

ANEJO 3. DISEÑO DE POLÍTICAS ÓPTIMAS DE
PRECIOS DEL AGUA QUE INCORPOREN LOS
COSTES MARGINALES DE OPORTUNIDAD DEL
RECURSO

Contenido

Introducción	7
1. Desarrollo de un modelo hidro-económico del río Mijares, caso de estudio.....	9
1.1. Descripción del sistema	9
1.1.1. Extensión territorial.....	9
1.1.2. Rasgos geográficos y climáticos	9
1.1.3. Recursos hídricos.....	10
1.1.4. Usos del agua.....	12
1.1.5. Infraestructura hidráulica.....	13
1.2. Modelo de gestión del sistema.....	16
1.2.1. Sistema superficial.....	16
1.2.2. Sistema subterráneo.	18
1.2.3. Demandas.....	18
1.2.4. Aportaciones.	20
1.2.5. Reglas de operación	21
1.3. Caracterización económica del sistema.....	24
1.3.1. Curvas de demanda económica	24
1.3.2. Demanda urbana	29
1.3.3. Costes variables de operación del agua subterránea.....	30
2. Cálculo del Coste Marginal de Oportunidad. Análisis de series temporales y relación entre la escasez del recurso y su valor económico.....	31
2.1. Introducción.....	31
2.2. Coste Marginal de Oportunidad del Recurso	31
2.3. Metodología para el cálculo del cmor	32
2.3.1. Enfoque de optimización.....	32
2.3.2. Enfoque de simulación	33
2.4. CMOR como Valores Sombra del Modelo de Optimización GAMS.....	34
2.4.1. Descripción general de GAMS	34
2.4.2. Optimización económica de la gestión.....	35
2.5. El CMOR mediante modelo de simulación del SAD Aquatool	38
2.5.1. Descripción del módulo SimGes	38
2.5.2. Simulación de la gestión mediante SimGes.....	39

2.5.3.	El evaluador económico EcoWin del SAD Aquatool	41
2.6.	Simulación con prioridades del modelo hidro-económico. Cálculo del Coste del Recurso 44	
2.6.1.	Análisis de resultados de la simulación. Coste de escasez	45
2.6.2.	Análisis de resultados de la simulación. Coste del recurso en los embalses	48
2.6.3.	Coste marginal de oportunidad de caudal ecológico (CMOCE)	50
2.6.4.	Análisis de sensibilidad del CMOR.....	51
2.7.	Optimización económica de la gestión. Coste de escasez y CMOR.....	52
2.7.1.	Modelo de optimización de la gestión del río Mijares	52
2.7.2.	Análisis de resultados de la optimización económica. Coste de escasez y suministro a la demanda	53
2.7.3.	Análisis de resultados de la optimización económica. Coste del recurso en los embalses del sistema.	54
2.7.4.	Comparación entre la simulación de la gestión y la optimización económica.....	55
3.	Estudio de políticas factibles de precios del agua en función de la escasez del recurso y valoración de los distintos efectos sobre la gestión del recurso	57
3.1.	Metodología para el diseño de una política eficiente de precios.....	57
3.1.1.	Descripción de la metodología	57
3.1.2.	Diferencias entre simulación y optimización. La predicción perfecta.....	61
3.2.	Caso sintético	62
3.2.1.	Datos del esquema sintético.	62
3.2.2.	Simulación con prioridades y optimización económica	64
3.2.3.	CMOR. Simulación y optimización.....	67
3.3.	Políticas de precios.	68
3.3.1.	Políticas de precios escalonados en función del volumen almacenado	68
3.3.2.	Precios escalonados según umbrales de aportaciones	74
3.3.3.	Precios anuales constantes en función del volumen embalsado y aportaciones previas	76
3.3.4.	Precios estacionales en función del volumen embalsado y aportaciones previas. 81	
3.3.5.	Análisis de la eficacia de precios con series sintéticas de aportaciones.	86
3.3.6.	Conclusiones a la metodología	89
3.4.	Aplicación de la metodología a la cuenca del Mijares.....	91
3.4.1.	Precios escalonados a partir del CMOR en embalses.....	91
3.4.2.	Precios escalonados óptimos	95

3.4.3.	Conclusiones en la determinación de políticas eficientes de precios para la cuenca del Mijares.....	97
4.	Conclusiones y líneas futuras de investigación.....	99
4.1.	Metodología y etapas	99
4.2.	Políticas de precios y CMOR. Conclusiones de la aplicación a los casos de estudio	102
4.3.	Líneas futuras de investigación.....	103

Introducción

El uso de modelos hidro-económicos de simulación y de optimización permite obtener dos variantes complementarias de la estimación de los costes de oportunidad en la asignación del agua como recurso escaso.

Mediante el enfoque de optimización, si consideramos como función objetivo el beneficio económico neto agregado en la asignación del agua en el sistema, el modelo de optimización nos permite valorar el Coste Marginal de Oportunidad del Recurso (CMOR) y el Coste Marginal de oportunidad de Restricciones Ambientales (CMRA) mediante el análisis de los precios sombra o valores duales de la optimización. Estos resultados corresponden a una asignación económicamente óptima del agua en una situación de mercado perfecto, que sirve únicamente como un estimador del máximo de rendimiento del sistema, pero que no es de aplicación práctica, dado que la gestión se realiza con otros condicionantes legales, medioambientales y técnicos ya mencionados en otros puntos de esta propuesta.

Mediante el enfoque de simulación, en cambio, asumimos que el sistema es gestionado de acuerdo con unas reglas establecidas a priori. El CMOR puede ser estimado como la variación de beneficios que ocurriría si una unidad menos de recurso estuviera disponible en un punto e instante determinados. De forma análoga, puede estimarse el CMRA valorando el coste para el sistema de aumentar en una unidad dicha restricción en un determinado mes. Este segundo enfoque es conceptual y computacionalmente más simple que las metodologías basadas en la optimización, y consigue resultados similares, a igualdad de circunstancias a los que se obtiene mediante optimización. La ventaja fundamental es que mantienen los criterios actuales de gestión, a partir de los cuales se incorporan los aspectos económicos. Así, esta metodología es totalmente compatible y continuadora de los modelos realizados previamente en las cuencas españolas para objetivos de planificación.

Uno de los objetivos del proyecto INTEGRAME es el estudio del diseño de políticas óptimas de precios del agua que incorporen los costes marginales de oportunidad del recurso (CMOR), de forma que se transmita al usuario una señal de la escasez y el valor económico real del recurso, fomentando un uso económicamente eficiente del mismo. Para ello se partirá de los resultados de modelos hidro-económicos de simulación mediante el SAD AQUATOOL, utilizando el sistema del río Mijares como caso de estudio. Este objetivo, al igual que con los otros objetivos del proyecto, se dividió en 4 puntos intermedios que se detallan a continuación:

1. Se empleará el módulo ECOWIN del SAD AQUATOOL para desarrollar un modelo hidroeconómico del río Mijares, a utilizar como caso de estudio. Para ello se partirá de la caracterización hidrológica y económica previa del sistema. La caracterización del valor económico del agua para los distintos usos se llevará a cabo mediante curvas económicas de demanda.
2. Se calcularán costes marginales de oportunidad del recurso en los embalses del sistema

3. Se analizarán las series temporales de CMOR en los embalses, y se tratará de establecer una relación entre la escasez del recurso (caracterizada por el almacenamiento disponible en los embalses) y su valor económico.

4. Se estudiarán políticas factibles de precios del agua en función de la escasez del recurso y se valorará los distintos efectos sobre la gestión del recurso en el sistema mediante el modelo hidroeconómico de simulación.

En este anejo se muestran los trabajos y resultados obtenidos durante los tres años de proyecto relativos a la consecución de este objetivo particular.

1. Desarrollo de un modelo hidro-económico del río Mijares, caso de estudio.

1.1. Descripción del sistema

Se presenta una breve descripción del sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón considerando los siguientes aspectos: extensión territorial, rasgos geográficos y climáticos, recursos hídricos, usos del agua y la infraestructura hidráulica.

1.1.1. Extensión territorial

El sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón se encuentra ubicado en la vertiente oriental de la Península Ibérica vertiendo al mar Mediterráneo, y pertenece al ámbito territorial de la CHJ (figura 7). Se encuentra situado en las provincias de Teruel y Castellón. No sólo comprende la totalidad del río Mijares, sino también las pequeñas cuencas próximas a su área de influencia como son las del río Seco, Veo y Belcaire, y las subcuencas litorales comprendidas entre Benicasim (incluyendo su término municipal) y el límite provincial entre Castellón y Valencia. La superficie total comprendida por este sistema es de 5.466 km² (CHJ, 1997).

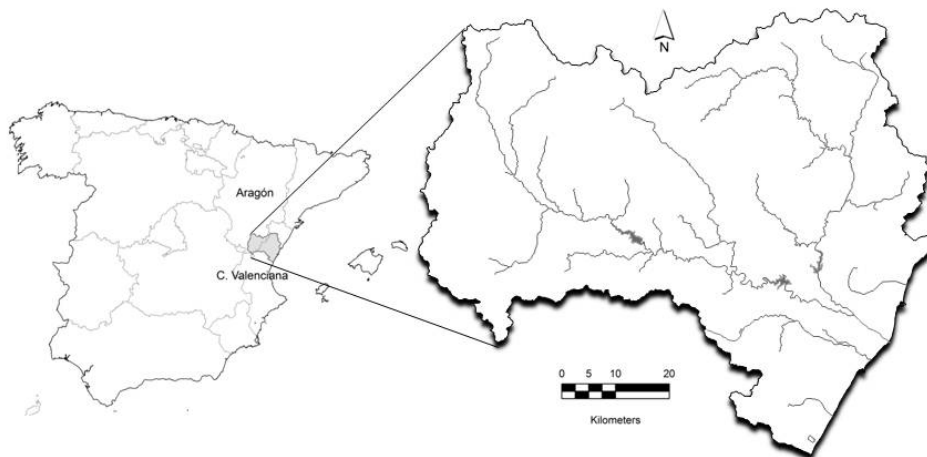


Figura 1. Ubicación geográfica del SRH del río Mijares

Fuente: CHJ (1997) y elaboración propia

1.1.2. Rasgos geográficos y climáticos

La altitud máxima del Sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón se alcanza en el nacimiento del río Albentosa (2024 msnm). El nacimiento de la Rambla de la Viuda también se produce a cotas elevadas (1814 msnm) estando la confluencia con el río Mijares a la cota 35 msnm (CHJ, 1997).

En el sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón se diferencian dos zonas geográficas climatológicamente distintas: una zona costera con un clima litoral mediterráneo y otra aguas arriba del embalse de Arenós, asimilable a un clima de transición al tipo continental. La precipitación media anual de la zona es de 505 mm y la temperatura media de 14,4 °C.

1.1.3. Recursos hídricos

La red hidrográfica del sistema del río Mijares (figura 8) está constituida por el cauce del propio río Mijares y sus afluentes, principalmente de los ríos Villahermosa y Rambla de la Viuda, además de una serie de ríos de menor importancia tributarios por su margen izquierda. Constituyen parte del sistema del río Mijares los ríos Seco, Veo y Belcaire. El río Villahermosa discurre durante su trayecto de 60 km paralelo al Mijares y encajonado al pie de Peñagolosa. Su pendiente es muy fuerte y recibe importantes aportaciones tanto superficiales como subterráneas. La cuenca de la Rambla de la Viuda, de gran extensión, se sitúa paralela a la costa y drena los valles interiores de la provincia de Castellón, presentando un régimen muy irregular con períodos muy secos y fuertes avenidas. Este régimen irregular se explica por estar situado el nivel freático regional por debajo del cauce, por lo que se produce una fuerte infiltración que deja el cauce seco salvo en los grandes temporales de otoño. Las aguas superficiales de la Rambla de la Viuda se regulan en el Embalse de María Cristina. Las aguas del embalse contribuyen a la recarga de los acuíferos de La Plana. Por este motivo, desde la presa de María Cristina hasta su desembocadura en el río Mijares, el cauce de la Rambla de la Viuda permanece seco (CHJ, 1997).

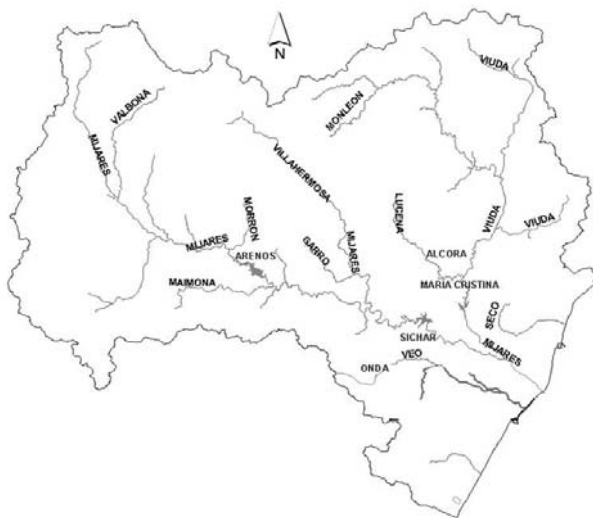


Figura 2. Red hidrográfica del sistema del Mijares

Fuente: CHJ (1997) y elaboración propia

Las características más importantes de los cauces que conforman al sistema Mijares-Plana de Castellón, se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 1 Características de los cauces del sistema Mijares-Plana de Castellón

CUENCA	LONGITUD (Km)	SUPERFICIE (Km²)	COTA MÁXIMA (msnm)	COTA MÍNIMA (msnm)
Río Belcaire	18,2	103,4	877	0
Río Seco	26,0	94,30	729	0
Río Veo	42,0	238,70	1103	0
Río Mijares	156,0	4028,20	2024	0
Villahermosa	59,0	449,90	1997	245
Rambla la viuda	81,0	1510,30	1814	35

El papel de las aguas subterráneas en el sistema de recursos hídricos de la cuenca del río Mijares es fundamental. Sin ellas sería imposible alcanzar el grado actual de aprovechamiento de los recursos. Aunque no existe conexión hidráulica entre el acuífero y el río, el uso conjunto es un elemento fundamental en la estrategia de gestión del sistema. Sin embargo hay que destacar la importancia del uso conjunto por dos grandes problemas que se han detectado en la zona: por un lado el conflicto existente entre los diferentes usos del agua, especialmente entre riego e hidroelectricidad, y por el otro la sobreexplotación del acuífero que se produce en la zona baja de La Plana de Castellón que ha provocado intrusión salina en diferentes pozos del acuífero costero (Andreu y Sahuquillo, 1987).

La explotación de las aguas subterráneas aumenta en los años más secos, mientras que en los años más húmedos se riega con aguas superficiales la mayor extensión posible de tierras dominadas por acequias y canales. En un estudio previo se dispone de un modelo del acuífero mediante diferencias finitas. Este modelo se ha transformado en un modelo de autovalores para su incorporación en el modelo global de simulación del sistema, y un modelo complementario para estudiar la intrusión marina en el acuífero de La Plana con mayor detalle. Se llegó a la conclusión de la necesidad de aumentar el uso de agua superficial para los riegos de la Cota 100, como forma de controlar las importantes salidas superficiales al mar, y aumentar los bombeos en los riegos tradicionales, al menos en determinados períodos y situaciones, para disminuir las salidas subterráneas al mar y aliviar los problemas de drenaje en la zona de Burriana.

Las Unidades Hidrogeológicas que se adscriben al Sistema de Explotación Mijares-Plana de Castellón (CHJ, 1997) son las siguientes, aunque no de manera exclusiva (figura 9):

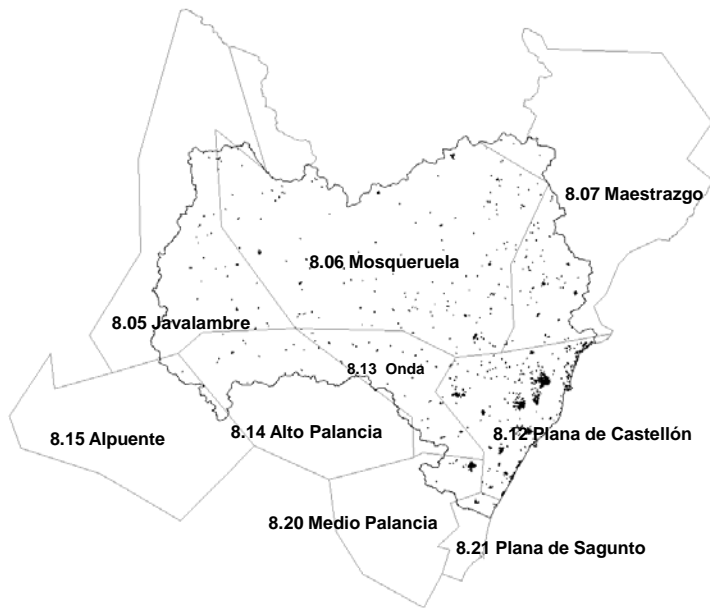


Figura 3. Unidades Hidrogeológicas en Mijares Plana de Castellón

Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar (1997) y elaboración propia

Los balances de las unidades hidrogeológicas se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 2 Balances de las unidades hidrogeológicas

NOMBRE UNIDAD	ENTRADAS			SALIDAS	DIFERENCIA (hm ³)
	Recarga de lluvia	Infiltración de riego	Transferencias laterales	Bombeos	
JAVALAMBRE	72,94	2,83	24,00	0,41	99,36
MOSQUERUELA	239,02	5,45	0,00	5,97	238,50
MAESTRAZGO	216,24	13,75	32,00	35,65	226,34
PLANA DE CASTELLON	35,94	59,73	25,60	134,23	-12,96
ONDA	28,92	2,79	0,00	4,05	27,66
ALTO PALANCIA	61,44	0,54	0,00	9,88	61,10
ALPUENTE	71,07	2,52	0,00	9,88	63,71
MEDIO PALANCIA	35,82	20,55	24,00	63,25	17,12
PLANA DE SAGUNTO	7,21	26,46	11,98	45,54	0,11

Fuente: CHJ, 1997

1.1.4. Usos del agua

La demanda global del sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón alcanza un valor de 305 hm³ anuales, de los que 232 corresponden al uso agrícola, 68 al abastecimiento urbano y 5

a la demanda industrial (CHJ, 1997). El uso agrícola representa el 76% de la demanda total. Le sigue en importancia el uso urbano, el cual demanda el 22% del total del recurso, mientras que el uso industrial y de servicios demanda únicamente el 1,6% del total (figura 10).

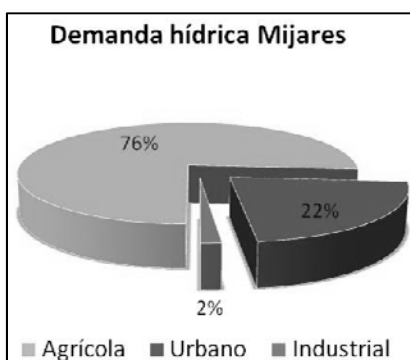


Figura 4. Demandas totales del sistema Mijares-Plana de Castellón

Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar (1997) y elaboración propia

1.1.5. Infraestructura hidráulica

La conexión entre los recursos y los usos se produce mediante un sistema de infraestructura hidráulica de: captación, transporte, almacenamiento, depuración, potabilización y defensa. La información detallada de esta información puede consultarse en la página web de la Confederación Hidrográfica del Júcar (<http://www.chj.es>).

1.1.5.1. Embalses

Los principales embalses que conforman el sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón son: Arenós, Sichar, M^a Cristina y Alcora, aunque existen algunos pequeños cuerpos de agua que funcionan más como azudes que como embalses, ya que no poseen capacidad de regulación (figura 5). Las capacidades útiles se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Embalses del sistema Mijares

EMBALSES	RÍO	CAPACIDAD UTIL (hm ³)
Valbona	Valbona	0,52
Los Toranes	Mijares Palomarejas	0,52
Balagueras	Mijares	0,12
Arenós	Mijares	93
Cirat	Mijares	0,05
Vallat	Mijares	0,60
Ribesalbes	Mijares	0,30
Sichar	Mijares	39-49
Alcora	Lucena	2,02

EMBALSES	RÍO	CAPACIDAD UTIL (hm ³)
M ^a Cristina	Rambla de la Viuda	19,70
Onda	Veo	1,10

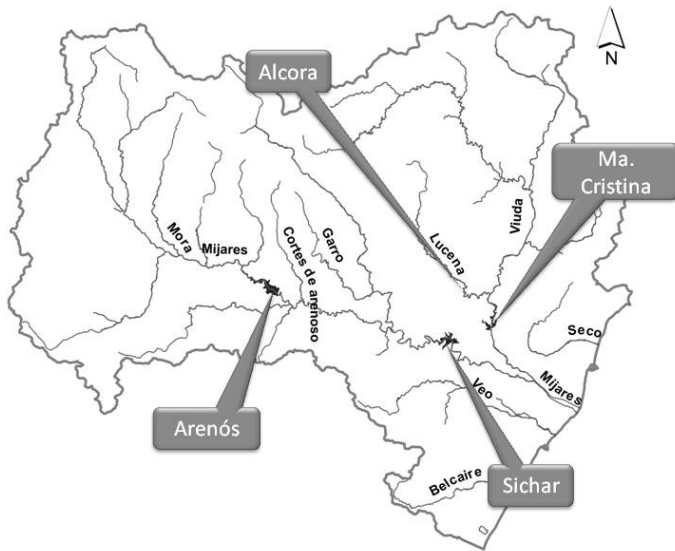


Figura 5. Principales embalses del sistema Mijares-Plana de Castellón

Fuente: CHJ (1997) y elaboración propia

1.1.5.2. Centrales hidroeléctricas

El sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón cuenta con diez centrales hidroeléctricas, todas ellas ubicadas en el río Mijares (figura 1).



Figura 6. Centrales Hidroeléctricas.

La potencia, caudal y salto de cada una de ellas, se muestran en la tabla siguiente

Tabla 4. Características de las centrales hidroeléctricas

APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS	POTENCIA (Mw)	CAUDAL (m³/s)	SALTO (m)
Central de San Agustín	11,84	6,80	127,00
Central de Los Villanuevas	3,60	9,83	48,50
Central de Los Cantos	4,80	9,81	62,50
Central de Cirat	14,73	14,72	118,70
Central de Vallat	14,72	15,91	104,50
Central de Ribesalbes	7,04	12,92	73,15
Central de Colmenar	5,60	13,27	55,59
Central de Onda	0,90	7,12	19,30
Central de Hidro	0,64	7,72	13,15
Central de Villarreal	0,27	6,76	7,28

1.1.5.3. Canales

Los principales canales que forman parte del sistema Mijares, así como sus características, se muestran en la tabla 5

Tabla 5. Canales y sus características principales

CANALES	CAUDAL (m³/s)	LONGITUD (km)
Canal del Tramo Común	24,4	5,5
Canal de la Cota 100	4,1	18,0
Canal de la cota 220	5,0	9,0
Canal de M ^a Cristina	3,0	15,2

1.1.5.4. Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDARs)

Existen 41 estaciones depuradoras, de las cuales la de Castellón de la Plana es la que depura mayor volumen de agua, del orden de 14 hm³, siendo el volumen total depurado del orden de 40 hm³. En la figura 7 se muestra la localización de las estaciones depuradoras.



Figura 7. Localización de las Estaciones Depuradoras

1.2. Modelo de gestión del sistema

A continuación se presenta la descripción del modelo de la simulación de la gestión de la cuenca del río Mijares y se incluyen los aspectos siguientes: representación del sistema superficial; representación del sistema subterráneo; representación de las demandas; aportaciones; definición de prioridades en la gestión; y la descripción de escenarios de simulación de la gestión.

1.2.1. Sistema superficial.

El sistema superficial está representado, de acuerdo con los lineamientos del Sistema Soporte a la Decisión Aquatool, por diferentes tipos de conducciones: tipo 1, tipo 2 y tipo 3 (figura 12); embalses y azudes (Sopeña, 2002).

Conducciones tipo 1. Corresponde a una conducción simple, sin filtraciones. Este tipo de conducción se asignó a los siguientes tramos de ríos:

- Río Mijares, aguas abajo del embalse Arenós hasta la confluencia con el río Villahermosa.
- Río Mijares, aguas abajo del embalse Sicha por un corto tramo.
- Río Villahermosa.
- Río Lucena.
- Rambla de la Viuda.
- Río Mijares poco antes de su confluencia con la Rambla de la Viuda y hasta su desembocadura al Mediterráneo.

Conducciones tipo 2. Son aquellas que presentan pérdidas por filtración en el cauce. Este tipo de conducción se asignó al tramo del río Mijares aguas abajo del embalse Sicha (después del tramo con conducción tipo 1) y hasta un poco antes de la confluencia con la Rambla de la Viuda.

Conducciones tipo 3. Corresponde a una conducción que presenta conexión hidráulica con un acuífero. Este tipo de conducciones se asignó al tramo del río Mijares aguas abajo de la confluencia con el río Villahermosa y hasta el embalse Schar.

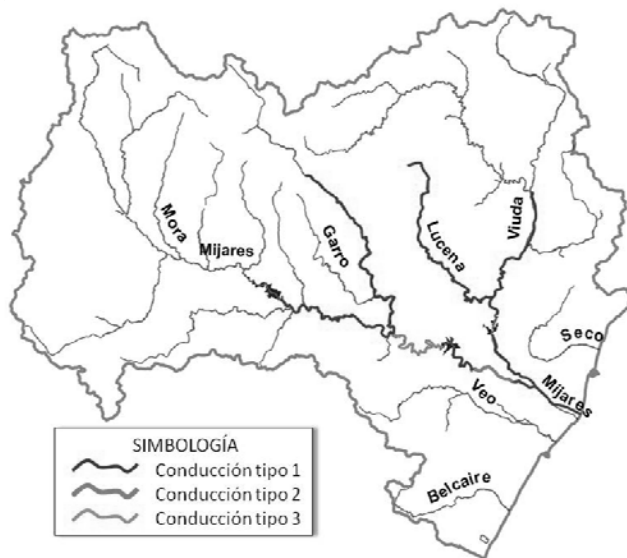


Figura 8. Definición del tipo de conducción en el modelo de gestión

Fuente: Confederación hidrográfica del Júcar (1997) y elaboración propia

En el tramo final, el río recarga al acuífero, produciéndose importantes pérdidas por filtraciones en el cauce. El primer tramo del río desde la salida del embalse Schar presenta fuertes filtraciones; este hecho propició la construcción del denominado *Tramo Común* cuya toma se localiza inmediatamente aguas abajo del reintegro de la central hidroeléctrica de Colmenar. El *Tramo Común* es un canal artificial situado en la margen izquierda del cauce que permite alimentar el Canal de la Cota 100 y el Canal de enlace de los riegos de M^a Cristina sin que se produzcan pérdidas por filtraciones. Casi la totalidad del agua que lleva el río se deriva hacia el tramo común, dejando únicamente en el cauce del río el caudal ecológico (figura 13). Las filtraciones en este primer tramo se estiman en unos 200 l/s (CHJ, 1997), unos 0,527 hm³/mes el cual se ha definido como caudal mínimo ecológico. Las pérdidas en la actualidad se concentran en la zona entre el retorno del tramo común y las tomas de los riegos tradicionales. Se han estimado leyes de pérdidas en función de los caudales circulantes diferentes para los meses de invierno y verano.

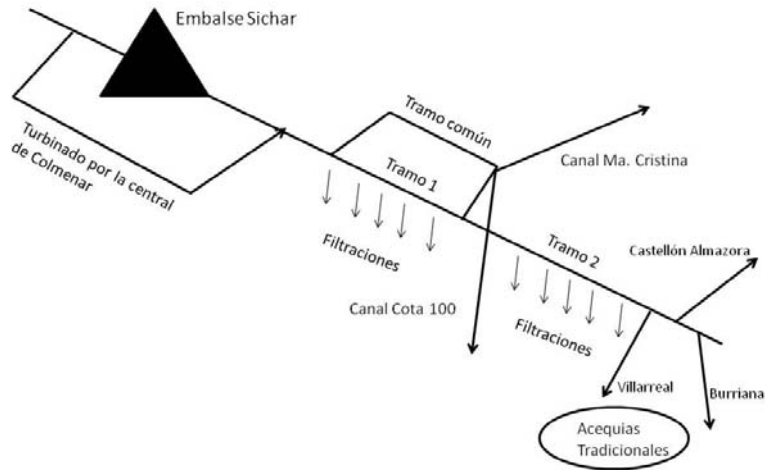


Figura 9. Esquema del tramo final del Mijares

Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar (1997) y elaboración propia

Embalses y azudes. Este tipo de infraestructura se corresponde a los elementos de regulación y almacenamiento del sistema, y en total son tres embalses y un azud (Alcora) los representados.

1.2.2. Sistema subterráneo.

Los acuíferos han sido considerados, en este caso, exclusivamente como depósitos de agua no conectados hidráulicamente con el sistema superficial, y cuyo objetivo es contar con una unidad de estado que indica el llenado y vaciado (volumen almacenado).

1.2.3. Demandas

Las principales demandas representadas en el modelo corresponden a los usos descritos anteriormente. Cada demanda se denomina como Unidad de Demanda (UD) relativa al uso que tiene: agrícola (UDA); urbana (UDU) e industrial (UDI). Sin embargo, para el análisis del sistema se consideraron exclusivamente las demandas principales: agrícola y urbana. El uso agrícola es el que demanda un mayor volumen del sistema hídrico superficial, mientras que el abastecimiento urbano en su totalidad se hace por medio de la explotación de aguas subterráneas.

Demanda agrícola. Las catorce UDAs que forman parte del ámbito del sistema de explotación del río Mijares (figura 14), se han agrupado de acuerdo a su ubicación geográfica, su sistema de explotación y el origen del recurso.

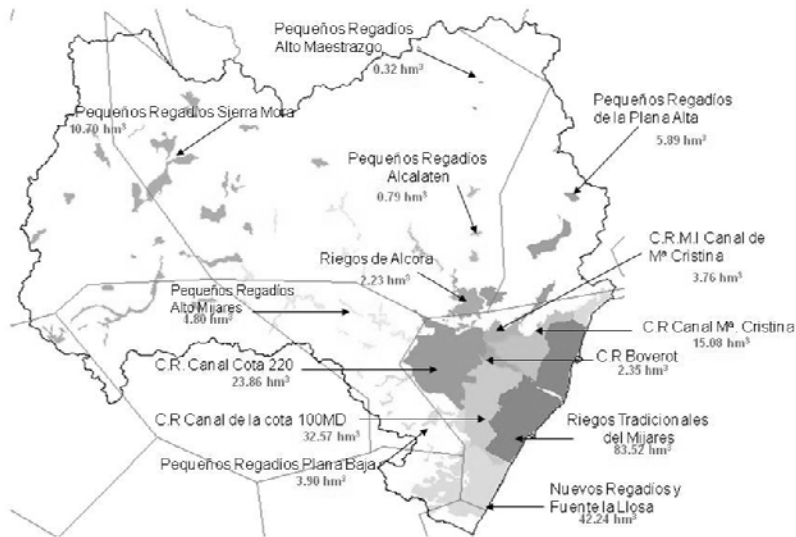


Figura 10. Unidades de demanda agrícola del sistema del río Mijares

Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar (1997) y elaboración propia

La distribución mensual de cada una de las demandas se estimó considerando una hectárea representativa y utilizando los porcentajes indicados en los informes del CEDEX (1991), (figura 15).

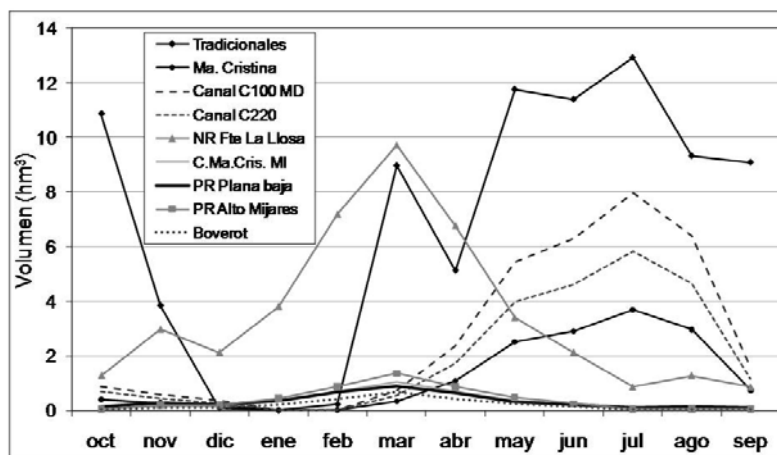


Figura 11. Distribución mensual de la asignación del agua en las demandas agrícolas

Demanda urbana. La demanda urbana fue considerada tomando en cuenta las Unidades Hidrogeológicas en las que se encontraban las poblaciones ubicadas en la región del Sistema de Explotación Mijares-Plana de Castellón. El total de la demanda anual por Unidad Hidrogeológica (UHG), se muestra en la tabla 3 y corresponde a la suma de demandas de los municipios que se encuentran en cada UHG.

Tabla 6 Demanda urbana anual por UHG

UHG	Demanda (hm ³)
8.05	0,27

UHG	Demanda (hm ³)
8.06	3,35
8.07	1,13
8.12	57,00
8.13	1,39
8.14	0,13
8.15	0,01
8.20	3,56
8.21	0,63
TOTAL	67,47

1.2.4. Aportaciones.

Las series de aportaciones restituidas a régimen natural que se han utilizado para definir las aportaciones intermedias que se introducen en el modelo son las incluidas en el Plan Hidrológico de la Cuenca del Júcar, ampliadas hasta el año 2002 con datos del seguimiento y revisión del mismo plan. De esta forma se cuenta con las series completas de los años hidrológicos 1940-1941 a 1999-2002 (Sopeña, 2002). Estas series proporcionan el caudal circulante a su paso por las estaciones de control, en hm³/mes, restituido al régimen natural. Las series de aportaciones fueron asignadas para: (1) las entradas al embalse de Arenós; (2) las aportaciones intermedias Arenós-Sichar; (3) las entradas al embalse de María Cristina y (4) las entradas al embalse de Alcora (figura 16).

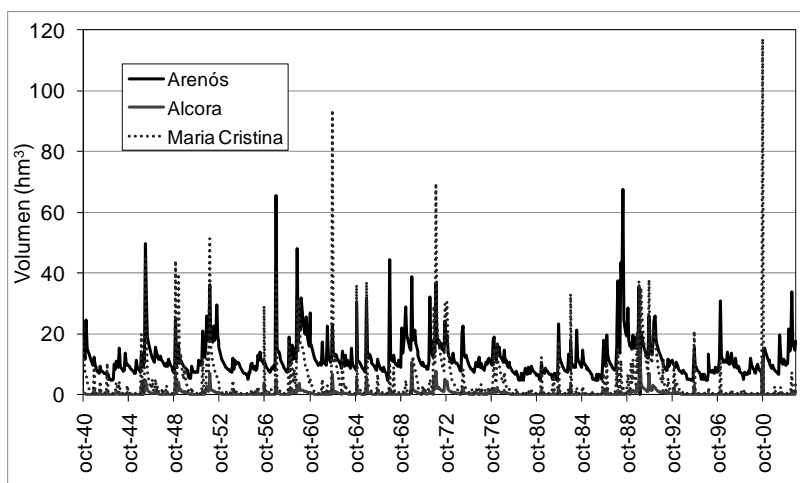


Figura 12. Series restituidas a régimen natural en escala mensual

Fuente: Sopeña, 2002

1.2.5. Reglas de operación

Las aguas de la comarca de la Plana, especialmente las del río Mijares, han sido siempre objeto de disputa por parte de las diferentes poblaciones desde el siglo XIII hasta la actualidad. Las poblaciones de Burriana, Almazora, Castellón y Villarreal, desde el siglo XIII, después de la conquista cristiana del territorio, monopolizaron el uso de las aguas del río Mijares, al aprovechar buena parte del preexistente sistema musulmán de regadíos. Con el paso del tiempo otras poblaciones se consideraron con los mismos derechos para una utilización que la historia les había negado sistemáticamente. Esto fue motivo de disputa durante ocho siglos (Sopeña, 2002). Por tales circunstancias, se elaboró el *Convenio de bases para la ordenación de las aguas del río Mijares* en el año de 1970. Este documento marca un hito en la ordenación de la cuenca pues ha puesto fin a los litigios entre comunidades. El Convenio consta de una relación detallada de los distintos aprovechamientos con determinación de la clase y cuantía de los mismos, superficie regable de cada uno y otras características.

Como resultado de dicho Convenio, la gestión del sistema se realiza mediante una regla de explotación determinista (figura 17). En esa curva se define un volumen útil como curva de reserva para el embalse de Schar, variable mes a mes y con un máximo en febrero de 36 hm³. Tras la construcción de Arenós, la gestión del conjunto de embalses de Arenós y Schar consiste en satisfacer las demandas existentes desde el embalse de Schar, por encontrarse, este último, aguas abajo del anterior. Una vez agotada la reserva del embalse de Schar, se realizarán las sueltas necesarias desde el embalse de Arenós. Si el volumen almacenado en el conjunto de Arenós-Schar es menor que el umbral de la curva, entonces no se suministra agua a los riegos mixtos, y sólo se suministran los regadíos tradicionales, más prioritarios. Existen unos volúmenes mínimos en cada embalse, que lleva a modificar la curva de reserva, adicionando 5 hm³ durante todos los meses.

