas consuntivas del sistema por zonas y por tipos de uso:

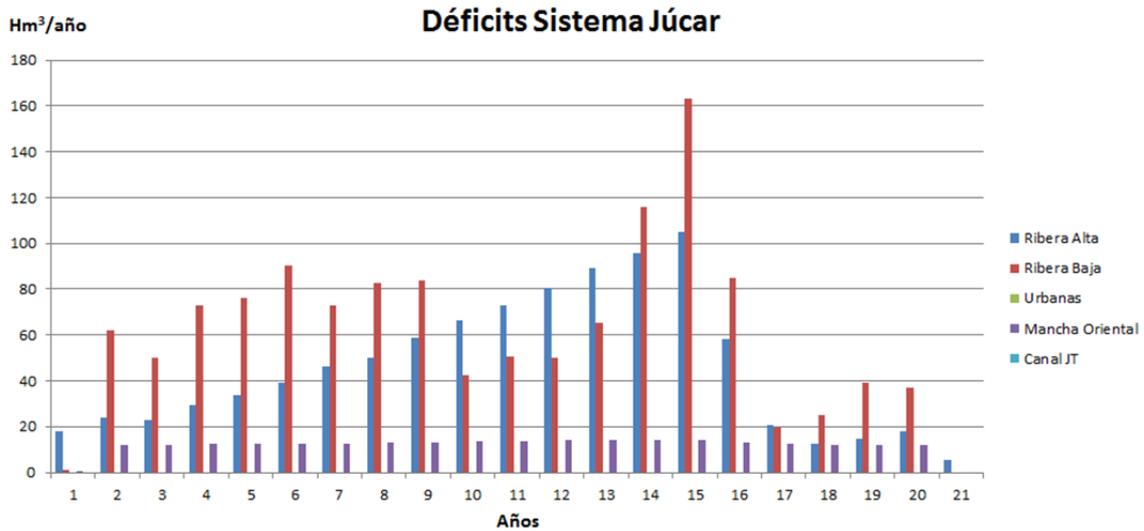


Figura 77. Déficits Sistema Júcar

En la figura 78, se muestran los caudales turbinados por las principales centrales hidroeléctricas del sistema Júcar:

Caudales turbinados Centrales Hidroeléctricas

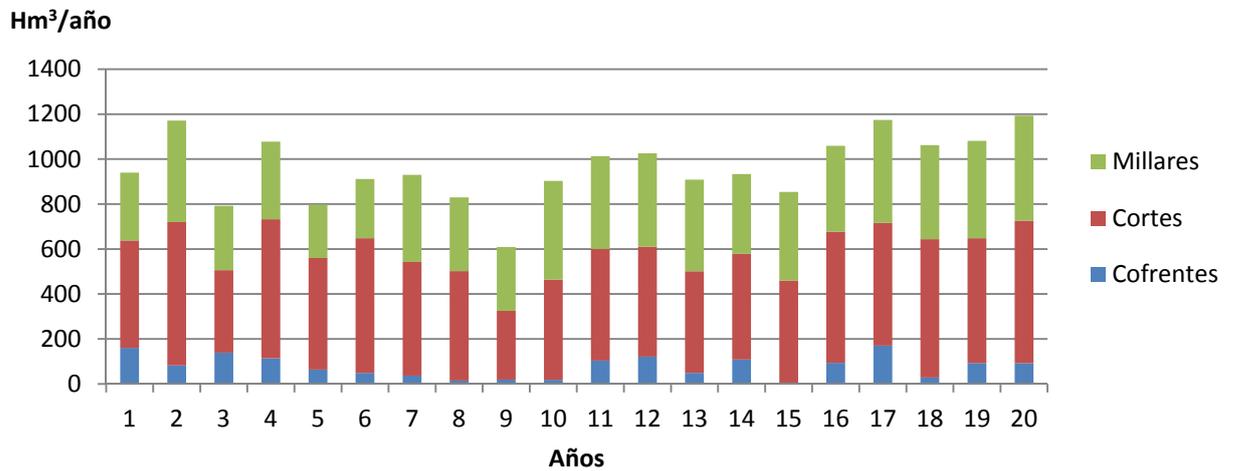


Figura 78. Caudales turbinados Centrales Hidroeléctricas

6.4.2 Resultados económicos. Mercados del agua

Como resultados económicos se obtienen tanto los costes de escasez como el coste marginal de oportunidad del recurso (CMOR). Para este análisis se han empleado curvas de demanda a escala mensual, como suele ser habitual en la resolución de problemas de optimización. En la tabla 17 se muestran los costes de escasez de cada demanda consuntiva

Tabla 17. Costes de escasez Sistema Júcar con mercados del agua

	Costes escasez (M.€) para 21 años
Acequia Real Júcar Cítricos	0
Regadíos Mancha Oriental	1.78
Sueca Cítricos	0
Cuatro Pueblos Cítricos	0
Cullera Cítricos	0
CJT	0
Acequia Real Júcar Arroz	18.03
Sueca Arroz	12.4
Cullera Arroz	8.76
Cuatro Pueblos Arroz	0.88
Escalona	0
Albacete	0
Valencia	0
Sagunto	0

Como se deduce de la tabla 17, al aplicar mercados del agua perfectamente competitivos (optimización económica), se observa que los costes de escasez se reducen notablemente. Ello es debido a la significativa diferencia (ya comentado previamente) que existe en el beneficio neto marginal de los cítricos y del arroz, siendo de 1 €/m³ y de 0.05 €/m³ respectivamente.

A continuación se muestran los costes de escasez y los déficits asociados de los cultivos de arroz de la Ribera Baja del Júcar (figuras 79 a 81). Observándose que los déficits y los costes de escasez siguen la misma tendencia.

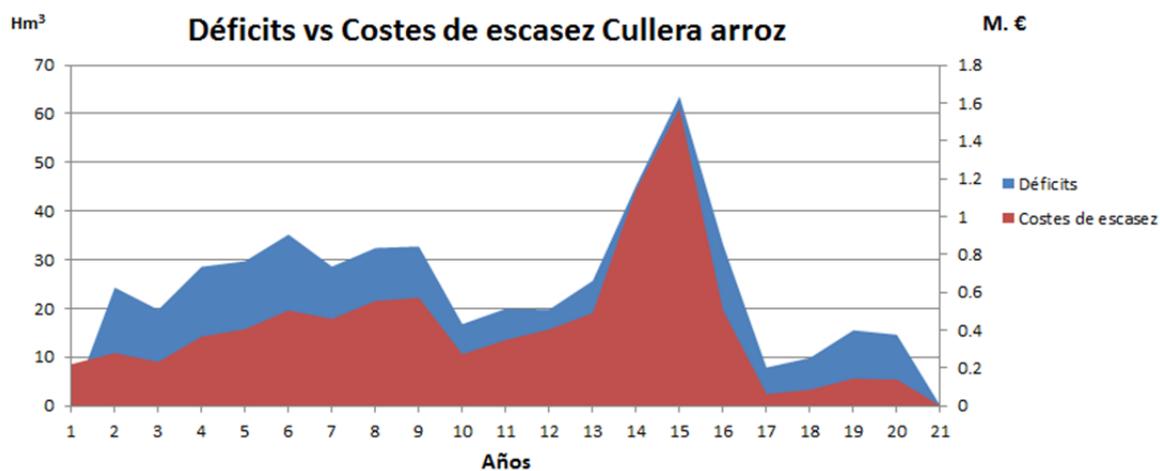


Figura 79. Costes de escasez vs déficits en mercados del agua Cullera



Figura 80. Costes de escasez vs déficits en mercados del agua Sueca



Figura 81. Costes de escasez vs déficits en mercados del agua Cuatro Pueblos

En la figura 82, se muestran los beneficios obtenidos por las principales centrales hidroeléctricas del sistema Júcar:

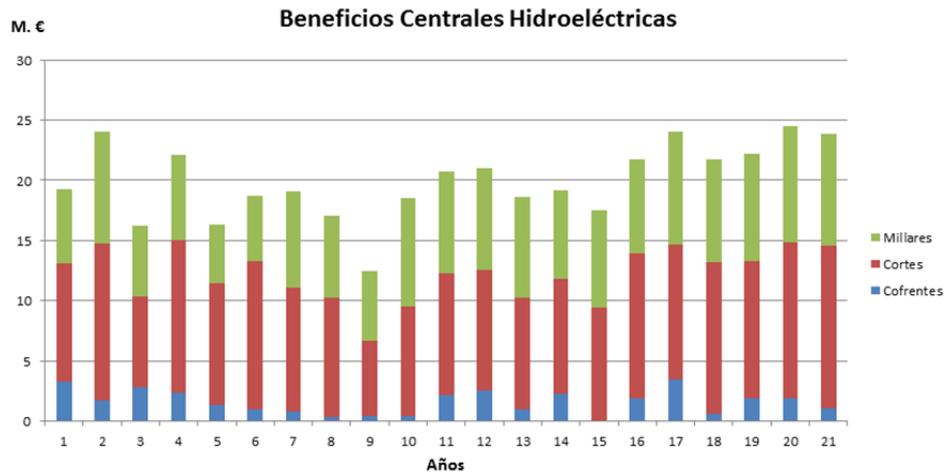


Figura 82. Beneficios Centrales Hidroeléctricas

Por otra parte, también se obtienen los costes marginales de oportunidad del recurso (CMOR), como ya se ha comentado previamente. A continuación se muestran los valores de CMOR obtenidos para los embalses de Alarcón y Contreras:

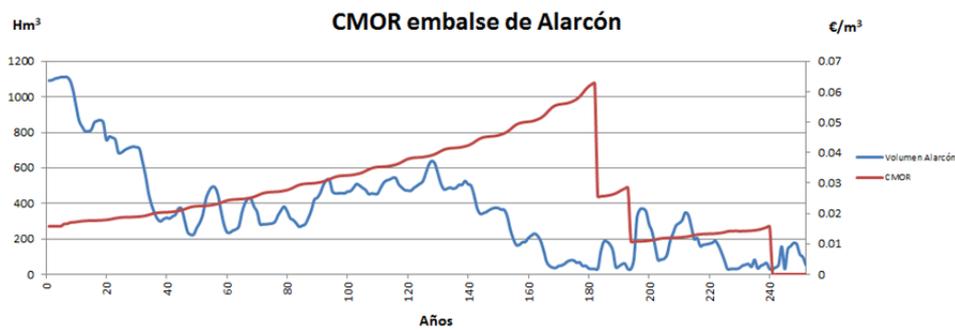


Figura 83. CMOR embalse de Alarcón

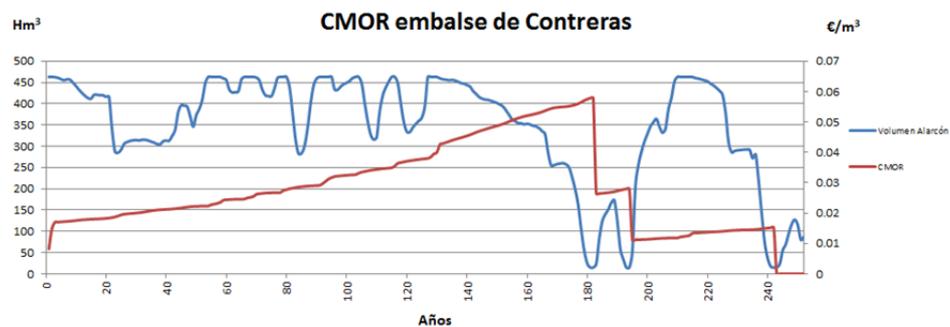


Figura 84. CMOR embalse de Contreras

Como puede observarse, con la aplicación de mercados perfectos del agua el valor marginal del agua es muy pequeño si lo comparamos con el obtenido con el enfoque de simulación. Este resultado es totalmente coherente, ya que con el enfoque de optimización económica, casi todos los déficits se producen en los cultivos tipo arroz que tienen un valor marginal de 0.05 €/m³ (frente a los cultivos tipo cítricos que tienen un valor marginal de 1 €/m³, y también se dan en los cultivos de la Mancha Oriental, aunque por ser de pequeña magnitud (un gran porcentaje se suministra por bombeo) el precio también es bajo (parte derecha de la curva de demanda).

6.5 Comparativa de resultados de instrumentos económicos

En este apartado se van a comparar los costes de escasez obtenidos con gestión con enfoque de simulación (basada en prioridades, reglas de operación y diversos objetivos), y con aplicación de instrumentos económicos: mercados del agua (optimización económica) y políticas de precios.

Primeramente, se van a comparar los valores obtenidos con el enfoque de simulación y con aplicación de políticas de precios tanto a los cultivos tipo cítrico como al arroz (se recuerda las políticas de precios se han aplicado también sólo a los cultivos tipo cítricos, bajo la hipótesis de que el arroz crece en zonas protegidas como humedales):

Tabla 18. Comparativa entre simulación y políticas precios

	Costes escasez Simulación (M.€) para 21 años	Costes escasez Políticas Precios (M.€) para 21 años
Acequia Real Júcar Cítricos	349.56	150.51
Escalona	31.52	28.14
Sueca Cítricos	33.80	16.04
Cuatro Pueblos Cítricos	2.51	1.73
Cullera Cítricos	10.91	6.44
CJT	272.48	58.44
Acequia Real Júcar Arroz	6.56	29.35
Sueca Arroz	7.57	37.40
Cullera Arroz	5.36	27.94
Regadíos M. O.	0.74	0.74

	Costes escasez para 21 años	Costes escasez Políticas Precios para 21 años
Cuatro Pueblos Arroz	0.44	5.99
Total	721.01	356.75

Como puede observarse, al aplicar las políticas de precios el coste de escasez se reduce en un 49% respecto a la situación de gestión con simulación sin aplicar ningún instrumento económico. Los costes de escasez de los cultivos tipo cítricos disminuyen significativamente, mientras que los del tipo arroz aumentan. Aunque las disminuciones de costes se producen en una proporción significativamente mayor que los aumentos de costes. Este resultado pone de manifiesto que los cultivos tipo arroz, consumen una gran cantidad de agua que reporta un beneficio o unas pérdidas muy bajas en comparación con las de los cultivos tipo cítricos. Por ello, se puede afirmar que el arroz tiene un alto coste de oportunidad, mientras que los cítricos tienen un bajo coste de oportunidad.

A la hora de diseñar las políticas de precios, se aplicaron tres criterios para obtener el valor de CMOR entre los embalses de Alarcón y de Contreras (Problema multi-embalse). Los costes de escasez recogidos en la tabla 18, se corresponden a la aplicación de política de precios obtenida a partir de CMOR, como valor medio de los embalses de Alarcón y de Contreras. A continuación, se muestra una tabla con las reducciones del coste de escasez que se obtendrían si se aplicasen las tres políticas de precios diseñadas:

Tabla 19. Reducción coste de escasez con aplicación de Políticas de Precios

	Reducción
Política de Precios con criterio de mínimo para CMOR	59%
Política de Precios con criterio de valor medio para CMOR	49%
Política de Precios con criterio de máximo para CMOR	36%

Estos resultados confirman, la necesidad de incorporar los instrumentos económicos a la gestión de los sistemas de recursos hídricos.

Al aplicar una política de precios tan sólo a los cultivos tipo cítricos, se obtuvo un efecto positivo igualmente (aunque una reducción menos significativa que cuando se aplica tanto a los cítricos como al arroz). Se redujo el coste de escasez de 721 M. € a 718 M. €. Este resultado refuerza el efecto positivo que tiene el aplicar políticas de precios del agua a la gestión de los sistemas de recursos hídricos.

A continuación se va a analizar el efecto de la aplicación de mercados del agua perfectamente competitivos (no se consideran los costes de transacción) a la gestión de sistemas de recursos hídricos. En la tabla 20 se muestra la comparativa de los costes de escasez obtenidos con política de precios y con aplicación de mercados del agua a las demandas agrarias del sistema:

Tabla 20. Políticas de precios vs Mercados del agua

	Costes escasez Políticas Precios (M.€) para 21 años	Costes escasez Mercados del agua (M.€) para 21 años
Acequia Real Júcar Cítricos Escalona	150.51	0
Acequia Real Júcar Arroz	29.35	18.03
Sueca Cítricos	16.04	0
Cuatro Pueblos Cítricos	1.73	0
Sueca Arroz	37.40	12.4
Cullera Arroz	27.94	8.76
Regadíos Mancha Oriental	0.74	1.78
Cuatro Pueblos Arroz	5.99	0.88
Cullera Cítricos	6.44	0
CJT	58.44	0
Total	362.74	41.85



Como puede observarse al aplicar mercados del agua se obtiene una gran reducción del coste de escasez (88%) con respecto a la aplicación de políticas de precios. Este resultado es coherente con los tipos de cultivos que hay en la cuenca: la política de precios no suministra recurso alguno al arroz en la

mayoría de los casos (no pueden permitirse comprar el agua a ese precio), y además también aplica restricciones a la demanda de los cítricos en función del volumen embalsado en Alarcón y Contreras; mientras que los mercados del agua no aplican restricción alguna y lógicamente da prioridad a los cultivos que producirían un alto coste de escasez (cítricos) que además son los que demandan una menor cantidad de agua (salvo en la Acequia Real).

Con estos resultados se demuestra la eficacia de los mercados del agua y de las políticas de precios en la gestión de sistemas de recursos hídricos, especialmente en épocas de sequías donde claramente se requiere una redistribución de recursos, dado que la cuenca tiene, principalmente, dos cultivos con un beneficio marginal neto muy diferente.

CAPÍTULO 7. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se han desarrollado nuevas herramientas que permiten evaluar el efecto de la aplicación de instrumentos económicos, concretamente mercados del agua y políticas de precios, en la gestión de sistemas de recursos hídricos. Para obtener las políticas de precios se ha empleado el concepto de coste marginal de oportunidad del recurso (CMOR) y para la simulación de mercados del agua perfectamente competitivos se ha empleado la optimización económica. El caso de estudio es el sistema de explotación Júcar.

7.1 Herramientas SIMGAMS y OPTIGAMS

Las herramientas desarrolladas se han basado en el enfoque de modelos hidroeconómicos. Se presentan dos nuevas herramientas SIMGAMS y OPTIGAMS.

La herramienta SIMGAMS permite desarrollar modelos de simulación con gestión basada en prioridades y/o reglas de operación. También es un post-procesador económico, que permite obtener los costes de escasez asociados a la gestión realizada. Tiene implementado dos módulos que permiten simular el efecto de políticas de precios, uno de ellos permite obtener el CMOR y el otro simular el efecto de las políticas de precios (creadas según Pulido-Velázquez et

al., 2013) al permitir que la demanda de los usuarios sea variable en función del precio del agua.

La herramienta OPTIGAMS permite desarrollar modelos de optimización con gestión basada en criterios económicos. Tiene implementada una función económica que minimiza los costes de escasez de los usuarios del sistema. Esta optimización económica se corresponde con la simulación de mercados del agua perfectamente competitivos.

Tanto SIMGAMS como OPTIGAMS permiten simular acuíferos y la relación río-acuífero de modelos pluricelulares.

Para el desarrollo de estas herramientas se han empleado las siguientes herramientas base: GAMS (Brooke et al., 1998) para el desarrollo de los códigos, HYDROPLATFORM (Harou et al., 2010) para el desarrollo de la red del sistema de recursos hídricos y el módulo SIMGES del programa AQUATOOL (Andreu et al., 1996) para validación de la herramienta SIMGAMS

7.2 Instrumentos económicos

En este trabajo de investigación se han diseñado y evaluado el efecto de políticas de precios y de mercados del agua en la gestión del sistema Júcar.

Para diseñar las políticas de precios se ha empleado un enfoque basado en la escasez del agua. Se han calculado a partir del coste marginal de oportunidad del recurso, como en trabajos previos, pero como novedad se ha abordado el problema de sistema multi-embalse. En este sentido se ha diseñado una política de precios conjunta para los embalses de Alarcón y de Contreras con tres criterios distintos. Con este enfoque cuando los volúmenes embalsados son grandes los precios del agua son bajos, y cuando los volúmenes embalsados son bajos (como en las situaciones de sequías) los precios del agua son altos. Este es un enfoque novedoso en el campo de la gestión de sistemas de recursos hídricos.

En referencia a los mercados del agua, hasta ahora la herramienta sólo permite simular el efecto de mercados del agua ideales (por ejemplo no se tienen en cuenta costes de transacción).

Para los agricultores, los mercados del agua son más aceptables que las políticas de precios, ya que con los mercados incrementan sus ingresos con la venta del agua mientras que con las políticas de precios son penalizados. Pero, la experiencia demuestra que en la práctica para implementar los mercados del agua es necesario realizar muchos cambios. De todas las opciones que existen para resolver problemas de escasez del agua la menos utilizada, de acuerdo con su potencial, son las políticas de precios del agua. Hasta ahora las políticas de precios tan sólo se han utilizado como instrumento financiero para recuperación de costes y no como un instrumento económico, que es el enfoque que hemos presentado en este trabajo.

Por ejemplo el BLUEPRINT (EC; 2012) pone un énfasis en la eficiencia del agua y da soporte al empleo de instrumentos económicos para alcanzar sus objetivos.

7.3 Conclusiones de la aplicación al sistema Júcar

Los resultados obtenidos refuerzan la necesidad de emplear instrumentos económicos en la gestión de los recursos hídricos. Concretamente, en el sistema Júcar demuestran la necesidad de redistribuir los recursos existentes durante los períodos de sequías. Al aplicar políticas de precios al sistema Júcar, se ha obtenido una disminución de los costes de escasez de las demandas agrícolas del sistema de entre un 36% y 59% (según la política de precios aplicada) con respecto a la gestión sin instrumentos económicos (simulación basada en prioridades y/o reglas de operación). Se obtienen unas reducciones tan significativas porque los principales cultivos son el arroz y los cítricos. Estos cultivos tiene un valor marginal del agua de 0.05 €/m³ y 1 €/m³ respectivamente. Además el arroz, salvo en la Acequia Real del Júcar, tiene una demanda superior a la de los cítricos, es decir un coste de oportunidad muy alto: gran cantidad de agua que genera un beneficio o pérdidas muy

pequeñas en comparación con la de los cítricos. También se decidió aplicar las políticas de precios, sólo a los cítricos bajo la hipótesis de que el arroz crece en zonas protegidas, obteniéndose un efecto positivo (reducción del coste de escasez de 721 M.€ a 718 M.€). Ésto confirma la utilidad de las políticas de precios en la gestión de sistemas.

Por otra parte, también se aplicó un mercado del agua ideal al sistema Júcar (optimización económica que minimiza los costes de escasez totales del sistema), obteniéndose una reducción significativa del coste de escasez respecto a la obtenida con la aplicación de las políticas de precios, en torno a un 88%.

Como resumen, es necesario emplear instrumentos económicos en el sistema Júcar para reducir las pérdidas económicas del sistema. Principalmente, existen dos cultivos con un beneficio neto marginal muy dispar: arroz y cítricos. Ésto tiene que ser tenido en cuenta, principalmente durante períodos de escasez del agua.

7.4 Limitaciones y Líneas futuras

Con este trabajo de investigación, se dispone de la base para realizar la tesis doctoral. Los siguientes pasos a realizar consisten en:

- Cálculo de las curvas de demanda agrícolas mediante la herramienta MODERE. Es una herramienta desarrollada en GAMS, que trata de simular las decisiones de los agricultores. Tiene implementada una función de utilidad exponencial que analiza simultáneamente diferentes atributos como son: maximizar el beneficio, minimizar el riesgo y la complejidad de la gestión.
- Análisis de nuevos instrumentos económicos e institucionales como por ejemplo aplicación de seguros a cultivos de regadío.
- Incluir en la simulación de mercados los costes de transacción del agua y otras restricciones.

- Analizar la alternativa de que los ingresos por precios, nos sirvan para compensar las pérdidas
- Análisis de los efectos del cambio climático en la gestión del sistema Júcar, a corto, medio y largo plazo.

En referencia a las limitaciones del estudio realizado:

- No se incorporan los valores ambientales.
- Sólo se tiene en cuenta el criterio de eficiencia y no la equidad.
- Incertidumbre asociada a la obtención de las curvas de demanda.

Referencias

- Alvarez-Mendiola, E. (2010). "Diseño de un política eficiente de precios del agua integrando costes de oportunidad del recurso a escala de cuenca. Aplicación a la Directiva Marco europea del agua." Ph.D. dissertation, Univ. Politècnica de Valencia, Spain (in Spanish).
- Andersen, M. S. (2001) "Economic instruments and clean water: why institutions and policy design matter", OECD, Paris
- Andreu, J., J. Capilla y J. Ferrer, 1992. Modelo SIMGES de Simulación de la Gestión de Recursos Hídricos incluyendo utilización conjunta. Manual del Usuario. Servicio Publ. Universidad Politècnica de Valencia, Valencia, Spain.
- Andreu, J., J. Capilla y E. Sanchís, 1996. AQUATOOL, a generalized decision support system for water-resources planning and management, Journal of Hydrology, 177, 269-291.
- Andreu et al., 2007: "Modelo SIMGES para simulación de cuencas. Manual de usuario v 3.00". Editorial Universidad Politècnica de Valencia.
- Arqued V., 2013. Presentación realizada en "Jornadas Internacionales de Sistemas Soporte de Decisión en la Planificación y Gestión de Recursos Hídricos". Universidad Politècnica de Valencia.
- Assimacopoulos, D (2004): An Integrated Decision Support System for the evaluation of water management strategies. IDS Water Europe web conference, May 2004
- Baumann, D.D. y J.J. Boland, 1998. The case for managing urban water. In D.D. Baumann et al., eds., Urban Water Demand Management and Planning, p. 1-30. McGraw-Hill, Inc., NY.
- Bazzani, G.M., Di Pasquale, S., Gallerani, V., Morganti, S., Raggi, M. & Viaggi, D. (2005) "The sustainability of irrigated agricultural systems under the Water Framework Directive: first results", Environmental Modeling and Software 20, p165–175

- Bazaraa, M.S., J.J. Jarvis y H.D. Sherali, 1990. Linear programming and network flows. John Wiley & Sons; 2nd edition. 704 pp.
- Bernstein, J.D. (1997) "Economic instruments", Chapter 6, in: Helmer, R. & Hespanhol, I. (eds.) Water Pollution Control - A Guide to the Use of Water Quality Management Principles, WHO/UNEP, http://www.who.int/water_sanitation_health/resourcesquality/wpcchap6.pdf
- Blanco I., Varela-Ortega C. and Flichman G. (2009) "Groundwater development and wetlands preservation: assessing the impact of water conservation policies", Paper submitted for 13th IWRA World Water Congress 2008: GLOBAL CHANGES and WATER RESOURCES: confronting the expanding and diversifying pressures, 1-4 September 2008, Montpellier, France"
- Booker, J. & Young, R. (1994) "Modeling intrastate and interstate markets for Colorado River water resources", Journal of Environmental Economic Management 26(1), p66-87
- Brown, C., Rogers, P., 2006. Effect of forecast-based pricing on irrigated agriculture: a simulation. Journal of Water Resources Planning and Management 132 (6), 403–413.
- Burt, O.R., 1964. Optimal resource use over time with an application to groundwater. Management Science 11 (1), 80–93.
- Cai, X., D.C. McKinney y L.S. Lasdon, 2003. Integrated hydrologic -agronomic-economic model for river basin management. Jnl. Water Resources Planning and Management., 129(1), 4-17.
- CCE, 2000. Directiva 2000/60/CE Marco del Agua del Parlamento Europeo y del Consejo. Consejo de la Comunidad Europea.
- CHJ, 1999. Plan Hidrológico de cuenca del Júcar. Disponible en www.chj.es. Confederación Hidrográfica Júcar.
- CHJ, 2009: Documento Técnico de Referencia: Metodología y Resultados de la Estimación de Demandas en el ámbito territorial de la Confederación Hidrográfica del Júcar. Confederación Hidrográfica del Júcar.

- CHJ, 2012. Esquemas de Temas Importantes. Disponible en www.chj.es. Confederación Hidrográfica Júcar.
- CHJ, 2013. Borrador Plan Hidrológico de Cuenca del Júcar. Confederación Hidrográfica del Júcar, Valencia, España
- Collazos Guillermo, 2004. Sistema de soporte de decisión para evaluación y optimización económica de sistemas de recursos hídricos. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de València.
- Deidda, D., 2004: Análisis microeconómico de sistemas de recursos hídricos mediante modelos de simulación: Aplicación a la cuenca del Río Júcar. Ejercicio Final de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Valencia.
- Diaz, G.E., T.C. Brown y O. Sveinsson, 2000. AQUARIUS: a modeling system for river basin water allocation. USDA Forest Service, General Technical Report RM-GTR-299.
- Diaz, G.E., Brown, T.C., Sveinsson, O.G.B., 2000. Aquarius: a modeling system for river basin water allocation. General Technical Report RM-GTR-299. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Fort Collins, CO.
- Dinar, A., M.W. Rosegrant y R. Meizen-Dick, 1997. Water allocation mechanisms. World Bank, Policy Research Paper n. 1779. Washington, DC.
- EC (European Commission), 2012. A Blueprint to Safeguard Europe's Water Resources, European Commission, Brussels, 14.11.2012, COM(2012) 673 final.
- EPI Water, 2013. Evaluating Economic Policy Instruments for sustainable water management in Europe. Véase <http://www.feem-project.net/epiwater/>
- Estrela Monreal, 2014. Presentación para la asignatura "Planificación y Gestión de Recursos Hídricos". Grado en Ingeniería de Obras Públicas. Universitat Politècnica de València.