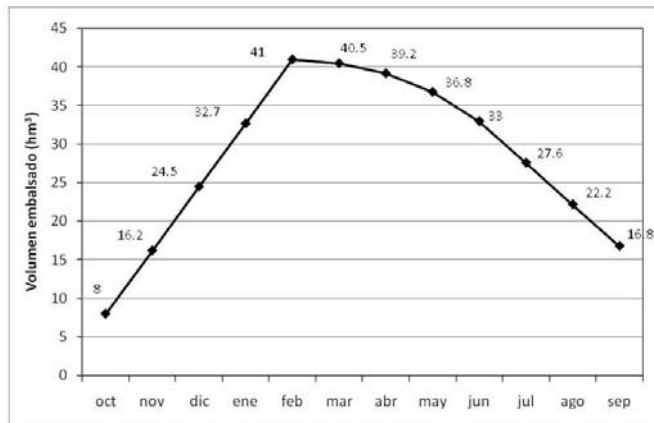
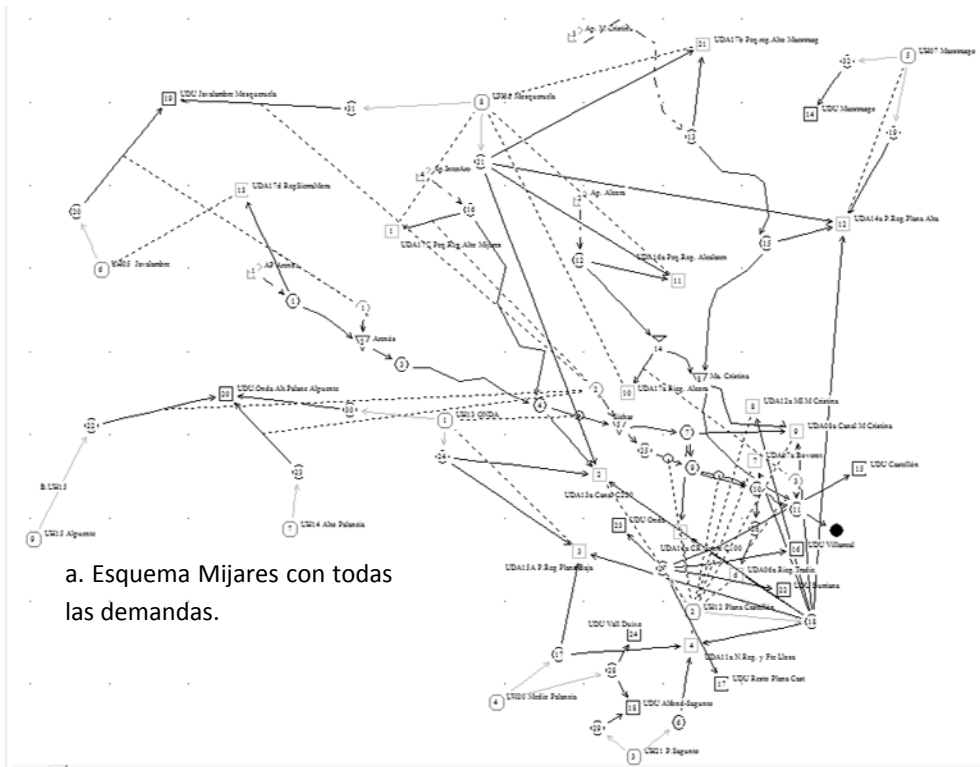


Figura 13. Curva de reserva del *Convenio 1970*

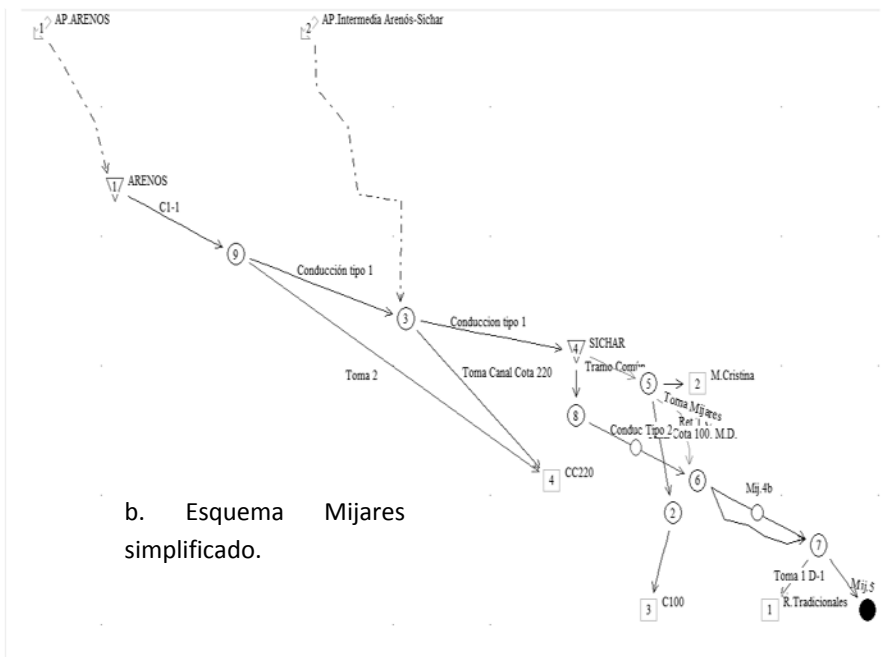
Fuente: CHJ (1997), modificada por Sopeña, 2002

La simulación de la gestión del sistema del Mijares se llevó a cabo para el total de las demandas indicadas anteriormente (figura 18a). Sin embargo, para realizar el análisis de políticas de precios se utilizó un esquema más sencillo con el fin de simplificar los cálculos (18b). Dicho esquema consistió en utilizar exclusivamente las demandas agrícolas de los riegos Tradicionales y la de los Riegos Mixtos que se dividen en las demandas de: M^a Cristina, Canal Cota 100 y Canal Cota 220 (Sopeña, 2002) actualizándose de acuerdo con los últimos datos

disponibles en la Confederación Hidrográfica del Júcar (2006). Los valores de las demandas superficiales para el caso de los Riegos Mixtos, se consideraron como el 50% de la superficial, debido al tipo de concesión utilizado por la CHJ (las demandas hídricas para los riegos considerados en el esquema simplificado se pueden ver en la figura 15). Para no complicar el modelo durante el análisis de políticas de precios, tampoco se consideró el acuífero de la Plana pues no hay conexión directa entre el río y el acuífero. Únicamente se introdujo como filtraciones en el tramo final del modelo. De igual manera no se incluyen las centrales hidroeléctricas, ya que las sueltas de agua están supeditadas a los riegos. Tampoco se han incluido las demandas urbanas ya que éstas son abastecidas por el acuífero de la Plana.



a. Esquema Mijares con todas las demandas.



b. Esquema Mijares simplificado.

Figura 14. Esquemas correspondientes al modelo de simulación de la gestión del sistema del río Mijares

1.3. Caracterización económica del sistema

A continuación se presenta la descripción de las curvas de demanda económica y el resumen de los costes variables de operación que se tomaron en cuenta para el análisis económico.

1.3.1. Curvas de demanda económica

Demanda agrícola.

El Plan Hidrológico Nacional (MIMAM, 2002) identificó cinco grandes zonas en España caracterizadas por: una estructura productiva común; (la especialización de cultivos; y una estructura socioeconómica similar. Entre ellas está la de Castellón. Los datos disponibles de precios por $\text{m}^3/\text{ha}/\text{año}$ y ponderados correspondientes a la provincias de Castellón, Vall d'Uxó y Onda Canal 220, se ajustaron a una curva LOWESS (Cleveland y Devlin, 1988) no paramétrica (Figura 19), con objeto de obtener una función que caracterice la región bajo análisis.

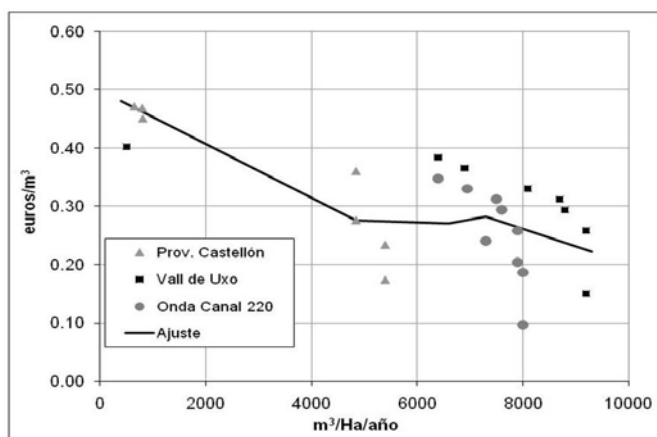


Figura 15. Curva de demanda ajustada para la zona de Castellón

Cuando se analiza la economía de los regadíos desde el punto de vista de las posibles transferencias externas, es importante considerar, conjuntamente con las curvas de demanda, el efecto de mermas de rentas, pues es posible que precios muy elevados de la curva de demanda, teóricamente alcanzables, lo sean a costa de una pérdida de renta tal que se desincentive la actividad del sector. Las curvas de la figura 20 realizadas para diferentes regadíos de la Comunidad Valenciana (Sumpsi et al, 1998) muestran los efectos sobre la renta agraria (miles de pts/ha) de imponer nuevas tasas del agua (pts/m^3) en algunas zonas regables de la cuenca del Júcar. En los tramos iniciales de la curva de demanda, que son totalmente inelásticos, la pérdida de renta del agricultor se debe exclusivamente a la dotación inicial de agua al suponer que nuevas tarifas se pagan por el volumen de agua consumida. Esto sucede porque los agricultores no siguen alguna estrategia para ahorrar agua, aunque pierden renta al pagar más por la dotación inicial. Se aprecia que las mayores pérdidas de renta agraria se producen en la Comunidad de regantes de la Acequia Real del Júcar.

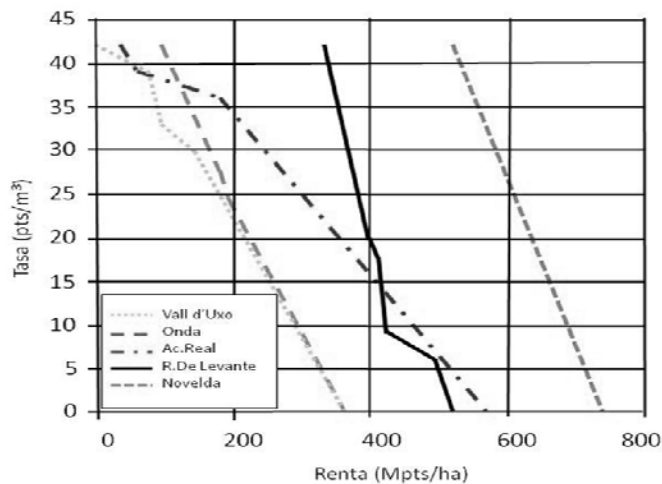


Figura 16. Efectos sobre la renta agraria

Fuente: Sumpsi et al. (1998)

La zona cultivable que el sistema Mijares-Plana de Castellón riega presenta predominantemente una superficie para cítricos que representa el 91% del total del área cultivada. El 5% del total cultivado corresponde a hortalizas y, el resto, a frutales, arroz y otros cultivos (García Mollá, 2000).

El Ministerio de Medio Ambiente, y posteriormente en los trabajos de Blanco (2008) e Iglesias y Blanco (2008) han propuesto una serie de curvas de demanda económica, dándole un valor al agua por hectárea regada del cultivo en cada una de las comunidades de regantes. Estas curvas se han obtenido mediante la técnica de Programación Matemática Positiva (PMP), desarrollada inicialmente por Howitt (1995). Este método supera algunas limitaciones importantes de la programación matemática tradicional. Una gran ventaja de este enfoque es que se rescata la información adicional de los datos observados en el comportamiento de los agricultores, lo que permite una interpretación teórica de los datos observados en una situación real. Además el método permite utilizar menor cantidad de datos con un modelo que considera los cambios graduales de las variables exógenas.

Las curvas correspondientes a las diferentes demandas agrícolas del Mijares se muestran en la siguiente figura. Según Sumpsi et al. (1998), en las UDAs del Mijares, tanto la existencia de prácticamente un monocultivo (cítricos) como la pequeña dimensión de las explotaciones, hace que no interese la sustitución entre cultivos de regadío y que tampoco se traspase de regadío a seco, lo que explica la baja elasticidad en las curvas de demanda.

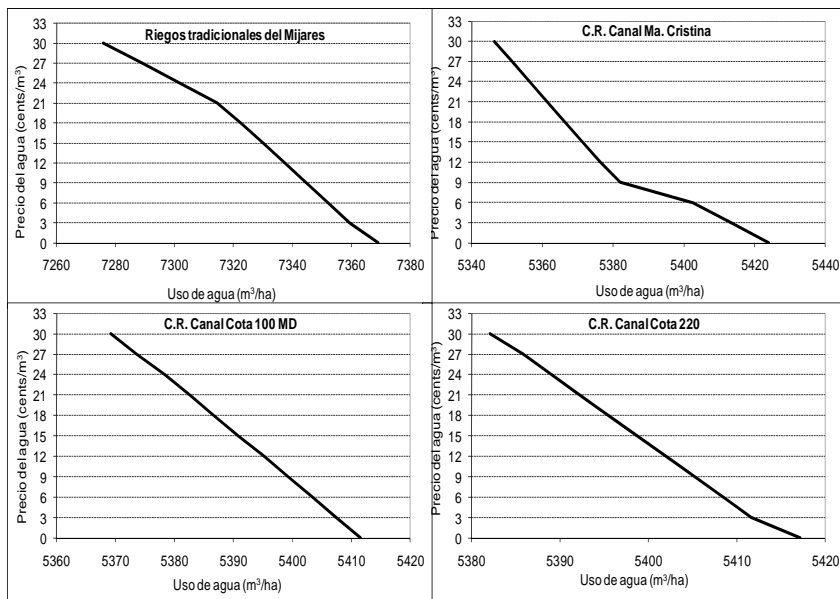


Figura 17. Curvas de demanda económica.

Las curvas anteriores representan un rango muy pequeño de la dotación de agua en cada una de las comunidades de regantes. Sin embargo, para efectos del presente análisis económico, se requiere tener curvas que abarquen un mayor rango en las dotaciones de agua, por lo que se han extendido dichas curvas (figura 22) con base a ciertas hipótesis.

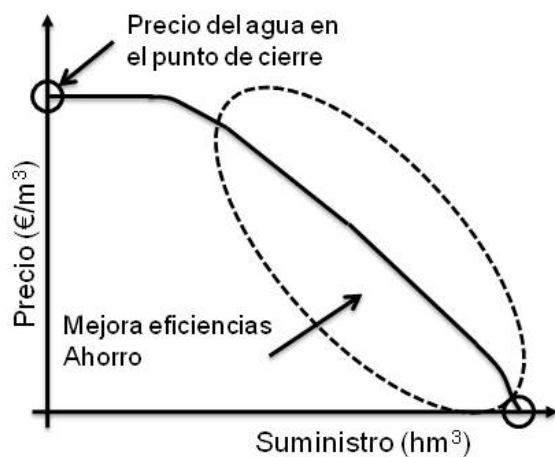


Figura 18. Consideraciones en las curvas de demanda

El punto de corte con el eje de abscisas corresponde a la dotación con la que están regando en promedio las distintas UDAs analizadas. El primer tramo (en círculo punteado) se basa en las curvas obtenidas mediante programación matemática. En este primer tramo, la respuesta de los agricultores ante el aumento de precio del agua se traduce en mejores prácticas de riego, ahorro y mejora de eficiencia en general. Con eficiencias altas, aumenta el valor económico unitario del agua (mayor producción neta por m^3 utilizado).

Se selecciona un precio del agua en el punto de cierre de la curva, que para los cítricos ronda los $0,70 \text{ €/m}^3$ en la mayoría de las fuentes consultadas (ej. Colino y Martínez, 2002). El precio

de cierre representa el nivel del precio del agua en el que, *ceteris paribus*, los costes totales se igualan a los ingresos totales. A ese nivel de precio del input, los ingresos sólo son capaces de cubrir los costes variables, por lo que al agricultor le será indiferente seguir produciendo o no. Cualquiera que sea su decisión, debe hacer frente a unas pérdidas inevitables en el corto-medio plazo como son las del pago de costes fijos. Niveles de suministro por debajo de la dotación mínima requerida con la máxima eficiencia alcanzable suponen introducir un efecto de riego deficitario. El riego deficitario es factible en los cultivos leñosos, pudiendo obtenerse importantes reducciones del suministro sin grandes pérdidas en la producción final (siempre que el agua aplicada se distribuya de forma óptima a lo largo de las etapas de desarrollo del cultivo).

Con lo anterior, las curvas de demanda utilizadas en el análisis económico toman la forma de las mostradas en las siguientes figuras. En ellas se observa la curva de demanda en las modalidades de dotación (m^3/ha -año) y demanda volumétrica ($hm^3/año$).

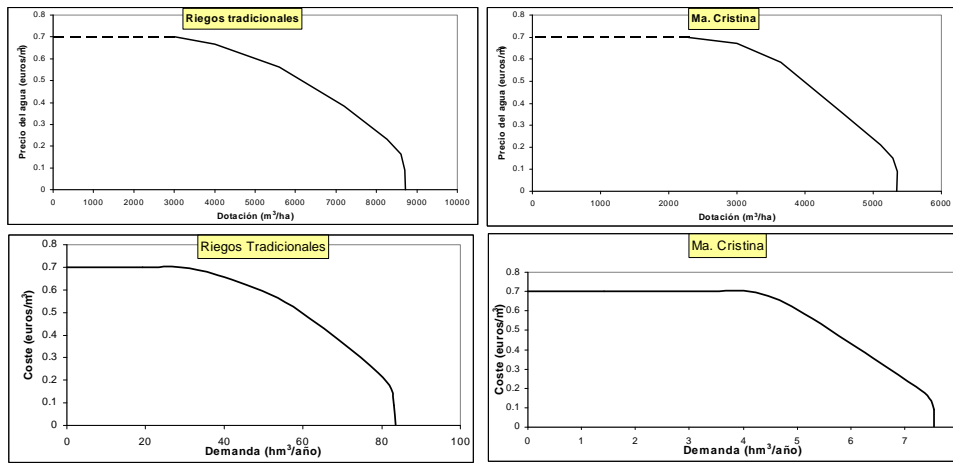


Figura 19. Curvas de demanda Riegos Tradicionales y Ma. Cristina

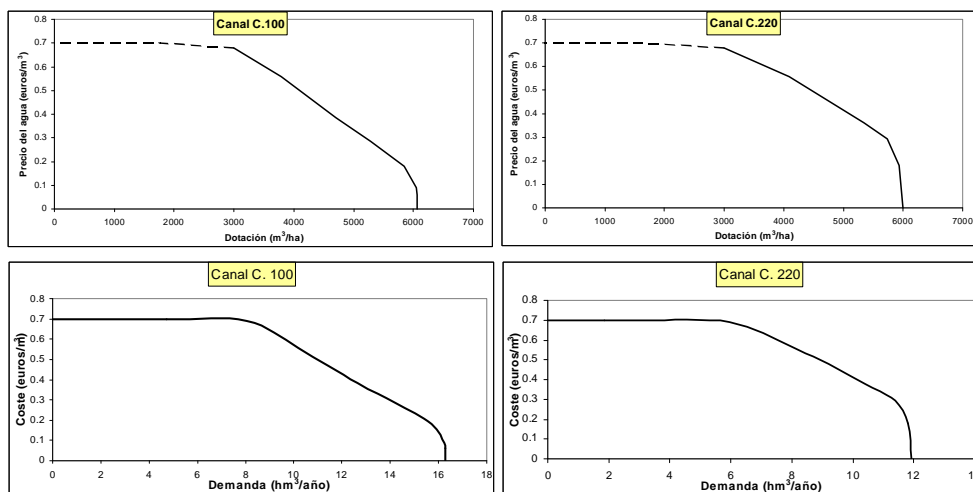


Figura 20. Curvas de demanda Canal Cota 100 y Canal Cota 220

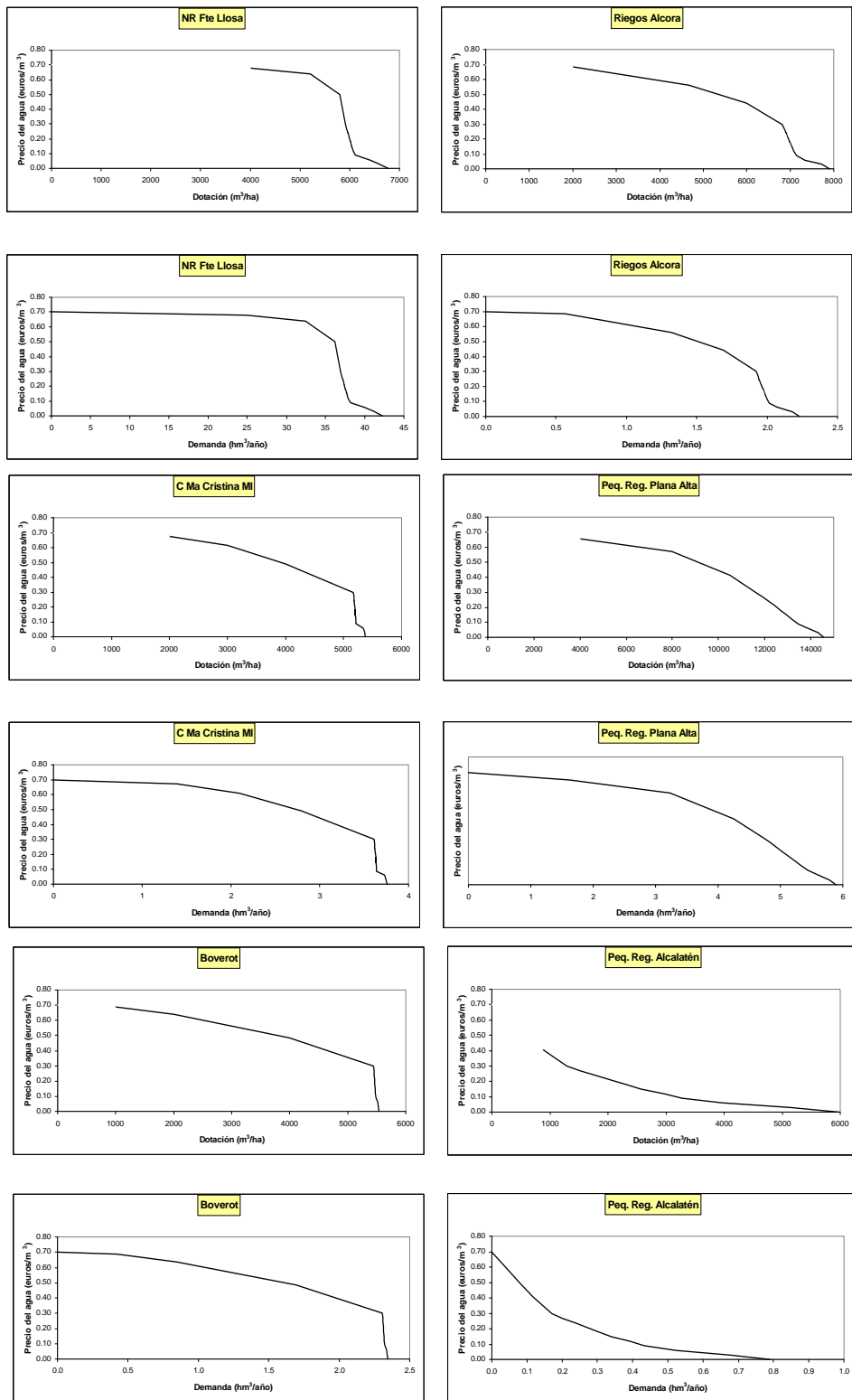


Figura 21. Curvas de demanda agrícola (cont.)

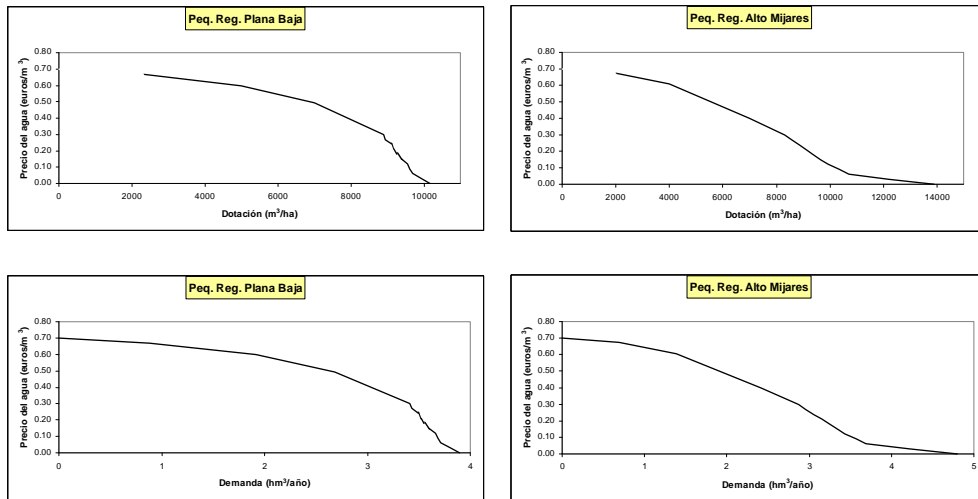


Figura 22. Curvas de demanda agrícola (cont.)

1.3.2. Demanda urbana

Los servicios de agua urbana en la Demarcación Hidrográfica del Júcar (DHJ, en adelante) se prestan a una población de 4,3 millones, junto con otros consumos urbanos (industria, comercio y servicios públicos). El agua total suministrada ha sido estimada en 360 hm³/año, con una eficiencia media en la red del 80% (CHJ, 2005). Los servicios incluyen el suministro y tratamiento de agua potable (gestionados por los Ayuntamientos o a través de empresas mixtas o concesiones), y la recogida, transporte, depuración y vertido de aguas residuales (la mayoría gestionadas por la Entidad Pública de Saneamiento de Aguas de la Comunidad Valenciana). La recuperación de costes de los servicios urbanos de agua en 2005 se estima en un 95% (CHJ, 2005).

El coste unitario por metro cúbico facturado de estos servicios se ha estimado en 1,06 € (CHJ,2005), cifra que se ha adoptado como precio medio al nivel de consumo actual para las UDUs modeladas (figuras 24. a y b). En esta cifra no se incluye el coste del servicio de alcantarillado, 0,42 €/m³, ya que éste no es estrictamente un coste asociado al suministro de agua urbana.

Las curvas de demanda urbana para el sistema del río Mijares se determinaron con base en funciones de Cobb-Douglas usando una elasticidad-precio constante de -0,65.

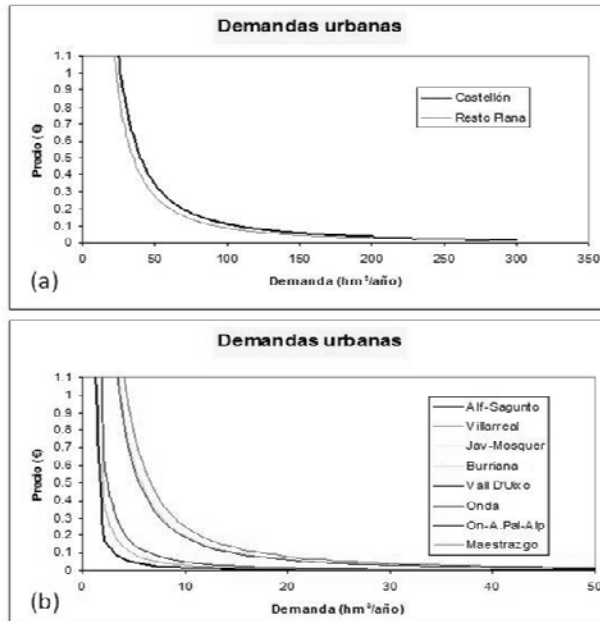


Figura 23. Curvas de demanda urbana

Fuente: CHJ y elaboración propia

En las curvas de la figura 24, se observa que la elasticidad-precio es negativa (disminuyen los consumos al aumentar el precio) y las demandas son inelástica en los rango de demanda menores a 50 hm³ en las curvas de la figura 24a y 3 hm³ en las curvas de la figura 24b.

1.3.3. Costes variables de operación del agua subterránea.

Los costes variables de operación corresponden a los costes de bombeo, los cuales corresponden a los reportados en el Informe Técnico del Coste del Uso de Aguas Subterráneas en España (DGHO, 2003). Según dicho informe, la cuenca del Júcar es la que tiene el mayor grado de explotación de aguas subterráneas de todas las cuencas españolas, llegando a sobrepasar los 1580 hm³/año para las 41 unidades hidrogeológicas. Los costes de extracción del agua subterránea, para las Unidades Geohidrológicas que forman parte del Sistema del río Mijares, se muestran en la tabla 4.

Tabla 7. Costes de extracción del agua subterránea. Mijares

Unidad Hidrogeológica		Coste (€/m ³)		Coste total (€)		
		Abast.	Riego	Abast	Riego	Total
8.05	Javalambre	0,07		137,992		137,992
8.07	Maestrazgo	0,06	0,09	120,747	1.086,726	1.207,473
8.12	Plana de Castellón	0,05	0,08	2.017,598	7.413,501	9.431,099
8.13	Onda	0,12	0,24	736,171	490,781	1.226,952
8.20	Medio Palancia	0,08	0,13	152,352	3.047,035	3.199,387
8.21	Plana Sagunto	0,04	0,07	126,009	3.343,449	3.469,458

2. Cálculo del Coste Marginal de Oportunidad. Análisis de series temporales y relación entre la escasez del recurso y su valor económico

2.1. Introducción

La valoración del coste del recurso ha sido un tema de discusión por parte de los diferentes grupos que se han definido para el estudio de la implementación de la DMA y que los diferentes Estados miembro utilizan en sus propios ámbitos y sitios de estudio (véase apartado 3.3.).

El *coste del recurso* generalmente se asocia con el *coste de oportunidad* o beneficio neto al que se renuncia cuando un recurso escaso es asignado a una actividad o uso en lugar de a otras posibles. Surge, por tanto, de una asignación económicamente ineficiente del recurso (en cantidad y/o calidad) en el tiempo y entre diferentes usuarios en el espacio y el tiempo, y está relacionado con la escasez del recurso y su gestión. Desde el punto de vista de la gestión del agua como un recurso económico el reto clave es conseguir que se tenga en cuenta este coste de oportunidad del agua en la asignación del recurso. A pesar de la aparente simplicidad del concepto, su aplicación es muy compleja, ante la inexistencia práctica de precios de mercado que reflejen el valor marginal del agua en cada uso. La complejidad aumenta al considerar la variación en el tiempo y en el espacio del coste marginal de oportunidad del recurso.

El establecimiento de precios del agua que incorporen el valor del recurso a escala de cuenca desde el punto de vista práctico es por tanto un reto complejo, lo que se agrava por el hecho de que el valor del recurso es variable en el tiempo y espacio, lo que dificultaría su implementación práctica y su aceptabilidad. Por ello en este trabajo se hace un esfuerzo por vincular el coste del recurso con estados de reservas, y definir con ello políticas de precios.

En este capítulo se plantean tanto el concepto de coste utilizado en esta tesis como la metodología para la valoración del mismo, considerando los enfoques de optimización y simulación hidrológica. La valoración del coste mediante el enfoque de simulación se muestra en un caso práctico para la cuenca hidrográfica del río Segura.

2.2. Coste Marginal de Oportunidad del Recurso

El coste de oportunidad está relacionado con el valor del agua de forma no transitiva (Briscoe, 1996; Pulido-Velázquez, 2003). El uso urbano de agua es generalmente un uso de poco volumen y alto valor. Los costes de uso son relativamente altos, mientras que los costes de oportunidad (impuestos sobre otros como consecuencia del uso del agua) son relativamente bajos. Por otro lado, el suministro de agua para riego aunque supone un gran volumen por lo general tiene un bajo valor añadido. El coste de uso del agua para riego es con frecuencia modesto, pero cuando compite con el uso urbano el coste de oportunidad es alto. A pesar de esto, el coste de oportunidad del agua de riego frecuentemente se sobrevalora, ya que aunque los requerimientos de agua son grandes, las fluctuaciones temporales son importantes y la garantía de suministro requerida es mucho más baja que para el suministro urbano.

Desde el punto de vista de la gestión del agua como un recurso económico el reto clave es conseguir que se tenga en cuenta el coste de oportunidad real del agua en la utilización del recurso (Pulido-Velázquez, 2003; Pulido-Velázquez et al., 2008). La eficiencia económica en la gestión del recurso exige que se conozcan e incorporen los costes de oportunidad del recurso en las decisiones. Además, las tarifas que incluyen el coste de oportunidad transmiten al usuario una señal de escasez del recurso, incentivando un uso eficiente del mismo. A pesar de la aparente simplicidad del concepto, su aplicación es muy compleja. Si, como ocurre en España y en otros muchos países, la asignación del agua no se realiza generalmente a través del mercado, la determinación del coste de oportunidad del uso del recurso en cada momento y en cada lugar es una tarea muy complicada, y requiere de una metodología de análisis de sistemas apoyada en un adecuado sistema de valoración económica del valor del agua en cada uso.

En el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la UPV se ha considerado el concepto de **Coste Marginal de Oportunidad del Recurso (CMOR, en adelante)** para definir el coste del recurso (Pulido-Velázquez, 2003). Para un punto del sistema y en un instante dado, el **CMOR** es el coste que supone para el sistema el disponer de una unidad menos de agua en ese punto y en ese instante. Ese coste es un indicador de la escasez del agua en el sistema y de la disponibilidad de pago del sistema productivo y los usuarios finales, que tienen para solventar la escasez. La variabilidad espacio-temporal del coste del recurso así valorado, se captura mediante el uso de modelos hidrológico-económicos del sistema, ya que estos son capaces de incorporar tanto la variabilidad de las demandas económicas del sistema como la operatividad de la infraestructura que regula y distribuye el recurso hídrico (Pulido-Velázquez et al., 2004b).

2.3. Metodología para el cálculo del cmor

Se tienen dos variantes para la valoración del **CMOR** en este trabajo. Por un lado el enfoque de optimización y, por el otro un enfoque basado en la simulación hidrológica del sistema. Ambos enfoques utilizan diferentes modelos, con sus respectivas ventajas y desventajas, para evaluar el CMOR. En el desarrollo de la presente tesis se utilizaron los modelos GAMS, para el enfoque de optimización, y el módulo SimGes del SAD Aquatool para el enfoque de simulación.

2.3.1. Enfoque de optimización

El coste del recurso puede valorarse en función de los valores o precios sombra que se obtienen de un modelo de optimización, en el cuál la función objetivo corresponde a los beneficios económicos derivados del reparto del recurso del agua a los diferentes usos que compongan un sistema de explotación. El valor económico neto se obtiene agregando los beneficios que corresponden al nivel de suministro y deduciendo los costes variables de suministro. Por otro lado, las restricciones en el modelo garantizan que las decisiones finales sean factibles y sostenibles.

Los valores óptimos de las variables del problema dual (precios sombra), definen 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 cada variable dual. Ya que la función objetivo es el resultado económico por el uso económico del agua en todo el sistema, los precios sombra de las restricciones de balance en los nudos del modelo (embalses, acuíferos, etc.) proporcionan el incremento neto de beneficio neto por incremento

infinitesimal del recurso hídrico en ese nudo y en ese instante, y por tanto el **Coste Marginal de Oportunidad del Recurso** (Pulido-Velázquez, 2003, 2006a). El modelo utilizado mediante el enfoque de optimización proporciona una valoración normativa que constituye un techo ideal o valor máximo para el coste de oportunidad.

2.3.2. Enfoque de simulación

El análisis económico con base en un enfoque de simulación, tiene la virtud de tomar en cuenta las condicionantes de la gestión actual y real del sistema. Los indicadores económicos resultantes del análisis permiten detectar ineficiencias en el sistema, sin que aquellos sean los protagonistas en la gestión.

Un *modelo de simulación* asume que el sistema es gestionado de acuerdo con unas reglas a priori. El CMOR puede aproximarse mediante la variación de beneficios que ocurriría si hubiera una unidad menos de recurso en un punto e instante determinados. El modelo de simulación permite una valoración positiva correspondiente a la gestión del sistema mediante reglas predefinidas, por ejemplo prioridades legales en la asignación del recurso, permitiendo reproducir el *modus operandi* del sistema.

El enfoque de simulación es conceptualmente sencillo, computacionalmente más simple, y consigue resultados aproximados a los que se obtienen mediante optimización. La metodología parte de la puesta a punto de un modelo de simulación de la gestión de la cuenca en el que estén caracterizadas todas las componentes relevantes (recursos superficiales y subterráneos, infraestructuras, demandas, etc.) y que permita una representación razonable de distintas políticas de gestión.