- Fredericks, J.W., J.W. Labadie y J.M. Altenhofen, 1998. Decision support system for conjunctive stream-aquifer management. *J. Water Resour. Planning and Mgmt.* 124 (2), 69-78.
- García Mollá, M., 2000. Análisis de la influencia de los costes en el consume de agua en la Comunidad Valenciana. Caracterización de las entidades organizativas para riego. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, Spain.
- García Valiñas, M. A., 2002. La demanda de agua en las ciudades: estimación comparada para tres municipios españoles. En L. del Moral (ed.), III Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del Agua. La Directiva Marco del Agua, realidades y futuros, p. 232-253. Universidad de Sevilla, Universidad Pablo de Olavide, Fundación Nueva Cultura del Agua. Sevilla, Spain. 787 pp.
- GIRH-IIAMA, 2006: Desarrollo y aplicación de metodologías y herramientas en la cuenca piloto del río Júcar para los análisis económicos requeridos en la Directiva Marco Europea del Agua. Informe Final. Proyecto de Investigación y Desarrollo entre Universidad Politécnica de Valencia y EPTISA.
- Griffin, R.C., 2006. *Water Resource Economics: The Analysis of Scarcity, Policies, and Projects.* The MIT Press. 424 pp.
- Grafton, R.Q., Landry, C., Libecap, G., McGlennon, S. & O'Brien, B. (2010) "An integrated assessment of water markets: Australia, Chile, China, South Africa and the USA", ICER Working Paper Series No. 32/2010, <http://www.icer.it/docs/wp2010/ICERwp32-10.pdf>
- Harou et al., 2010 "An open-source model platform for water management that links models to a generic user-interface and data-manager". International Congress on Environmental Modelling and Software: "Modelling for Environment's Sake". Fifth Biennial Meeting. Ottawa, Canada.
- Harou, J.J., Pulido-Velazquez, M., Rosenberg, D.E., Medellín-Azuara, J., Lund, J.R., Howitt, R.E. (2009). Hydro-economic Models: Concepts, Design, Applications, and Future Prospects. *J. of Hydrology*, 375 (3-4), 627–643, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.06.037

- Heinz, I., Pulido-Velazquez, M., Lund, J. R., and Andreu, J. (2007). "Hydro-economic modeling in river basin management: Implications and applications for the European Water Framework Directive." *Water Resour. Manage.*, 21(7), 1103–1125.
- Howe, C.W., D.R. Schurmeier y D.W. Shaw, 1986. Innovative approaches to water allocation: the potential for water markets. *Water Resources Research*, 22(4), 439-445
- Howitt, R.E., MacEwan, D., Medellín-Azuara, J., & Lund, J.R. (2010) "Economic Modeling of Agriculture and Water in California using the Statewide Agricultural Production Model", California Department of Water Resources, University of California – Davis.
- Jenkins, M.W., J.D. Draper, J.R. Lund, R.E. Howitt, et al., 2001. Improving California Water Management: Optimizing Value and Flexibility, Center for Environmental and Water Resources Engineering, Report no.01-1, Univ. California at Davis, Calif., USA.
- Jenkins, M.W., Howitt, R. E., Lund, J.R., Draper, A.J., Tanaka, S.K., Ritzema, R.S., Marques, G.F., Msangi, S.M., Newlin, B.D., Van Lienden, B.J., Davis, M.D., Ward, K.B, 2001. Improving California Water Management: Optimizing Value and Flexibility. Report No. 01-1. Center for Environmental and Water Resources Engineering, University of California.
- Labadie, J.W. 1988. Program MODSIM: River basin network flow model for the microcomputer. Department of Civil Engineering, Colorado State University, Ft. Collins, Colorado.
- Loucks, D.P., P.N. French y M.R. Taylor, 1995. IRAS interactive river-aquifer simulation program description and operation. V.1.01. Ithaca, New York; Cornell University and Resources Planning Associates.
- Loucks, D.P., 2002. IRAS- Interactive River-Aquifer Simulation for policy impact prediction. In E. Cabrera, R. Cobacho and J.R. Lund (eds.), *Regional Water System Management; Water Conservation, Water Supply and System Integration*, p. 305-321. Balkema Publishers, The Netherlands.

- Lund, J.R., Ferreira, I., 1996. Operating rule optimization for Missouri River reservoir system. *Journal of Water Resources Planning and Management – ASCE* 122 (4), 287–295.
- MacDonald, D. H., Connor, J. & Morrison, M. (2004) "The use of economic instruments for managing water quality", CSIRO final report NZ Ministry for the Environment
- McKinney, D., Cai, X., Rosegrant, M., Ringler, C. & Scott, C. (1999) "Modeling Water Resources Management at the Basin Level: Review and Future Directions", Technical Report. International Water management Institute. Paper 6, 71 pp. Colombo. MEA, 2003
- MIMAM, 2000. Libro Blanco del Agua en España. Ministerio de Medio Ambiente, España. 637 pp.
- O'mara, G.T., Duloy, J.H., 1984. Modeling efficient water allocation in a conjunctive use regime the Indus Basin of Pakistan. *Water Resources Research* 20 (11), 1489–1498.
- Provencher, B., Burt, O., 1994. Approximating the optimal groundwater pumping policy in a multi aquifer stochastic conjunctive use setting. *Water Resources Research* 30 (3), 833–843.
- Pulido- Velázquez M., 2003: Optimización Económica de la Gestión del Uso Conjunto de Aguas superficiales y Subterráneas en un sistema de Recursos Hídricos. Contribución al Análisis económico propuesto en la Directiva Marco Europea del Agua. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de València. Valencia, España.
- Pulido-Velázquez, M., Sahuquillo, A., and J. Andreu, 2006. Economic optimization of conjunctive use of surface and groundwater at the basin scale. *J. Water Resour. Plan. Manage.*, 132(6), 454-467.
- Pulido-Velázquez, M., Andreu, J., Sahuquillo, A., and Pulido-Velázquez, D. (2008). Hydro-economic river basin modelling: The application of a holistic surface-groundwater model to assess opportunity costs of water use in Spain. *Ecological Economics*, 66(1), 51-65.

- Pulido-Velazquez, M., Lopez-Nicolas, A., Harou J., Andreu J.; 2013. "Generalized DSS Shell for developing simulation and optimization hydro-economic models of complex water resources systems". Poster para la Asamblea General de la EGU 2013. Viena
- Pulido-Velazquez, M., Alvarez-Mendiola, E., and Andreu, J., 2013. Design of Efficient Water Pricing Policies Integrating Basinwide Resource Opportunity Costs. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 139(5): 583-592.
- Rogers, P., Smith, D.V., 1970. Integrated use of ground and surface water in irrigation project planning. *American Journal of Agricultural Economics* 52 (1),13.
- Rosenberg, D.E., Howitt, R.E., Lund, J.R., 2008. Water management with water conservation, infrastructure expansions, and source variability in Jordan. *Water Resources Research* 44, W11402.
- Sumpsi, J.M., A. Garrido, M. Blanco, C. Varela y E. Iglesias, 1998. *Economía y política de gestión del agua en la agricultura*. Mundi-Prensa, Madrid, Spain.
- Tanaka, S.K., Zhu, T.J., Lund, J.R., Howitt, R.E., Jenkins, M.W., Pulido, M.A., Tauber, M., Ritzema, R.S., Ferreira, I.C., 2006. Climate warming and water management adaptation for California. *Climatic Change* 76 (3–4), 361–387.
- USACE (U.S. Army Corps of Engineers), 2007. HEC-Res Sim. Reservoir System Simulation. User's manual U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, Calif., USA. Disponible en <http://www.hec.usace.army.mil/publications>
- Young, R.A., 1996a. Water Economics. In L.A. Mays (ed.), *Handbook of Water Resources*. McGraw-Hill, p. 3.1.-3.57.
- Young, R.D., 2004. Effective economic decision-making. National Center on Nonprofit Enterprise. Foundation Center.
- Ward, F. A., B. H. Hurd, T. Rahmani, and N. Gollehon (2006), Economic impacts of federal policy responses to drought in the Rio Grande Basin, *Water Resour. Res.*, 42, W03420, doi:10.1029/2005WR004427.

- Ward, F.A. & Pulido-Velázquez, M. (2008) "Efficiency, equity, and sustainability in a holistic water quantity — quality optimization model in the Rio Grande basin", Ecological Economics Special Issue Integrated Hydro-Economic Modelling.

ANEXO I. ESQUEMA SISTEMA DE EXPLOTACIÓN RÍO JÚCAR

ANEXO II. PROGRAMA HYDROPLATFORM

ANEXO II. PROGRAMA HYDROPLATFORM

HYDROPLATFORM es un programa que genera los datos de entrada que un modelo HidroEconómico en GAMS requiere: matrices de conectividad, aportaciones referenciadas a cada uno de los nudos, pérdidas de flujo a lo largo de las masas de agua o conducciones de los canales,...

Para su funcionamiento el lenguaje del ordenador debe ser inglés.

El programa permite definir todos los tipos de nudos que sean requeridos para representar la red de flujo, así como asociar a éstos todos los tipos de datos que sean necesarios: parámetros, series temporales,...

Para representar la red de flujo el programa dispone de una interfaz gráfica de simple manejo:

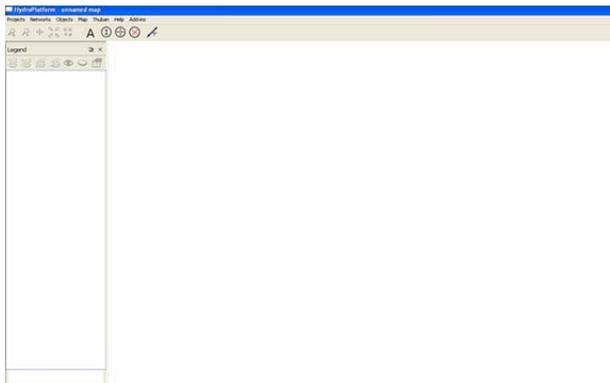


Figura 86. Interfaz HYDROPLATFORM

El programa ha sido desarrollado en "UniversityCollege London" por Julien J. Harou y HosAlmeer.

Para comenzar a usar el programa hay que hacer doble click sobre:



Tras hacer doble click aparece la pantalla principal del programa:

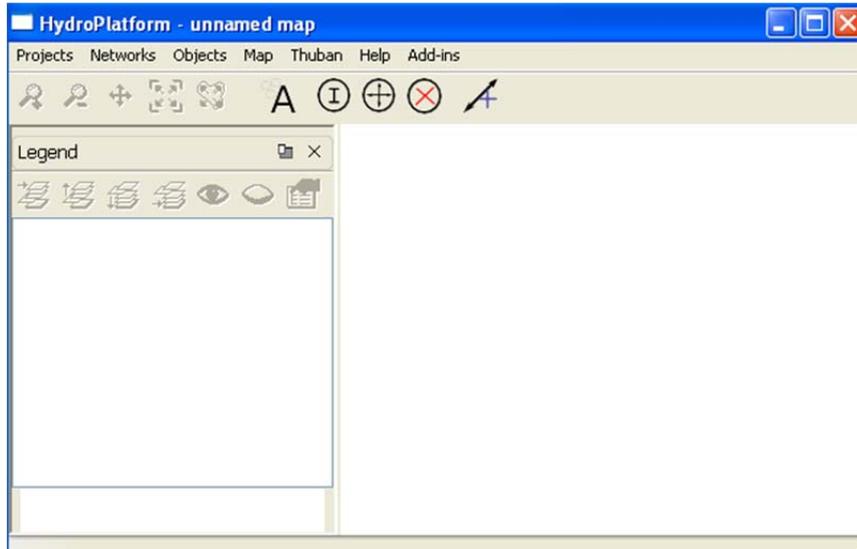


Figura 87. Pantalla Principal de HYDROPLATFORM

Para crear un nuevo proyecto se han de seguir los siguientes pasos:

1. Seleccionar del menú **Projects** la opción **Connect**:

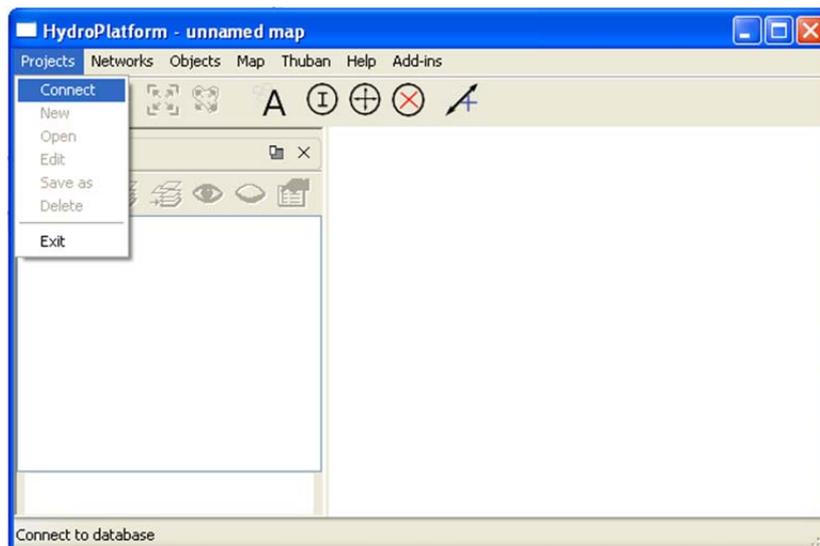


Figura 88. Conectar a la base de datos

2. Seleccionar la **ubicación** de la base de datos del proyecto:

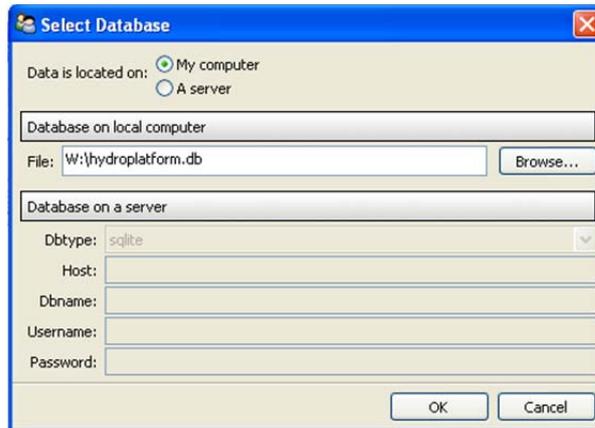


Figura 89. Ubicación de la base de datos

3. Seleccionar la opción **New** del menú **Projects**:

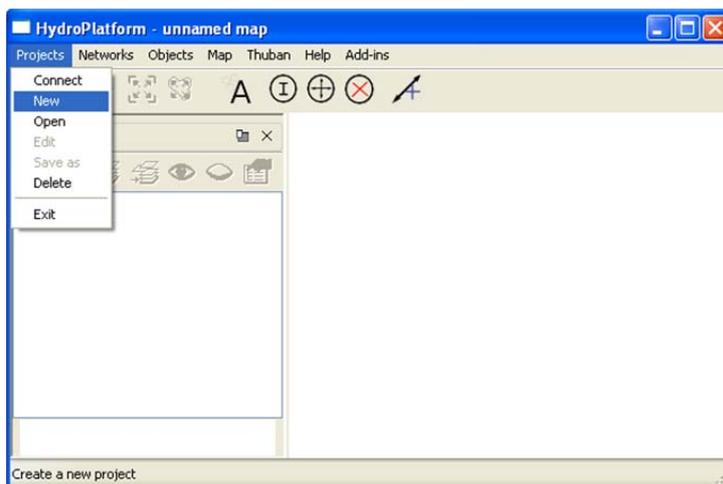


Figura 90. Definición de un nuevo proyecto 1/2

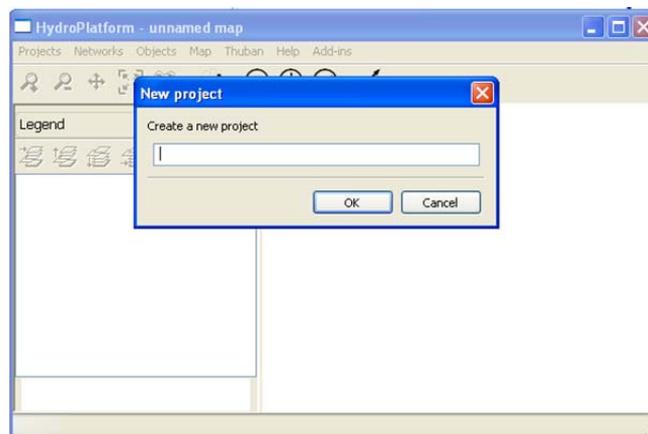


Figura 91. Definición de un nuevo proyecto 2/2

4. Se indican las características del proyecto:

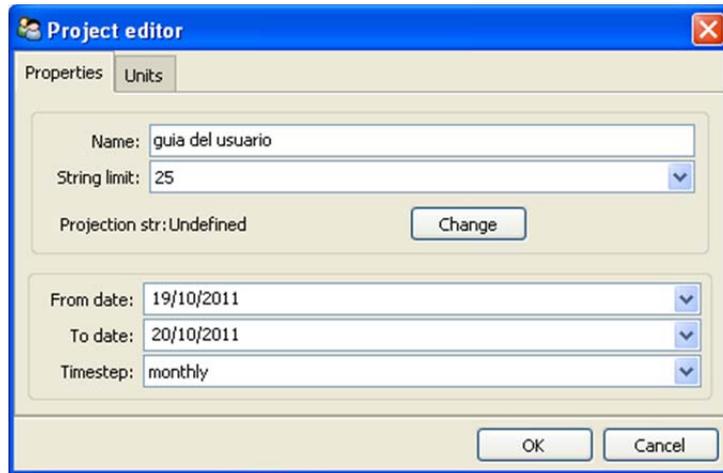


Figura 92. Características del proyecto 1/2

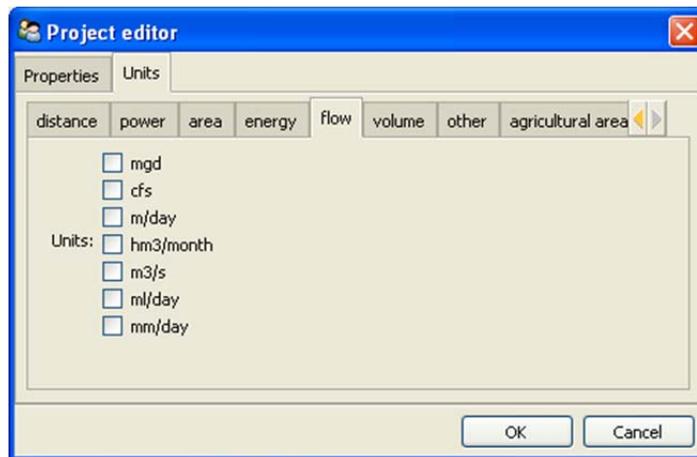


Figura 93. Características del proyecto 2/2

Creación de una red dentro de un proyecto

Hacer click sobre la opción **New** del menú Networks:

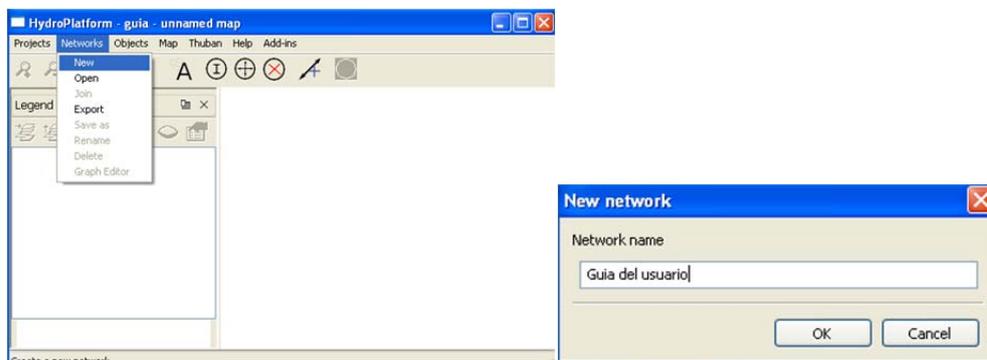


Figura 94. Generación de una red

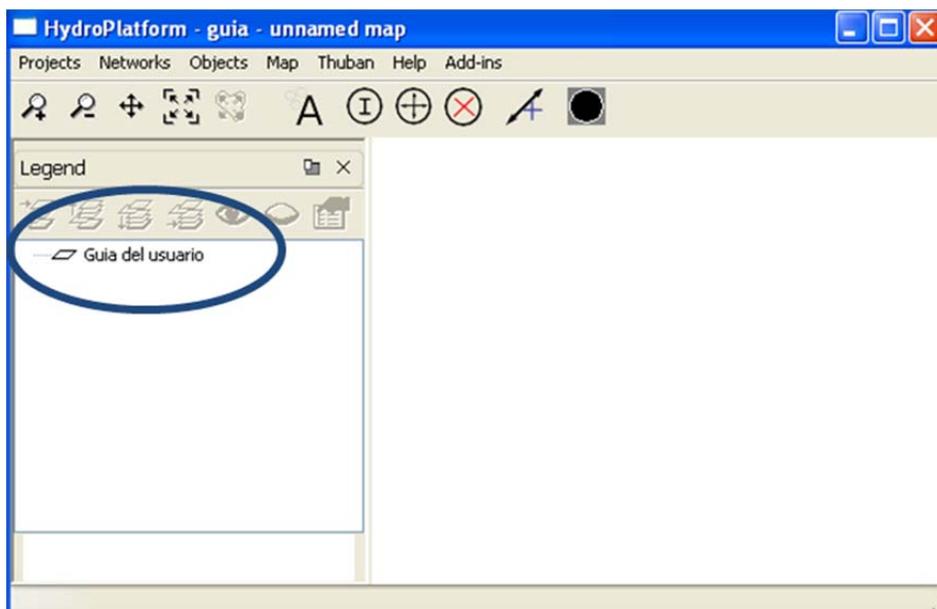


Figura 95. Red generada

Definición tipología de objetos

Hacer click sobre la opción **Objecttypeeditor** del menú Objects:

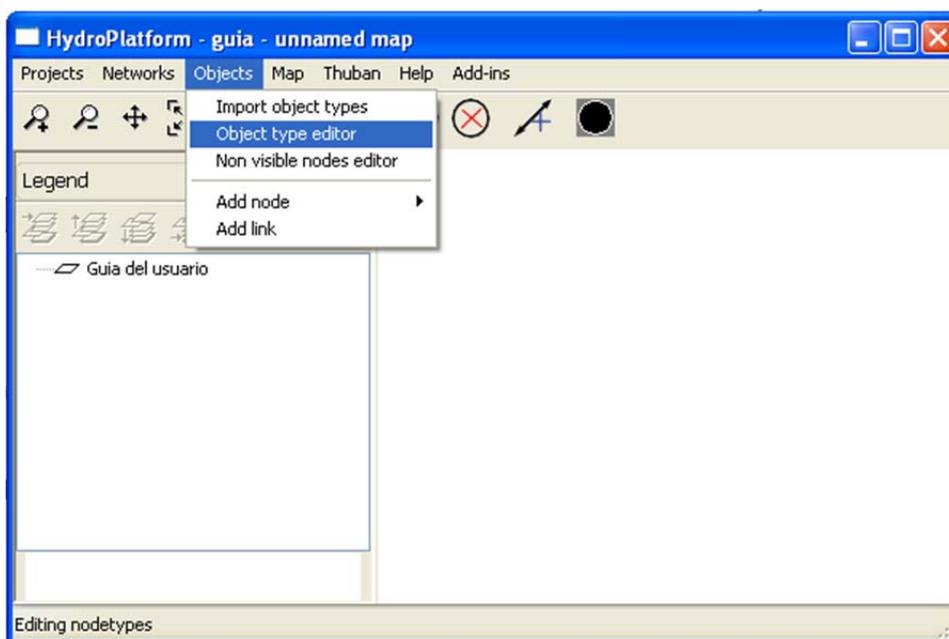


Figura 96. Definición de los tipos de objeto

Se abre el siguiente cuadro de opciones:

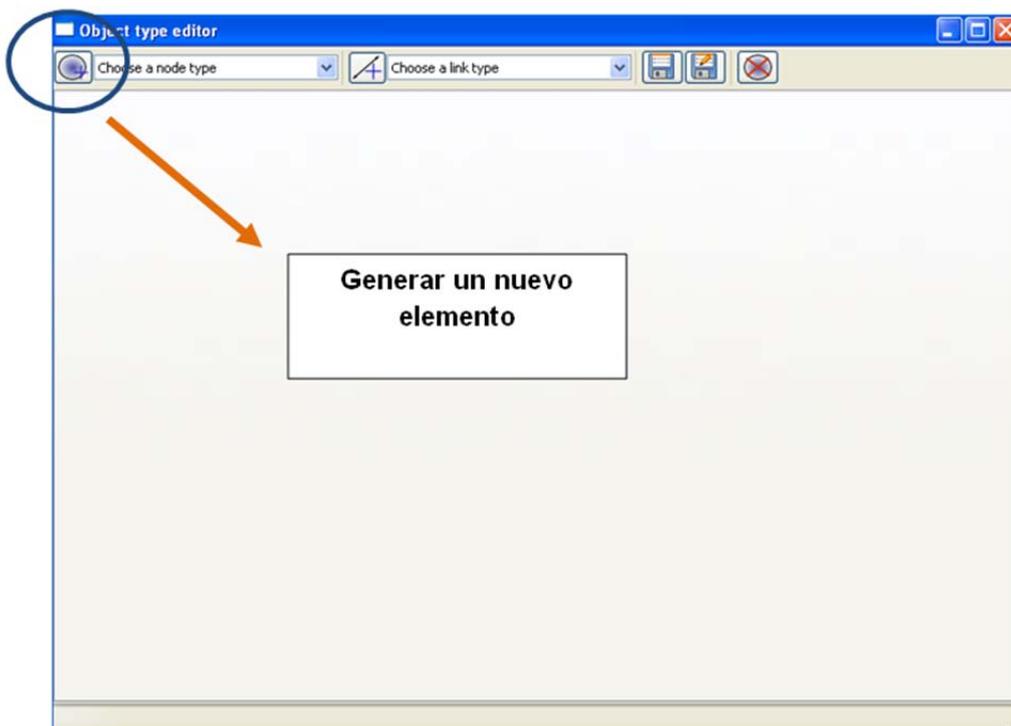


Figura 97. Cuadro de opciones para creación de objetos

Tras hacer click en el botón indicado en la figura 97, aparece la siguiente pantalla:

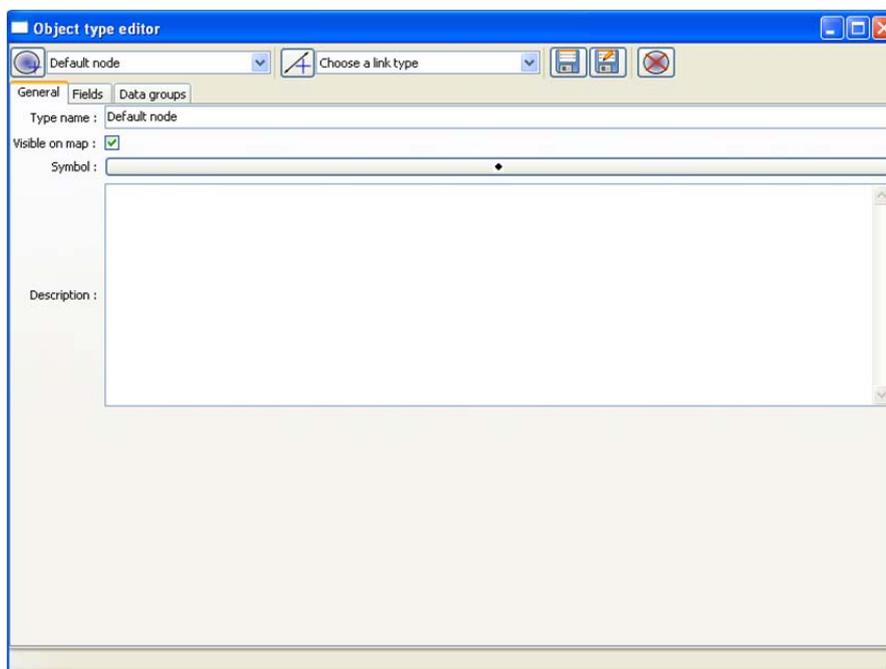


Figura 98. Generación de objetos. Características generales

En la pestaña **General**:

- Nombre del tipo de objeto: “TypeName”.
- El símbolo que representa al objeto, haciendo click en el punto negro de la línea de “symbol” (figura 99):

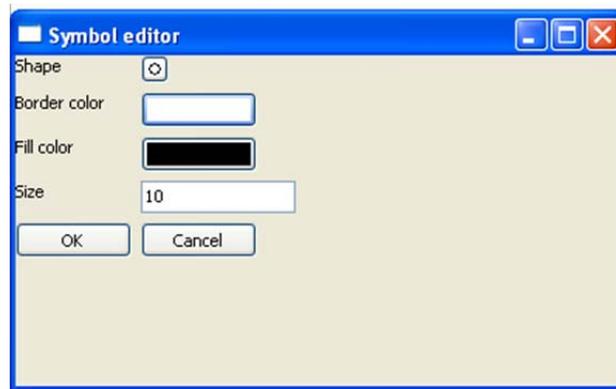


Figura 99. Editor de Símbolos

- Una descripción del tipo del objeto.

Si hacemos click en la **pestaña “Fields”** aparece:

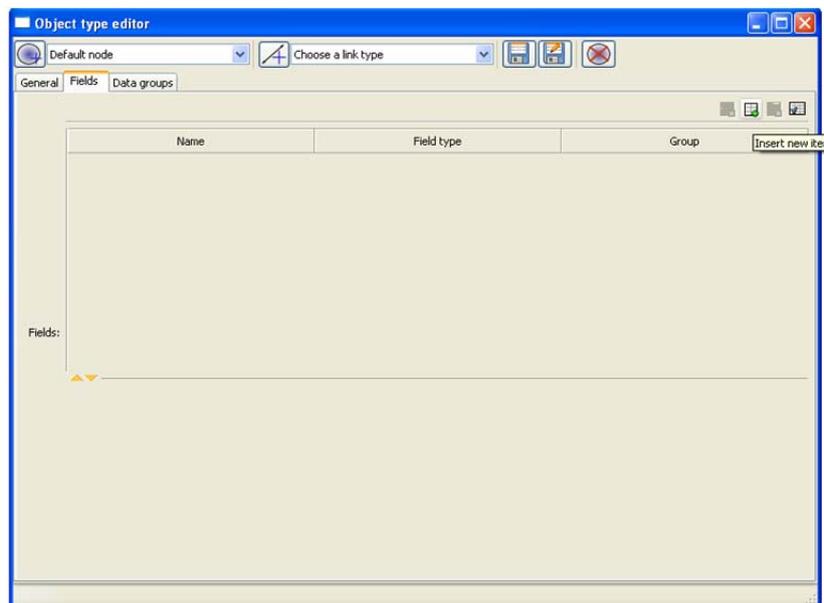


Figura 100. Generación de objetos. Caracterización de datos

Para añadir un nuevo dato asociado a un nudo hay que hacer click sobre “Insert New Item”

Los campos a rellenar son:

- **Name:** es el nombre del dato a introducir, por ejemplo “Vmin”.
- **Fieldstyle:** es el tipo de dato.

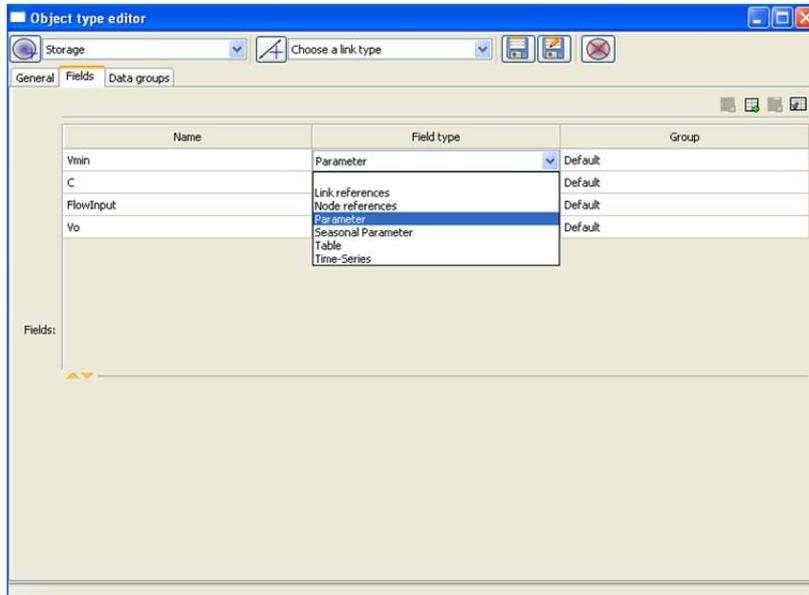


Figura 101. Generación de objetos. Tipología de datos

Por ejemplo el “Vmínimo” es de tipo **parámetro** y una serie de **aportaciones** es de tipo “**Time Series**”.

También hay que indicar las unidades de cada uno de los tipos de datos:

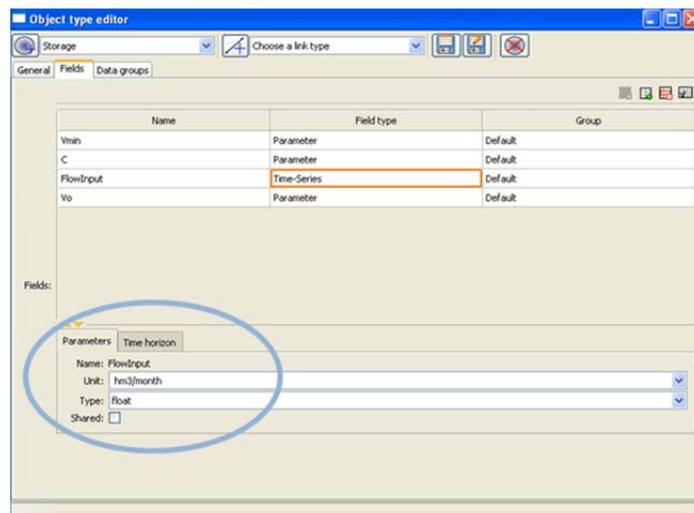


Figura 102. Generación de objetos. Unidades de los datos

Una vez generados todos los tipos de objetos, hacer click sobre el icono de guardar los cambios:

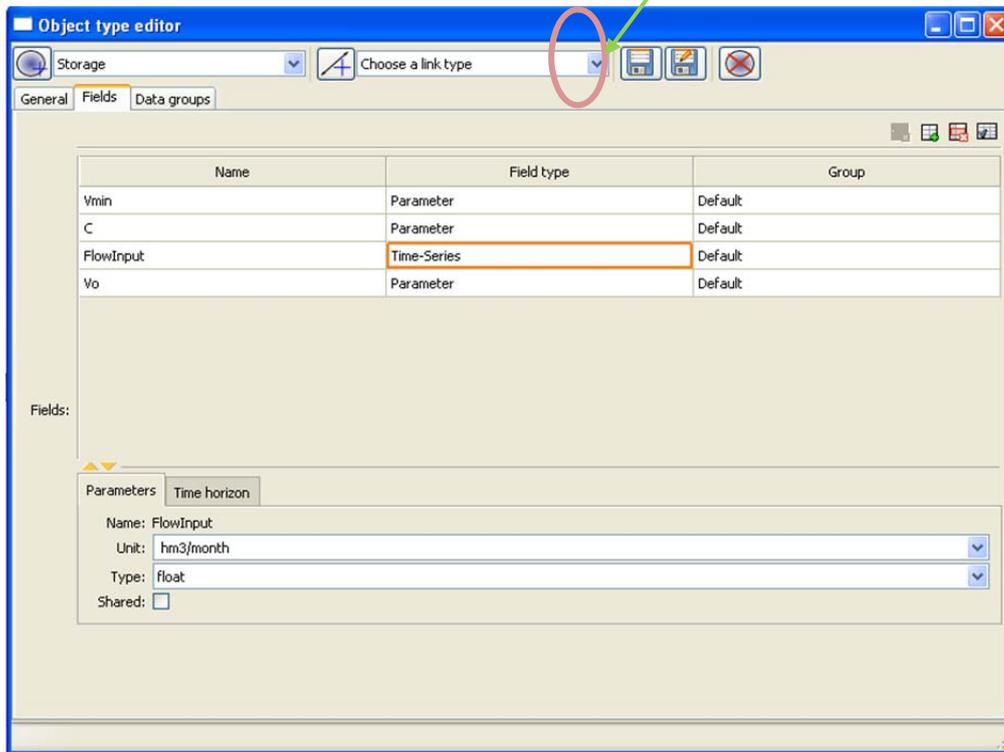


Figura 103. Generación de objetos

Cuando se han generado todos los tipos de objetos, en la pantalla principal del programa aparecen los botones que permiten introducirlos:

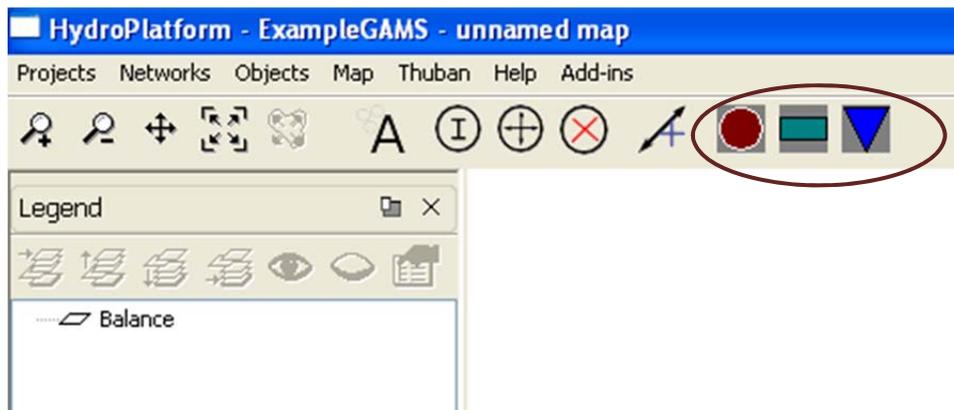


Figura 104. Generación de objetos. Botones para introducir los objetos en la red

En HYDROPLATFORM las **demandas** son **nudos**, luego tiene que haber un tipo de objeto que las represente.

Definición tipología de links

Para definir los tipos de links, se ha de hacer click en el botón indicado en la figura 105:

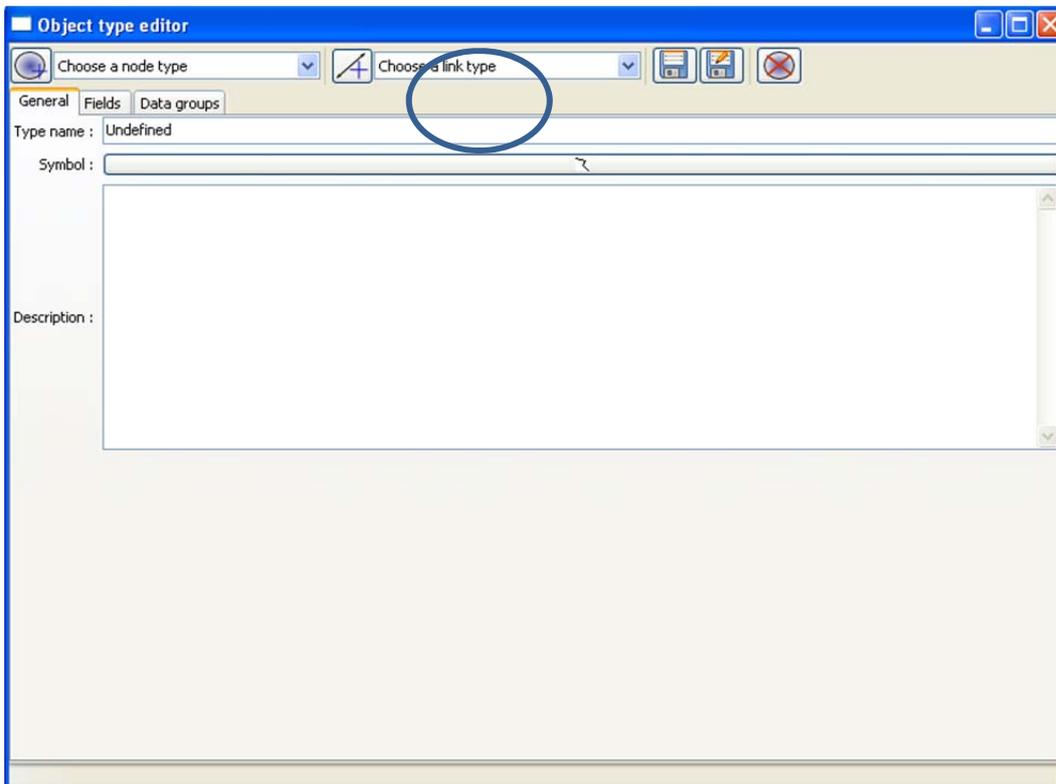
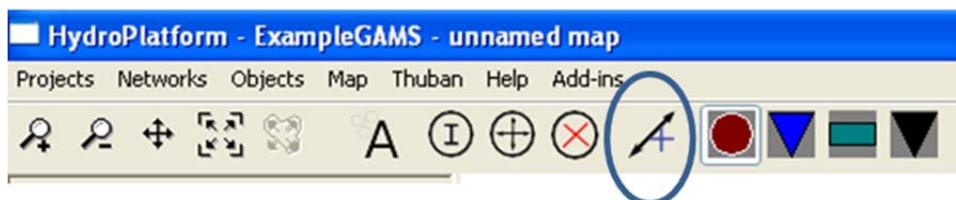


Figura 105. Definición de los tipos de links

Y a continuación, el proceso a seguir es exactamente el mismo que el descrito para la creación de tipología de objetos.

Cuando se han generado los tipos de links, en la pantalla principal del programa aparecen los botones que permiten introducir cada uno de éstos:

Figura 106. Botones para introducir los links en la red



En los links, que son las masas de agua o conducciones de los canales, se pueden introducir los caudales mínimos o ecológicos como un parámetro.