Collazos et al. (2004) proponen un modelo de simulación para realizar un análisis económico a nivel de cuenca, consideran una asignación del agua no basada en aspectos económicos sino en otros distintos, como los referentes a usos históricos, legales, etc. Los autores definen también funciones económicas que, para los distintos usos del recurso, representan las curvas de demanda pero pueden ser también aplicadas a otros elementos del sistema para representar los costes. Utilizan el módulo SimGes del SAD Aquatool para la simulación de la gestión y con ello representar adecuadamente la asignación actual de agua a la cuenca. Indican que para realizar el análisis económico, el SRH bajo análisis ha de haber sido modelado previamente con SimGes. Su propuesta metodológica consiste en: puesta a punto de un modelo de simulación de la gestión de la cuenca; puesta a punto de un evaluador económico de la asignación del recurso obtenida con el modelo de simulación; y utilización de rutinas específicas que permiten el uso secuencial de los modelos anteriores con el fin de obtener los costes marginales.

Los autores comparan los resultados económicos para el *caso base*, que representa la asignación actual, y el *caso modificado*, constituido por el caso base más una pequeña perturbación consistente en añadir (o restar) una unidad diferencial de caudal en el elemento e instante de interés. En el caso modificado el modelo lleva a cabo una nueva asignación del recurso, usando las reglas de reparto, y posteriormente se evalúa el beneficio económico total y se calcula la diferencia de beneficios totales entre el caso base y el modificado. El cociente entre la variación del beneficio económico y la variación de caudal, es una aproximación al Coste Marginal de Oportunidad del Recurso, el cual refleja el coste

económico de la escasez relativa del recurso hídrico de acuerdo con los criterios de asignación actuales.

2.4. CMOR como Valores Sombra del Modelo de Optimización GAMS

Se ha utilizado el lenguaje de programación GAMS (General Algebraic Modeling System, Brooke et al., 1998) en el presente trabajo, por ser una herramienta muy versátil que entra dentro de la clasificación de lenguajes algebraicos especialmente diseñados para el modelado, análisis y resolución de problemas de optimización.

2.4.1. Descripción general de GAMS

El modelo de optimización GAMS es un sistema de modelación de alto nivel basado en programación matemática. Está específicamente diseñado para resolver problemas de optimización lineales, no lineales y mixtos. GAMS puede diseñar grandes y complejos modelos a escala, y permitir construirlos de manera que puedan adaptarse de acuerdo a los requerimientos del modelador y/o a nuevas y diversas condiciones del problema por optimizar.

Las características más importantes de GAMS son las siguientes (Pulido-Velázquez, 2003):

- Capacidad para resolver problemas de pequeña dimensión (docenas de variables y restricciones), y problemas mayores (miles de variables y restricciones) sin variar el código de forma importante. El manejo eficiente de sus índices permite escribir, de manera compacta las restricciones mediante una sola ecuación.
- Separa el proceso del modelado por el usuario, del proceso interno de resolución obtenido mediante alguno de los optimizadores disponibles.
- La forma en que GAMS representa un modelo de optimización coincide prácticamente con la descripción matemática del problema, por lo que el código resulta sencillo de comprender.
- Proporciona los mecanismos necesarios para resolver problemas de optimización con estructuras similares, como aquellos que se derivan de técnicas de descomposición.

Existe una amplia literatura sobre técnicas de programación lineal que muestran un amplio rango de métodos aplicables: métodos duales; métodos de penalizaciones; métodos de lagrangiano aumentado; métodos de direcciones factibles; programación cuadrática secuencial, etc. GAMS dispone de diferentes *optimizadores* (solvers) para resolución de problemas no lineales. Los más conocidos son CONOPT y MINOS, siendo sus últimas versiones CONOPT3 (ARKI 2002) y MINOS 5.5 (Murtagh y Saunders, 2002). MINOS 5.5, desarrollado en la Universidad de Stanford, emplea un algoritmo de gradiente reducido combinado con un algoritmo cuasi-newtoniano para facilitar la optimización de variables súper-básicas. En el caso de restricciones no lineales, se utiliza un algoritmo de proyección lagrangiana que incorpora una secuencia de iteraciones mayores, cada una de las cuales requiere la solución de un sub-problema linealmente restringido. Cada sub-problema contiene versiones linealizadas de las restricciones no lineales, así como las restricciones lineales originales y las cotas de variables.

CONOPT3, desarrollado por una consultora danesa (ARKI Consulting and Development), que implementa un algoritmo basado en el método generalizado de gradiente reducido (algoritmo

GRG) es un método más apropiado para resolver problemas de gran tamaño con muchas no linealidades y pocos grados de libertad. A diferencia de las versiones anteriores, CONOPT3 puede utilizar información de segundas derivadas de las funciones para acelerar el proceso de optimización.

MINOS 5.5 y CONOPT3 utilizan, por tanto, un algoritmo de optimización diferente, y uno puede ser más apropiado que el otro dependiendo del problema por resolver siendo muy difícil predecir *a priori* cual es el más adecuado para resolver un problema particular.

2.4.2. Optimización económica de la gestión

Un modelo de optimización busca de forma automática la solución factible óptima para el periodo de optimización seleccionado, de acuerdo con un objetivo único o varios objetivos simultáneos no evaluables en las mismas unidades. A diferencia del modelo de simulación, el de optimización es más limitado en cuanto a la representación real de un sistema real, pero se elimina el largo proceso de prueba y error inherente a un modelo de simulación.

La optimización económica de la gestión se ha realizado mediante un modelo hidro-económico de optimización a escala de cuenca o sistema de explotación. El modelo integra el sistema superficial de agua, la infraestructura hidráulica y las funciones económicas que definen el valor del recurso para las distintas demandas y costes implicados en el suministro de las mismas. La optimización se hace sobre series hidrológicas extensas, representativas del rango de eventos hidrológicos probables en el futuro, pero para las demandas correspondientes a un nivel de desarrollo determinado.

Se ha asumido que los valores sombra proporcionados por el modelo de optimización mediante el cambio en la función objetivo, como consecuencia de un cambio marginal unitario del término independiente de la restricción que corresponde a cada variable dual, corresponden al valor del CMOR. El problema matemático consiste en maximizar el valor de una función escalar objetivo económica, bajo una serie de restricciones que definen el suministro de agua a las demandas de un sistema de explotación. La función objetivo representa los beneficios totales que se proporcionan a las diferentes demandas cuando se asigna el recurso de agua de acuerdo a la disponibilidad y a las aportaciones a los embalses considerados.

$$MAX \quad BA = \sum_{k=1}^{nT} \frac{1}{(1+i)^k} \left(\sum_{e=1}^{nE} \int_0^{x'_{ke}} f_{e_{ke}}(x_{ke}) dx_{ke} \right)$$

La función objetivo está sujeta a las diferentes restricciones para reproducir los condicionantes físicos y de gestión del sistema.

Las restricciones se pueden clasificar en:

- Restricciones de balance en los nudos del sistema. El balance será entradas igual a salidas para los nudos sin capacidad de almacenamiento, y entradas menos salidas igual a variación de volumen en los nudos de embalse.

- Restricciones de signo de las variables. Las variables de decisión (sueltas, bombeos, recarga artificial, caudales de derivación, etc.) son todas positivas. Algunas de las variables de estado pueden ser positivas o negativas (se definen como variables libres o sin restricción de signo en el modelo). Por ejemplo, algunas de las variables de control de los acuíferos pueden alcanzar valores negativos, como ocurre cuando se generan alturas piezométricas o volúmenes por debajo de la situación de referencia.
- Restricciones de capacidad máxima, en variables que representan caudales en conducciones o volúmenes en embalses o acuíferos, de acuerdo con las cotas superiores impuestas bien por limitaciones físicas o de gestión en el sistema. En el caso de las demandas consuntivas se añade la condición de que el suministro máximo a cada unidad de demanda viene definido por el valor máximo de la demanda en cada mes.
- Ecuaciones de procesos físicos. Para el subsistema superficial consisten generalmente en restricciones de igualdad que reproducen mediante una ecuación empírica previamente calibrada procesos físicos como pérdidas por evaporación o filtraciones en conducciones y embalses, y retornos en las demandas. Las evaporaciones suponen pérdidas permanentes de agua para el sistema. Las filtraciones pueden suponer pérdidas de agua para el sistema; en otros casos se considera que esas filtraciones alimentan a un acuífero concreto que se incluye en el modelo. En ese caso la variable de infiltración se suma como recarga en las ecuaciones de balance en el acuífero. Los retornos son los reintegros de agua al sistema (superficial o subterráneo) en las unidades de demanda consuntivas.
- Restricciones de valor mínimo. Este valor mínimo puede corresponder a restricciones de caudal mínimo en conducciones o volumen mínimo en embalses, ya sea por motivos operativos, ambientales (por calidad de las aguas o mantenimiento de ecosistemas) o recreativos. A diferencia del resto de restricciones comentadas, que representan limitaciones físicas reales que no pueden ser violadas de ninguna forma, este tipo de restricciones representan metas u objetivos implícitos, que pueden de hecho ser violados, aunque el coste de esa violación sea alto. En el caso de que no haya agua disponible para cumplir las restricciones de valor mínimo no se encontraría solución factible al optimizar, con lo que hay que introducir variables de holgura con alta penalización para detectar no factibilidades.

Las **variables de decisión** corresponden en este caso a decisiones de sueltas en embalses, bombeos en los acuíferos, y variables de caudal circulante por las conducciones, según las decisiones de reparto del agua para atender a las distintas demandas y requerimientos ambientales. Entre las variables de estado se incluyen las variables de volumen, evaporación y filtraciones en el embalse, y las que representan el estado de los acuíferos.

Las ecuaciones de balance en *nudos* sin capacidad de almacenamiento vienen definidas por la clásica relación de continuidad que implica que la suma de entradas al nudo desde aguas arriba debe ser igual a las salidas aguas abajo del nudo.

En el caso de *embalses*, la ecuación de balance se transforma en una ecuación de estado, en la que el estado del embalse viene representado por la variable de volumen embalsado. La

ecuación de continuidad consiste en este caso en que la diferencia entre entradas y salidas es igual a variación de volumen,

$$V_t = V_{t-1} + AP_t - PE_t - PF_t - QS_t$$

donde V_t es el volumen en el embalse al final del mes t , V_{t-1} es el volumen en el embalse al final del mes $t-1$ (y, por tanto, el volumen inicial en el mes t), AP_t es la aportación hidrológica al embalse durante el mes t , PE_t y PF_t son las pérdidas por evaporación y filtración, y QS_t son las sueltas del embalse a través de la conducción i , una de las n conducciones de salida del nudo. Las sueltas pueden deberse tanto a sueltas controladas, que corresponden a decisiones de reparto del agua, como a vertidos, o desembalses producidos por superarse la capacidad máxima de embalse. La limitación de capacidad máxima en el embalse viene definida en el modelo por una restricción del tipo:

$$V_t \leq VMAX_t, \forall t$$

donde $VMAX_t$ es la llamada *capacidad útil* del embalse, o capacidad de embalse utilizable para regulación, es decir, descontando resguardos para avenidas y volúmenes mínimos por razones operativas. Dado que los resguardos por avenidas pueden variar de unos meses a otros, $VMAX$ puede ser variable a lo largo del año. El volumen mínimo también puede variar dentro del año.

Las pérdidas por evaporación y filtración en el embalse son función del volumen almacenado. Las pérdidas por evaporación se calculan como el producto de la superficie de lámina libre del embalse por las tasas mensuales de evaporación por unidad de superficie (dato). Debido a que la variable de estado es el volumen en el embalse, es necesario realizar un cambio de volumen a superficie de lámina libre, para lo cual se utiliza la función volumen-superficie libre. Dicha función puede aproximarse en forma potencial:

$$S = aV^b$$

siendo a y b las constantes de ajuste. Con la expresión 4.4 la evaporación en el mes t , PE_t se calcula al considerar la superficie media del mes aproximada como la media aritmética entre las superficies al inicio y al final del mes, mediante la expresión:

$$PE_t = c \cdot \left(\frac{V_{t-1} + V_t}{2} \right)^d e_t$$

siendo e_t la tasa media mensual de evaporación; V_{t-1} el volumen al final del mes $t-1$ (igual al volumen al inicio del mes t) y V_t el volumen al final del mes t .

Las pérdidas por filtración se calculan mediante una ecuación empírica, ajustada a una nube de datos empírica que relaciona las pérdidas mensuales (obtenidas mediante balance en el embalse) con los volúmenes correspondientes. Para el caso de un ajuste potencial entre pérdidas mensuales y volumen medio almacenado en el embalse, se utiliza la expresión:

$$PF_t = m \cdot \left(\frac{V_{t-1} + V_t}{2} \right)^n$$

siendo m y n las constantes de proporcionalidad del ajuste.

Las ecuaciones para cada unidad de demanda se derivan de funciones económicas que expresan la relación entre el agua suministrada y su valor marginal en cada mes del año. Por simplicidad, las funciones de demanda se ajustan a un polinomio de grado n (véase apartado 3.2.3). La función que define el beneficio para un volumen disponible de agua es igual al área bajo la curva de demanda hasta ese nivel de suministro y corresponde a la disposición total a pagar por el agua.

En GAMS la única regla que gobierna el orden de las sentencias es que una entidad del modelo no puede ser referenciada antes de ser declarada. Una vez que el programa es compilado en GAMS se llama a un determinado *optimizador* (solver) que intenta encontrar la solución óptima al problema planteado. En la terminología GAMS los *índices*, usados para identificar parámetros y variables y definir ecuaciones, se definen en conjuntos denominados *Sets*. Los *datos* se definen como *Parameters* de distinta dimensión, o se pueden configurar como escalares o matrices. Las *variables de estado* y *decisión* son definidas mediante el comando *Variables*. Todas las *restricciones* y la *función objetivo* son definidas en el bloque *Equations*. El bloque *Model* permite asociar un nombre al modelo e identificar qué conjunto de restricciones lo componen. Mediante el bloque *Solve* se indica a GAMS que utilice un optimizador determinado para resolver el modelo. Finalmente se puede ordenar a GAMS que muestre los resultados más interesantes en un fichero de salida. En el caso que ocupa el presente trabajo, los resultados se han vinculado a un fichero de Microsoft EXCEL que previamente preparado permite almacenar los resultados de interés en forma de tablas, gráficas y estadísticas.

2.5. El CMOR mediante modelo de simulación del SAD Aquatool

Para valorar el Coste Marginal de Oportunidad del Recurso se requiere de un modelo de simulación de la gestión. En el presente trabajo se ha utilizado el modelo de simulación de la gestión denominado SimGes, que forma parte del Sistema de Apoyo a la Decisión (SAD) Aquatool. Es una herramienta para la elaboración de modelos de simulación y optimización de recursos hídricos a escala de cuenca desarrollada por el Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos del IIAMA-UPV (Andreu et al., 1996). El módulo EcoWin es usado para estimar el valor del CMOR de acuerdo con la simulación de la gestión con SimGes.

2.5.1. Descripción del módulo SimGes

SimGes es un modelo general para la Simulación de la Gestión de Cuencas, o sistemas de recursos hidráulicos complejos, en los que se dispone de elementos de regulación o almacenamiento tanto superficiales como subterráneos, de captación, de transporte, de utilización y/o consumo, y de dispositivos de recarga artificial (Andreu et al., 2004). La simulación se efectúa a nivel mensual y reproduce, a la escala de detalle espacial que el usuario desee, el flujo del agua a través del sistema. Para los subsistemas superficiales el flujo es calculado simplemente por continuidad o balance, mientras que para los subsistemas subterráneos o acuíferos el flujo es simulado mediante modelos de celda, uni o pluricelulares, según convenga, o incluso mediante modelos distribuidos de flujo lineal. Se tiene asimismo en

cuenta en la simulación las pérdidas por evaporación y filtración en embalses y cauces, así como las relaciones entre aguas superficiales y aguas subterráneas.

La gestión de los recursos hidráulicos se efectúa mediante reglas de operación que permitan reproducir cualquier regla de gestión en los embalses usando para ello unas curvas de zonas de embalse y otros mecanismos, como indicadores y restricciones asociadas. Estas curvas son las reglas de explotación propiamente dichas y son suministradas por el usuario del modelo. Se admite la definición de caudales mínimos ecológicos, así como de diferentes prioridades de los usuarios para el aprovechamiento del agua. La simulación y gestión del sistema superficial se efectúan a un tiempo mediante el uso de un algoritmo de optimización de redes de flujo conservativo. Dicho algoritmo se encarga de determinar el flujo en el sistema tratando de satisfacer al máximo los objetivos múltiples de minimización de déficits, y de máxima adaptación a las curvas de volúmenes objetivo de embalse y objetivo de producción hidroeléctrica.

Los resultados del modelo incluyen la evolución de todas las variables de interés a nivel mensual, a nivel anual, y los valores medios del período de simulación, así como las garantías. Todo ello permite que el modelo pueda ser utilizado, entre otras finalidades para:

- Determinar las garantías que se obtienen para distintas hipótesis de infraestructura y de evolución de demandas, así como para distintas reglas de explotación de la cuenca;
- Establecer las reglas de explotación más adecuadas para unos niveles exigidos de garantías;
- Estimar los beneficios o perjuicios derivados de la alteración de prioridades de usos del agua;
- Determinar las capacidades de embalse, de conducciones, y de instalaciones de bombeo para unos niveles de demanda y de garantía dados.

2.5.2. Simulación de la gestión mediante SimGes

Para poder definir el modelo del sistema de explotación que se requiere representar, el usuario debe realizar lo siguiente:

- Confeccionar un esquema de la cuenca o del sistema (figura 4.1) adaptándose al uso de los elementos tipo arriba mencionados. Para ello se definirá una serie de nudos en el sistema hidráulico de superficie, estando localizados los nudos en cada uno de los siguientes puntos:
 - Embalses.
 - Puntos de unión de dos o más cauces o conducciones.
 - Puntos de derivación o partición de caudal.
 - Puntos de toma y de retorno de las distintas demandas.
 - Puntos donde se supone se incorporan las posibles aportaciones intermedias o los posibles bombeos adicionales.

- Puntos de cambio de las características de las conducciones.
- Definir las conexiones (conducciones) que existan entre los nudos, así como el tipo al que pertenecen.
- Situar las aportaciones intermedias que puedan llegar a algún nudo o embalse (si no se definen asociadas al propio embalse). Ubicar las demandas, localizando sus nudos de toma y sus nudos de retorno (elementos), e identificando los acuíferos de los que puedan bombear y los que reciben los retornos por infiltración.
- Identificar los nudos de donde parten los flujos destinados a recarga artificial y aquellos donde se incorporan los bombeos adicionales.
- Definir los criterios de restricción para las situaciones de alarma del sistema. Estos **indicadores de alarma**, pueden asociarse a tomas de demandas o a tramos de río y canales.

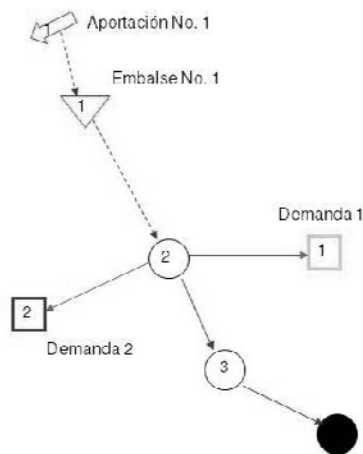


Figura 24. Ejemplo de esquema del SRH

La definición del esquema hidráulico del sistema queda completa cuando el usuario suministra al modelo, además de otros datos de cada elemento, su conexión con los nudos previamente definidos.

El esquema del usuario, previamente confeccionado, constituye una red de flujo. Pero dicha red no cumple el requisito de ser conservativa, ya que no es cerrada y existen nudos en los que hay almacenamiento de agua (los correspondientes a los embalses). Por tanto, lo primero que realiza el modelo, después de la lectura de datos, es la adaptación del esquema del usuario a una red de flujo conservativo. Para ello es necesario, por una parte, el establecimiento de unos nudos de "cierre" de la red, y por otra, el desdoblamiento de cada elemento tipo en un sub-esquema de arcos y nudos tal que aseguren que la simulación del comportamiento hidráulico y de gestión del elemento sea adecuada. El resultado es una red de flujo interna, mucho más compleja que la del usuario, que ya es conservativa, y que es la que utilizará el modelo sin trascendencia exterior para el usuario.

Una vez confeccionada la red interna, el modelo inicia la dinámica de la simulación, en la que para cada mes del período de simulación se resuelve la red de flujo con los valores de

aportaciones, demandas, y parámetros de gestión correspondientes a ese mes; utilizando el algoritmo de “out of kilter” (ver por ejemplo Bazaraa et al, 2009) se simulan los acuíferos; se itera entre estos dos últimos pasos (debido a las no linealidades y a las relaciones río-acuífero); y se almacenan valores para su escritura anual y representación estadística.

SimGes realiza la asignación con base en las prioridades relativas, entre los elementos del sistema, establecidas por el modelador. Esto es como si se asignaran a los elementos funciones económicas constantes. Los usos que tienen igual prioridad constituyen un *grupo isoprioritario*. Si en un mes dado el agua no alcanza para el requerimiento de todos los usos de ese grupo, el déficit se reparte entre ellos proporcionalmente al requerimiento.

SimGes también dispone de un mecanismo para disminuir la asignación en época de escasez: los *indicadores de alarma* o *indicadores de restricción*. Estos indicadores afectan a los usos, y los define el usuario. Cada indicador se define con pares de valores, que relacionan el volumen almacenado en uno o varios embalses con un porcentaje del volumen requerido por los usos. De esta forma se consigue que, cuando los embalses están a bajo nivel, la entrega a los usos disminuya, y como consecuencia se reparten los efectos de una posible sequía.

2.5.3. El evaluador económico EcoWin del SAD Aquatool

El módulo EcoWin (Anejo B) del SAD AquaTool también ha sido desarrollado por el Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos del IIAMA-UPV, partiendo del trabajo desarrollado por Collazos (2004) y Collazos et al. (2004), y permite calcular tanto los beneficios (y costes de escasez) que reportan a los usuarios una determinada asignación del recurso, como la serie temporal del CMOR en algún punto del sistema.

Para la aplicación del programa, se necesita tener un esquema (adecuadamente validado) del sistema modelado con SimGes. El uso del modelo de simulación es imprescindible para tener bien definido el comportamiento hidrológico de la cuenca como unidad y preservar las interrelaciones entre los distintos elementos del sistema hídrico.

El programa calcula el beneficio y/o el coste de escasez económico con la ecuación para cada elemento del sistema y para cada periodo de tiempo considerado. Además se utiliza una función económica de tipo paramétrico que también puede definirse en forma discreta por medio de puntos, en el caso de que la función no pueda ajustarse o que resulte muy compleja en su estructura.

Para evaluar la ecuación de beneficios o coste de escasez, se utilizan dos grupos de datos:

- La simulación de la gestión que se realiza con el modelo SimGes.
- Las funciones económicas (f.e.) declaradas para cada elemento del sistema. Esta función económica se representa como un polinomio de la forma siguiente:

$$f.e. = a + bx + cx^2 + \left(\frac{d}{x+e} \right) + fx^g$$

donde a, b, c, d, e, f, g son parámetros de la función económica y x es la asignación del recurso hídrico.

Las funciones económicas pueden ser de tipo polinomiales cuadráticas, exponenciales o de elasticidad constante para representar la curva de demanda o costes. El beneficio económico asociado para cada elemento del sistema se calcula como la integral de la función económica entre cero y la cantidad asignada en la simulación. Asociado al beneficio se encuentra el *coste de escasez*, en el caso que la demanda en el sistema no sea satisfecha, y se define como la integral entre la cantidad asignada en la simulación y el total demandado (figura 25).

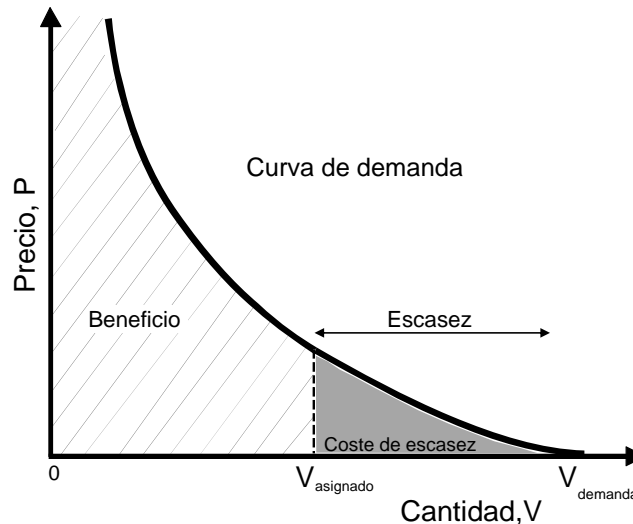


Figura 25. Beneficio y coste de escasez

El programa evalúa la función de beneficio en donde los valores de x_{ke} para cada paso de tiempo, son obtenidos por el modelo de simulación previamente empleado. La función económica no necesariamente deberá ser continua y derivable. Sin embargo, se puede adoptar la función paramétrica. EcoWin también permite introducir la función económica en forma discreta, proporcionando los datos de varios puntos en forma de valores ordenados x, y .

Para la ejecución de EcoWin (Anejo B) se precisan los siguientes elementos:

1. Un esquema completo del sistema hídrico modelado con SimGes;
2. El archivo ejecutable;
3. El archivo con la información de la ruta del esquema a simular;
4. Los archivos con la información económica del sistema por analizar.

Para la caracterización económica del sistema se asocian funciones económicas a los distintos elementos modelados, que expresan el coste/beneficio marginal para el sistema de los distintos niveles de flujo o suministro a cada elemento. Para el cálculo del CMOR se comparan los resultados económicos para el *caso base*, que representa la asignación actual, y el *caso modificado*, constituido por el caso base más una pequeña perturbación consistente en añadir (o detraer) una unidad diferencial de caudal en el elemento e instante de interés. En el caso modificado el modelo lleva a cabo una nueva asignación del recurso, usando las reglas de reparto, y posteriormente se evalúa el beneficio económico total y se calcula la diferencia de beneficios totales entre el caso base y el modificado.

La idea básica es calcular el coste marginal del recurso mediante un cociente de diferencias (figura 26) El numerador contiene la diferencia entre los beneficios económicos netos ($BA_{\text{caso modificado}} - BA_{\text{caso base}}$) y en el denominador se encuentra una diferencia de volúmenes de agua ($\Delta = V_m - V_b$).

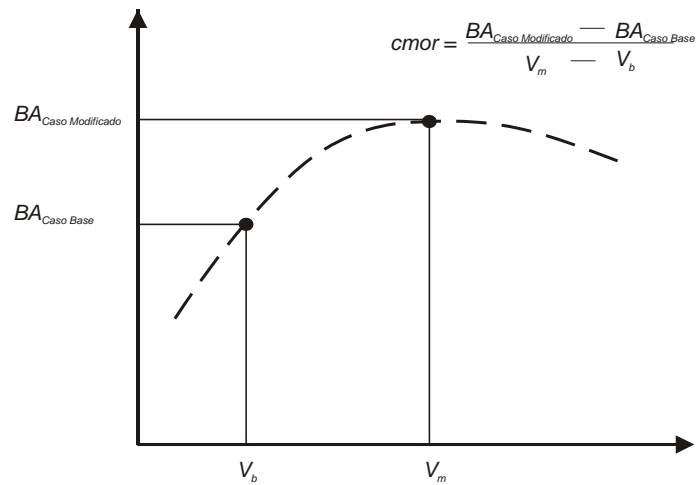


Figura 26. Aproximación del CMOR mediante simulación

Fuente: Collazos (2004)

El cociente entre la variación de beneficio económico y la variación de caudal es una aproximación al CMOR (sólo se puede hablar estrictamente de coste del recurso en un sistema optimizado económicamente), y se expresa:

$$CMOR = \frac{BA_{\text{Caso Modificado}} - BA_{\text{Caso Base}}}{\Delta_{\text{volumen}}} \quad (2.1)$$

Conocida la asignación del recurso y conocidas las funciones económicas se calcula el beneficio asociado. El diagrama de flujo para el cálculo del CMOR en los nudos del sistema (Collazos, 2004) es el mostrado en la figura 27.

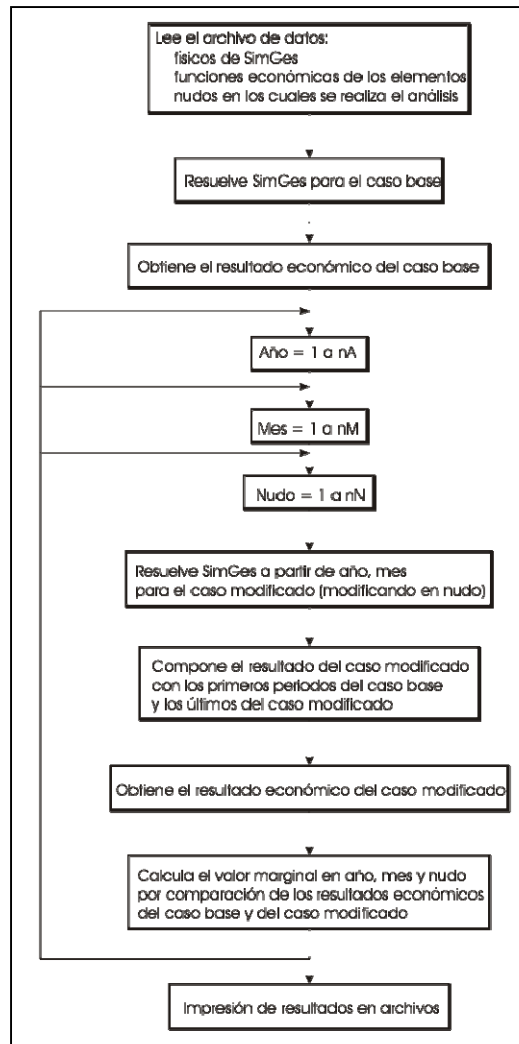


Figura 27. Diagrama de flujo para calcular el CMOR

Fuente: Collazos (2004)

2.6. Simulación con prioridades del modelo hidro-económico. Cálculo del Coste del Recurso

Al igual que para el caso sintético, la simulación de la gestión se ha realizado con paso de tiempo mensual. Aunque la simulación de la gestión se hace a escala mensual (Álvarez, et al, 2006), los resultados económicos se calculan mediante agregación de valores mensuales en las curvas de demanda económica anuales, considerando para cada año hidrológico (de octubre a septiembre) la suma de los flujos mensuales generados por el simulador.

En este apartado se presentan los resultados de simulación de la gestión y su valoración económica con base en las curvas de demanda. Para proceder a la simulación económica se ha considerado lo siguiente:

- El periodo temporal está definido por la serie histórica de aportaciones de 30 años, desde octubre de 1970 hasta septiembre de 2000. El empleo de series hidrológicas extensas permite considerar la variabilidad temporal en la disponibilidad del recurso.
- Se han elegido dos puntos de interés para el cálculos del CMOR en el Sistema Mijares-Plana de Castellón que corresponden a los embalses de Arenós (nudo 2) y Schar (nudo 5).
- La prioridad en el suministro corresponde a los riegos Tradicionales mientras que los riegos mixtos están sujetos al volumen almacenado en los embalses Arenós y Schar una vez suministrada la demanda Tradicional.
- En la simulación se suministra el recurso de acuerdo a lo que el uso requiere y conforme a las reservas en el embalse (figura 28)

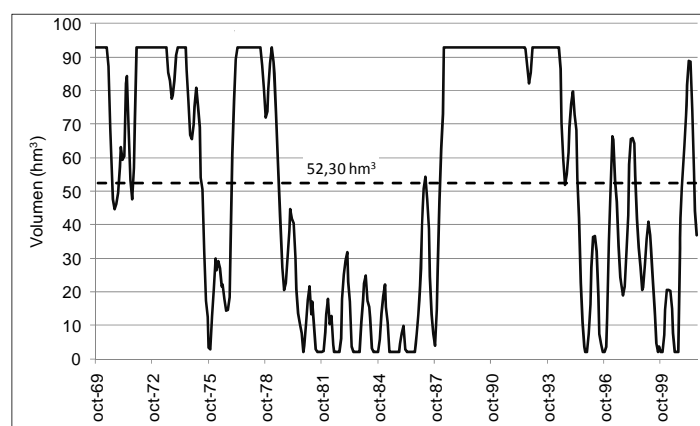


Figura 28. Volumen embalsado en Arenós. Simulación

Las demandas agrícolas son las que más agua superficial requieren del Sistema de Explotación. El modelo en SimGes garantiza que la demanda de agua a los Riegos Tradicionales sea satisfecha en un 95%, al igual que para las demandas de los Canales Cotas 100 y 220 y Canal de M^a Cristina. En el modelo se han considerado también otras demandas que aunque no necesariamente toman agua directamente del Mijares, lo hacen de alguno de sus afluentes.

Las demandas de agua para las poblaciones inmersas en la zona del Sistema de explotación del río Mijares son abastecidas en su totalidad por los diferentes acuíferos que conforman las nueve Unidades Hidrogeológicas mostradas. Los resultados de SimGes muestran garantías de suministro del 100% para las demandas urbanas.

2.6.1. Análisis de resultados de la simulación. Coste de escasez

El coste de escasez de agua está íntimamente ligado al déficit que se presente en el suministro a cada una de las demandas agrícolas. El esquema completo del sistema, contempla un mayor número de demandas que deberá satisfacer con un buen grado de garantía. El modelo en SimGes se calibró para que las demandas fueran satisfechas con el menor déficit posible. Sin embargo, los costes de escasez de agua para los cultivos suministrados a las demandas de Riegos Tradicionales presentan un mayor valor que el correspondiente a las demandas suministradas por los Canales de las Cotas 100 y 220 (figura 29). Lo anterior se debe a que el déficit que presentan los Riegos Tradicionales es mucho mayor que el de los Riegos Mixtos (figura 30).

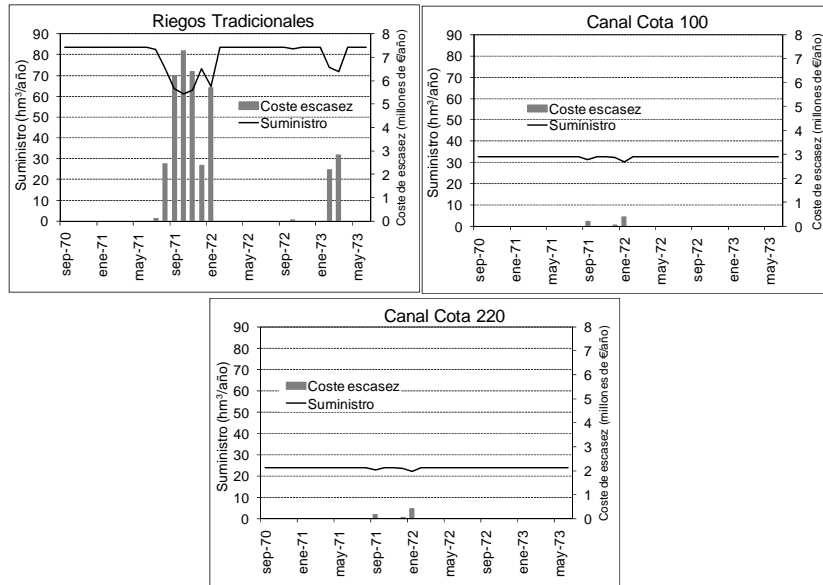


Figura 29. Coste de escasez y suministro en las UDAs consideradas en la simulación

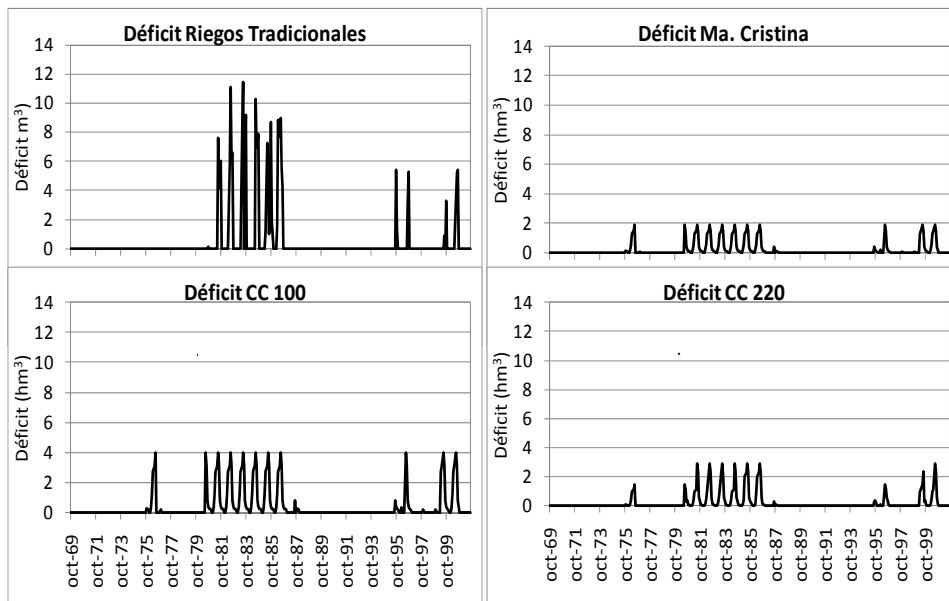


Figura 30. Déficit de suministro a las demandas. Riegos Tradicionales y Mixtos. Simulación

Como era de esperarse los mayores costes de escasez (figura 31) se presentan cuando los volúmenes en los embalses de Sihar y Arenós se sitúan en los niveles mínimos. En épocas de grandes sequías (1982-88 y 1995-2000) se presenta el mayor valor marginal del recurso en los embalses.