Generación de una red

Primeramente se ha de dibujar la red con los **botones** que definen las tipologías de **objetos** y de **links**, a continuación se muestra un ejemplo:

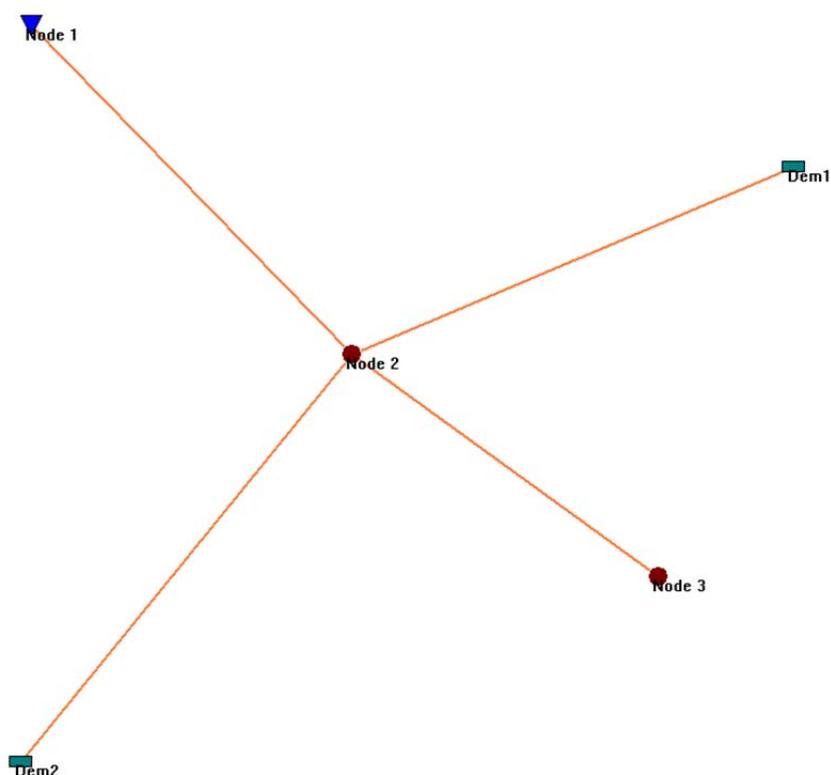


Figura 107. Esquema Red de Flujo HYDROPLATFORM

Para definir los “links” hay que arrastrar el cursor del nudo inicial al nudo final.

Una vez dibujada la topología de la red, se han de introducir los valores de cada uno de los tipos de datos que llevan asociados cada uno de los nudos.

Para introducir los datos se ha de hacer click sobre el nudo, y con el botón derecho seleccionar la opción **edit**:

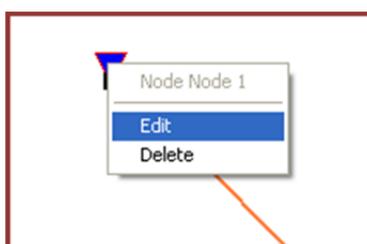


Figura 108. Editar los datos de un nudo

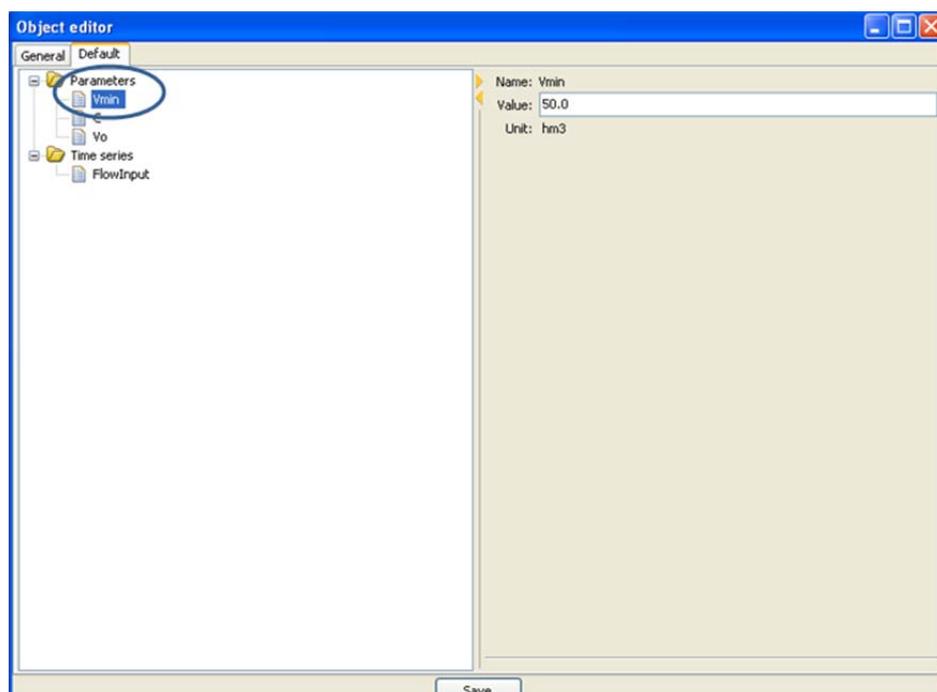


Figura 111. Introducción de datos en los nudos 3/3

Para introducir los datos en los links, hay que seguir el mismo procedimiento que para los objetos.

Para modificar la red dibujada en el menú principal se dispone de los siguientes botones:

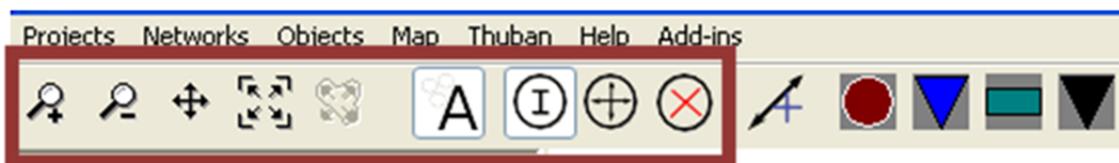


Figura 112. Modificación de la red

Exportación de datos

Una vez generada la red se pueden exportar todos los datos mediante la opción:

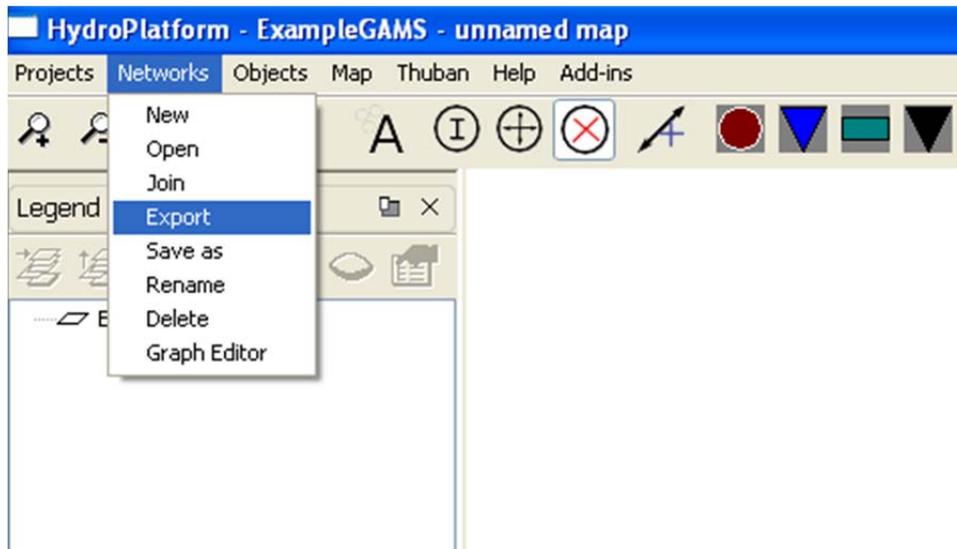


Figura 113. Exportación de datos

Esta función exportadora tiene varias opciones, para el caso de exportar a GAMS en formato "txt" se ha de seleccionar "**Text exporter for GAMS**":



Figura 114. Función exportadora de HYDROPLATFORM

También hay que introducir la red que se quiere exportar "**Network**" y el directorio al que se quiere exportar "**Output file**".

Interpretación de los ficheros de datos generados por el exportador a GAMS

Para explicar este apartado se parte del siguiente ejemplo:

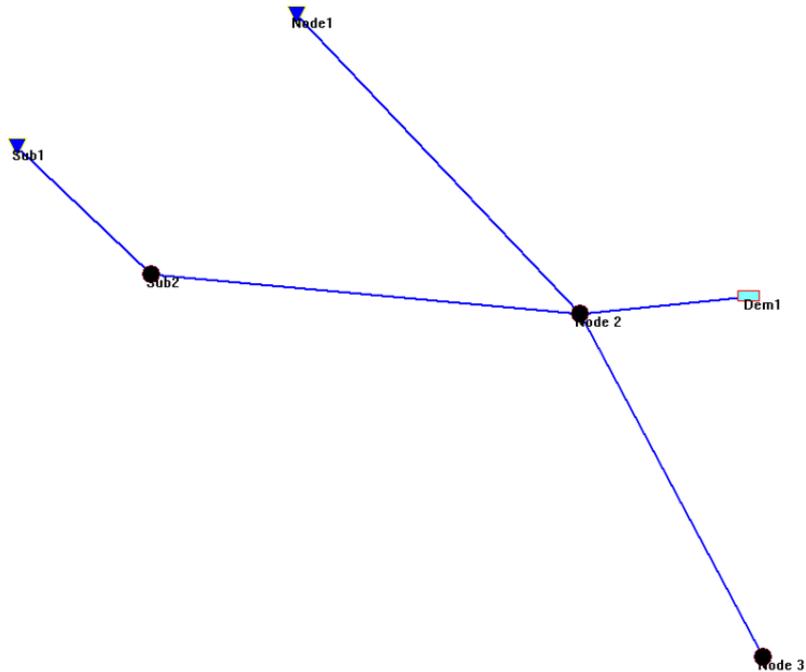


Figura 115. Ejemplo HYDROPLATFORM explicación de las matrices

En los nudos tipo embalse (**Reservoir**nodes) que en este caso son: “node 1 y “Sub1”, se han definido los siguientes tipos de de datos:

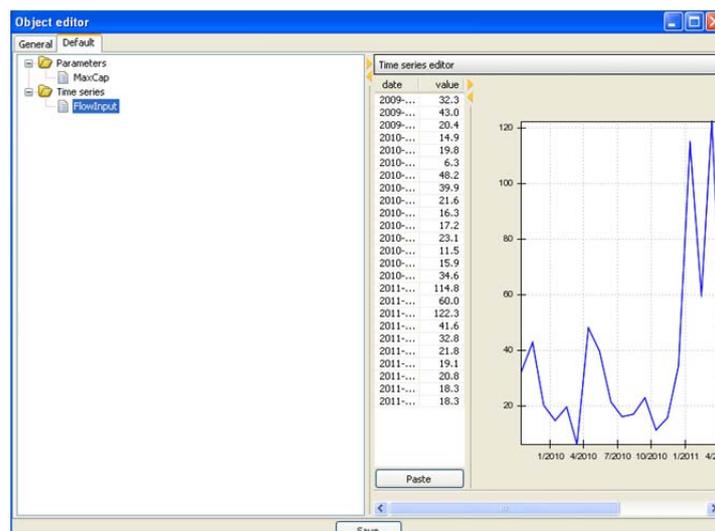


Figura 116. Tipos de datos del nudo tipo Reservoir

Se muestran los años, meses y días en los que se va a simular.

- Archivos “**Reservoir**” y “**Non-storage**”
Se muestran los nudos que son embalses y los que no respectivamente.
- Archivo “**Reservoir par par**”
Indica los diferentes parámetros que en los embalses se han definido.
- Archivo “**Reservoir par data**”
Muestra los valores de cada uno de los parámetros definidos.
- Archivo “**Reservoir ts par**”
Indica las diferentes series temporales que en los embalses se han definido.
- Archivo “**Reservoir ts data**”
Muestra los valores de cada una de las series temporales.
- Archivo “**nodes**”
Muestra todos los nudos.
- Archivo “**links**”
Muestra los links que existen entre los diferentes nudos.
- Archivo “**Urbdem**”
Muestra los nudos que son demandas.
- Archivo “**UrbDem ts par**”
Indica las diferentes series temporales que en las demandas se han definido.
- Archivo “**UrbDem ts data**”
Muestra los valores de cada una de las series temporales.

ANEXO III. VALIDACIÓN DE SIMGAMS VS SIMGES

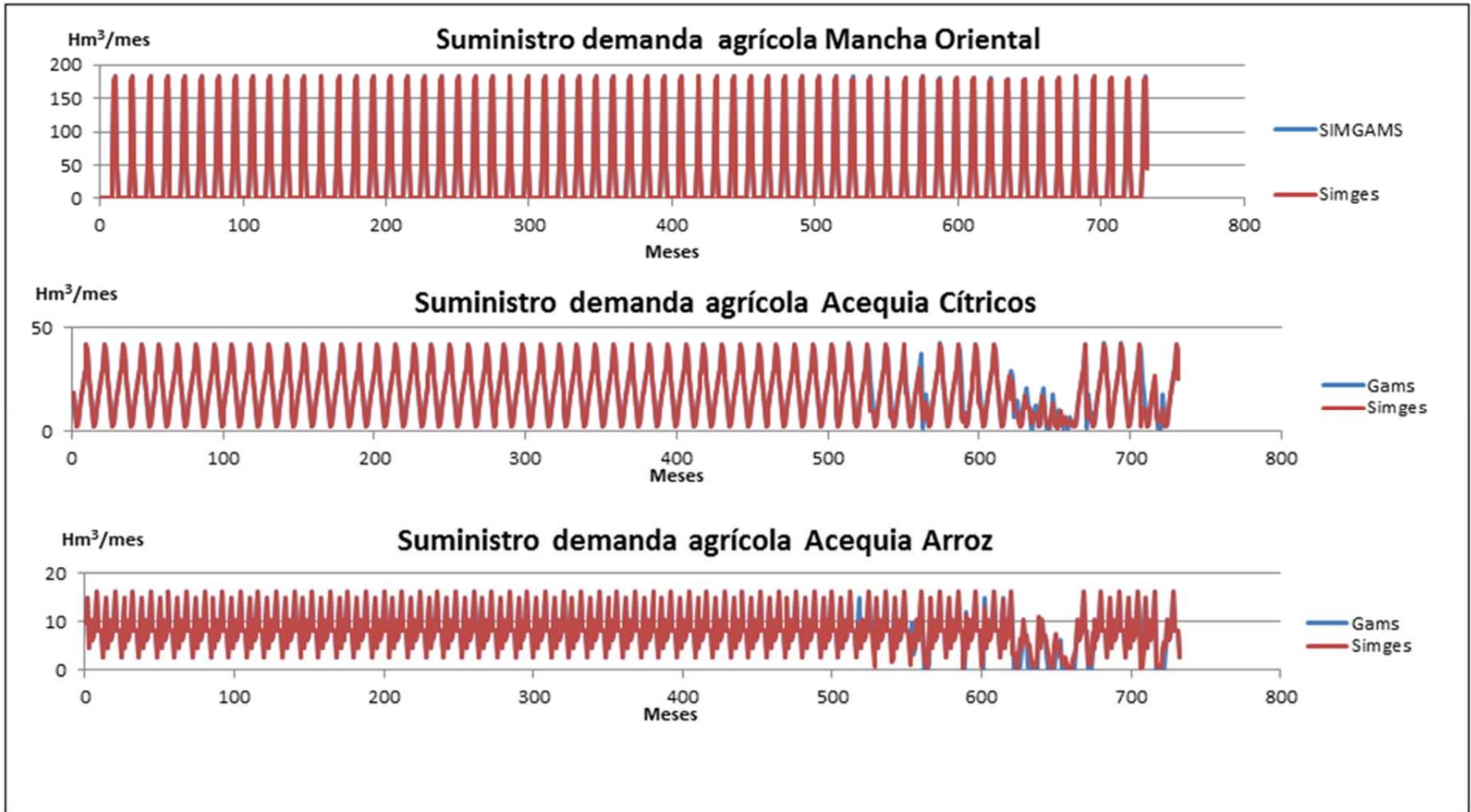


Figura 118. Gráficas de Validación SIMGAMS vs SIMGES

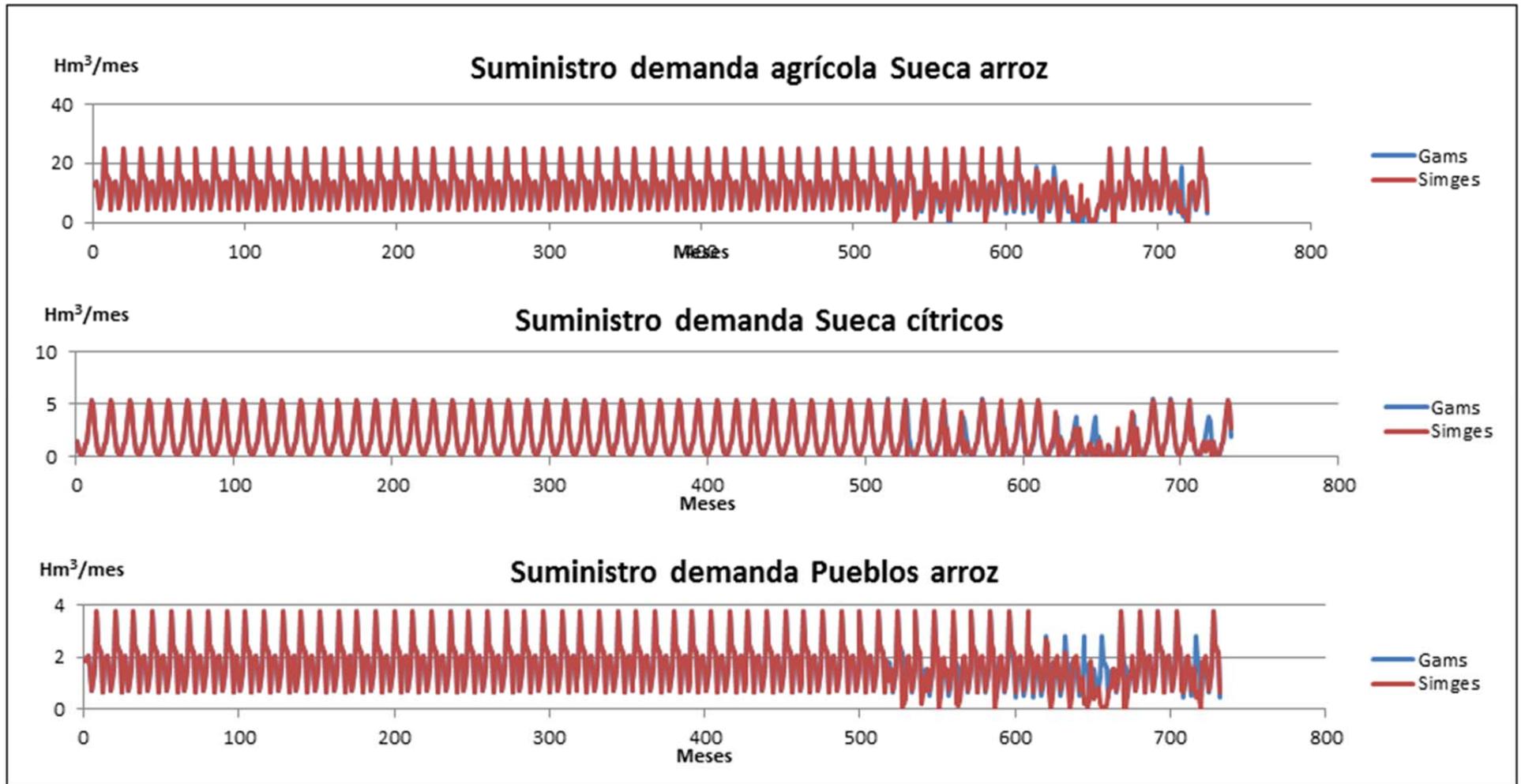


Figura 119. Gráficas de Validación SIMGAMS vs SIMGES

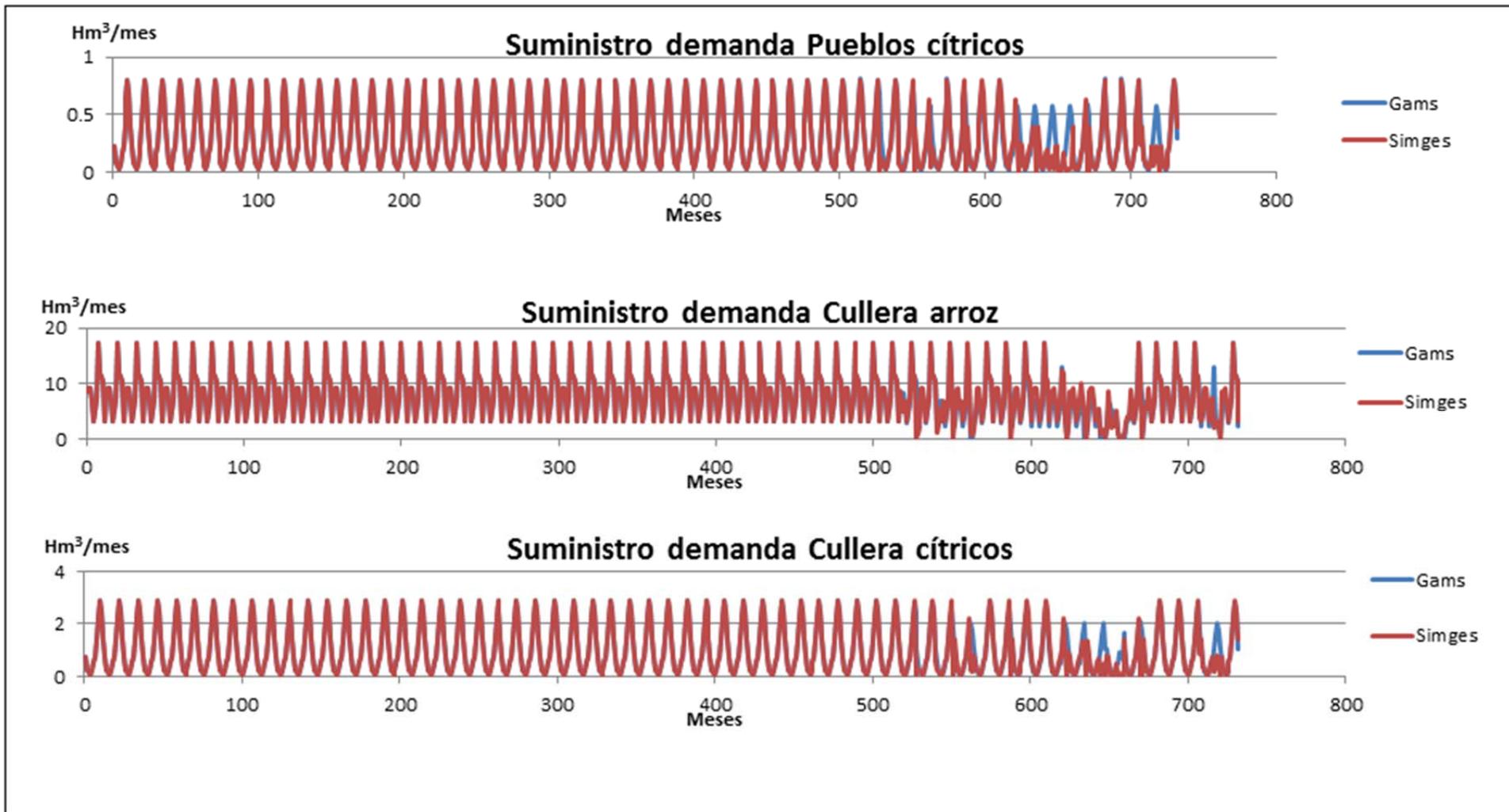


Figura 120. Gráficas de Validación SIMGAMS vs SIMGES

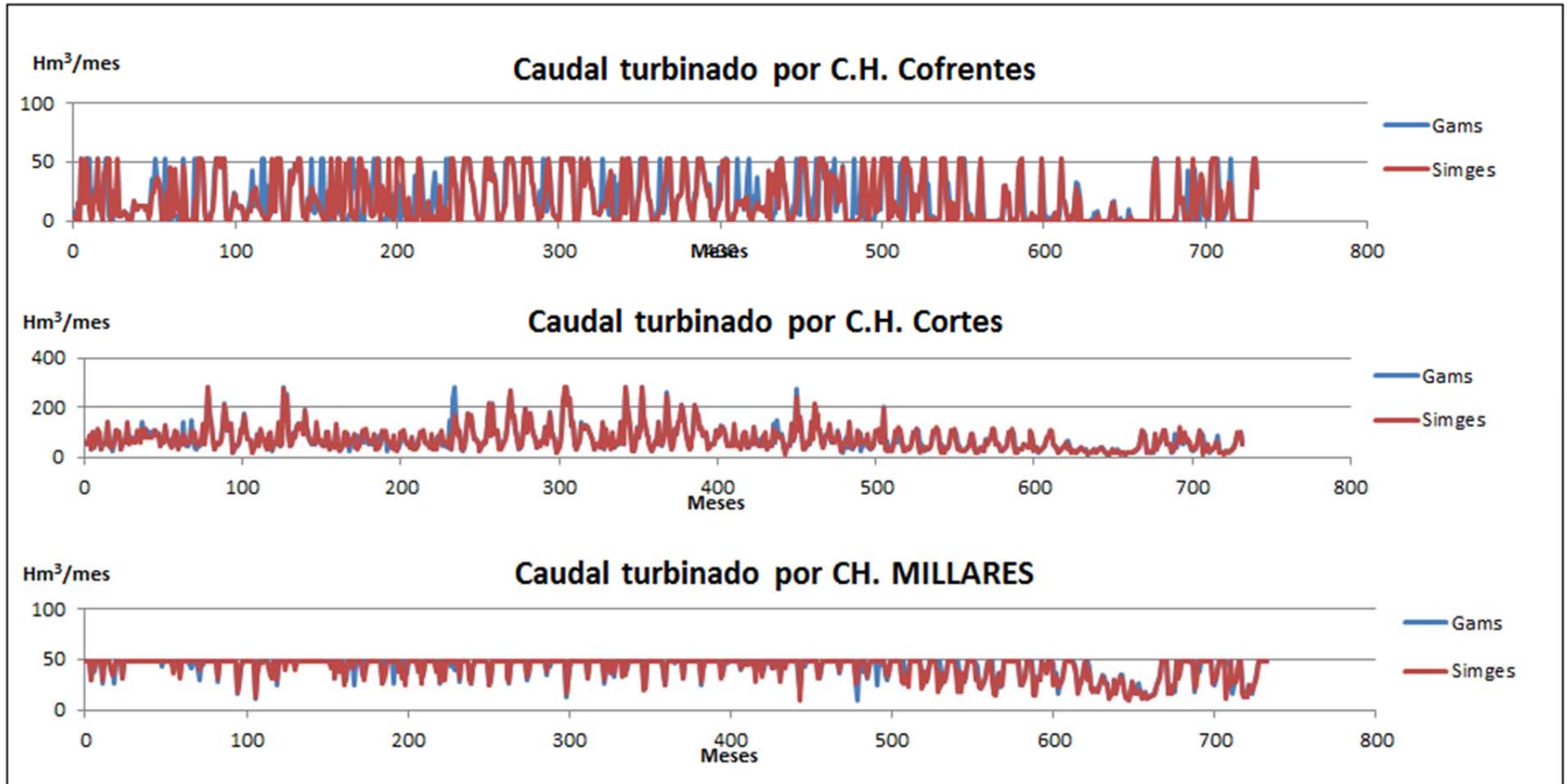


Figura 121. Gráficas de Validación SIMGAMS vs SIMGES