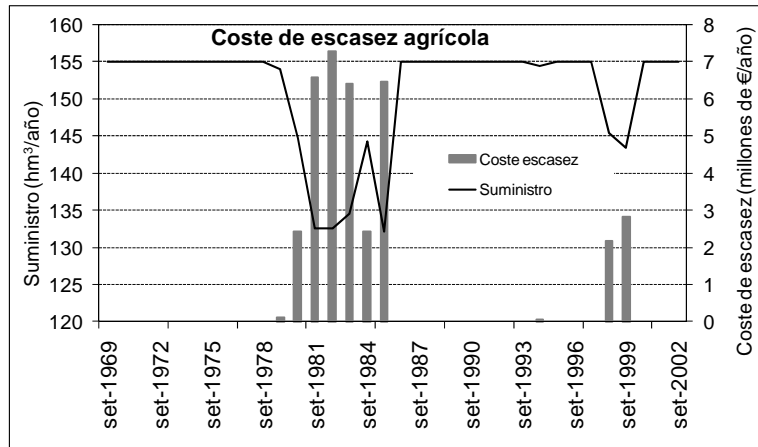


Figura 31. Coste de escasez agrícola y volumen embalsado

La figura 32 muestra el coste de escasez del recurso en unidades de demanda agrícola clasificadas según tipos de cultivo que se practican: cítricos, herbáceos y leñoso herbáceos.

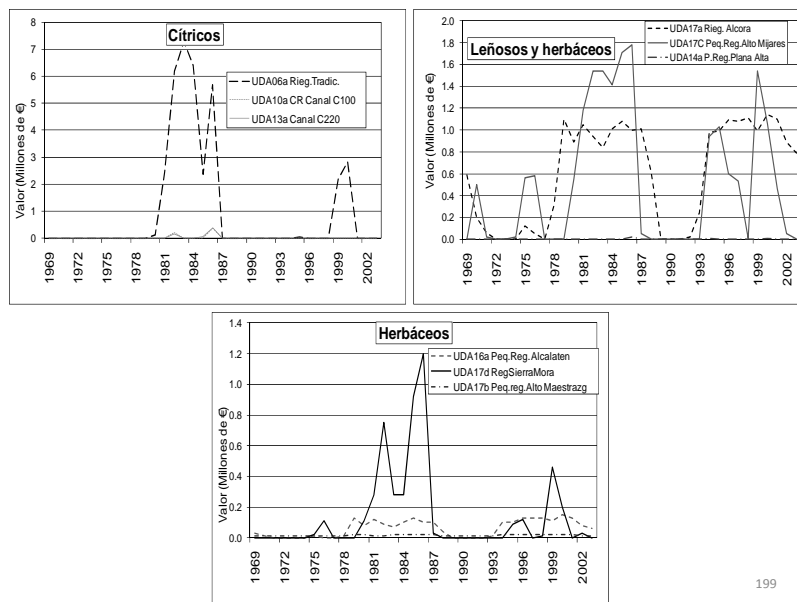


Figura 32. Costes de escasez en diferentes UDAs

Los Riegos Tradicionales, fundamentalmente cítricos (98%), presentan mayor coste de escasez, del orden de los 7 millones de euros durante el periodo 82-84, que el de los riegos de los canales Cotas 100 y 220 (de un orden máximo de medio millón de euros anuales para el mismo periodo), mientras que los riegos del canal de M^a Cristina presentaron un coste de escasez menor al medio millón de euros anuales.

Los cultivos herbáceos y leñosos de la UDA Alto Mijares presentan costes de escasez entre 0,5 y 1,8 millones de euros en el periodo 1975-1986, mientras que los regadíos de Alcora tienen un coste de escasez más uniforme en todo el periodo de análisis, con máximos anuales de 1,1 millones de euros. Cabe destacar que estos últimos regadíos, son abastecidos por un pequeño embalse considerado como azud en el esquema SimGes y presenta déficits de suministro de un orden máximo de 0,6 hm³.

Los riegos de la Sierra Mora, de herbáceos en su mayoría, presentan un contrastado coste de escasez, con picos de hasta 1,2 millones de euros anuales, en comparación a lo de Alcalatén y Alto Maestrazgo, cuyos picos máximos son menores a 0,2 millones de euros anuales.

Dado que no se presentan déficits en el suministro a las demandas urbanas, no existe coste de escasez para las mismas. De acuerdo a los suministros para cada una de las unidades de demanda, se han obtenido los beneficios económicos mostrados en la figura 33.

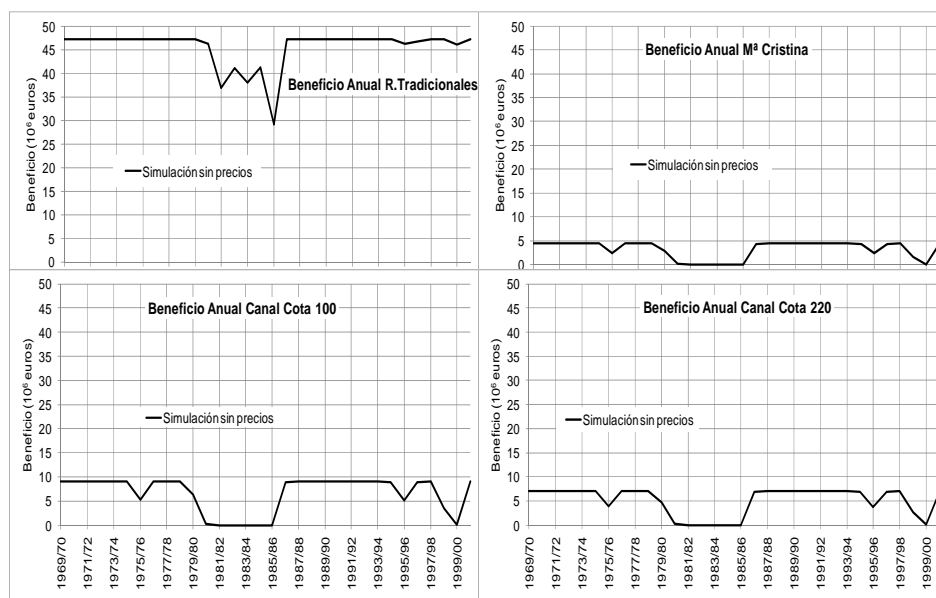


Figura 33. Beneficios anuales en las diferentes UDAs del Mijares. Simulación

2.6.2. Análisis de resultados de la simulación. Coste del recurso en los embalses

Como ya se ha comentado anteriormente, el CMOR se aproxima en la simulación mediante el cálculo de la variación de beneficios que ocurriría si hubiera una unidad menos de recurso en un punto e instante determinados. En la figura 34 se observa que el mayor valor marginal en el embalse de Arenós corresponde al periodo en donde hay menos reservas en los embalses, y por tanto más escasez del recurso. En los períodos de coste de recurso alto, los déficit en las demandas y por consiguiente los costes de escasez son elevados. Cuando los volúmenes embalsados son altos, no hay déficit de suministro y por tanto el valor marginal o valor de una unidad adicional de agua en el embalse es nulo (el disponer de una unidad más no aporta ningún beneficio adicional para el sistema).

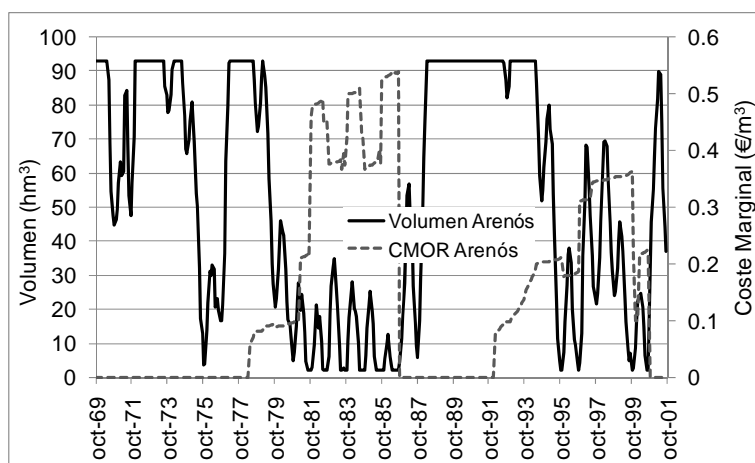


Figura 34. Valor del recurso en el embalse Arenós. Simulación

Durante el primer período crítico (1978-1985 de la serie histórica de aportaciones), el valor medio del coste del recurso es de $0,15 \text{ €/m}^3$, con un máximo de $0,54 \text{ €/m}^3$, bajando a $0,14 \text{ €/m}^3$ y un máximo de $0,36 \text{ €/m}^3$ en el segundo periodo (1995-2000). En la figura 35 se compara el valor del recurso en los dos embalses principales del sistema, obteniendo resultados prácticamente iguales, excepto para el periodo 1995-2000 que presenta pequeñas diferencias.

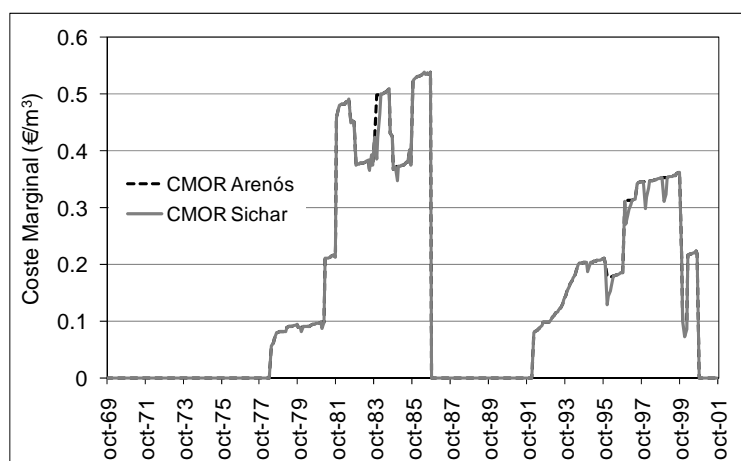


Figura 35. CMOR en los embalses.

En un intento de profundizar en el análisis de la relación que pueda existir entre volumen almacenado y coste del recurso, se ha calculado el promedio de este en distintos rangos de volúmenes, obteniendo los resultados que pueden verse en la figura 36. El promedio mensual del CMOR en el embalse de Arenós es de $0,30 \text{ €/m}^3$ para el rango de volumen almacenado comprendido entre 0 y 20 hm^3 . Cuando el embalse está prácticamente lleno, el CMOR tiende a cero (figura 36).

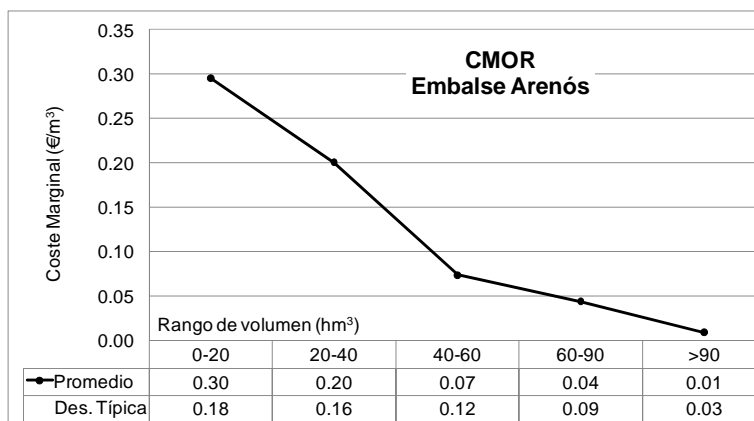


Figura 36. Promedio mensual del CMOR en Arenós. Simulación

2.6.3. Coste marginal de oportunidad de caudal ecológico (CMOCE)

De conformidad con el vigente Plan Hidrológico del Júcar (artículo 22), el caudal medioambiental del tramo aguas abajo del embalse de Sichar hasta el punto donde retorna el caudal derivado para la Central Hidroeléctrica de Colmenar, se fija en 200 l/s. El coste marginal (o por unidad adicional) que supone para el sistema el mantenimiento de las restricciones ambientales de caudal ecológico puede ser analizado calculando la diferencia de beneficios simulados entre el caso base y el caso base relajando en una unidad dicha restricción en un mes determinado.

Al calcular el coste marginal de oportunidad de la restricción de caudal mínimo ecológico (CMOCE) que se tiene en el tramo de río mencionado (figura 37), se observa que el mayor coste marginal, entre 0,15 y 0,7 €/m³, se presenta cuando hay poco volumen de agua circulando por el río; corresponde también al periodo en donde es mayor el coste del recurso en el embalse Sichar (1975-1985). El coste marginal de la restricción de caudales mínimos se hace cero en los periodos en que el volumen almacenado es alto y no hay costes de oportunidad en mantener los caudales ecológicos.

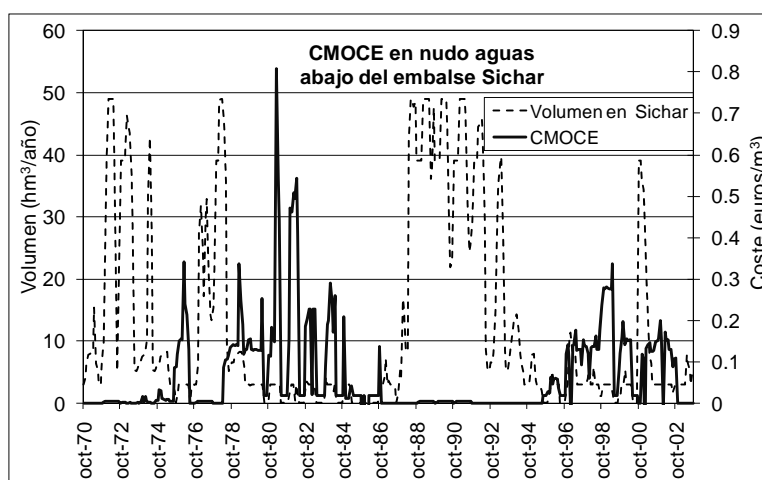


Figura 37. Coste marginal del recurso para caudal ecológico

2.6.4. Análisis de sensibilidad del CMOR

Se llevó a cabo un análisis para comprobar la sensibilidad de los cálculos del CMOR a las curvas de demandas, considerando tres coste como punto de cierre para las curvas de demanda en los principales riegos del sistema: 0,70, 0,55 y 0,45 €/m³. Las curvas de demanda en las cuatro UDAs principales (Riegos Tradicionales, Canal Cota 100, Canal Cota 220 y M^a Cristina) se muestran en la figura 38.

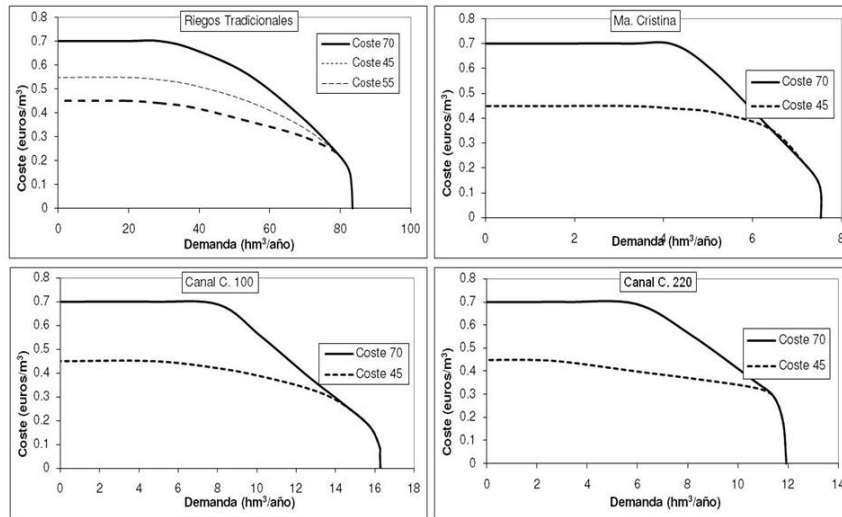


Figura 38. Variación en las curvas de demanda económica

Al realizar el cálculo del CMOR, se observa que la distribución temporal de los valores se mantiene con la misma forma para los tres grupos de curvas de demandas. Para el periodo 1981-1987 el resultado (figura 39) resulta más sensible al cambio en la curva de demanda (25 céntimos/m³), ya que se alcanza un déficit mayor de suministro, mientras que para el periodo final las variaciones en el coste del recurso presentan una menor variabilidad (10 céntimos/m³).

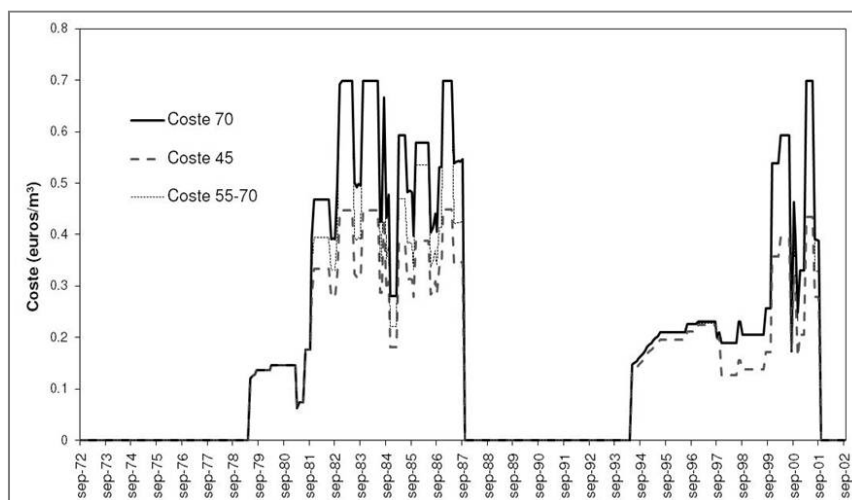


Figura 39. Variación del CMOR. Embalse de Arenós

2.7. Optimización económica de la gestión. Coste de escasez y CMOR

Como se ha comentado anteriormente, en el modelo de optimización los valores óptimos de las variables del problema dual (precios sombra o multiplicadores de Lagrange) nos definen directamente el cambio en el valor óptimo de la función objetivo como consecuencia de un cambio marginal unitario en el término independiente de la restricción correspondiente a cada variable dual. Al referirse la función objetivo al resultado económico derivado del uso del agua en el sistema, los precios sombra de las restricciones de balance en nudos del modelo (incluyendo embalses y acuíferos) proporcionan el incremento de beneficio neto por incremento infinitesimal del recurso en ese nudo y en ese instante, y por tanto el *coste marginal de oportunidad del recurso (CMOR)*.

En este apartado se presentan los resultados de optimización de la gestión y su valoración económica con base en las curvas de demanda, destacando los aspectos siguientes: descripción del modelo de optimización; coste de escasez y suministro a la demanda y beneficios medios anuales; coste del recurso en los embalses del sistema; y comparación entre la simulación de la gestión y la optimización económica.

Para proceder a la optimización económica se ha considerado lo siguiente:

- El periodo temporal está definido por la serie histórica de aportaciones de 30 años, desde octubre de 1970 hasta septiembre de 2000.
- Se han elegido los mismos puntos de interés que en la simulación de la gestión para el cálculos del CMOR en el Sistema Mijares-Plana de Castellón los cuales corresponden a los embalses de Arenós (nudo 2) y Sichar (nudo 5).
- Se ha considerado exclusivamente una opción de análisis: Incluir únicamente las cuatro demandas agrícolas del Sistema de Explotación correspondientes a los Riegos Tradicionales y a los Riegos Mixtos.
- Se trabaja con curvas económicas de demanda mensuales, para lo que fue necesario desagregarlas las curvas anuales originales de acuerdo con el calendario de riego. La función que proporciona el beneficio para un volumen de agua disponible es igual al área bajo la curva de demanda hasta ese nivel de suministro, y equivale a la disposición total a pagar por esa agua. Integrando desde un nivel genérico de agua disponible hasta el nivel de suministro máximo se obtiene la expresión del *coste económico de escasez* versus nivel de suministro.

Al tratarse de optimización, no se da prioridad en el suministro a ninguna de las UDAs consideradas en el análisis.

2.7.1. Modelo de optimización de la gestión del río Mijares

La optimización económica tiene como función objetivo maximizar los beneficios económicos totales para las cuatro demandas consideradas (Riegos Tradicionales y Riegos Mixtos). El modelo en GAMS optimiza el conjunto de todas las variables involucradas en el balance de masa; comprueba el balance hídrico en cada nodo del sistema y maximiza la suma de beneficios de cada demanda del esquema, sin considerar la regla del convenio 70 (análisis mensual). El modelo mejora la eficiencia económica en la gestión del sistema y proporciona el

“techo” de beneficios que se pueden conseguir o tratar de alcanzar. El modelo de optimización siempre “ve hacia adelante” –conoce la hidrología y demandas futuras- pues se optimiza simultáneamente para todo el periodo de análisis. De esta manera, los volúmenes almacenados en la optimización son diferentes a los de la simulación. El modelo de optimización claramente prevé almacenar agua para solventar los periodos de sequía que vendrán en periodos posteriores (debido al conocimiento perfecto de futuro hidrológico). En la figura 40 se observa que el volumen embalsado en el embalse de Arenós para el caso de la optimización económica es mayor al embalsado con el modelo de simulación.

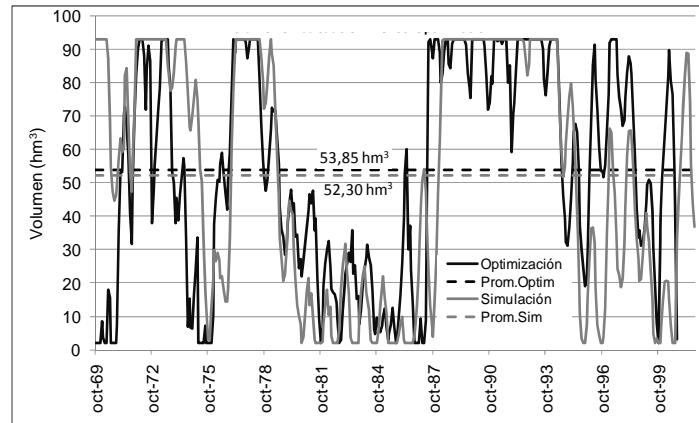


Figura 40. Volumen embalsado en Arenós. Optimización

2.7.2. Análisis de resultados de la optimización económica. Coste de escasez y suministro a la demanda

Se realizó la optimización económica del sistema, observándose que se suministra el recurso penalizando a los riegos tradicionales y mejorando el suministro a los riegos mixtos del sistema (figura 41).

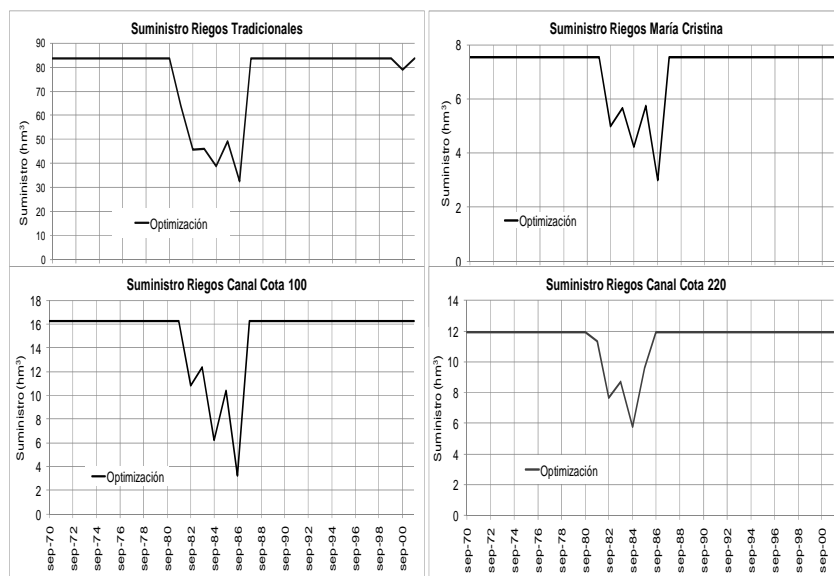


Figura 41. Suministro a las demandas. Riegos Tradicionales y Mixtos Optimización

El modelo de optimización reduce el déficit de suministro en los usos mixtos en una proporción mayor que el de los riegos Tradicionales, ya que no considera prioridades como lo hace el modelo de simulación (figura 42).

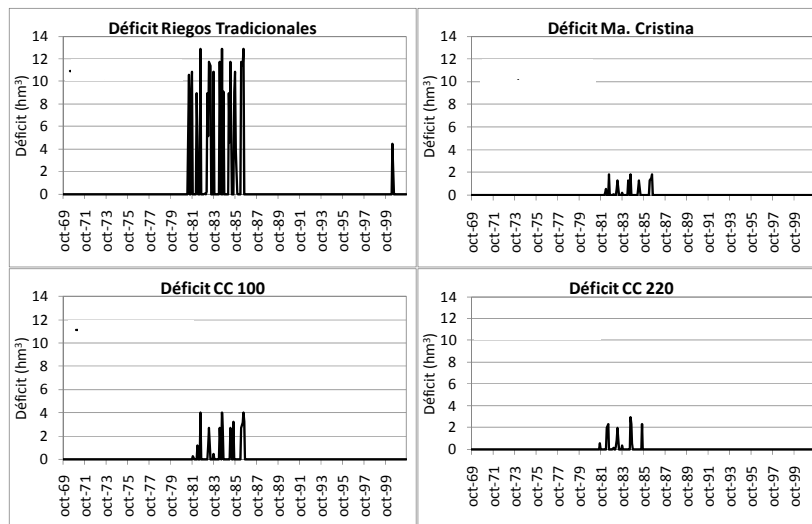


Figura 42. Déficit de suministro a las demandas. Riegos Tradicionales y Mixtos. Optimización

De acuerdo a los suministros para cada una de las unidades de demanda, se han obtenido los beneficios económicos mostrados en la figura 43. Se observa que se penalizan los riegos tradicionales y por lo tanto los beneficios son menores que los proporcionados por la simulación, mientras que se mejora el beneficio en los riegos mixtos del sistema.

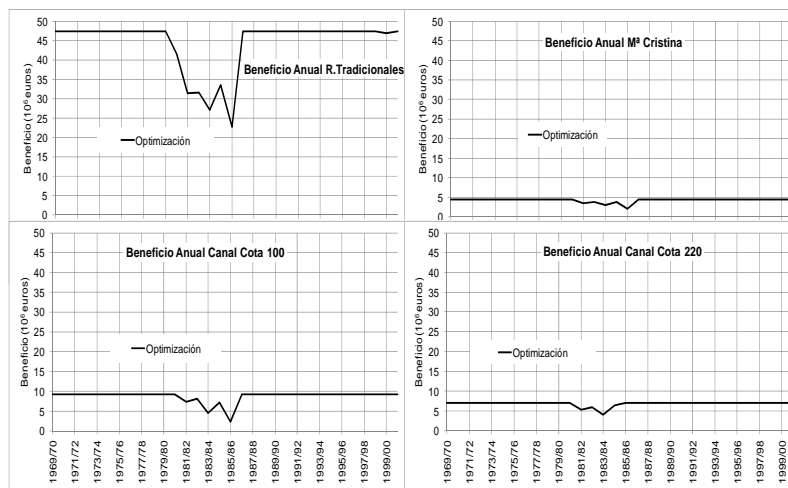


Figura 43. Beneficios anuales en las diferentes UDAs del Mijares. Optimización

2.7.3. Análisis de resultados de la optimización económica. Coste del recurso en los embalses del sistema.

Para determinar el coste del recurso en los embalses de Arenós y Sichar se consideraron las curvas de demanda económica mostradas figuras 19 a 22, con los caudales de suministro dados por la optimización económica con GAMS.

El mayor valor marginal (CMOR optimización) (figura 44) corresponde al periodo en donde hay menos reservas en los embalses, y por tanto más escasez del recurso. En la optimización económica no se consideran las prioridades en la asignación del recurso a las demandas. El valor marginal de una unidad de agua para un instante dado depende de las demandas y escasez, siendo gestionado el recurso en este caso con pleno conocimiento del periodo futuro. El volumen en el embalse se ajusta con anticipación perfecta a los periodos húmedos y secos y se aumenta el almacenamiento previo a las sequías mediante restricciones anticipadas utilizando el agua sin restricciones frente a periodos húmedos.

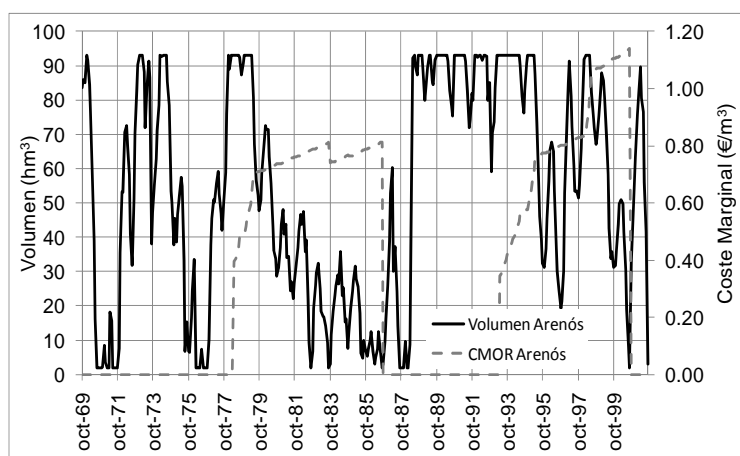


Figura 44. Valor marginal del recurso (CMOR) en el embalse Arenós. Optimización

2.7.4. Comparación entre la simulación de la gestión y la optimización económica

El modelo de simulación de la gestión del sistema del río Mijares toma en cuenta las prioridades a las demandas establecidas por la Curva del Convenio de 1970. Debido a ella, los Riegos Tradicionales tienen prioridad de suministro sobre los Riegos Mixtos. El modelo de optimización siempre “ve hacia adelante” –conoce la hidrología y demandas futuras- y por ello optimiza simultáneamente para todo el periodo de análisis, y además no considera algún tipo de prioridad en el reparto. De esa manera la optimización económica, al maximizar los beneficios, penaliza los suministros a los Riegos Tradicionales mejorando el reparto a los Riegos Mixtos (tabla 8).

Tabla 8. Comparación de suministros medios anuales. Mijares

SUMINISTRO MEDIO ANUAL (hm ³)					
Escenario	Tradicionales	Ma. Cristina	CC100	CC220	Total
Optimización	76,36	7,10	15,09	11,42	109,97
Simulación	76,68	5,20	11,23	9,14	102,25

Ya que el objetivo del modelo de optimización es maximizar los beneficios sin considerar prioridades en el suministro, los beneficios de los Riegos Tradicionales son menores (3%) que

los que proporciona la simulación. Sin embargo se ven favorecidos los beneficios de los Riegos Mixtos en un 30% (tabla 9).

Tabla 9. Comparación de beneficios anuales. Mijares

BENEFICIO MEDIO ANUAL (Millones de euros)						
Escenario	Tradicionales	Ma. Cristina	CC100	CC220	Total	Benef.Tot
Optimización	44,38	4,28	8,65	6,89	64,19	2054,09
Simulación	45,56	3,20	6,59	5,08	60,43	1933,79

Los beneficios totales proporcionados por el modelo de optimización económica son mayores en un 6% a los que proporciona la simulación de la gestión.

3. Estudio de políticas factibles de precios del agua en función de la escasez del recurso y valoración de los distintos efectos sobre la gestión del recurso

3.1. Metodología para el diseño de una política eficiente de precios

El CMOR como indicador de la variación del valor marginal del recurso en una cierta ubicación de un sistema de recursos hídricos a lo largo del tiempo, puede ser utilizado para diseñar una política de precios del agua con el objetivo de maximizar la eficiencia económica en la gestión del sistema a escala de cuenca. En este capítulo se estudian y comparan distintos enfoques para estimar políticas de precios eficientes a escala de cuenca partiendo del cálculo del CMOR. Un primer apartado describe la metodología desarrollada para la estimación de políticas eficientes de precios; en seguida se define un esquema sintético de un sistema de explotación al que se le aplican las políticas de precios definidas de acuerdo a la metodología propuesta. Finalmente se presentan los resultados de aplicar políticas de precios eficientes al esquema sintético partiendo del CMOR.

3.1.1. Descripción de la metodología

Para poder utilizar los resultados del modelo hidro-económico como indicadores para una política de precios que incida en la eficiencia económica del sistema, es necesario tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- (1) el modelo de la simulación hidrológica del sistema debe ser un modelo que represente fidedignamente al sistema de explotación bajo estudio para lo cual la calibración del mismo deberá ser lo más acertada posible;
- (2) las funciones económicas (curvas de demanda, funciones de coste) que se asignen a diferentes elementos que conforman el sistema deberán representar de la mejor manera posible el valor económico del agua suministrada en cada uno de los usos para los cuales es destinado el recurso.

Como se ha mencionado en apartados anteriores, el modelo hidro-económico utiliza un modelo de simulación de la gestión del sistema (SimGes) y un evaluador económico (EcoWin). La metodología se describe mediante la figura 45.

El modelo de simulación de la gestión, empleando SimGes (SAD AquaTool) proporciona tanto los volúmenes almacenados en el embalse o embalses del sistema como las series temporales de suministros a las demandas y garantías. El módulo SimGes proporciona también los déficits de suministro a cada una de las demandas del sistema de recursos hídricos bajo estudio. Esta información sirve como datos de entrada para el evaluador económico EcoWin, el cual con esta información y las curvas de demanda económica de cada uno de los usos calcula el CMOR

(véase capítulo anterior). Junto con el CMOR, el evaluador valora los beneficios netos que cada uno de los usos tendrán con el suministro que ha proporcionado SimGes. Estos beneficios netos son entonces comparados con los beneficios que proporciona el modelo de optimización económica (desarrollado con GAMS) que corresponden al techo ideal o valor máximo que se puede obtener con una gestión económicamente óptima del sistema.

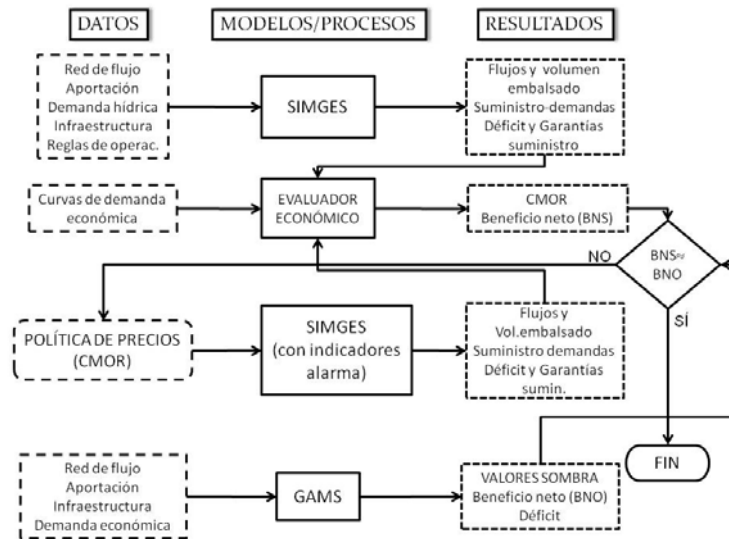


Figura 45. Esquema de la metodología propuesta.

Los resultados del CMOR servirán como punto de partida para el diseño de **políticas de precios** cuyo efecto se analizará empleando de nuevo el modelo de simulación. El CMOR varía con el volumen de reserva en el embalse o embalses del sistema. Cuando hay escasez de agua, el valor (coste) marginal (o precio máximo por unidad adicional de agua que los usuarios del sistema estarían dispuesto a pagar) será elevado. Cuando se relaciona el CMOR con el volumen embalsado, el resultado es una gran nube de puntos con una alta dispersión, en la que el coeficiente de correlación es por lo general bastante bajo (figura 46a). Esto es debido a que mismos valores de embalse pueden corresponder a una situación de inicio de sequías, o a una situación de recuperación de la misma (en cuyo caso el valor marginal del agua, distribuida en el tiempo por el embalse, podría ser menor). A pesar de esto, a partir de la nube de puntos se puede definir una función escalonada de precios que depende del volumen de reserva del embalse (figura 46c), la cual se obtiene al considerar diferentes rangos de volúmenes de reserva y promediar los correspondientes costes marginales (figura 46b).

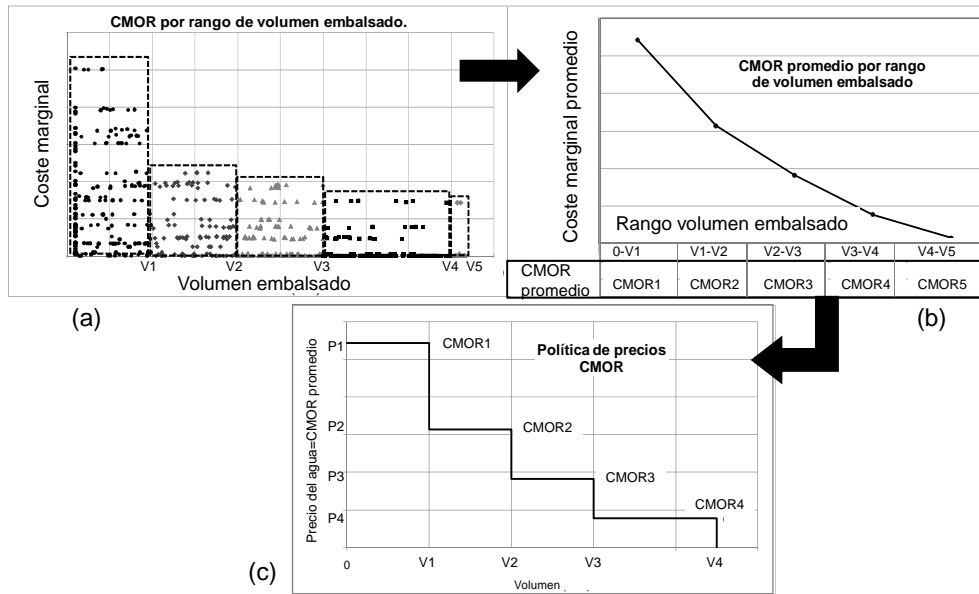


Figura 46. Proceso para la obtención de precios escalonados en función del volumen de reserva del embalse

Un precio del agua igual a su valor marginal transmitiría al usuario una señal de escasez del recurso y su valor real en cada paso de tiempo (mes). El precio actuaría reduciendo las cantidades demandadas según las curvas de demanda de cada uso, y así el recurso escaso se asignaría preferentemente a los usos de mayor valor marginal. Esta información se incorpora al modelo de simulación haciendo uso de coeficientes de restricción mediante la utilidad “indicadores de alarma” del módulo SimGes que hacen que, en función volúmenes disponibles en los embalses, se asigne recurso para toda la demanda o sólo para un porcentaje de la misma. Con los precios definidos como el CMOR promedio se busca el volumen correspondiente en las curvas de demanda económica anual de los diferentes usos (figura 47 a, b). Con ese volumen, se calcula el coeficiente de restricción (figura 47 c), mediante la expresión:

$$Coef. Restr. = 1 - \frac{Volumen\ corespondiente\ al\ precio}{Volumen\ Demanda\ Máxima}$$

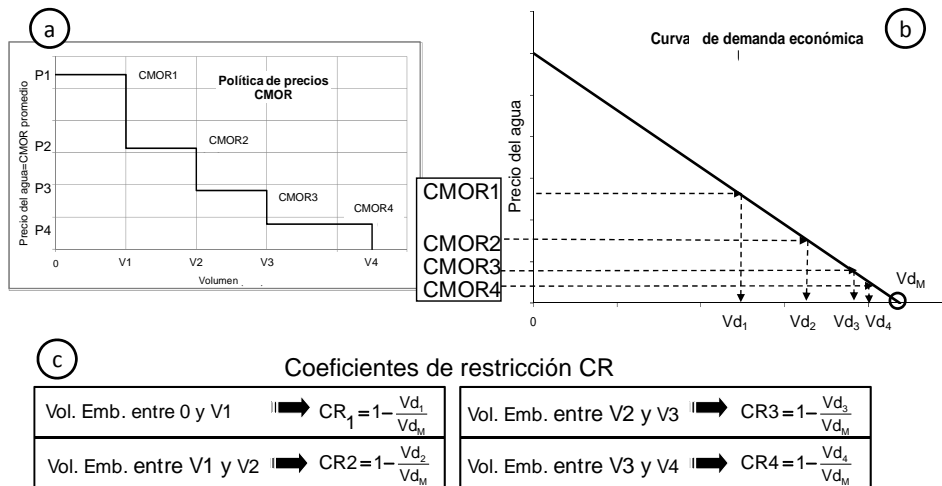
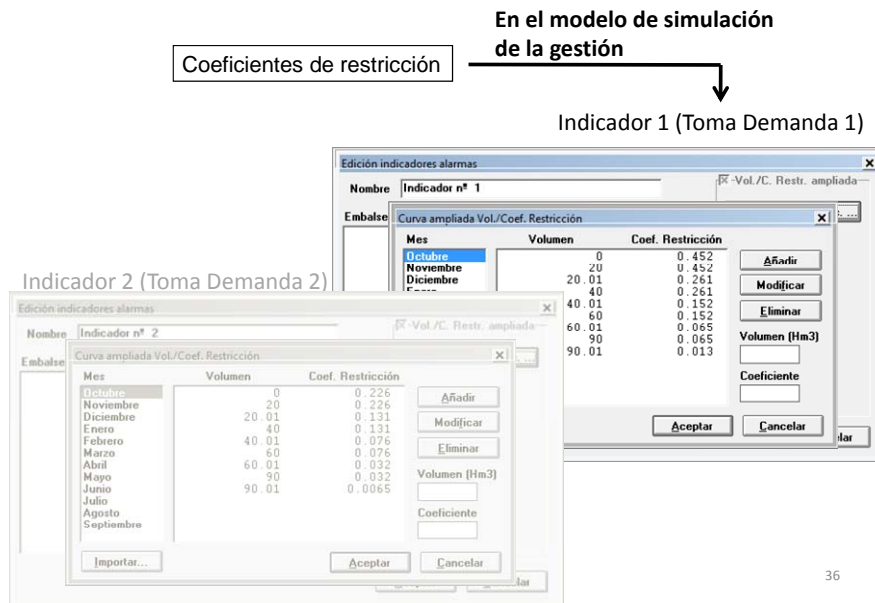


Figura 47. Políticas de precio. Cálculo de restricciones de suministro

Los coeficientes de restricción así obtenidos, se incorporan al modelo de simulación de la gestión en forma de indicadores de alarma en las tomas de las demandas consideradas en el sistema de explotación (figura 48). Se trata de criterios de gestión cuya función es reducir los consumos de agua de menor valor añadido cuando la reserva hidráulica del sistema, o de una parte de éste, está por debajo de límites especificados por el usuario. Cada indicador viene definido por un conjunto de embalses a los que se asocia una tabla que relaciona volúmenes almacenados con coeficientes de restricción. La tabla, definida por el usuario, está constituida por un número no superior a diez de valores crecientes de volumen y sus coeficientes de restricción correspondientes, que han de ser decrecientes de 1,0 a 0,0. Cada indicador de alarma lleva asociado a un grupo de embalses y una tabla de coeficientes de restricción. Puede haber embalses comunes a varios indicadores distintos e incluso se puede definir indicadores distintos asociados al mismo grupo de embalses.

Al principio de cada mes el modelo de simulación en SimGes calcula la suma de los volúmenes almacenados en los embalses asociados y, mediante la tabla dada, obtiene el coeficiente de restricción correspondiente al indicador para dicho mes. Hay que recalcar que estos indicadores se calculan con base en el valor de reservas a principio de mes, sin tener en cuenta las entradas durante el mismo mes ni la situación en que el embalse pueda quedar a final de mes. Los indicadores de alarma incorporados al modelo de simulación permiten simular por tanto el efecto de cualquier política de precios en función del estado de las reservas del sistema. En esta tesis se analiza la hipótesis de que se puede definir políticas eficientes de precios a partir de series temporales del CMOR y de volúmenes de embalse, y por tanto la herramienta descrita va a permitir comprobar la eficiencia real de estas políticas de precios en casos de estudio concretos.



36

Figura 48. Incorporación de precios en SimGes

Los valores del CMOR en los embalses obtenidos mediante el proceso de simulación iterativo descrito en el capítulo 2 representan una primera aproximación al valor marginal del recurso en el sistema en esa localización a lo largo del tiempo. En la optimización, el CMOR se obtiene como los precios sombra de las restricciones de disponibilidad del recurso (balance). Para el caso de la simulación, esos valores se condicionan a unas determinadas reglas de gestión que determinan la asignación del agua en cada paso de tiempo. Los resultados obtenidos con el nuevo esquema de simulación con restricciones incorporadas mediante indicadores de alarma (políticas de precios incorporadas), sirven de datos de entrada de nueva cuenta para el evaluador económico. Los beneficios obtenidos son comparados con los beneficios que se tienen del modelo de optimización.

Se han analizado diversas opciones para la representación de los precios del agua tomando como base los valores del CMOR tanto del modelo de simulación como del de optimización. La mejora de la eficiencia económica resultante de la aplicación de las políticas de precios, se valorará comparando los resultados de la simulación de la gestión actual del sistema (según criterio de prioridad) con los correspondientes a la política actual de precios. Los resultados del modelo de optimización indican la máxima eficiencia económica alcanzable que sirve como nivel de referencia. En este punto es importante aclarar las diferencias entre la simulación y la optimización.

3.1.2. Diferencias entre simulación y optimización. La predicción perfecta

Los modelos que representan la gestión de un sistema de explotación son generalmente de dos tipos: uno que simula el comportamiento del agua recursos de conformidad con un conjunto predefinido de normas de reparto del agua y operación de infraestructura, y otro que optimiza el reparto del agua durante un cierto horizonte de tiempo basado en una función objetivo que está sujeta a ciertas restricciones.

Un modelo de simulación (modelo descriptivo) trata de reproducir la gestión de un sistema de recursos hídricos para unas determinadas reglas de operación. Las reglas dependen del estado

de las reservas de agua en los embalses. La simulación de agua existente en los embalses. La simulación proporciona decisiones del reparto de agua con base en una serie de prioridades para el suministro del recurso. Este tipo de modelo permite representar el *modus operandi* actual del sistema.

Un modelo de optimización determinista optimiza de forma simultánea todo el periodo horizonte, actuando por tanto con pleno conocimiento de las aportaciones y demandas futuras (*predicción perfecta* o *perfect foresight*). El volumen en un embalse se ajusta con anticipación perfecta a los periodos húmedos y secos y se aumenta el almacenamiento previo a las sequías mediante restricciones anticipadas utilizando el agua sin restricciones frente a periodos húmedos. Los resultados económicos del modelo de optimización representan un “techo” ideal inalcanzable en la práctica. La “predicción perfecta” subestima el valor de nueva capacidad de almacenamiento y puede subestimar también la escasez, el coste de escasez y por consecuencia los costes marginales de oportunidad del recurso (Pulido Velázquez, 2003).

3.2. Caso sintético

La metodología descrita en el apartado anterior se ha aplicado primeramente a un esquema sintético de explotación, el cual ha servido de base para corroborar y observar la propuesta metodológica de asignación de precios con base en los resultados del CMOR.

El caso sintético está conformado por un embalse y dos unidades de demanda (Uso A y Uso B) con diferentes prioridades en el suministro del recurso, como se muestra en la figura 49.

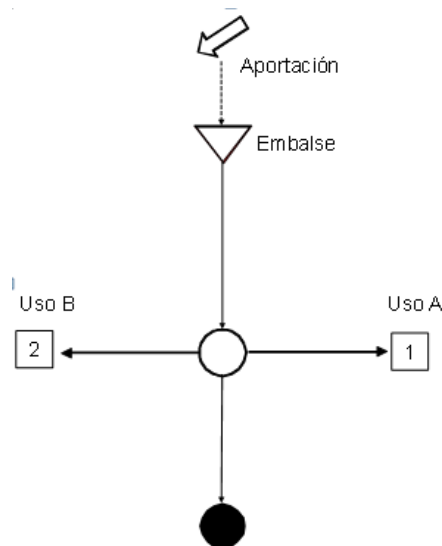


Figura 49. Esquema SimGes del caso sintético

3.2.1. Datos del esquema sintético.

Caracterización hidrológica. El esquema considera una serie de aportaciones al embalse de cabecera (figura 50) con un registro mensual de 55 años, desde 1948 hasta 2003, en la cual se incluyen dos periodos marcadamente secos (1952-1958 y 1978-1987). El embalse tiene una capacidad útil de 93 hm³ y un volumen mínimo de 2 hm³ (embalse “muerto”). La media de las

aportaciones anuales es de 137 hm³ presentándose un valor pico superior a los 300 hm³ en el año hidrológico 59/60 y otro superior a los 250 hm³ en el año hidrológico 90/91 (figura 51).

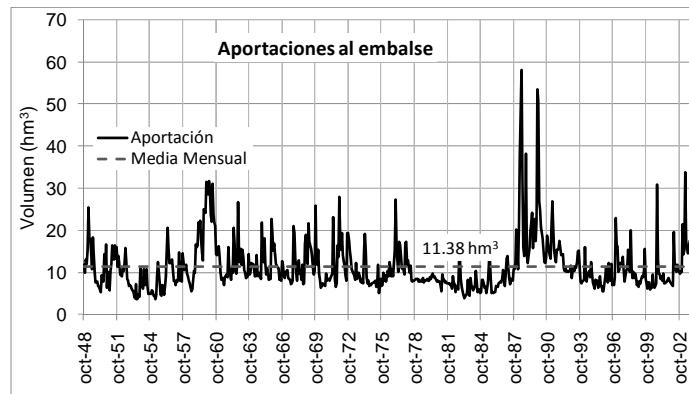


Figura 50. Aportaciones mensuales al embalse. Caso sintético

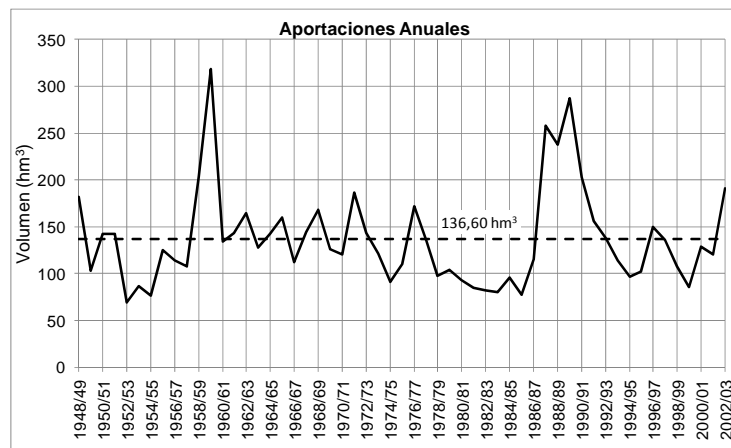


Figura 51. Aportaciones anuales al embalse. Caso sintético

Demandas hídricas. Las demandas de agua para los usos considerados varían notablemente. La que corresponde al uso A es del orden del doble de la demanda del uso B, como se observa en la figura.52.

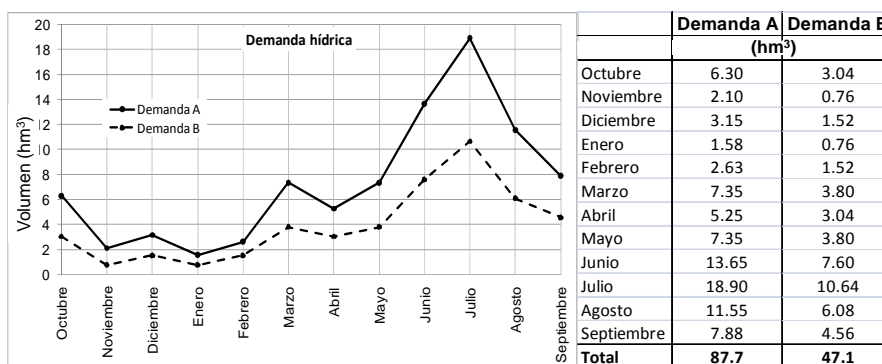


Figura 52. Demandas mensuales y anuales para los usos del caso sintético

Caracterización económica. Las funciones económicas asignadas a los dos usos considerados se definieron con un precio de cierre de 0,6 €/m³ para el uso A y 1,2 €/m³ para el uso B siendo el volumen máximo igual al máximo volumen anual demandado en cada uno de ellos (figura.53).

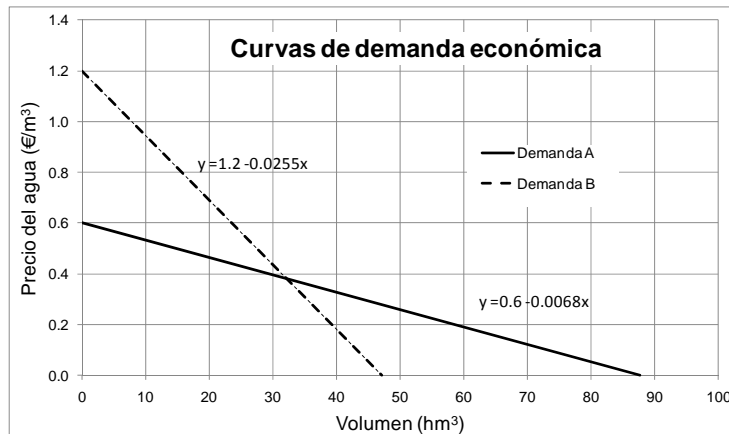


Figura 53. Funciones económicas del caso sintético

3.2.2. Simulación con prioridades y optimización económica

En la simulación, la gestión se realiza a nivel mensual, utilizando curvas de demanda anual para la valoración de beneficios-costes de escasez y el cálculo de la aproximación del CMOR en embalses. En la optimización, sin embargo, la gestión obtenida maximiza beneficios de forma simultánea para todo el periodo de análisis, considerando en este caso curvas de demanda mensuales (desagregando la curva anual mes a mes, según el calendario de riego) (Pulido-Velazquez, 2003). Debido a que se han considerado funciones de tipo lineal, la desagregación de éstas sigue también un patrón lineal con punto de cierre en los precios de las curvas anuales y demanda máxima mensual.

En el modelo de simulación, a la demanda A se le da prioridad de suministro sobre la demanda B, mientras que en el modelo de optimización no se consideran estas prioridades sino que se asigna el agua con el criterio de maximizar los beneficios netos totales para todo el período analizado. La simulación con prioridades permite representar la gestión del recurso hídrico en condiciones actuales y presenta, a su vez, el reparto del agua en función de las prioridades en el suministro establecidas de antemano. Así, el uso A tendrá prioridad en la asignación del recurso; mientras el embalse mantenga los niveles suficientes, el uso B podrá contar con el mayor suministro posible, lo contrario sucederá si el embalse empieza a tener poco volumen almacenado. El modelo utilizado para representar la simulación con prioridades en la gestión del recurso hídrico para el caso sintético es el módulo SimGes del SAD Aquatool, con una posterior evaluación económica mediante el módulo EcoWin.

La optimización económica tiene como función objetivo maximizar los beneficios económicos totales para las dos demandas consideradas. El modelo proporciona el “techo” de beneficios que se pueden conseguir. El modelo de optimización siempre “ve hacia adelante” –conoce la hidrología y demandas futuras- pues se optimiza simultáneamente para todo el periodo de análisis. De esta manera, los volúmenes almacenados en la simulación y la optimización no son coincidentes. El modelo de optimización claramente prevé almacenar agua para solventar los periodos de sequía que vendrán en periodos posteriores (predicción perfecta), mientras que

en la simulación se suministra el recurso de acuerdo a lo que el uso requiere y conforme a las reservas que se tengan en el embalse (figura 54).

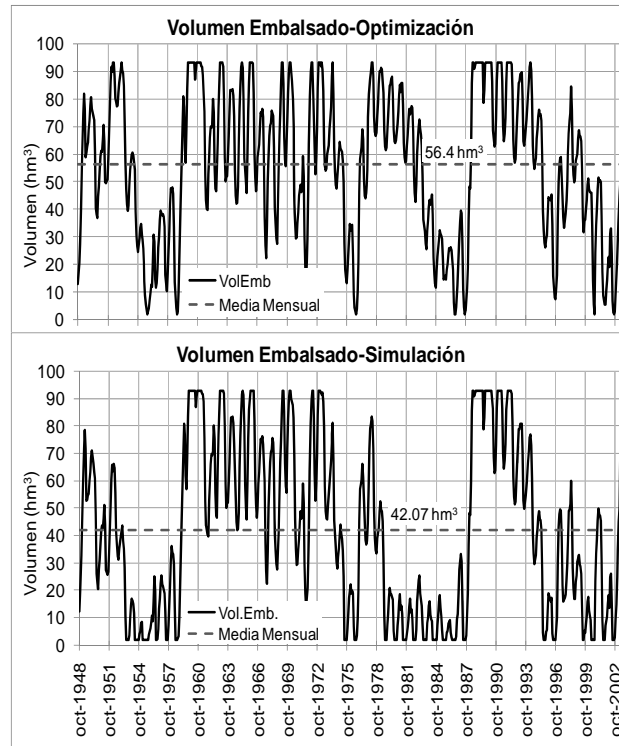


Figura 54. Volumen embalsado. Optimización y Simulación

Con lo anterior, los suministros a las demandas varían. Mientras el modelo de simulación considera preferente satisfacer la demanda prioritaria, el modelo de optimización prefiere mejorar el suministro al uso B a costa de penalizar al uso A (figura 55) puesto que el objetivo es maximizar el beneficio económico total.

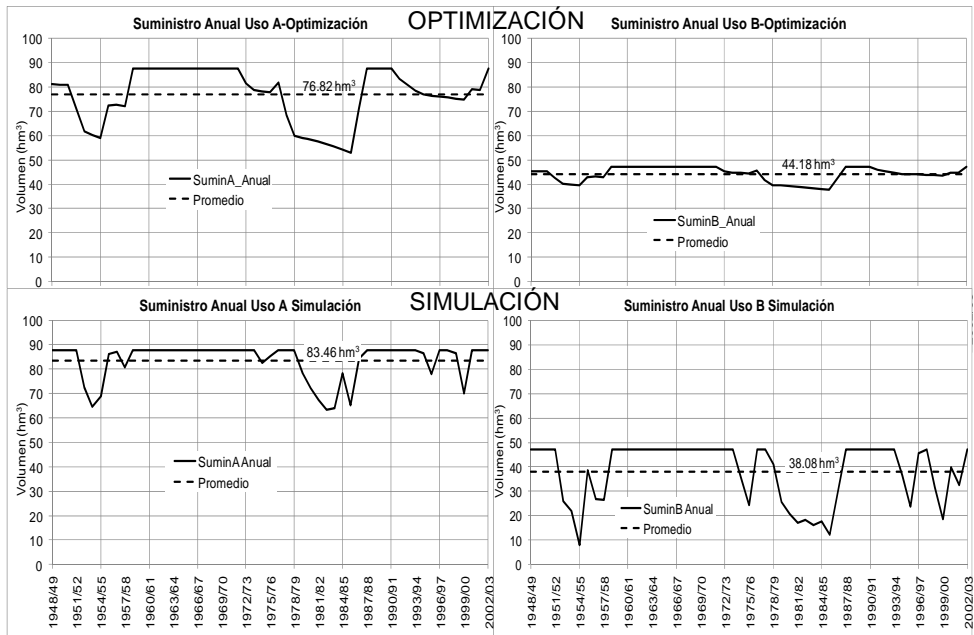


Figura 55. Suministro a las demandas

El modelo de optimización reduce el déficit de suministro en el uso B, como puede observarse en la figura 56. En el modelo de optimización, aunque disminuyen los valores máximos de déficit en el uso A, aumenta mucho la frecuencia de los mismos, y también el valor total (ver déficit medio, Tabla 5.1), ya que destina más recursos al uso B, que produce mayores beneficios.

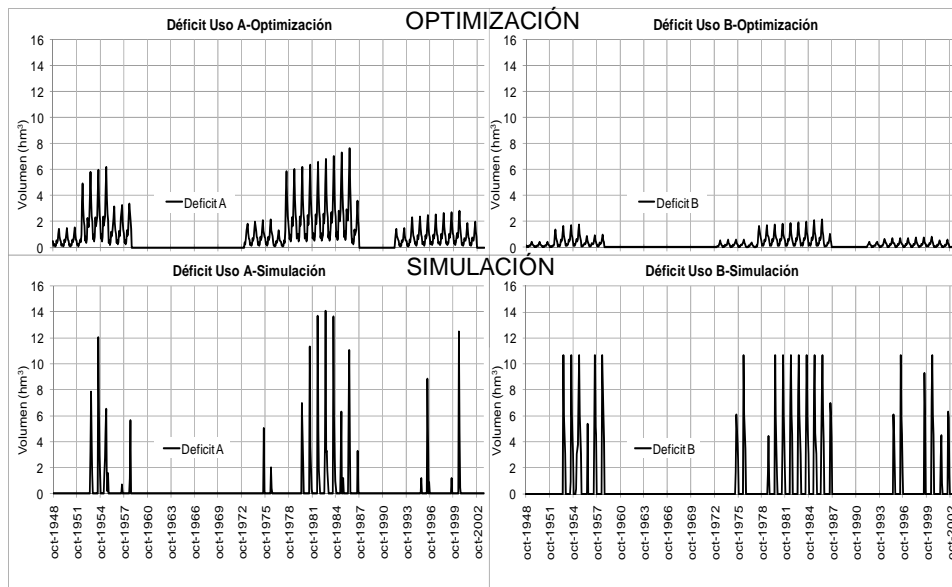


Figura 56. Déficit de suministro a la demanda

El modelo de optimización proporciona mayor beneficio económico total ya que reasigna agua del uso A al uso B (uso de mayor valor), como se resume en la tabla 11. En el incremento de beneficio hay también una cierta componente atribuible a la gestión óptima del sistema con perfecta anticipación frente a los episodios de sequía, lo que permite disminuir

significativamente los coste de escasez en esos períodos (el coste de escasez aumenta de forma no lineal con el déficit de suministro).

Tabla 10. Beneficios y déficits medios anuales

Metodología	Benef A (M€/año)	Benef B (M€/año)	Beneficio Medio Anual (M€/año)	Déficit medio A (hm ³)	Déficit medio B (hm ³)
Optimización	25,49	28,05	53,54	10,85	2,94
Simulación	26,05	25,38	51,43	4,21	9,04

3.2.3. CMOR. Simulación y optimización

Con el fin de poder definir políticas de precios acorde con lo descrito en los párrafos anteriores, se estimó el coste marginal de oportunidad del recurso (CMOR) en el embalse tanto en el modelo de simulación como en el de optimización.

Para determinar el CMOR en el embalse se emplearon las curvas de demanda económica mostrada en la figura 53 con los caudales de suministros proporcionados por los modelos de simulación y la optimización, y las respectivas metodologías descritas en el capítulo 2. En la figura 57 se observa que, en consonancia con lo esperado según la teoría económica, el mayor valor marginal corresponde al periodo en el que hay menos reservas en los embalses, y por tanto, más escasez del recurso. En los períodos de CMOR alto los déficits en las demandas y por consiguiente los costes de escasez y la disposición marginal a pagar son elevados. Cuando los volúmenes embalsados son altos, no hay déficit de suministro y por tanto el valor marginal del agua en el embalse es nulo (el disponer de una unidad más no aporta ningún beneficio adicional para el sistema).

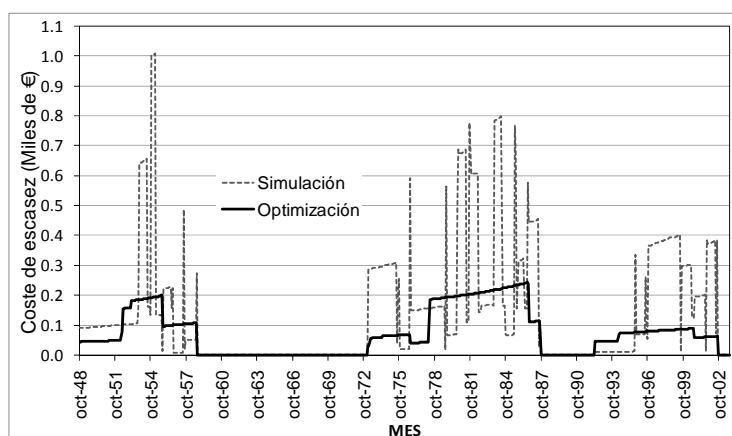


Figura 57. Coste de escasez mensual

Como las pérdidas económicas (coste de escasez) no son lineales con el déficit (ecuaciones cuadráticas de pérdidas), la optimización consigue mejores resultados económicos para el uso B (mejora en un 4% el beneficio medio anual, tabla 11) disminuyendo su déficit (del orden de un 30%). La operación del embalse (figura 58) en el esquema óptimo permite conservar más agua para los períodos de sequía más significativos (52-58; 78-87), reduciendo significativamente el coste de escasez (figura 57). De esta forma en el modelo de optimización

se hace una gestión del embalse con anticipación económicamente óptima frente a los periodos de sequía. Este resultado se ve favorecido por la predicción perfecta del modelo de optimización, como han estudiado diversos autores (Labadie, 1997; Draper y Lund, 2004).

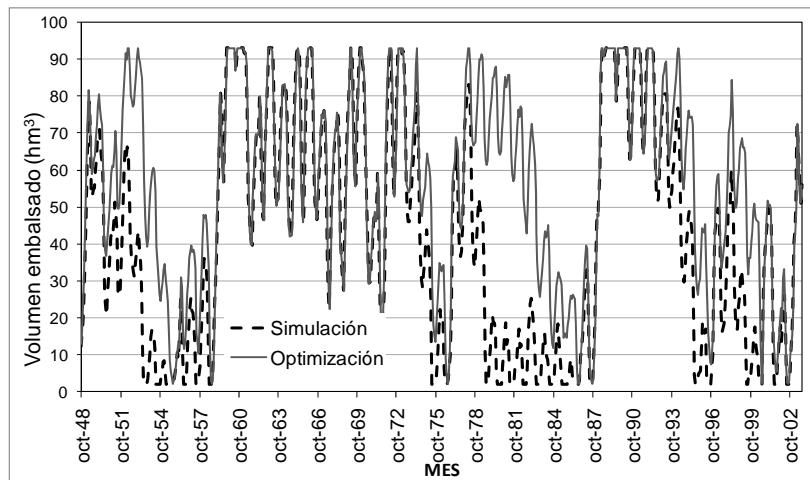


Figura 58. Series mensuales de volumen embalsado

El CMOR, base para definir las políticas de precios, presenta una gran dispersión en relación con los volúmenes embalsados (figura 59). Los resultados del CMOR del modelo de optimización muestran una clara separación de los costes marginales en dos poblaciones, una con valores entre 0 y 0,15 €/m³ y otra entre 0,15 y 0,25 €/m³.

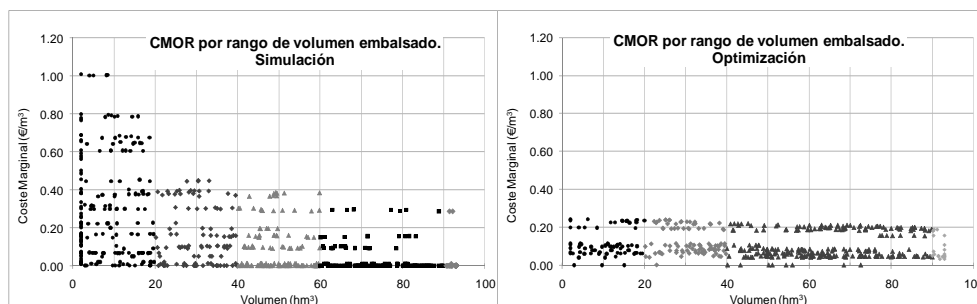


Figura 59. CMOR por rango de volumen embalsado. Simulación y optimización

3.3. Políticas de precios.

En los párrafos siguientes se analizan diversas formas de definir políticas de precios a partir de los valores del CMOR en el embalse del sistema obtenidos con los modelos hidro-económicos de simulación y optimización. Las distintas formulaciones de las políticas de precios se aplican al caso sintético descrito en los apartados anteriores y se comparan los beneficios totales obtenidos con cada una de ellas.

3.3.1. Políticas de precios escalonados en función del volumen almacenado

A partir de los valores de CMOR obtenidos en la optimización y la simulación se definen políticas de precios escalonados en función del volumen embalsado y, posteriormente, se

simulan estas políticas de precios actuando como nuevas “reglas de gestión” en el modelo de simulación. Esto se consigue mediante el uso de las funciones de demanda de cada uso, entrando con el precio y obteniendo el grado de suministro correspondiente, que se traduce en un coeficiente de restricción sobre la demanda máxima.

Para la definición de la función de precios escalonada, se obtienen los valores medios del CMOR correspondientes a simulación y optimización, para diferentes rangos de volúmenes embalsados, obteniéndose las políticas de precios mostradas en la figura 60.

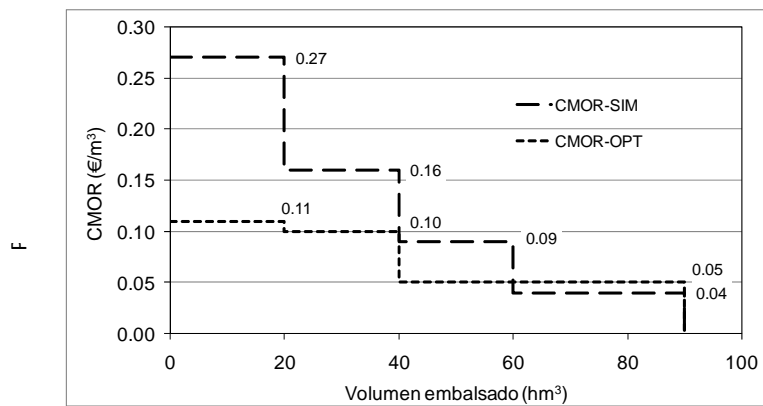


Figura 60. Políticas de precio derivadas del CMOR

A continuación se analizan los resultados de las políticas de precios a partir de los valores del CMOR mensuales promedio para distintos rangos de volúmenes embalsados, tanto para el modelo de simulación como para el de optimización.

Precios escalonados a partir de CMOR de simulación. Se consideran las políticas de precios indicadas en la figura 60, y se incorporan al modelo de simulación en forma de restricciones de suministro a las demandas del sistema en función del estado del embalse mediante indicadores de alarma. Dicho factor de restricción se calcula con base en la curva de demanda económica del uso correspondiente.

Como puede verse en la figura 61, al aplicar la política de precios del CMOR de la propia simulación el sistema penaliza al uso A y proporciona mayor recurso al uso B, con mayores beneficios netos por unidad (compárese con figura 55). La simple aplicación de una política de precios escalonada en función del volumen embalsado definida a partir de los CMOR de simulación consigue aproximarse bastante al óptimo económico dado por la optimización.

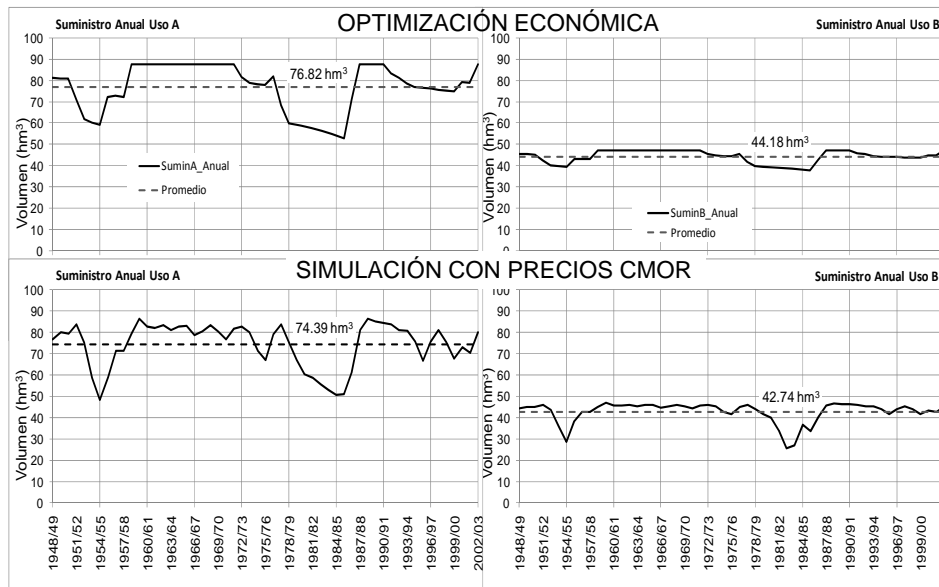


Figura 61. Suministro a las demandas. Precios escalonados CMOR de simulación

En la figura 62 puede observarse que el uso B es el que mayores beneficios proporciona aunque el beneficio en el uso A es un poco menor que el obtenido con la simulación con prioridades, los beneficios medios totales son mayores al aplicar la política de precios derivada del CMOR de simulación, acercándose mucho a los obtenidos con la optimización económica (tabla 12).