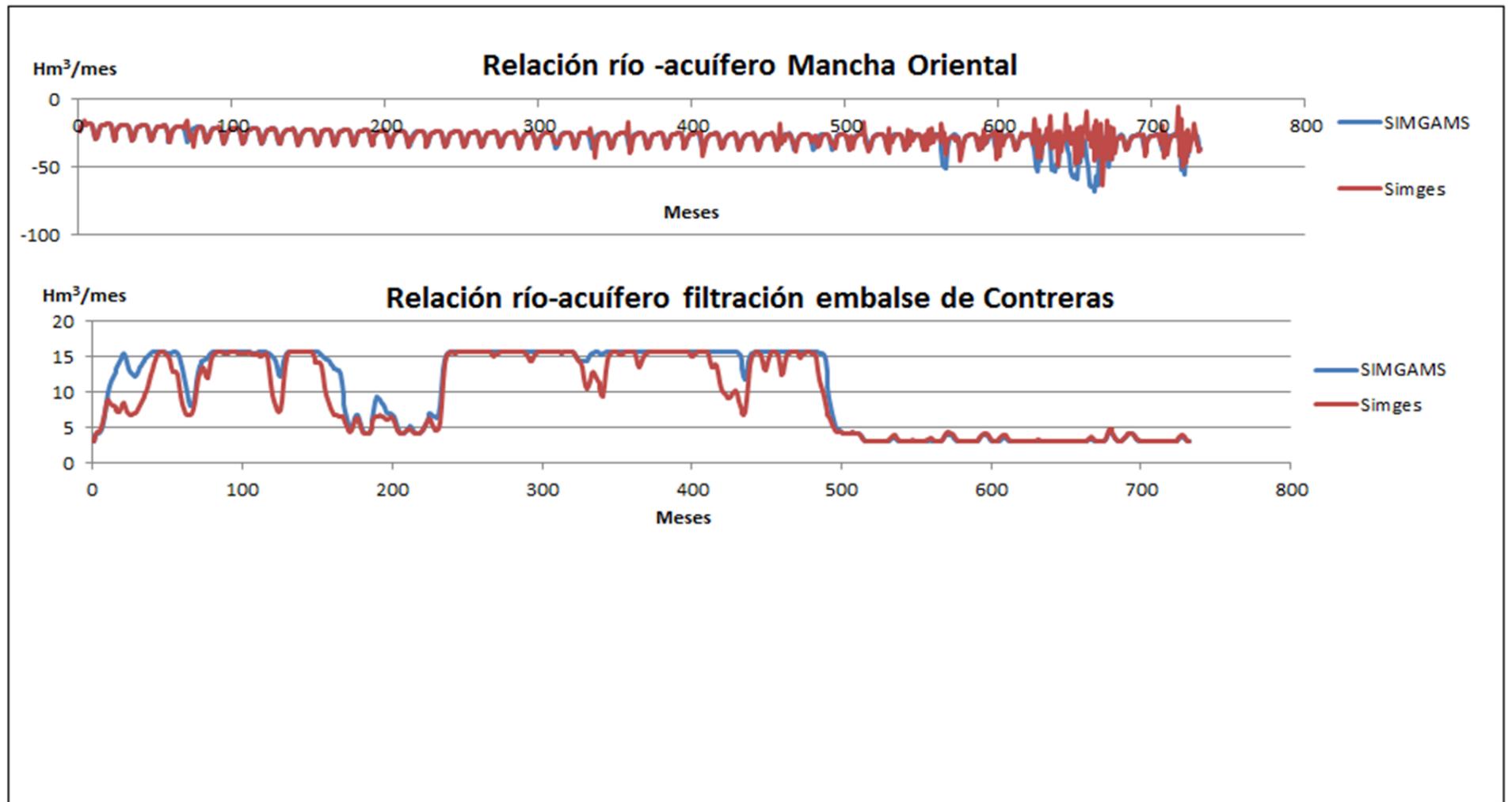


Figura 122. Gráficas de Validación SIMGAMS vs SIMGES

ANEXO IV. RESULTADOS DE GESTIÓN CON OPTIGAMS

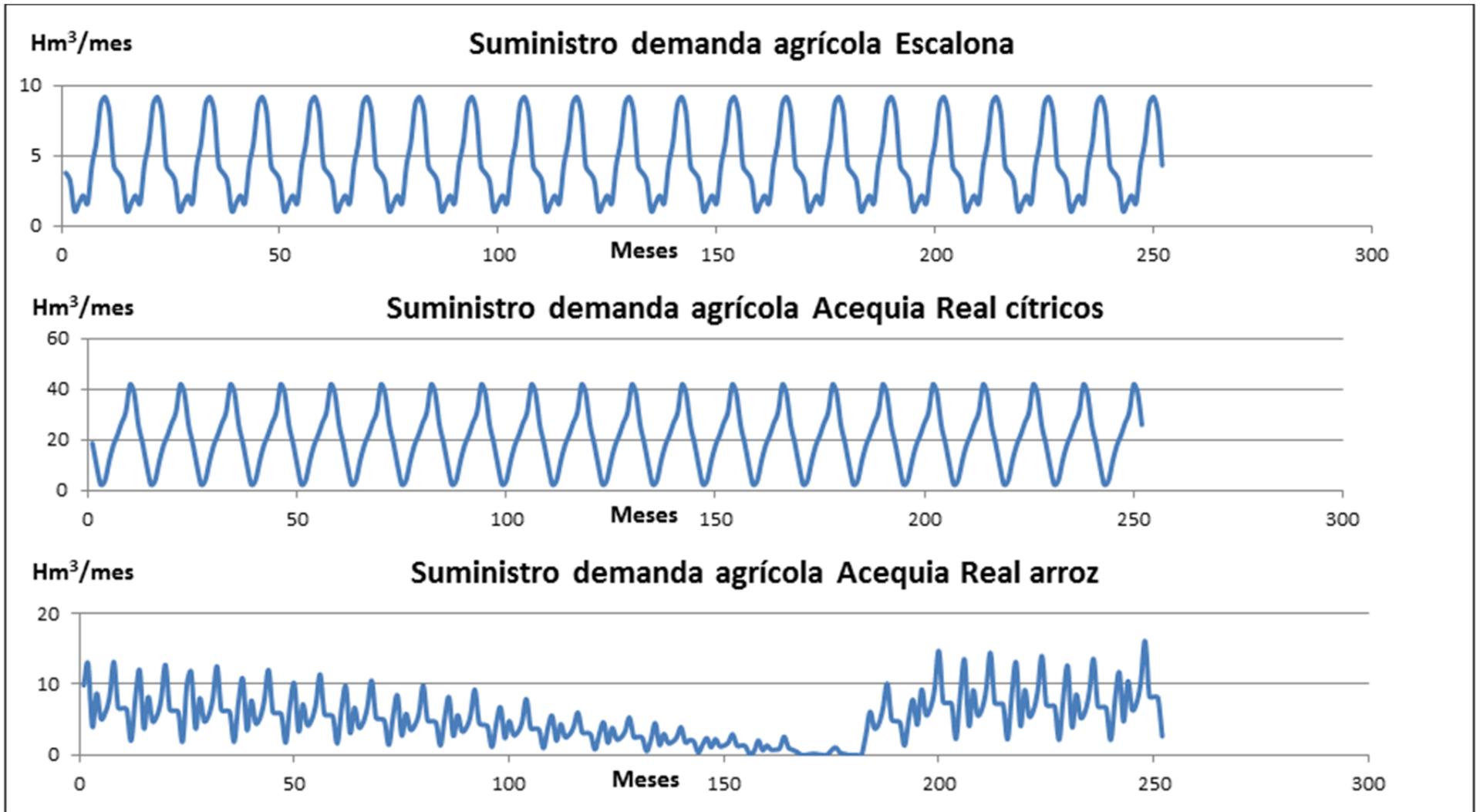


Figura 123. Suministros demandas con OPTIGAMS

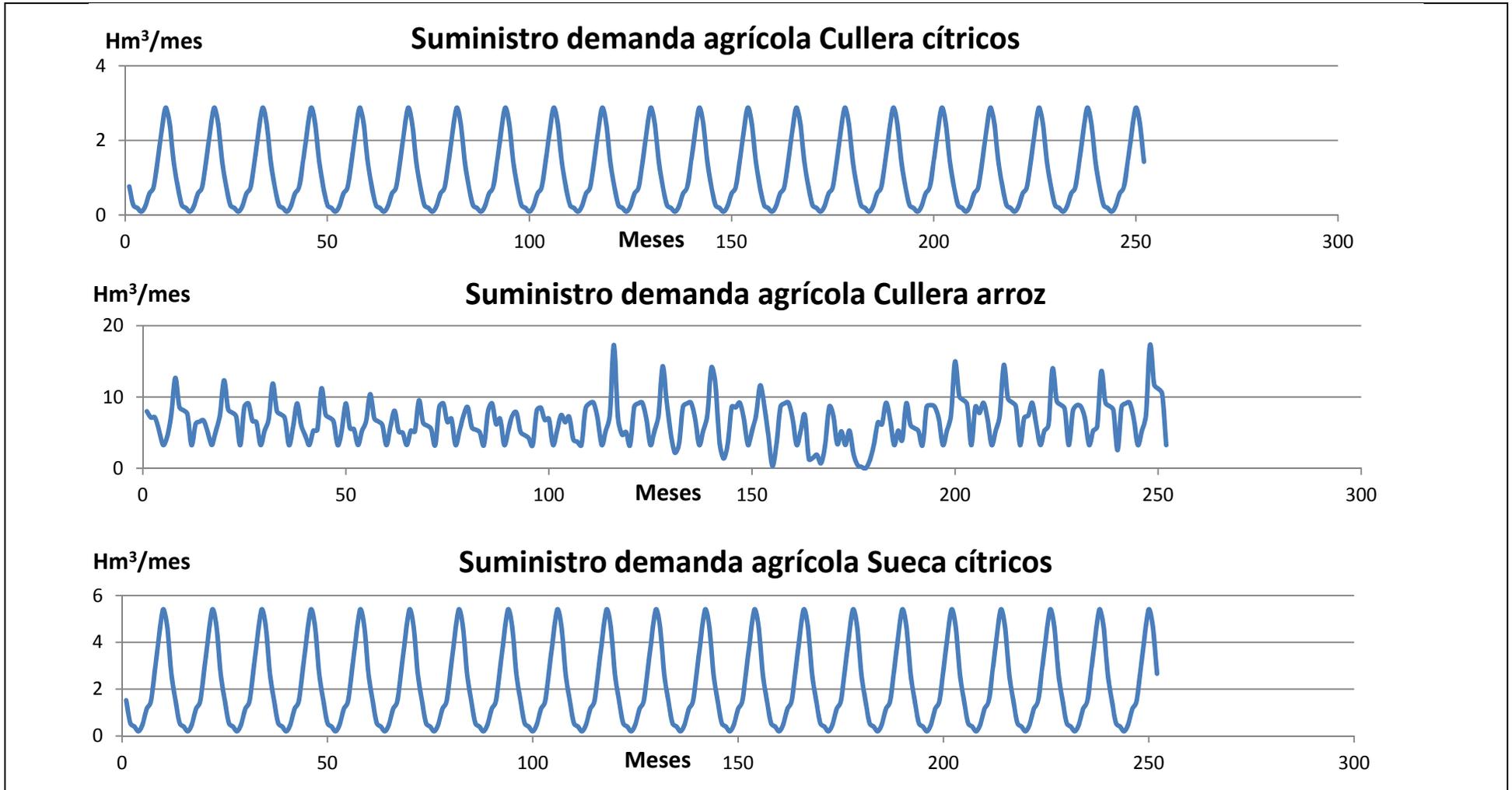


Figura 124. Suministros demandas con OPTIGAMS

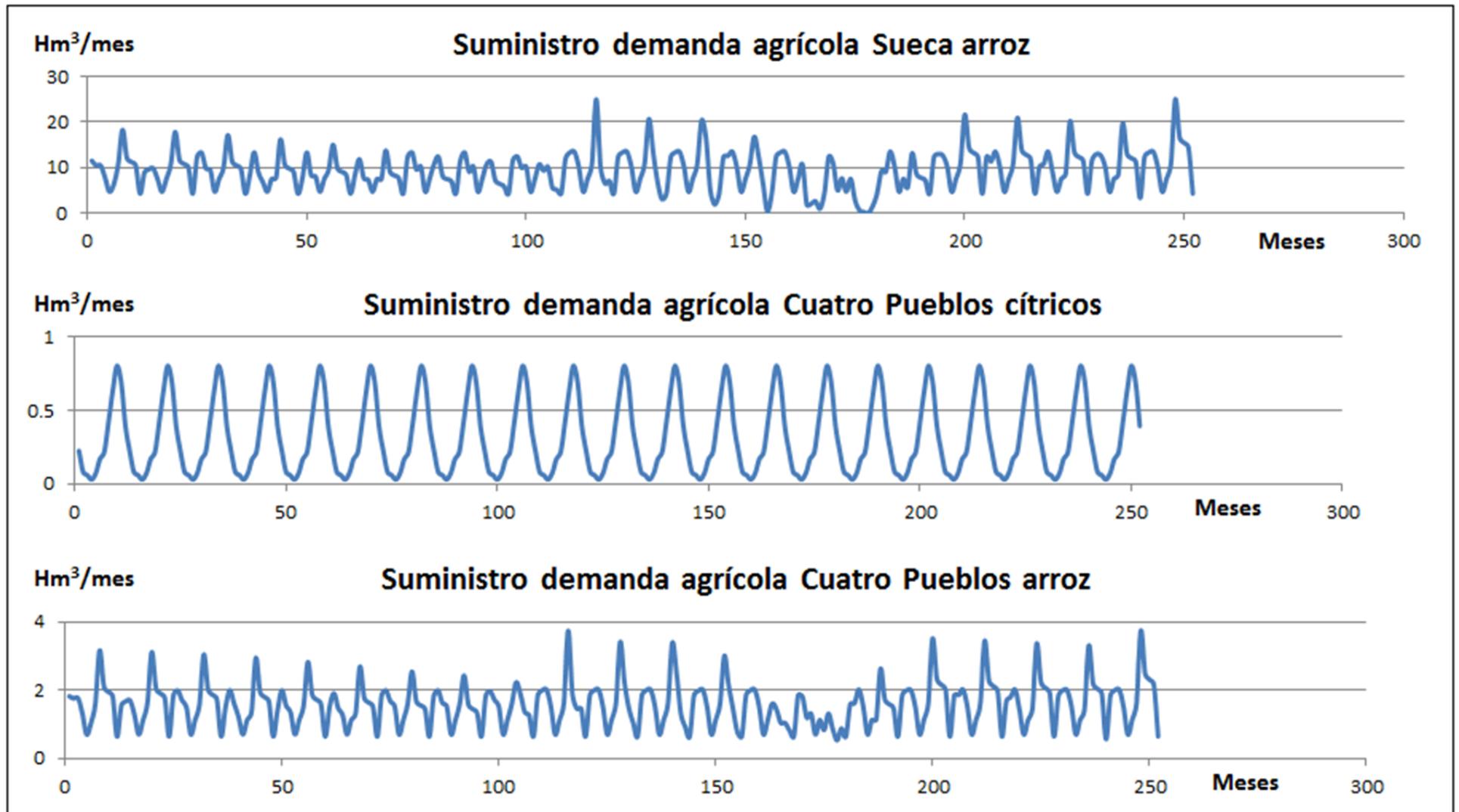


Figura 125. Suministros demandas con OPTIGAMS