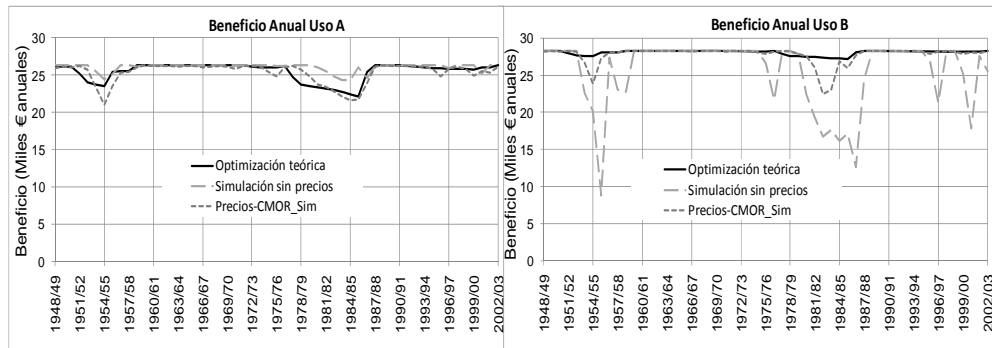


Figura 62. Beneficios Anuales. Precios con CMOR de simulación

Tabla 11. Beneficios medios anuales por metodologías. Caso sintético

METODOLOGÍA	Benef A (M€/año)	Benef B (M€/año)	Beneficio Medio Anual (M€/año)	Beneficio Total (M€)
Optimización teórica	25,49	28,05	53,54	2944,74
Simulación con prioridades	26,05	25,38	51,43	2828,53
PRECIOS ESCALONADOS:				
Precios CMOR-Sim-Función volumen	25,34	27,73	53,07	2918,75

Precios escalonados a partir de CMOR de optimización. Al simular la política de precios obtenida a partir de los CMOR promedio de optimización para distintos rangos de volumen embalsado (figura 60), los suministros promedio son menores que los que proporciona el modelo de simulación con prioridades, penalizándose también el uso A (figura 63). Sin embargo, en este caso se obtuvieron menores beneficios medios/tales que en la simulación de precios a partir del CMOR de la simulación (figura 64, tabla 13).

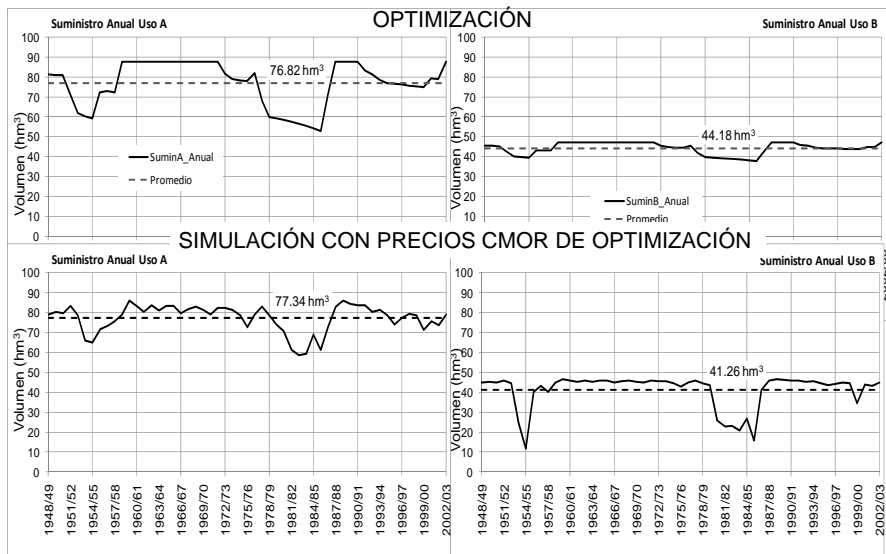


Figura 63. Suministro a las demandas. Precios escalonados, CMOR de la optimización

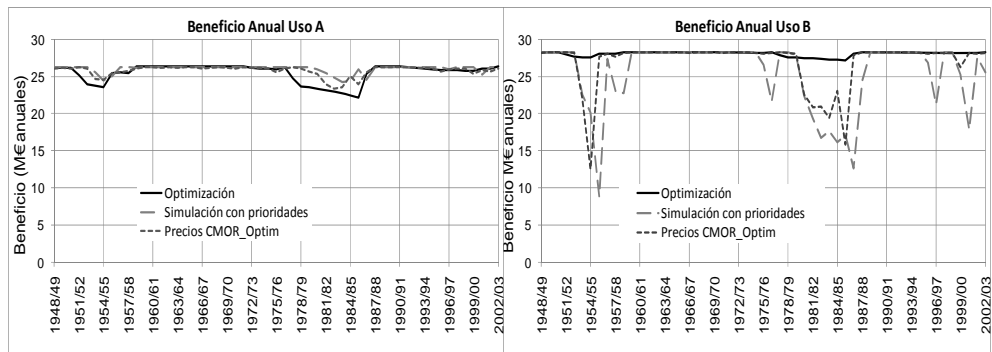


Figura 64. Beneficios anuales. Precios con CMOR de la optimización

Tabla 12. Beneficios medios anuales por metodologías. Caso sintético

METODOLOGÍA	Benef A (M€/año)	Benef B (M€/año)	Beneficio Medio Anual (M€/año)	Beneficio Total (M€)
Optimización teórica	25,49	28,05	53,54	2944,74
Simulación con prioridades	26,05	25,38	51,43	2828,53
PRECIOS ESCALONADOS:				
Precios CMOR-Sim-Función volumen	25,34	27,73	53,07	2918,75
Precios CMOR-Opt-Función volumen	25,78	26,90	52,68	2897,40

Precios escalonados óptimos. A continuación se analiza la posibilidad de mejorar la política de precios optimizando los valores de los precios para los distintos escalones de forma que los beneficios económicos sean máximos al aplicarla en el modelo de simulación (optimización de los precios de la función escalonada). Para ello, los escalones de la función de precios se optimizaron con la herramienta *solver* de Excel, partiendo de los valores iniciales proporcionados por la política de precios de los apartados anteriores. La función objetivo es la suma de los beneficios totales para los dos usos, sujeta a que los precios unitarios sean mayores para los rangos más bajos de volumen almacenado en el embalse. La política de precios “óptima” resultante se muestra en la figura 65 con línea continua. Se observa que la política “óptima” es más similar en este caso a la política de precios a partir del CMOR de simulación que a la derivada de los valores marginales de optimización, lo que corrobora los mejores resultados económicos obtenidos con la primera.

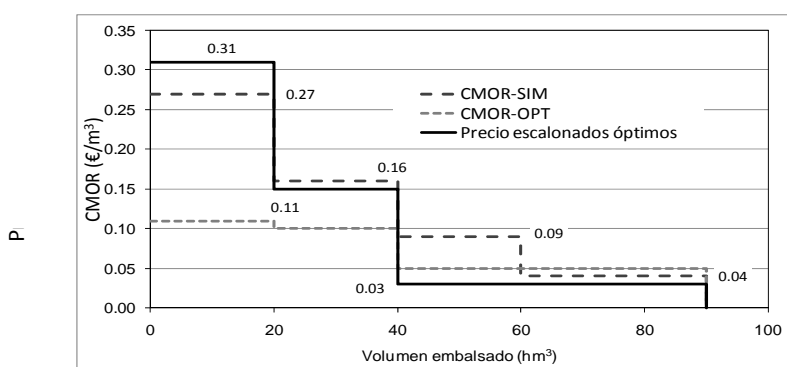


Figura 65. Política de precios escalonados óptimos

Al aplicar la política de precios escalonados óptimos las series temporales de suministros para ambos usos se aproximan a las obtenidas con el modelo de optimización (figura 66) y por ende los beneficios anuales también (figura 67, tabla 5.4).

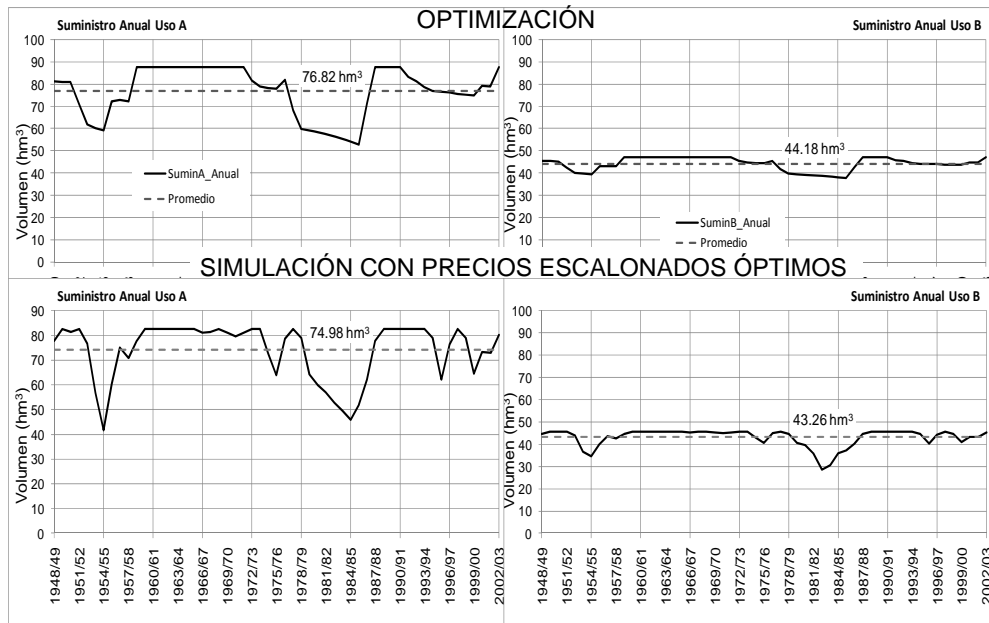


Figura 66. Suministro a las demandas. Precios escalonados óptimos

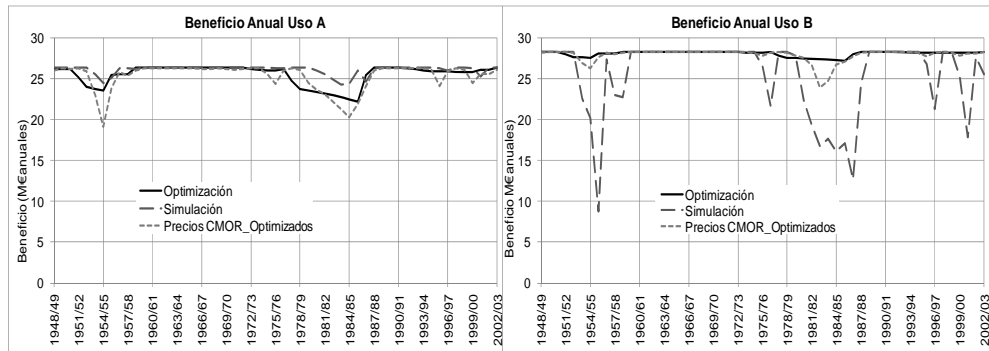


Figura 67. Beneficios anuales. Precios escalonados, CMOR de la simulación, óptimos

Tabla 13 Beneficios medios anuales por metodologías. Caso sintético

METODOLOGÍA	Benef A (M€/año)	Benef B (M€/año)	Beneficio Medio Anual (M€/año)	Beneficio Total (M€)
Optimización teórica	25,49	28,05	53,54	2944,74
Simulación con prioridades	26,05	25,38	51,43	2828,53
PRECIOS ESCALONADOS:				
Precios CMOR-Sim-Función volumen	25,34	27,73	53,07	2918,75
Precios CMOR-Opt-Función volumen	25,78	26,90	52,68	2897,40
Precios escalonados óptimos	25,24	27,87	53,11	2921,07

3.3.2. Precios escalonados según umbrales de aportaciones

Aunque como se ha indicado en párrafos anteriores, el CMOR depende del volumen disponible en el embalse, se pueden encontrar valores del CMOR distintos para el mismo volumen de embalse, dependiendo de la situación futura de llenado o vaciado del mismo, y por tanto, de la situación hidrológica de abundancia o de sequía. Para contemplar este aspecto, se han considerado también las aportaciones anuales al sistema para la definición de precios escalonados a partir del CMOR obtenido con la optimización. Las aportaciones juegan un papel importante ya que, junto con el volumen embalsado, definen las sequías que se presentan en el periodo de análisis. Los periodos de sequía hacen que aumente el valor marginal del recurso. La función escalonada de precios-volumen almacenado puede definirse entonces como una función también dependiente de umbrales de aportaciones anuales (figura 51) que ingresen al sistema.

Con la serie de aportaciones al sistema, se realizó un análisis de las sequías presentes, aplicando la teoría de sucesiones o rachas (Yevjevich, 1967; Dracup et al., 1980). Se observó que se presentan diez sequías durante el periodo de 55 años (figura 65) tomando como umbral para la definición de sequías la aportación media anual. Se observa que la duración media de las sequías es de 3,1 años (con desviación típica de 2,6). Por tanto, la mayoría de los episodios de sequías son multianuales, lo que en principio corresponde a una serie anual de aportaciones con significativa dependencia temporal. La media de la magnitud de las sequías es 97 hm^3 , por lo cual se ha tomado un valor de 100 hm^3 como el umbral inferior para definir rangos de aportaciones y sus correspondientes valores medios de CMOR. Se definieron dos rangos más: uno intermedio entre 100 y 120 hm^3 y otro superior a 120 hm^3 .

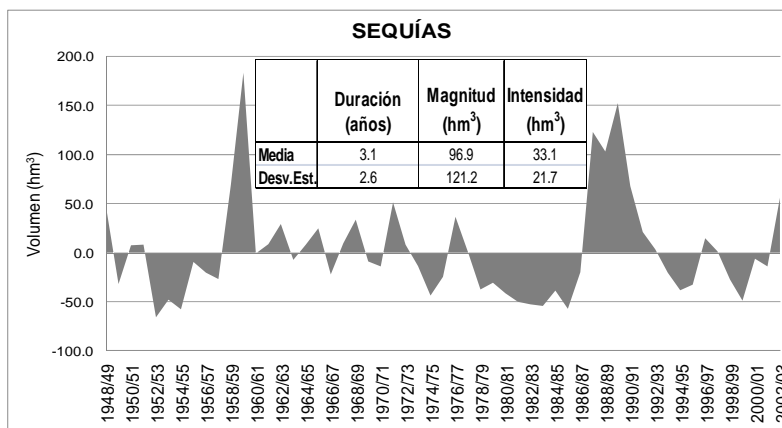


Figura 68. Sequías para el Caso sintético (con umbral igual a aportación media)

Para los rangos de aportaciones indicados, se definió una política de precios (figura 69) a partir de los valores promedio de los CMOR de embalse para los meses en que la aportación se situase en ese umbral.

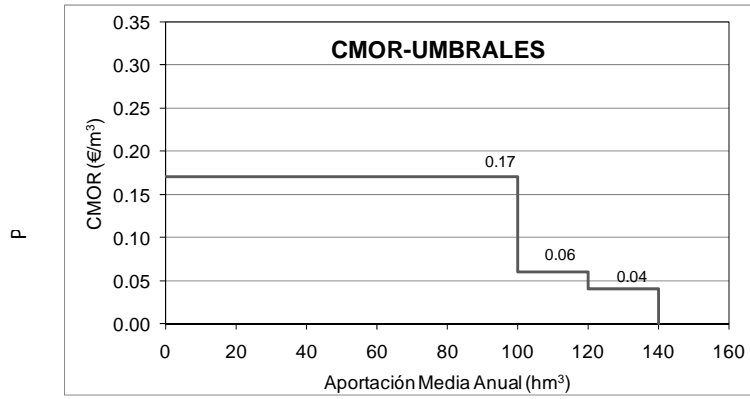


Figura 69. Política de precios para umbrales de aportaciones

Para el caso de los umbrales de aportaciones, los suministros de agua a las demandas fueron inferiores al caso anterior. El suministro al uso A se sigue penalizando y el suministro al uso B es mayor que en el caso del modelo de simulación (figura 70). Con todo, los beneficios económicos al aplicar este tipo de políticas, aunque superiores al caso de la simulación con prioridades, son inferiores al de las políticas de precios escalonados basados en el CMOR de simulación (figura 71, tabla 15).

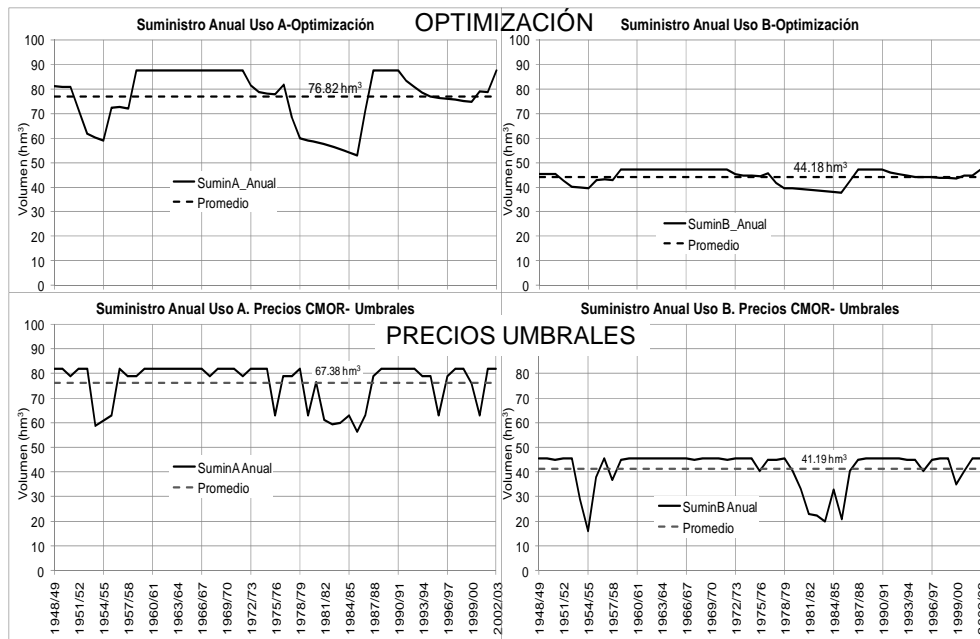


Figura 70. Suministro a las demandas. Precios escalonados, CMOR de la simulación, umbrales

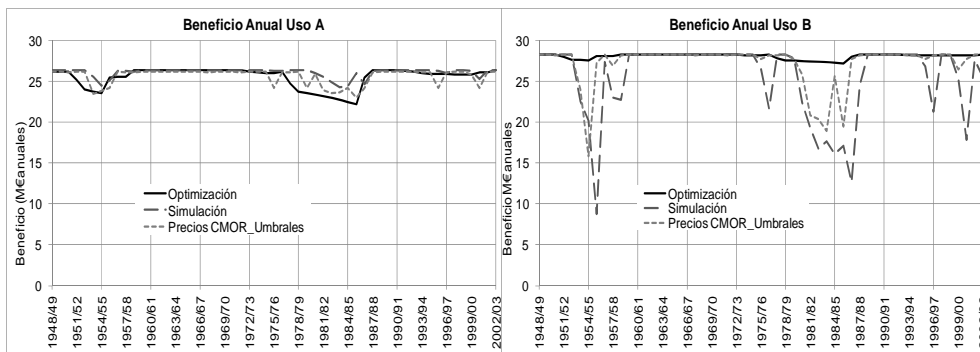


Figura 71. Beneficios anuales. Precios escalonados. CMOR de simulación

Tabla 14. Beneficios medios anuales por metodologías. Caso sintético

METODOLOGÍA	Benef A (M€/año)	Benef B (M€/año)	Beneficio Medio Anual (M€/año)	Beneficio Total (M€)
Optimización teórica	25,49	28,05	53,54	2944,74
Simulación con prioridades	26,05	25,38	51,43	2828,53
PRECIOS ESCALONADOS:				
Precios CMOR-Sim-Función volumen	25,34	27,73	53,07	2918,75
Precios CMOR-Opt-Función volumen	25,78	26,90	52,68	2897,40
Precios escalonados óptimos	25,24	27,87	53,11	2921,07
Precios CMOR-Función de aportaciones previas	25,60	27,11	52,71	2899,19

3.3.3. Precios anuales constantes en función del volumen embalsado y aportaciones previas

Como ya se ha mencionado, no sólo las reservas sino también las aportaciones juegan un papel importante decisivo en la evolución del valor marginal del recurso en el tiempo. De hecho, la información proporcionada por las aportaciones previas y el estado de las reservas del sistema pueden servir de elemento de predicción de caudales futuros, y por tanto, de eventuales sequías para hacer una gestión eficiente con anticipación a las mismas (Salas et al., 1980; Ochoa-Rivera et al., 2007).

Para tener esto en cuenta en el diseño de la política de precios, los escalones de precios pueden hacerse depender de las aportaciones anuales del primero y/o segundo años anteriores al año de análisis y el volumen embalsado que sea significativo para el ajuste y mejor representación del CMOR.

Las consideraciones mencionadas en el párrafo anterior se han hecho para los valores obtenidos del CMOR con los modelos de simulación y de optimización, siendo la función de ajuste de precios la siguiente:

$$p = a + b \cdot V_{oct} + c \cdot Ap_{año(t-1)} + d \cdot (Ap_{año(t-1)} + Ap_{año(t-2)})$$

donde:

p Precio del agua.

V_{oct} Volumen almacenado al inicio del mes de octubre.

$Ap_{año(t-1)}$ Aportación anual del año anterior.

$Ap_{año(t-2)}$ Aportación anual del año antepasado.

a, b, c, d Coeficientes de ajuste.

El análisis de sequías (figura 68) y el estudio de la dependencia temporal de las series de aportaciones permiten decidir sobre la conveniencia de considerar las aportaciones sólo del año anterior o incluir las de varios años atrás. La expresión anterior corresponde a un precio que depende tanto de aportaciones anuales anteriores como del volumen embalsado; en este caso se ha seleccionado el del mes de octubre como representativo, que es el volumen de embalse al comienzo de la campaña de riego. Al analizar los volúmenes almacenados en el embalse, claramente se observa que es en los meses de octubre cuando comienza a llenarse de nuevo el embalse tras las demandas mayores del período de verano, por lo que se presenta un valor de CMOR que concuerda con el poco volumen almacenado (figura 72).

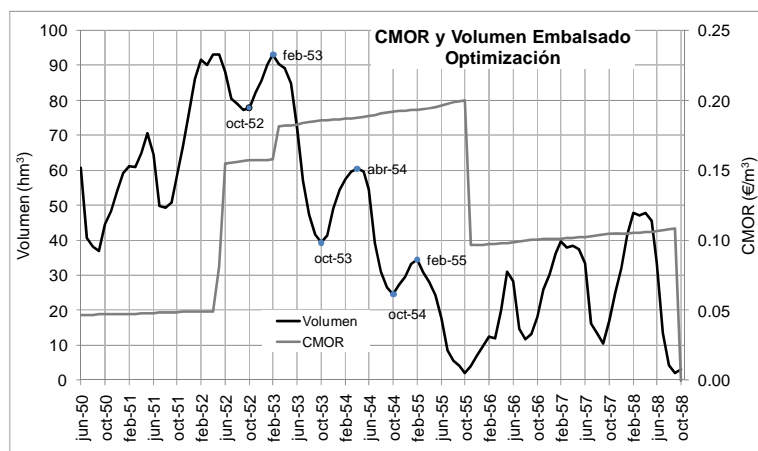


Figura 72. CMOR (valor sombra) de la optimización teórica y volumen embalsado

Los parámetros de la ecuación se calibraron para ajustar en lo posible los valores de la serie de CMOR de optimización. En la figura 73 se observa que los valores de la función de precios obtenidos aproximan bien en general la evolución en el tiempo de los CMOR de optimización, con la excepción del periodo 1959-1972 en el que la variabilidad del CMOR no es adecuadamente capturada por la función de precios. La función de precios dependiente de reservas y aportaciones previas, se traduce en una regla de operación en el embalse mediante el factor de suministro a las demandas en los usos A y B, el cual se utiliza para corregir las curvas de demanda en ambos usos. Dicha corrección permite obtener los coeficientes de restricción al suministro del recurso para los dos usos en el caso sintético para evaluar los beneficios al aplicar esta política de precios.

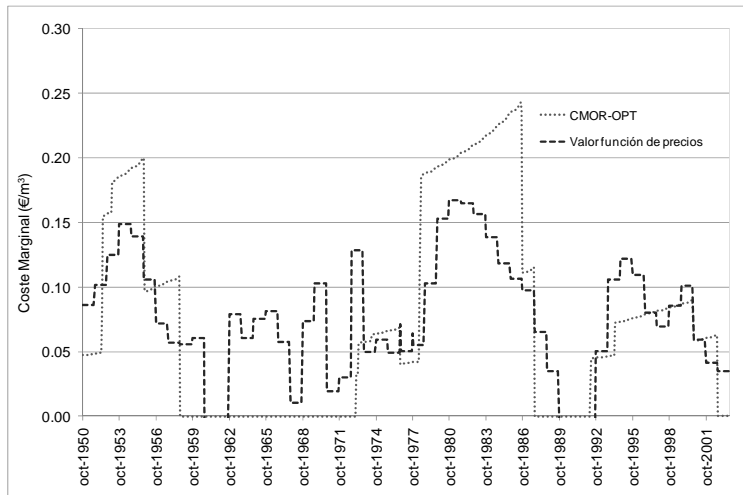


Figura 73. Comparativa CMOR de optimización y valores de la función de precios

La expresión se utilizó para definir la serie de precios del agua, constante para cada año en función del volumen al inicio del año hidrológico y las aportaciones anuales en los dos años previos. La figura 74 representa la serie temporal de precios y volumen de embalse en el período analizado. Los resultados muestran que, a pesar de la ventaja práctica que supone definir un precio constante para todo el año al principio del año y la mayor seguridad que eso proporcionaría a los usuarios en sus decisiones, los beneficios obtenidos en este caso particular no son tan buenos como los correspondientes a una política escalonada de precios (figura 75, tabla 16).

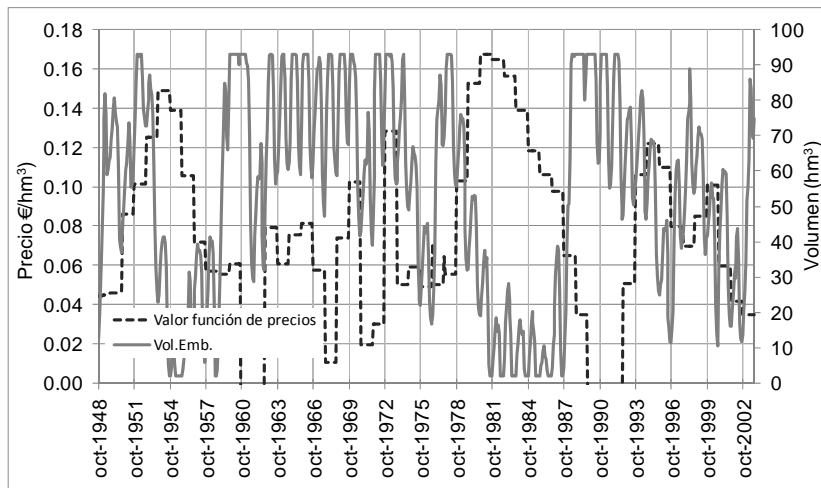


Figura 74. Volumen mensual y valores de la función de precios (ctes. para cada año)

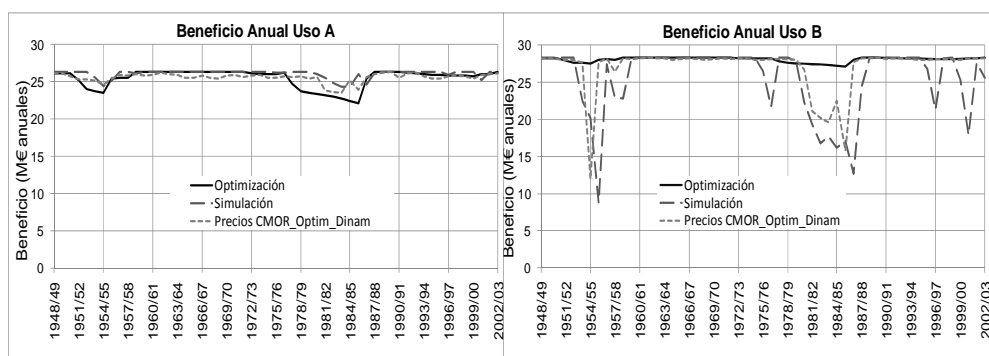


Figura 75. Beneficios anuales. Precios utilizando el CMOR de la optimización teórica y aportaciones previas

Tabla 15. Beneficios medios anuales por metodologías. Caso sintético

METODOLOGÍA	Benef A (M€/año)	Benef B (M€/año)	Beneficio Medio Anual (M€/año)	Beneficio Total (M€)
Optimización teórica	25,49	28,05	53,54	2944,74
Simulación con prioridades	26,05	25,38	51,43	2828,53
PRECIOS ESCALONADOS:				
Precios CMOR-Sim-Función volumen	25,34	27,73	53,07	2918,75
Precios CMOR-Opt-Función volumen	25,78	26,90	52,68	2897,40
Precios escalonados óptimos	25,24	27,87	53,11	2921,07
Precios CMOR-Función de aportaciones previas	25,60	27,11	52,71	2899,19
PRECIOS FUNCIÓN DE VOLUMEN Y APORTACIONES PREVIAS				
Precios CMOR-Opt-Función volumen y aportaciones previas	25,60	27,01	52,61	2893,31

Finalmente se calibraron los parámetros de la expresión para ajustar los valores del CMOR de simulación. Los resultados muestran unos beneficios mucho menores a los anteriores, aunque mayores a los obtenidos con la simulación sin política de precios (figura 76 y 77; tabla 17).

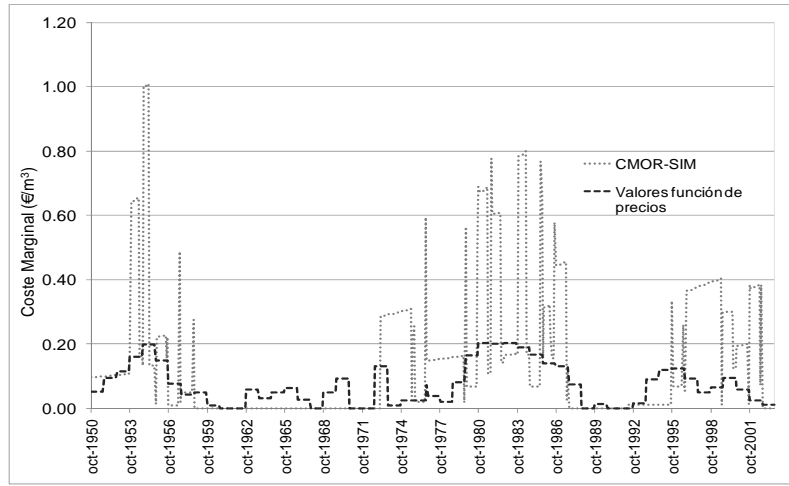


Figura 76. Comparativa de CMOR de simulación y función de precios ajustada

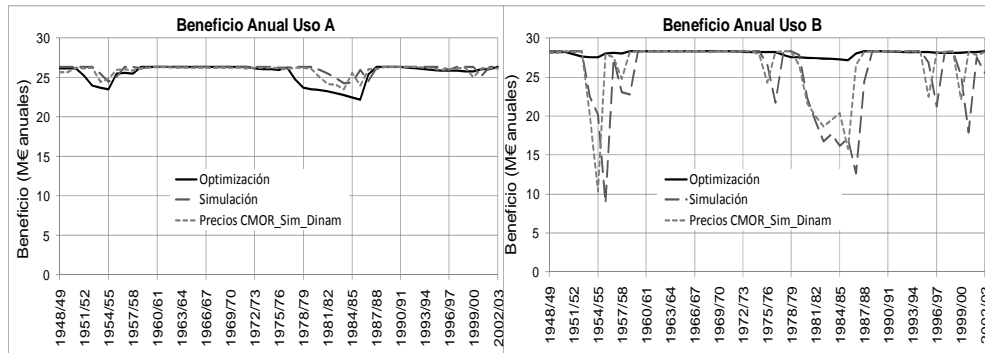


Figura 77. Beneficios anuales. Precios utilizando el CMOR de la simulación y aportaciones previas

Tabla 16. Beneficios medios anuales por metodologías. Caso sintético

METODOLOGÍA	Benef A (M€/año)	Benef B (M€/año)	Beneficio Medio Anual (M€/año)	Beneficio Total (M€)
Optimización teórica	25,49	28,05	53,54	2944,74
Simulación con prioridades	26,05	25,38	51,43	2828,53
PRECIOS ESCALONADOS:				
Precios CMOR-Sim-Función volumen	25,34	27,73	53,07	2918,75
Precios CMOR-Opt-Función volumen	25,78	26,90	52,68	2897,40
Precios escalonados óptimos	25,24	27,87	53,11	2921,07
Precios CMOR-Función de aportaciones previas	25,60	27,11	52,71	2899,19
PRECIOS FUNCIÓN DE VOLUMEN Y APORTACIONES PREVIAS				
Precios CMOR-Opt-Función volumen y aportaciones previas	25,60	27,01	52,61	2893,31
Precios CMOR-Sim-Función volumen y aportaciones previas	25,90	26,35	52,25	2873,49

3.3.4. Precios estacionales en función del volumen embalsado y aportaciones previas.

En un intento por reflejar la variación del CMOR para igual volumen embalsado en función de que sea época de aumento o disminución de reservas, se ha considerado la posibilidad de que el precio pueda depender del estado previo del sistema en los semestres anteriores al análisis, es decir, considerando periodos estacionales significativos. Las funciones de ajuste son las siguientes:

$$p_{oct-abr} = a + b \cdot V_{oct} + c \cdot Ap_{abr, año(t-1)}$$

$$p_{abr-sep} = d + e \cdot V_{abr} + f \cdot Ap_{oct, año(t-1)}$$

donde:

V_{abr} Volumen almacenado al inicio del mes de abril.

V_{oct} Volumen almacenado al inicio del mes de octubre.

Ap_{abr} Suma de aportaciones de abril a septiembre del año anterior.

Ap_{oct} Suma de aportaciones de octubre a marzo del año anterior.

a, b, c, d, e, f Parámetros de ajuste.

Se tienen entonces dos valores de precios ajustados al CMOR, dependiendo del periodo de análisis en que se encuentre el sistema de explotación. Si se parte del mes de octubre, se consideran los volúmenes almacenados al inicio de octubre, pero las aportaciones de abril a septiembre de ese mismo año. Cuando el análisis es en abril se toman los volúmenes almacenados al inicio de ese mes y las aportaciones de octubre del año anterior a marzo de ese mismo año.

Las funciones de precio se han ajustado a los valores del CMOR de optimización y de simulación usando las expresiones anteriores. Estas funciones se han hecho depender tanto de los volúmenes embalsados durante los semestres anteriores como de las aportaciones anuales igualmente de semestres anteriores. El resultado del ajuste para el caso sintético es el mostrado en la figura 78.

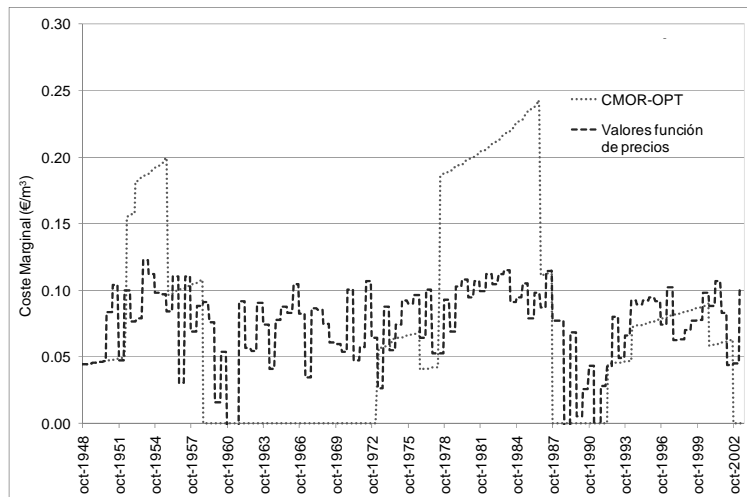


Figura 78. Comparativa CMOR de optimización y precios estacionales

La figura 79 representa la serie temporal de precios y volumen de embalse en el período analizado. Como se observa en la figura 78, el ajuste no es del todo satisfactorio y al aplicar este tipo de política estacional se obtienen beneficios inferiores a los obtenidos con las políticas de precios escalonados pero muy similares a los obtenidos con el ajuste anterior no estacional (figura 80, tabla 18).

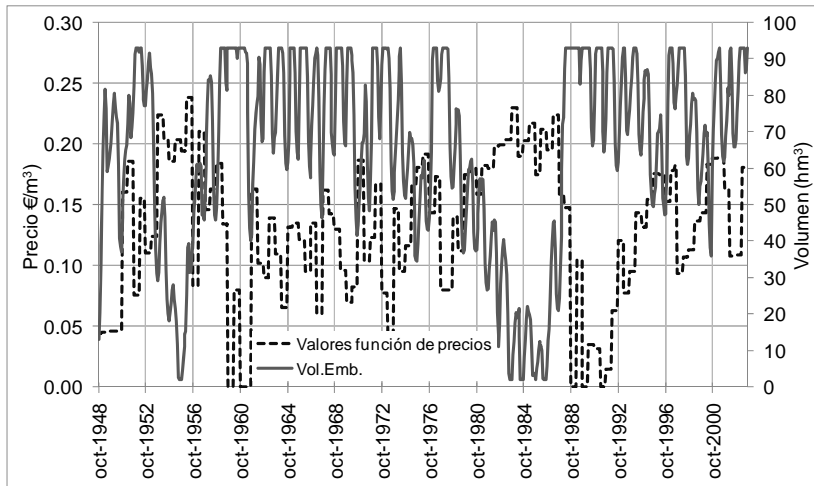


Figura 79. Volumen mensual y valores de la función de precios estacionales (ctes. para cada año)

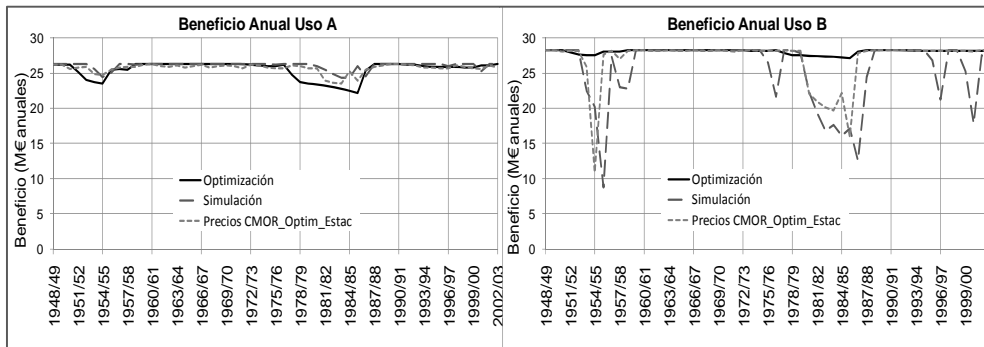


Figura 80. Precios en función del volumen embalsado y aportaciones previas con ajustes estacionales utilizando el CMOR (valor sombra) de optimización teórica

Tabla 17. Beneficios medios anuales por metodologías. Caso sintético

METODOLOGÍA	Benef A (M€/año)	Benef B (M€/año)	Beneficio Medio Anual (M€/año)	Beneficio Total (M€)
Optimización teórica	25,49	28,05	53,54	2944,74
Simulación con prioridades	26,05	25,38	51,43	2828,53
PRECIOS ESCALONADOS:				
Precios CMOR-Sim-Función volumen	25,34	27,73	53,07	2918,75
Precios CMOR-Opt-Función volumen	25,78	26,90	52,68	2897,40
Precios escalonados óptimos	25,24	27,87	53,11	2921,07
Precios CMOR-Función de aportaciones previas	25,60	27,11	52,71	2899,19
PRECIOS FUNCIÓN DE VOLUMEN Y APORTACIONES PREVIAS				
Precios CMOR-Opt-Función volumen y aportaciones previas	25,60	27,01	52,61	2893,31
Precios CMOR-Sim-Función volumen y aportaciones previas	25,90	26,35	52,25	2873,49
PRECIOS FUNCIÓN DE VOLUMEN, APORTACIONES PREVIAS Y AJUSTES ESTACIONALES				
Precios CMOR-Opt-Función volumen aportaciones y ajustes estacionales	25,71	26,91	52,62	2893,78

El ajuste para el caso de simulación_(figura 81) es mucho peor que para el caso del CMOR de optimización. Los valores del CMOR ajustado quedan muy por debajo de los valores del CMOR de la simulación.

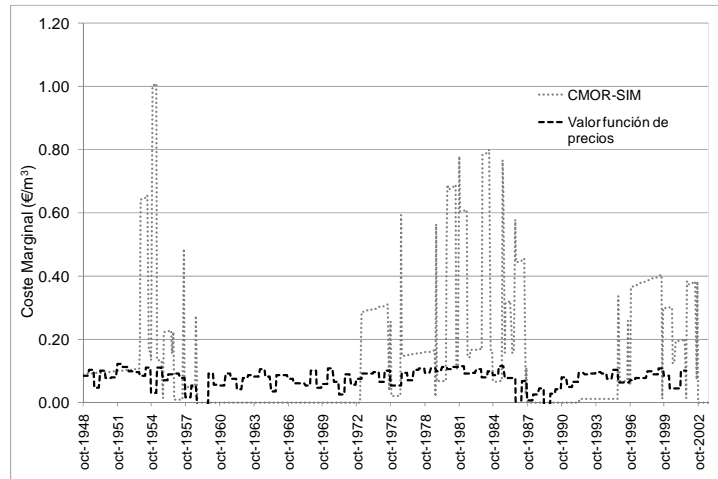


Figura 81. Ajuste del CMOR de la simulación por estaciones

Al aplicar este tipo de política al caso sintético, los beneficios que se obtienen (figura 82, tabla19) son menores a los obtenidos con políticas de precios escalonados, pero similares a los de políticas de precios dinámicos.

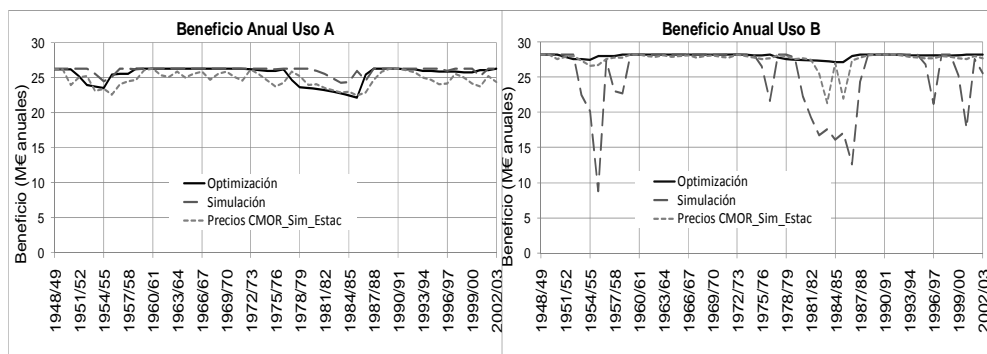


Figura 82. Precios en función del volumen embalsado y aportaciones previas con ajustes estacionales utilizando el CMOR de la simulación sin precios

En la tabla 19 se muestran en forma comparativa los beneficios medios anuales para cada metodología considerada.

Tabla 18. Beneficios medios anuales por metodologías. Caso sintético

METODOLOGÍA	Benef A (M€/año)	Benef B (M€/año)	Beneficio Medio Anual (M€/año)	Beneficio Total (M€)
Optimización teórica	25,49	28,05	53,54	2944,74
Simulación con prioridades	26,05	25,38	51,43	2828,53
PRECIOS ESCALONADOS:				
Precios CMOR-Sim-Función volumen	25,34	27,73	53,07	2918,75
Precios CMOR-Opt-Función volumen	25,78	26,90	52,68	2897,40
Precios escalonados óptimos	25,24	27,87	53,11	2921,07
Precios CMOR-Función de aportaciones previas	25,60	27,11	52,71	2899,19
PRECIOS FUNCIÓN DE VOLUMEN Y APORTACIONES PREVIAS				
Precios CMOR-Opt-Función volumen y aportaciones	25,60	27,01	52,61	2893,31
Precios CMOR-Sim-Función volumen y aportaciones	25,90	26,35	52,25	2873,49
PRECIOS FUNCIÓN DE VOLUMEN, APORTACIONES PREVIAS Y AJUSTES ESTACIONALES				
Precios CMOR-Opt-Función volumen aportaciones y ajustes estacionales	25,71	26,91	52,62	2893,78
Precios CMOR-Sim-Función volumen aportaciones y ajustes estacionales	24,76	27,58	52,34	2878,78

3.3.5. Análisis de la eficacia de precios con series sintéticas de aportaciones.

Aunque con frecuencia se adopta un enfoque determinístico en el análisis de sistemas de recursos hídricos, simulando la serie histórica, esta serie representa una realización sólo de los infinitos escenarios hidrológicos futuros, y es improbable que se repita en el futuro. La generación de múltiples series sintéticas equiprobables a la series histórica nos permite analizar el funcionamiento medio del sistema teniendo en cuenta todos esos escenarios.

Se ha realizado un estudio de series sintéticas con el fin de verificar si las conclusiones sobre los beneficios económicos que se obtiene al utilizarlas varían con respecto a las obtenidas con la serie histórica del sistema.

Para la generación de las series sintéticas, se elaboró y calibró un modelo estocástico de aportaciones clásico (Salas et al. 1980). Primeramente se calcularon los estadísticos básicos de

las aportaciones anuales y los límites de Snedecor y Cochran para el Test de Normalidad. La tabla 20 muestra los resultados correspondientes:

Tabla 19. Estadísticos de las series de aportaciones anuales

Media	Desviación Típica	Sesgo	Límite inferior	Límite superior
136,60	51,76	1,56	-0,63	0,63

Al salir el sesgo fuera de los límites de Snedecor y Cochran, se probaron distintas transformaciones para normalizar la serie raíz cuadrada, logarítmica y doble logarítmica, siendo esta última la mejor. Solamente se tienen problemas durante los meses de diciembre y enero (figura 83)

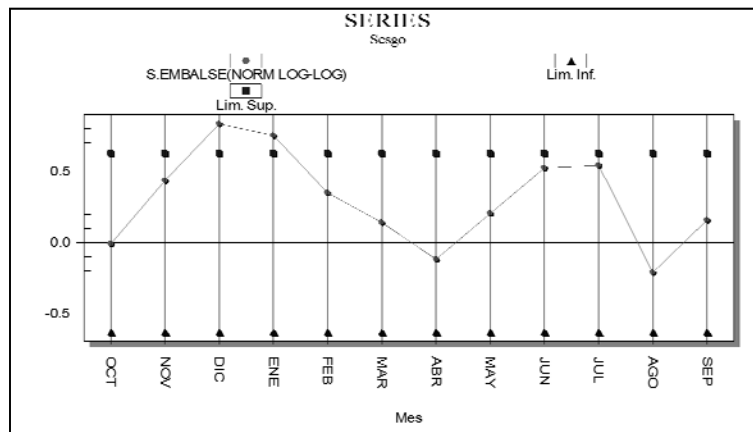


Figura 83. Normalización de la serie de aportaciones

Se postularon dos modelos de autocorrelación: AR (1) y AR (2), prefiriendo el primero por ser más sencillo y porque tiene total independencia temporal de los residuos y menor sesgo (figura 84).

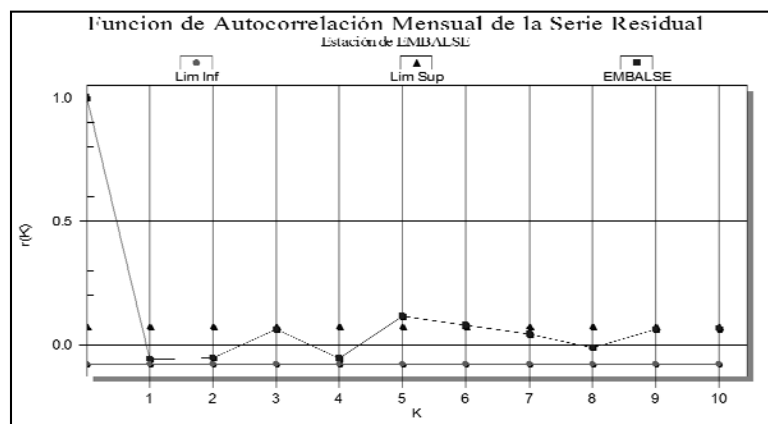


Figura 84. Función de autocorrelación mensual de la serie residual

La función de autocorrelación mensual de la serie de caudales tipificada, se muestra en la figura 85.

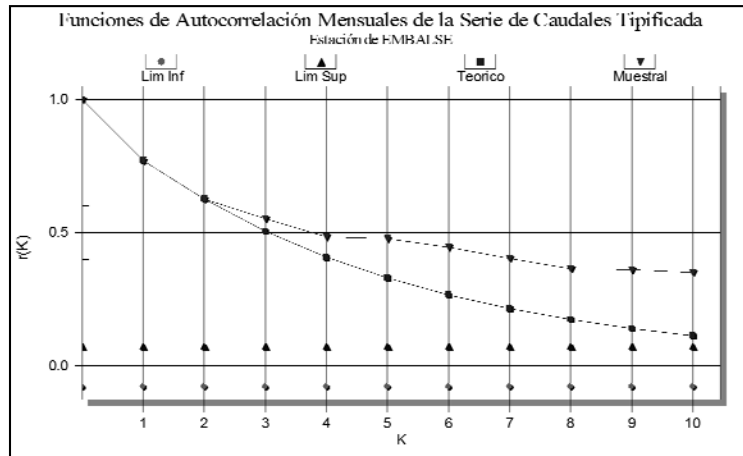


Figura 85. Funciones de autocorrelación mensuales

Con base en el modelo AR (1), se generaron 50 series sintéticas mensuales con una longitud total de 60 años y periodo de calentamiento de 5 años. Las medias, el sesgo y la desviación típica mensuales se observan en la figura 86.

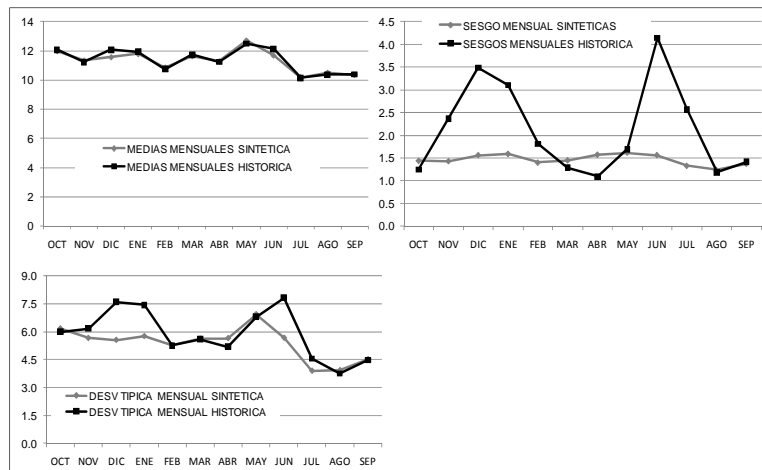


Figura 86. Estadísticos modelo AR (1)

Una vez generadas las cincuenta series sintéticas, se utilizaron en el esquema sintético para cada tipo de políticas de precio presentadas en los apartados anteriores. Los beneficios obtenidos se muestran en forma comparativa con los obtenidos de la serie de aportaciones histórica, en la tabla 21.

Tabla 20. Beneficios medios anuales por metodologías. Series de aportaciones

Metodología	Histórica (Mill.€/año)	Medias Sintéticas (Mill. €/año)
Beneficios Optimización	53,54	53,99
Beneficios Simulación con prioridades	51,43	52,51
Beneficios Precios Escalonados:		
Beneficios/Precios CMOR-Optim. Función de volumen	52,68	53,46
Beneficios/Precios CMOR-Sim. Función de volumen	53,07	53,57
Beneficios/Precios Optimizados	53,11	53,57
Beneficios/Precios CMOR-Función de volumen y aportaciones previas	52,71	52,91
Beneficios/Precios función de volumen y aportaciones previas:		
Beneficios/Precios CMOR-Optim-Función volumen y aportaciones	52,61	53,24
Beneficios/Precios CMOR-Sim-Función volumen y aportaciones	52,25	51,37
Beneficios/Precios función de volumen, aportaciones previas y ajustes estacionales:		
Beneficios/Precios CMOR-Optim-Función volumen aportaciones y ajustes estacionales	52,61	53,31
Beneficios/Precios CMOR-Sim-Función volumen aportaciones y ajustes estacionales	52,34	53,00

En la tabla 21 se observa que los beneficios obtenidos al simular las series sintéticas son similares a los resultantes de la simulación con la serie histórica, corroborando las conclusiones que se obtienen sobre la aplicación de las diferentes metodologías y que se comentan en el apartado siguiente.

3.3.6. Conclusiones a la metodología

Se observa que al considerar la política de precios escalonada función de volumen obtenida a partir de los CMOR de la simulación base, los beneficios medios anuales se aproximan mucho a los de la optimización teórica (véase la tabla 18). Por otro lado, la optimización de los precios de los escalones no mejora mucho los resultados. Tampoco las metodologías con inclusión de las aportaciones previas, ya sea estacional o no, y con el volumen o no, aportan mejoras

sustanciales. Curiosamente, tampoco las políticas de precios obtenidas por los mismos procedimientos a partir de los CMOR de la optimización mejoran los resultados de las que se obtienen usando los CMOR de la simulación base.

En este caso, asumir los CMOR medios de forma escalonada del modelo de la simulación como política de precios, da como resultado unos beneficios económicos que mejoran en un 80% los valores que por sí mismo proporciona el modelo de simulación. Estos valores son mejores que los que se obtuvieron cuando se consideró la política de precios con los CMOR del modelo de optimización. Además, los suministros a las demandas son un poco mayores a la de otro tipo de políticas de precios (tabla 22)

Tabla 21 Suministro medio anual por metodologías. Caso sintético

METODOLOGÍA	Sumin. A (hm³)	Sumin. B (hm³)	Suministro Medio Anual (hm³)
Optimización	76,82	44,18	121,00
Simulación con prioridades	83,46	38,08	121,54
Precios escalonados:			
Precios CMOR-Opt	77,34	41,26	118,60
Precios CMOR-Sim	74,39	42,74	117,13
Precios optimizados	74,98	43,26	118,24
Precios CMOR-Aportaciones previas	67,38	41,19	108,57
Precios función de volumen y aportaciones previas:			
Precios CMOR-Opt	75,77	41,24	117,01
Precios CMOR-Sim	79,51	39,97	119,48
Precios función de volumen, aportaciones previas y ajustes estacionales:			
Precios CMOR-Opt	75,93	40,99	116,92
Precios CMOR-Sim	68,16	41,11	109,27

Por tanto, y como conclusión principal obtenida en el análisis del caso sintético, parece que se obtiene una política de precios bastante buena cuando se utiliza la metodología basada en el CMOR de la simulación base, y con un ajuste escalonado en función del volumen embalsado.

Para definir o proponer una política eficiente de precios, primeramente se calculan los Costes Marginales de Oportunidad del Recurso (CMOR) con el modelo de simulación de la gestión del sistema de explotación aplicando las reglas de gestión existentes. Si fuera posible, se realiza el

modelo de optimización económica del sistema tomando como función objetivo la maximización de los beneficios económicos del uso del agua en las unidades de demanda que conformen el mismo. Los resultados de este modelo proporcionan la cota máxima del beneficio que se puede obtener con una política eficiente de precios, y por tanto son útiles para estimar la magnitud de la mejora que se consigue con la política que se proponga.

A continuación, se define una política de precios escalonada en función del volumen embalsado utilizando los valores medios del CMOR en el rango de volúmenes del escalón correspondiente. Para estimar la validez de la política de precios definida, los beneficios obtenidos pueden compararse con el óptimo económico teórico, y en función de los resultados, puede optarse por proponer la política obtenida o intentar refinarla. Para ello pueden usarse metodologías similares a las vistas anteriormente.

Con el fin de encontrar políticas de precios más eficientes, se procede a optimizar los escalones de la función de precios para diferentes rangos de volumen almacenado en el embalse. También puede tomarse en cuenta la serie de aportaciones al sistema y analizar los CMOR de los modelos de simulación y optimización para umbrales de volúmenes anuales aportados, en vez de volúmenes almacenados, y generar los CMOR promedios correspondientes a los mismos. Este tipo de análisis mejora los beneficios económicos que se tienen en el modelo de simulación, aunque en la práctica será difícil considerar volúmenes de aportaciones en vez de volúmenes embalsados, ya que estos últimos son los que se utilizan en el suministro del recurso a los usuarios.

Por otro lado, el proporcionar políticas de precios que dependan del estado previo del sistema o de periodos estacionales, hacen más complejo el cálculo y no proporcionan una mejora sustancial en los beneficios económicos por el uso del agua.

Finalmente, pueden realizarse series sintéticas de la serie de aportaciones históricas y realizando con cada una de ellas los cálculos para las diferentes políticas de precios previamente mencionadas. Se toma entonces el valor medio de los beneficios obtenidos con cada serie para cada política y se comparan entre ellas. Se observa que en todos los casos, se mejoran los beneficios económicos por el uso del recurso.

3.4. Aplicación de la metodología a la cuenca del Mijares

De acuerdo a los resultados obtenidos para el caso sintético, se aplicó la metodología descrita anteriormente, con el fin de proponer una política de precios eficiente para el Sistema de Explotación del río Mijares.

3.4.1. Precios escalonados a partir del CMOR en embalses

El CMOR calculado para el embalse Arenós se ha utilizado como base para definir una política eficiente que incentive la eficiencia económica en la gestión del Sistema de Explotación del río Mijares. El CMOR se clasificó de acuerdo a diferentes rangos de volúmenes. Para esos rangos, se obtuvo el valor promedio del CMOR y se definieron políticas escalonadas de precios iguales al Coste Marginal de Oportunidad del Recurso (figura 87) para los modelos de simulación de la gestión y de optimización económica.

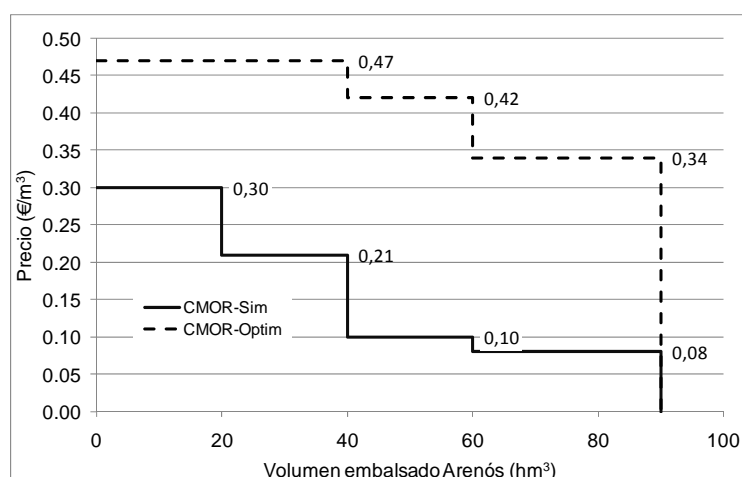


Figura 87. Políticas de precios derivadas del CMOR de simulación y de optimización económica. Mijares

Precios escalonados usando los CMOR de simulación. La simulación con este tipo de política de precios se realizó considerando restricciones al suministro de las demandas en función de la suma de los volúmenes embalsados en Arenós y Sichar. Los factores de restricción se han calculado con base en la curva de demanda económica del uso correspondiente.

En la figura siguiente puede observarse que el suministro a los Riegos Tradicionales disminuye ligeramente con respecto a la simulación, aumentando significativamente en los Riegos de M^a Cristina y Canal de la Cota 100 (figura 88), obteniéndose con esta política de precios un acercamiento al techo de eficiencia obtenido con la optimización teórica.

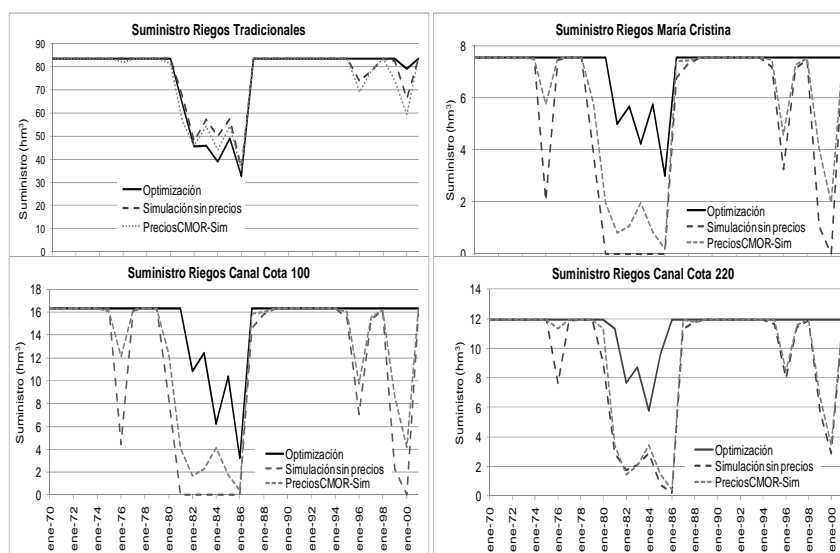


Figura 88. Suministros a las demandas. Precios del CMOR de simulación

Los beneficios medios totales en los riegos mixtos son mayores a los de la simulación penalizando un poco a los Riegos Tradicionales (figura 89).

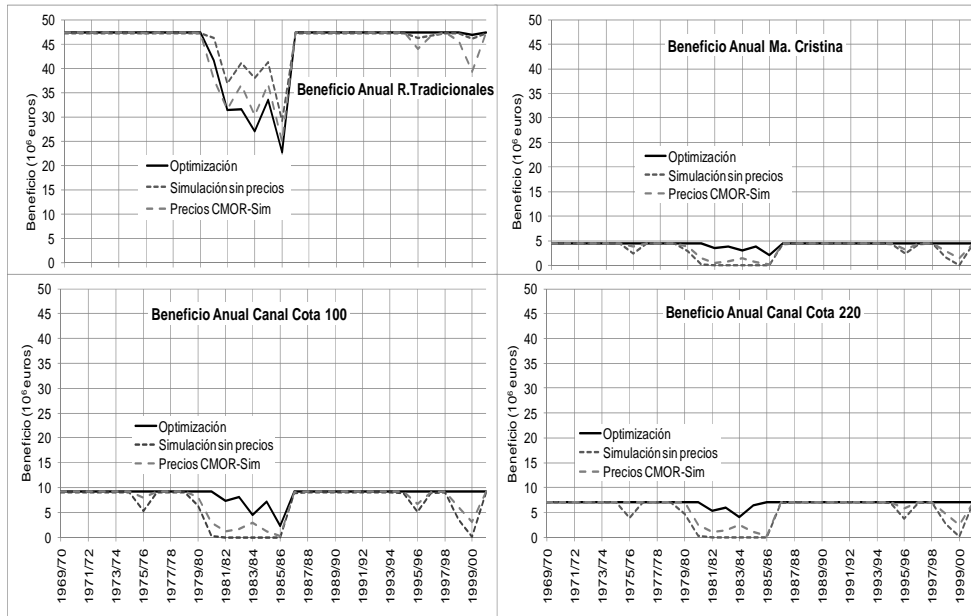


Figura 89. Beneficios medios anuales por uso. Precios del CMOR de simulación

Precios escalonados usando los CMOR de la optimización. Al simular la política de precios obtenidos a partir de los CMOR promedio del modelo de optimización para distintos rangos de volumen embalsado, los suministros (figura 90) tienden a ser menores que los que proporciona el modelo de simulación con prioridades (sin precios), penalizándose de igual manera a los Riegos Tradicionales.

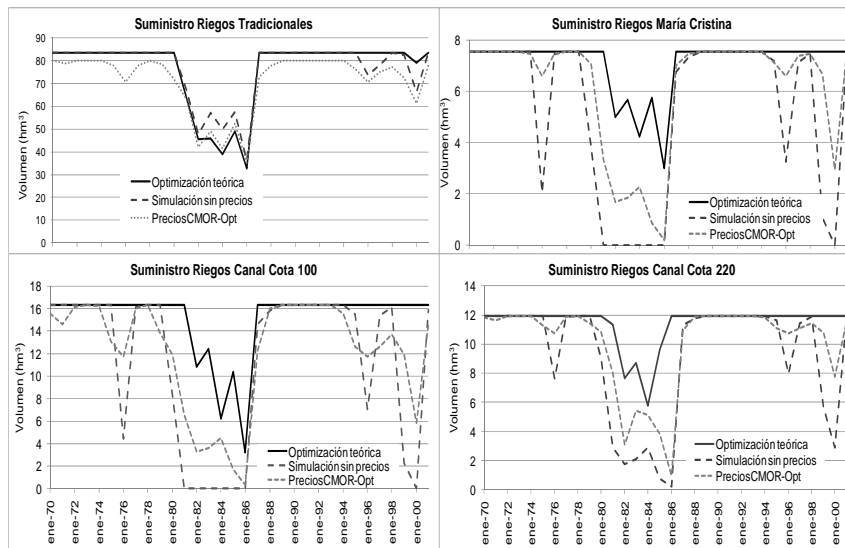


Figura 90. Suministros a las demandas. Precios del CMOR de la optimización

Los suministros resultantes se aproximan más a los obtenidos con el modelo de optimización económica (tabla 23).

Tabla 22. Suministro medio anual. Precios escalonados

Política	Tradicionales (hm ³)	Ma. Cristina (hm ³)	CC100 (hm ³)	CC220 (hm ³)	Total (hm ³)
Optimización económica	76,36	7,10	15,09	11,42	109,97
Simulación con prioridades (sin precios)	76,68	5,20	11,23	9,14	102,25
Precios escalonados					
Precios CMOR-Sim. Función volumen	75,05	5,85	12,63	9,48	103,01
Precios CMOR-Opt. Función volumen	71,28	6,15	12,18	10,07	99,68

El incremento de suministro y su diferente distribución temporal se traduce en mayores beneficios medios anuales que los obtenidos con el CMOR de la simulación (Figura 91).

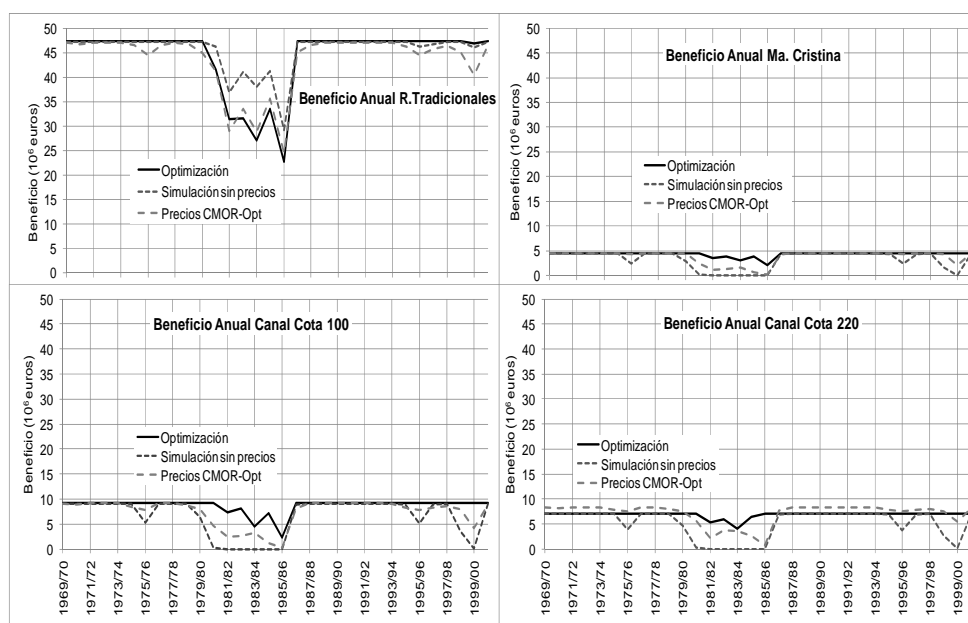


Figura 91. Beneficios medios anuales por uso. Precios del CMOR de optimización

En la tabla 24 puede observarse que efectivamente los beneficios mayores utilizando políticas de precios escalonados corresponde a los basados en los promedios del CMOR de la optimización para distintos rangos de volumen de embalse, aproximándose notablemente a los beneficios del propio modelo de optimización económica.

Tabla 23. Beneficio medio anual. Precios escalonados. Mijares

Política	Tradicionales (mill. de €)	Ma. Cristina (mill. de €)	CC100 (mill. de €)	CC220 (mill. de €)	Total (mill. de €)	Benef.Tot (mill. de €)
Optimización económica	44,38	4,28	8,65	6,89	64,19	2054,09
Simulación sin política de precios	45,56	3,20	6,59	5,08	60,43	1933,79
Precios escalonados						
Precios CMOR Sim. Función volumen	44,24	3,55	7,32	5,76	60,88	1948,04
Precios CMOR Opt. Función volumen	43,49	3,75	7,41	7,05	61,70	1974,32

3.4.2. Precios escalonados óptimos

Las políticas de precios obtenidas con los CMOR de la simulación y de la optimización se sometieron a un proceso de mejora por aproximaciones con el fin de encontrar políticas más eficientes que las descritas en los párrafos anteriores. Se realizaron 13 diferentes combinaciones de políticas de precios a partir de los CMOR de la simulación y 9 para el caso de los CMOR de la optimización. Cada una de esas políticas conserva tres escalones mostrándose como ejemplo algunas de ellas en la figura 92.

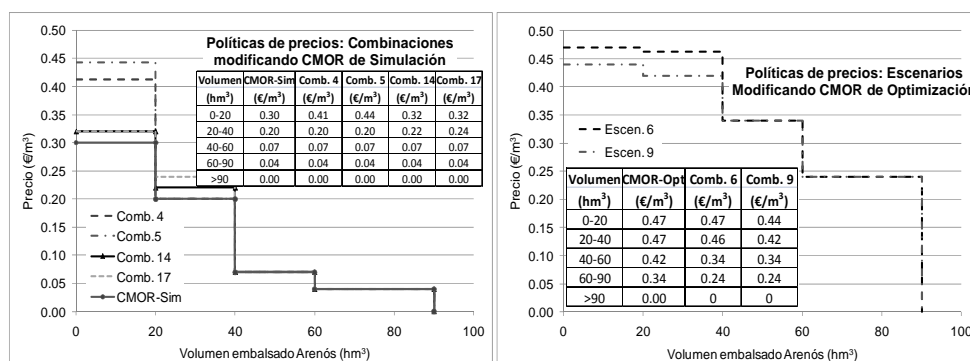


Figura 92. Políticas de precios CMOR óptimos

Los suministros obtenidos con las políticas mostradas en la figura 92 son superiores a los proporcionados por las políticas de precios escalonados descritos en el apartado anterior, aproximándose más a los que proporcionó el modelo de optimización económica teórica (tabla 24, compárese con tabla 22).

Tabla 24 Suministro medio anual. Precios escalonados óptimos

Política	Tradicionales (hm ³)	Ma. Cristina (hm ³)	CC100 (hm ³)	CC220 (hm ³)	Total (hm ³)
Optimización económica	76,36	7,10	15,09	11,42	109,97
Simulación con prioridades (sin precios)	76,68	5,20	11,23	9,14	102,25
Precios escalonados óptimos					
Combinación 6	79,87	7,54	15,99	11,87	115,27
Combinación 9	71,70	6,14	12,15	9,81	99,80
Combinación 4	74,61	5,87	12,58	9,62	102,88
Combinación 5	74,46	5,88	12,60	9,65	102,59
Combinación 14	75,04	5,86	12,64	9,48	103,02
Combinación 17	75,03	5,85	12,62	9,47	102,97

Los beneficios obtenidos con las políticas de precios optimizados a partir del CMOR de la simulación son mayores a los de la propia simulación y a los obtenidos con la política de precios con CMOR de la simulación (Tabla 25).

Tabla 25 Beneficio medio anual. Precios escalonados óptimos. Mijares

Política	Tradicionales (mill. €)	Ma. Cristina (mill. €)	CC100 (mill. €)	CC220 (mill. €)	Total (mill. €)	Benef.Tot (mill. €)
Optimización económica	44,38	4,28	8,65	6,89	64,19	2054,09
Simulación sin precios	45,56	3,20	6,59	5,08	60,43	1933,79
Precios óptimos						
Combinación 6	43,37	3,80	7,48	6,22	60,87	1947,86
Combinación 9	43,65	3,74	7,38	6,09	60,86	1947,41
Combinación 4	44,12	3,57	7,34	5,86	60,89	1948,53
Combinación 5	44,07	3,58	7,36	5,89	60,89	1948,51
Combinación 14	44,18	3,56	7,37	5,83	60,95	1950,47
Combinación 17	44,18	3,56	7,37	5,76	60,88	1948,23

3.4.3. Conclusiones en la determinación de políticas eficientes de precios para la cuenca del Mijares.

Las políticas de precios que se simularon para la cuenca del Mijares mejoran los beneficios totales (Tabla 26) del uso del agua en la cuenca con respecto a los resultados económicos de la simulación de la gestión actual. La política de precios escalonada derivada de los CMOR de la optimización (precios CMOR-Opt. En función del volumen embalsado) ha proporcionado los mejores beneficios económicos, mejorando en un 2% los beneficios que proporciona la simulación sin precios (gestión actual). Las políticas propuestas, además de dar mayores beneficios económicos, hacen más eficiente el suministro del recurso a las demandas.

La combinación 14, cuya política está basada en los CMOR de la simulación pero incrementados en el rango de mayor volumen almacenado en el embalse de Arenós (véase la figura 92), proporcionó el mayor beneficio total respecto a los demás escenarios probados con precios escalonados.

Con todo, los resultados muestran que el sistema del Mijares es poco sensible a la variación de precios para los rangos de volúmenes considerados. En forma desagregada, los mayores beneficios son para los Riegos Tradicionales los cuales ya tienen la prioridad sobre los Riegos Mixtos.

Tabla 26. Beneficio medio anual. Mijares

Política	Tradicionales (mill. €)	Ma. Cristina (mill. €)	CC100 (mill. €)	CC220 (mill. €)	Total (mill. €)	Benef.Total (mill. €)
Optimización económica	44,38	4,28	8,65	6,89	64,19	2054,09
Simulación sin precios	45,56	3,20	6,59	5,08	60,43	1933,79
Precios escalonados						
Precios CMOR Sim	44,24	3,55	7,32	5,76	60,88	1948,04
Precios CMOR Opt	43,49	3,75	7,41	7,05	61,70	1974,32
Precios escalonados óptimos						
Combinación 6	43,37	3,80	7,48	6,22	60,87	1947,86
Combinación 9	43,65	3,74	7,38	6,09	60,86	1947,41
Combinación 4	44,12	3,57	7,34	5,86	60,89	1948,53
Combinación 5	44,07	3,58	7,36	5,89	60,89	1948,51
Combinación 14	44,18	3,56	7,37	5,83	60,95	1950,47
Combinación 17	44,18	3,56	7,37	5,76	60,88	1948,23

La Combinación 9, obtenido con los CMOR de optimización pero con un escalón adicional (véase la figura 92), presenta los beneficios más bajos. Esto sucede porque se disminuyeron los precios para el rango menor de volumen embalsado en Arenós y esto provoca ineficiencia económica en el sistema, a pesar de tener precios mucho mayores que los de la simulación, además de suministrar menor cantidad promedio del recurso en todas las unidades de demanda.

Se puede afirmar por tanto que no necesariamente aumentar los precios implicará una mejora en los beneficios totales del sistema, sino que es conveniente realizar este tipo de análisis y con los resultados de las posibles políticas de precios tomar la decisión conjuntamente con todos los agentes involucrados en la gestión del sistema de recursos hídricos.

Tabla 27. Suministro medio anual a las demandas .Mijares

Política	Tradicionales (hm³)	Ma. Cristina (hm³)	CC100 (hm³)	CC220 (hm³)	Total (hm³)
Optimización teórica	76,36	7,10	15,09	11,42	109,97
Simulación sin precios	76,68	5,20	11,23	9,14	102,25
Precios escalonados					
Precios CMOR Sim. Función volumen	75,05	5,85	12,63	9,48	103,01
Precios CMOR Opt. Función volumen	71,28	6,15	12,18	10,07	99,68
Precios escalonados óptimos					
Combinación 6	79,87	7,54	15,99	11,87	115,27
Combinación 9	71,70	6,14	12,15	9,81	99,80
Combinación 4	74,61	5,87	12,58	9,62	102,88
Combinación 5	74,46	5,88	12,60	9,65	102,59
Combinación 14	75,04	5,86	12,64	9,48	103,02
Combinación 17	75,03	5,85	12,62	9,47	102,97

4. Conclusiones y líneas futuras de investigación.

Las contribuciones de este objetivo del proyecto INTEGRAME se pueden sintetizar en el desarrollo de metodologías y herramientas para:

- la simulación de diferentes políticas de precios del agua vinculadas a la disponibilidad del recurso o su escasez relativa.
- y la definición de políticas eficientes de precios que incorporen el valor marginal del recurso a escala de cuenca, enviando a los usuarios una señal del valor real del recurso y los costes de oportunidad.

La aplicación de la metodología a dos casos de estudio, el sintético y el del sistema del río Mijares, ha permitido analizar las ganancias en términos de eficiencia económica de la aplicación de diferentes políticas (precios escalonados basados en CMOR de simulación o de optimización, precios dinámicos, precios estacionales, etc.) y extraer algunas conclusiones. A continuación se sintetizan los principales resultados y conclusiones del trabajo, y finalmente se presentan líneas de investigación futuras.

4.1. Metodología y etapas

Desde el punto de vista de la gestión del agua como un bien económico un reto clave es conseguir que se tenga en cuenta de algún modo el coste de oportunidad real del agua en la utilización del recurso. La eficiencia económica en la gestión del recurso exige que se conozcan e incorporen los costes de oportunidad del recurso en las decisiones. Además, las tarifas que incluyen el coste de oportunidad transmiten al usuario una señal de escasez del recurso, incentivando un uso eficiente del mismo. A pesar de la aparente simplicidad del concepto, su aplicación es muy compleja. Sin embargo, la Directiva Marco del Agua (DMA) europea exige la implementación de una política de precios del agua que por un lado, contribuya a la recuperación de los costes de los servicios del agua (y por costes se entiende no sólo los financieros, sino también los ambientales y del recurso), y por otro, a una gestión más eficiente del recurso contribuyendo al logro de los objetivos ambientales de la DMA.

Poner precio al recurso hídrico siempre es un asunto trascendente para promover una asignación y un uso eficiente de un recurso escaso. En la literatura relativa a políticas de precios del agua se señala la incompatibilidad entre las recomendaciones de políticas de precio de tipo marginal que proporciona la teoría microeconómica y la política de precios con costes medios que se utiliza en la industria del agua en forma práctica. Generalmente las políticas de precios con costes medios están enfocadas hacia el suministro a nivel de usuario. Pero existe poca o nula investigación relativa a políticas de precios con costes marginales a nivel de cuenca.

Se ha presentado una metodología y herramientas para simular el efecto de distintas políticas de precios relacionadas con la disponibilidad del recurso en la gestión del recurso, y analizar el impacto económico (agregado e individual sobre cada demanda) de las mismas. Se ha desarrollado también un método para definir y simular políticas eficientes de precio del

recurso basadas en la estimación sistemática del coste de oportunidad del recurso (CMOR). Se ha descrito la aplicación de la metodología y herramienta a un caso sintético y posteriormente a la gestión del sistema del río Mijares.

La metodología parte del cálculo del CMOR (Coste Marginal de Oportunidad del Recurso). El CMOR en un punto del sistema y en un instante determinado se calcula como el coste que supone para el sistema el disponer de una unidad menos de recurso en ese punto y en ese instante. Este valor es un indicador de la escasez de agua en el sistema y de la disposición de pago del sistema productivo y de los usuarios finales del agua para mitigar esa escasez y varía de forma dinámica en el espacio y el tiempo. La caracterización económica del sistema se hace mediante curvas económicas de demanda para cada uso (que expresan la relación entre el agua suministrada y su valor marginal) y costes variables de operación del sistema. La precisión en la definición de estas curvas de demanda, asumidas como información exógena para el modelo, es fundamental en la fiabilidad de los resultados del modelo. El beneficio para un cierto volumen de agua disponible es igual al área bajo las curvas de demanda hasta ese nivel de suministro. Integrando desde un nivel genérico de agua disponible hasta el nivel de suministro máximo se obtiene la expresión del *coste económico de escasez* en función del nivel de suministro.

La estimación del CMOR se hace mediante dos enfoques: simulación de la gestión según prioridades y *modus operandi* actual y optimización económica. El primer enfoque considera la simulación hidro-económica de la gestión del sistema, empleando para ello dos módulos del Sistema de Apoyo a la Decisión AquaTool: el módulo de simulación (SimGes) y el de evaluación económica (EcoWin). Los resultados de la asignación mensual del recurso simulados en SimGes, junto con las funciones de valor económico del agua en los distintos usos, y de costes de operación, son inputs de entrada en el modelo de evaluación económica, que aproxima el valor del CMOR mediante comparación de los resultados económicos de la simulación del caso base con los de las simulaciones de la gestión del sistema disponiendo de una unidad adicional de agua en cada período de tiempo en el lugar seleccionado. El enfoque de optimización económica maximiza el valor económico neto del uso del agua durante el período de optimización. Se optimiza a nivel mensual sobre series hidrológicas extensas, representativas del rango de eventos hidrológicos probables en el futuro, obteniendo el flujo del agua en el sistema durante el período optimizado y los resultados económicos asociados. La *función objetivo* a minimizar representa el coste total para el período de optimización, incluyendo como costes las pérdidas económicas derivadas de la escasez o déficit en el suministro a las demandas, sumadas a los costes variables de operación del sistema. En el modelo de optimización, programado en GAMS, los valores óptimos de las variables del problema dual (precios sombra) nos definen directamente el cambio en el valor óptimo de la función objetivo como consecuencia de un cambio marginal en el término independiente de la restricción correspondiente a cada variable dual. Como la función objetivo representa el beneficio económico agregado del uso del agua, los precios sombra obtenidos para las restricciones de balance en embalse representan la variación de beneficio neto por unidad adicional de agua en el sistema, y por tanto, las series de coste (valor) marginal del recurso en ese embalse.

Para el análisis económico en cada sistema se han completado las siguientes etapas:

- Puesta a punto de un modelo de simulación de la gestión del sistema de recursos hídricos en cuestión, incorporando la información relevante sobre la hidrología, infraestructura, reglas de operación y criterios de asignación (ej. prioridades) y demanda
- Caracterización económica del sistema mediante curvas económicas de demanda para los usos de cada unidad de demanda y costes variables de operación. Los resultados económicos son sensibles a las curvas de demanda utilizadas, con lo que esta información, exógena a los modelos desarrollados, resulta muy relevante. Su determinación en algunos casos requeriría de más datos, de modelos específicos y de un análisis más completo del que se ha podido emplear en los casos de estudio del presente trabajo.
- Simulación de la gestión del sistema y análisis de suministros, déficits y costes de escasez (pérdidas de beneficio por déficit) en el suministro a las distintas demandas (individual y agregado)
- Determinación de la evolución del CMOR en los embalses principales del sistema mediante simulación iterativa de la gestión (comparando el escenario base con escenarios con una unidad adicional de agua a lo largo del tiempo).
- Puesta a punto del modelo de optimización económica de la gestión, incluyendo la función objetivo económica y las restricciones correspondientes (esto es, restricciones de balance en nudos, embalses y acuíferos; de capacidad máxima en infraestructura; de caudales o volúmenes mínimos por motivos ambientales, legales, operativos o recreativos; ecuaciones de procesos físicos, filtración y evaporación en embalses y conducciones, retornos, relación río-acuífero, etc.; y restricciones de signo de las variables).
- Optimización económica de la gestión y análisis de beneficios, suministros, déficits y costes de escasez. Este resultado representaría el techo o máximo beneficio económico alcanzable en la gestión del recurso.
- Determinación de la serie temporal de CMOR de optimización mediante los precios sombra de las restricciones de balance en el embalse.
- Análisis de los resultados del CMOR de simulación y de optimización, incluyendo estadísticas del mismo (promedios, desviaciones típicas) y clasificación de valores de CMOR para distintos rangos de volumen de embalse.
- Análisis de sensibilidad del CMOR a las curvas de demanda utilizadas
- Propuestas de políticas eficientes de precios, con base en los CMOR de los modelos de simulación y de optimización, teniendo en cuenta diferentes rangos de volumen de embalse e incluso aportaciones hidrológicas al sistema.

- Simulación de las diferentes políticas de precios (mediante el modelo SIMGES, con transformación precios-restricciones a través de los indicadores de alarma).
- Análisis de resultados económicos para distintas políticas de precios y determinación de la mejora de beneficios alcanzada respecto al escenario de gestión sin precios y al techo de la optimización económica

4.2. Políticas de precios y CMOR. Conclusiones de la aplicación a los casos de estudio

Como norma generalizada, para definir políticas eficientes de precios primeramente ha de calcularse el CMOR en los embalses principales con el modelo de simulación de la gestión del sistema de explotación. Si es posible, se desarrolla el modelo de optimización del sistema tomando como función objetivo la maximización de los beneficios económicos del uso del agua en las unidades de demanda que conformen al sistema. Para este modelo, se calculan los beneficios (y costes de escasez) y los CMOR en embalses. La distancia entre los beneficios simulados con la gestión actual y los beneficios máximos obtenidos en la optimización nos muestran el margen de ganancia sobre el que pueden actuar las políticas de precios.

Se pueden definir políticas de precios eficientes con los escalones de precios correspondientes a valores promedios del CMOR de simulación y de optimización para distintos rangos de volumen de embalse. En el caso de estudio sintético, asumir precios escalonados derivados de los CMOR promedios del modelo de la simulación conduce a unos beneficios económicos que ya capturan un 80% de la distancia que separa la gestión sin política de precios de la gestión optimizada teórica. En este caso, se da la circunstancia de que estos valores resultaron mejores incluso que los que se obtuvieron cuando se consideró la política de precios derivada de los CMOR del modelo de optimización. Sin embargo, en el caso de estudio del sistema del río Mijares los mayores beneficios se obtuvieron para la política de precios derivada de los CMOR de optimización. El que resulte mejor una política de precios u otra depende de muchos factores que son inherentes a la propia complejidad del sistema. Entre ellos podemos citar la estructura de dependencia temporal de las series de aportaciones y las propiedades estadísticas de las sequías del sistema, la configuración y características de la infraestructura del sistema, la capacidad de regulación, etc. Por tanto, a priori no es posible saber si una política de precios derivada del CMOR de optimización o de simulación ha de ser económicamente más eficiente. Como se ha comentado, la comparación de beneficios entre la simulación de la gestión y la optimización económica nos permite ver el margen de ganancia de eficiencia. Si los resultados obtenidos con una determinada política de precios no mejoran mucho la eficiencia, es posible analizar entonces distintas alternativas.

Con el fin de encontrar políticas de precios más próximas al óptimo teórico se pueden realizar diversas tentativas de mejora. Para ello se procedió a optimizar los valores medios escalonados del CMOR de la simulación, para diferentes rangos de volumen almacenado en el embalse. También se pueden incorporar los valores de las aportaciones previas al sistema en la definición de los precios. Esto último puede ser especialmente importante en la corrección de precios para mejorar su eficiencia en sistemas con alta dependencia temporal en las series de aportaciones (identificada por el autocorrelograma de la serie), ya que en este caso las

aportaciones previas proporcionan una información relevante sobre el riesgo de sequía en los meses posteriores.

Por otro lado, definir políticas de precios que dependan del estado previo del sistema o de periodos estacionales, hacen más complejo el cálculo. En el caso sintético no proporcionan una mejora sustancial en los beneficios económicos por el uso del agua. Sin embargo, el definir un precio constante al principio de cada año o estación según la disponibilidad de recursos tiene la ventaja práctica de proporcionar una mayor seguridad a los usuarios a la hora de tomar decisiones y programar actividades dependientes del uso del agua.

Finalmente, pueden generarse series sintéticas a partir de la serie de aportaciones históricas mediante un modelo estocástico (por ejemplo, un modelo ARMA de aportaciones) y simular con cada una de ellas las diferentes políticas de precios. En este caso se puede usar con más propiedad el valor medio de los beneficios obtenidos con cada serie como representativo de la contribución de la política de precios a la mejora de la eficiencia económica.

La metodología de simulación de políticas de precios es novedosa y puede incorporarse en cualquier modelo de simulación de la gestión de un sistema de recursos hídricos para el que se definan las correspondientes curvas de demanda. Mediante el uso de los indicadores de alarma del módulo SimGes del SAD Aquatool, se transforman los precios en restricciones de suministro a las demandas del sistema. La política de precios propuesta queda así definida como una serie de restricciones que al simular la gestión producirán cambios en el suministro a las demandas, información a partir de la cual se puede estimar los beneficios de la aplicación de esa política.

4.3. Líneas futuras de investigación.

La propuesta metodológica para definir políticas eficientes de precios puede ampliarse investigando sobre los aspectos siguientes:

- Incluir políticas en sistemas complejos incorporando la interacción río-acuífero y el uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas. La mayoría de los sistemas en explotación cuentan con acuíferos en explotación que están relacionados con el sistema superficial de la cuenca. Valorar el coste del recurso en sistemas complejos, como lo es la cuenca del río Segura –por poner un ejemplo- es de suma importancia para que los usuarios sean incentivados a mejorar la eficiencia de su propia infraestructura de suministro. Al considerar políticas eficientes de precios tomando en cuenta todos los elementos que conformen dicho sistema, producirá incentivos de eficiencia de gestión y beneficios mayores en el uso del recurso.
- Profundizar en el análisis de la caracterización económica de los sistemas de recursos hídricos. En la bibliografía actual existe mucha información referente al cálculo de las curvas de demanda económica para distintos usos en función de la información disponible y los objetivos del estudio. Como ya se ha comentado, la precisión en la definición de estas curvas de demanda, asumidas como información exógena para el modelo, es fundamental en la fiabilidad de los resultados del modelo. Aunque en este estudio se hace una “idealización” de la información aportada por las curvas de demanda, es necesario analizar y considerar las limitaciones e incertidumbres en la caracterización económica de los sistemas mediante curvas económicas de demanda.

Entre ellas, la adecuación de las distintas escalas temporales que intervienen (anual y mensual) y el tema de los efectos acumulados en el tiempo de los déficits en el suministro. Otros aspectos relevantes para la valoración económica de la gestión (por ejemplo, el papel de la tasa de descuento; beneficios y costes secundarios e indirectos; las externalidades; el papel de los mercados, etc.) han quedado fuera de los objetivos de este estudio pero sin duda sería importante abordarlos en una extensión de este trabajo.

- Estudiar la contribución de las políticas de precios al logro del buen estado de las masas de agua establecidos por la DMA. En este trabajo los requerimientos ambientales han sido tratados como restricciones a la gestión (así son considerados por la actual Ley de Aguas y en cierto modo por la DMA), y son tenidas en cuenta de esta forma en la definición de los precios a partir del CMOR. Hoy en día existen muchas técnicas de valoración de bienes ambientales sin mercado que permiten definir un valor económico del agua para mejorar las condiciones ambientales. Se puede explorar también el papel de estas funciones económicas en el diseño de precios eficientes.
- Adaptar el módulo de simulación SimGes del SAD AQUATOOL de manera que pueda incorporar de manera directa y flexible diferentes políticas de precios que el investigador proponga utilizar para un caso en particular.
- Integrar los conceptos de costes financieros, del recurso y ambientales en las políticas de precios.

5. Referencias

- AEAS, 1998. El Suministro de agua potable y saneamiento en España. VI Encuesta Nacional. Asociación Española de Abastecimiento y Saneamiento.
- AEAS, 2002. El Suministro de Agua Potable y Saneamiento en España. VIII Encuesta Nacional. Asociación Española de Abastecimiento y Saneamiento
- Álvarez, E., M. Pulido -Velázquez, J. Andreu, 2006. Estimación del Coste Marginal de Oportunidad del Recurso mediante modelos hidro-económicos a escala de Cuenca. Aplicación al Sistema del río Mijares en España. *XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Ciudad Guyana, Venezuela.
- Andreu, J. y A. Sahuquillo, 1987. Efficient aquifer simulation in complex systems. *Water Resources Planning and Management*, 113(1), 110-129.
- Andreu, J., J. Capilla y E. Sanchis, 1996. AQUATOOL, a generalized decision support system for water resources planning and management. *Journal of Hydrology* (177) 269-291.
- Andreu, J., A. Solera, J. Capilla, F. Ferrer, 2004. *Modelo SIMGES de Simulación de la Gestión de Recursos Hídricos, incluyendo Utilización Conjunta. Manual de usuario*. Servicio Publicaciones, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Arbués, F., R. Barberán e I. Villanúa, 2004. Price Impact on Urban Residential Demand: A Dynamic Panel Data Approach. *Water Resources Research* (40).
- ARKI, 2002. GAMS/CONOPT. ARKI Consulting Development in *GAMS the Solver Manual*. Development Corporation. Washington DC, USA.
- Arrojo, A., 1999. El valor económico del agua. Revista *CIDOB d'Afers Internacionals*, 45-46.
- Assimacopoulos, D., A. Schuman, E. Todini, J.M. Berland y E. Feinerman, 2001. The WaterStrategyMan Project. The WaterStrategyMan Project. Disponible en: <http://environ.chemeng.ntua.gr/wsm/>.
- Assimacopoulos, D., B. Barraque, J.M. Berland, E. Feinerman, P. Katsiardi y E. Manoli, 2005. Estimation of the level of cost recovery of different scenarios of water allocation in arid areas – an easy-to-implement approach. París, Francia.
- Azqueta, D., 2007. *Introducción a la Economía Ambiental*. McGraw Hill/Interamericana de España; 2ª edición. 456 pp. Aravaca, Madrid.
- Bauer, C.J., 2004. *Canto de Sirenas. El derecho de aguas chileno como modelo para reformas internacionales*. RFF Press. Bakeaz. Centro documentación estudios para la paz. 1ª edición. 237 pp.
- Baumann, D., J. Boland y M. Hanemann, 1997. *Urban Water Demand Management and Planning*. McGraw-Hill, Inc., NY. 1ª edición. 350 pp.
- Bazaraa, M. S.; J. Jarvis y H. Sherali, 2009. *Linear Programming and Network Flows*. Wiley & Sons Publication, New Jersey. 768 pp.
- Bear, J. y O. Levin, 1970. Optimal Utilization of an Aquifer as an Element of a Water Resource system. Proceeding of the *Selected Works in Operations Research*. Shechter M, & Baer, J, ed. Operations Research Center and Water Resources Center, USA.

- Blanco Fonseca, M., 1999. *La economía del agua: análisis de políticas de modernización y mejora de regadíos en España*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- Blanco, M., 2008. Decision Support System to Assess Environmental and Socioeconomic Effects of Water Pricing Policies in Agriculture. En Pulido et al. eds., *Hydro-economics models in Water Management: Applications to the EU Framework Directive*. Springer, Environment and Policy series (por publicar).
- Bookchin, M., 1974. *The limits of the city*. Harper and Row. 147 pp.
- Booker, J., R. Young, 1994. Modeling intrastate and interstate markets for Colorado River water resources. *Journal of Environmental Economic Management* 26(1) 66-87.
- Braat, L., W. Lierop, 1987. Integrated economic-ecological modeling. En *Economic-ecological Modeling (Studies in regional science and urban economics)*. Elsevier Science Ltd. 1st edition, 342 pp. North-Holland, Amsterdam.
- Braden, J.B., 2000. Value of valuation: Introduction. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 126 (6)
- Briscoe, J., 1996. Water as an economic good. The idea and what it means in practice. Proceedings of the *World Congress of the International Commission on Irrigation and Drainage (ICID)* El Cairo, Egypt.
- Brooke, A., D. Kendrick, A. Meeraus, y R. Raman, 1998. *GAMS:A User's Guide*. Scientific Press. Red Wood City, California, USA.
- Brouwer, R., 2004. The concept of environmental and resource cost. Lessons learned from ECO2. *En Environmental and Resource Cost and the Water Framework Directive. An overview of European practices*. RIZA Working Paper 2004 112x. Amsterdam, Holland.
- Brouwer, R., 2006. Practical working definition Environmental and Resource Costs and Benefits. Institute for Environmental Studies, Vrije Universiteit, Amsterdam.
- Brouwer, R., D. Barton, F. Oosterhuis., 2007. Economic Methods, models and instruments for the Water Framework Directive. Conference at Vrije Universiteit, Amsterdam.
- Burt, O., 1964. The economics of conjunctive use of ground and surface water. *Hilgardia* 36(2) 31-111.
- Cai, X., D.C. McKinney, L.S. Lasdon, 2003. Integrated hydrologic-agronomic-economic model for river basin management. *Journal of Water Resources Planning and Management* 129(1) 4-17.
- Calatrava, J., 2007. Curvas económicas de demanda en las UDAs de la cuenca del Segura. Informe para INITEC y la CHS. Murcia, España: Universidad Politécnica de Cartagena.
- CEDEX, 1991. Anexos 9 y 14: Determinación de las dotaciones de riego en los planes de regadío de la cuenca del Júcar.
- CHJ, 1997. Plan Hidrológico del Júcar, Anexo IV Sistemas de Explotación. Valencia, España.
- CHJ, 2005. Informe para la Comisión Europea sobre los artículos 5 y 6 de la Directiva Marco del Agua. Demarcación hidrográfica del Júcar. Valencia, España.
- CHS, 1998. Plan Hidrológico del Segura. Memoria. Ministerio del Medio Ambiente.

- CHS, 2006. Determinación y análisis del coste del recurso de los servicios del agua y de restricciones ambientales en la cuenca del Segura. Estudio realizado para la Confederación Hidrográfica del Segura. INITEC-UPV, Valencia, España.
- Cleveland, W.S., S.J. Devlin, 1988. Locally-Weighted Regression. An approach to regression Analysis by Local Fitting. *Journal of the American Statistical Association* 84 (403): pp. 596-610.
- Cobb, C.W., P.H. Douglas, 1928. A Theory of Production. *American Economic review* 18 (supplement): 139-165.
- Colino Sueiras, Martínez Paz, 2002. El Agua en la Agricultura del sureste español: productividad, precio y demanda. No. 2 de la *Colección Mediterráneo Económico*. "La Agricultura mediterránea en el siglo XXI".
- Collazos, G., 2004. *Sistema soporte de decisión para evaluación y optimización económica de sistemas de recursos hídricos*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- Collazos, G., M. Pulido-Velázquez, J. Andreu, 2004. SSD para el análisis económico de sistemas de recursos hídricos. *IV Congreso Ibérico de Gestión y Planificación del Agua*. Tortosa, España.
- Comisión Europea, 2000. *Comunicación de la Comisión al Consejo, al Parlamento Europeo y al Comité Económico y Social*. COM (2000) 477, pp 13-24. Bruselas, Bélgica.
- DG Eco 2, 2004. Assessment of Environmental and Resource Costs in the Water Framework Directive. The Netherlands.
- DGHO, 2003. Asistencia Técnica. Valoración del coste de uso de las aguas subterráneas en España.
- Díaz, G. e I. Brown, 1997. Aquarius: A general model for efficient water allocation in river basins. *Proceedings of 27th Congress of the International Association for Hydraulic*. San Francisco, CA: American Society of Civil Engineers, New York, USA.
- Dinar, A. y J. Letey, 1996. *Modeling Economic Management and Policy Issues of Water in Irrigated Agriculture*. Praeger Publishers. 1st edition, 264 pp. USA.
- Dinar, A., M. Rosegrant y R. Meinzen-Dick, 1997. Water allocation mechanisms. Principles and examples. World Bank, Policy research Paper No. 1779.
- DMA, 2000. Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo. 23 de octubre de 2000. PE-CONS 3639/00. Bruselas, Bélgica.
- Domenico, P., D.V. Anderson y C.M. Case, 1968. Optimal Groundwater Mining. *Water Resources Research* 4(2).
- Dracup, J., K. Lee, E. Paulson, 1980. On the statistical characteristics of drought events. *Water Resources Research* 16(2) 289-296.
- Draper, M. Jenkins, K. Kirby, J.R. Lund y R.E. Howitt, 2003. Economic-Engineering Optimización for California Water Management. *Journal of Water Resources Planning and Management* 129(3) 155-164.
- Draper, A. y J. Lund, 2004. Optimal Hedging and Carryover Storage Value. *Journal of Water Resources Planning and Management* 130(1) 83-87.
- Fernández Pérez D., 1995. Gestión del agua urbana. Madrid, España. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

- Fisher, F.M., Annette Huber-Lee, Ilan Amir, et al., 2005. *Liquid Assets: An Economic Approach for Water Management and Conflict Resolution in the Middle East and Beyond*. RFF Press, 256 pp. Washington DC, U.S.A.
- García Mollá, M., 2000. *Análisis de la influencia de los costes en el consumo de agua en la Comunidad Valenciana. Caracterización de las entidades organizativas para riego*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- García Valiñas, M., 2002. La demanda de agua en las ciudades: estimación comparada para tres municipios españoles. *Memorias del III Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del Agua. La Directiva Marco del Agua, realidades y futuros*. Sevilla, España: L. del Moral (ed.), 232-253.
- García Valiñas, M., 2006. Demanda Urbana de Agua en la Región de Valencia. Un enfoque econométrico. En *Jornadas Internacionales sobre Modelos HidroEconómicos y Herramientas para la implementación de la Directiva Marco europea del Agua*. Valencia, España.
- Gayoso, J. e A. Iroumé, 2000. Catastro y Localización de Usos Públicos no Extractivos o Usos in situ del Agua. Informe del Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. Chile.
- Gibbons, D.C., 1986. *The Economic Value of Water*. RFF Press. 1st edition, 116 pp.
- Gisser, M. y A. Mercado, 1972. Integration of the agricultural demand functions for water and the hydrologic model of the Pecos Basin. *Water Resources Research* 8(6) 1373-1384.
- Gisser, M. y A. Mercado, 1973. Economic aspects of ground water resources and replacement flows in semiarid agricultural areas. *American Journal of Agricultural Economics* 55 461-466.
- Gleick, P., 2003. Global Freshwater Resources: Soft-Path Solutions for the 21st Century. *Science* 302 1524-1528.
- Görlach, B. y E. Interwies, 2004. Assesing Environmental and Resource Costs in the Water Framework Directive: the Case of Germany. Ecologic Institut fü Internationale und Europäische Umweltpolitik. Berlín, Germany
- Griffin, R.C., 2006. *Water Resource Economics: The Analysis of Scarcity, Policies, and Projects*. The MIT Press. 424 pp.
- Hall, W. y W. Hanemann, 1996. Water rate design based on marginal cost. En *Advances in the economic of environmental economics. Marginal cost rate design and wholesale water markets. Marginal cost rate design and wholesale water markets*. JAI Press, 95-122. Greenwich, Connecticut
- Hanemann, W., 1997. Determinants of urban water use. En *Urban Water Demand Management and Planning*. McGraw-Hill, Inc. New York, pp 31-75.
- Harou, J.J., M. Pulido-Velazquez, D. Rosenberg, J. Medellín-Azuara, J. Lund, and R. Howitt, 2009. Hydro-economic models: Concepts, design, applications, and future prospects. *Journal of Hydrology* (375) 627-643.
- Hazell, P. y R. Norton, 1986. *Mathematical Programming for Economic Analysis in Agriculture*. Macmillan USA. 432 pp

- Heinz, I., 2006. The Economic Value of Water. In *International Workshop on Hydro-economic Modeling and Tools for the Implementation of the European Water Framework Directive*. Valencia, Spain.
- Heinz, I., M. Pulido-Velázquez, J. Lund, y J. Andreu, 2007. Hydro-economic Modeling in River Basin Management: Implications and Applications for the European Water Framework Directive. *Water Resources Management* (21) 1103-1125.
- Heras, G., 2000. Particularidades económicas del agua en España. 6ª Conferencia internacional del seminario permanente "ciencia y tecnología del agua" Economía del agua: hacia una mejor gestión de los recursos hídricos.
- Howe, C., D.R. Shurmeier, and D.W. Shaw, 1986. Innovative approaches to water allocation: the potential for water markets. *Water Resources Research* 22(4) 439-445.
- Howitt, R., 1995. Positive mathematical programming. *American Journal of Agricultural Economics* 2(77) 329-342.
- Iglesias, E., M. Blanco, 2008. New directions in water resources management: The role of water pricing policies. *Water Resources Research*, 44(W06417).
- Jenkins, M.W., 2003. Using Economic loss functions to value urban water scarcity in California. *Journal American Water Works Association*. 95 (2), 58-70
- Johansson, R.C., 2000. *Pricing irrigation water: a literature survey*. World Bank, Rural Development Department. 80 pp.
- Labadie, J., 1997. Reservoir system optimization models. *Water Resources Update* 108(summer) Universities Council on Water resources.
- Lee, T. y A. Juravlev, 1998. *Los precios, la propiedad y los mercados en la asignación del agua*. Comisión Económica para América Latina y Medio Ambiente. 100 pp.
- Ley de Aguas Española, 2003. Canon de control de vertidos contemplado en el artículo 113 del Texto Refundido de la Ley de Aguas (TRLA), aprobado por el Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, y modificado por la Ley 62/2003, de 30 de diciembre, y el Reglamento del Dominio Público Hidráulico (RDPH), aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, y modificado por el Real Decreto 606/2003, de 23 de mayo. Disponible en: <http://www.chj.es/ciudadano/tasasycanones/>
- Ley del Plan Hidrológico Nacional, 2001. Ley 10/2001, de 5 de julio, artículos 22 y 23.
- Lund, J.R., R.E. Howitt, M.W. Jenkins, A.J. Draper, and S. Tanaka, 2001. Improving California Water Management: Optimizing Value and Flexibility. Executive Summary. State of California, USA: University of California.
- Lund, J.R. y J.J. Harou, 2006. How to Build a Regional Hydro-Economic Engineering Model. Proceedings of the *International Workshop on Hydro-Economic Modeling and Tools for Implementation of the European Water Framework Directive*. Valencia, Spain.
- Maestu, J., A. Del Villar, 2006. El sector de los servicios del agua en España: Recuperación de costes y perspectivas financieras. *Ambienta* (59) 6.
- Martínez-Espiñeira, R., 2002. Residential water demand in the Northwest of Spain. *Environmental and Resource Economics* 21(2) 161-187.
- McKinney, D., X. Cai, M. Rosegrant, C. Ringler, and C. Scott, 1999. Modeling Water Resources Management at the Basin Level: Review and Future Directions. Technical Report. International Water management Institute. Paper 6, 71 pp. Colombo.
- Merrett, S., 2004. The Demand for Water: Four Interpretations. *Water International* 29(1) 27-29.

- Mill, J. S., 1848. Principios de economía política; con algunas de sus aplicaciones a la filosofía social.
- MIMAM, 2000. *Libro Blanco del Agua en España*. España: Ministerio de Medio Ambiente.
- MIMAM, 2002. Plan Hidrológico Nacional. Anexo de Análisis Económicos.
- MIMAM, 2003. Valoración del coste de uso de las aguas subterráneas en España. Ministerio del Medio Ambiente.
- MMA, 2007. Precios y Costes de los Servicios del Agua en España. Informe integrado de recuperación de costes de los servicios de agua en España. Artículo 5 y anejo III de la Directiva Marco de Agua.
- MMAMRM, 2008. Esquema Provisional de Temas Importantes. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Confederación Hidrográfica del Segura.
- Moss, J., G. Wolf, G. Gladden y E. Gutiérrez, 2003. Valuing Water for Better Governance. How to Promote Dialogue to Balance Social, Environmental, and Economic Values? Proceedings of the *3rd World Water Forum*. Kyoto, Japan.
- Murtagh, B. and M. Saunders, 2002. MINOS 5.5 User's Guide. Technical Report SOL 83-20R. Department of Operation Research, Stanford University. Stanford, California, USA.
- Noel, J. and R.E. Howitt, 1982. Conjunctive multibasin management: an optimal control approach. *Water Resources Research* 18 753-763.
- Ochoa-Rivera, J.C., J. Andreu, R. García-Bartual, 2007. Influence of inflows modeling on management simulation of water resources system. *Journal of Water Resources Planning and Management* 133 (2), 106–116
- Pearce, D. y R. Turner, 1995. Economía de los Recursos Naturales y Medio Ambiente. *Colegio de Economistas de Madrid*.
- PHCS, 1998. Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura. Memoria
- 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. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- Pulido-Velázquez, M., M. Jenkins and J. Lund, 2004a. Economic Values for Conjunctive Use and Water Banking in Southern California. *Water Resources Research* 40(3).
- Pulido-Velázquez, M., J. Andreu, G. Collazos y M. A. Pérez, 2004b. Metodologías y herramientas para el análisis económico de sistemas de recursos hídricos. Aplicación a la DMA. *Memorias del IV Congreso Ibérico de Gestión y Planificación del Agua*. Tortosa, España.
- Pulido-Velázquez, M., 2006a. Metodología y Herramientas para la valoración integrada del coste del recurso y coste ambiental. Aplicación a la Cuenca del Júcar. *Memorias del V Congreso Ibérico*. Faro, España
- Pulido-Velázquez, M., J. Andreu and A. Sahuquillo, 2006b. Economic Optimization of Conjunctive Use of Surface Water and Groundwater at the basin, scale. *Journal of Water Resources Planning and Management* 132(6) 454-467.
- Pulido -Velázquez, M., J. Andreu, A. Sahuquillo and D. Pulido –Velázquez, 2008. Hydro-economic river basin modeling: The application of a holistic surface-groundwater

- model to assess opportunity costs of water use in Spain. *Ecological Economics* 66(1) 51-65.
- Reglamento del Dominio Público Hidráulico, 2003. Disposición transitoria primera en el Real Decreto 606/2003, de 23 de mayo, por el que se modifica el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los Títulos preliminar, I, IV, V, VI y VIII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas. Disponible en http://noticias.juridicas.com/base_datos/Admin/rd606-2003.html
 - Robbins, L., 1984. *An Essay On The Nature and Significance of Economic Science*. Palgrave MacMillan. 3^{ed} edition. 208 pp.
 - Rogers, P., R. Bhatia, A. Huber, 1998. Water as Social and Economic Good: how to put the principles into practice. Background paper. Stockholm, Sweden: Global Water Partnership TAC.
 - Rogers, P., R. De Silva and R. Bhatia, 2002. Water is an economic good: How to use prices to promote equity, efficiency, and sustainability. *Water Policy* 4 1-17.
 - Rosegrant, M., X. Cai, C. Ringler, A. Séller, G. Donoso and D. McKinney, 1999. Report for the Inter-American Development Bank on the integrated economic-hydrologic water modeling at the basin scale: The Maipo River Basin in Chile. IFPRI, Washington DC.
 - Ruiz, J.M., 1998. *Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual-distribuido de simulación continua integrado con un sistema de información geográfica*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
 - Salas, J., J. Delleur, V. Yevjevich and W. Lane, 1980. *Applied modeling of hydrologic time series*. Water Resource Publications. 484 pp.
 - Savenije, H., 2001. Why water is not an ordinary economic good? Proceedings of the *Second WaterNet/WARFSA Symposium on 'Integrated Water Resources Management: Theory, Practice, Cases'* Cape Town, South Africa: IHE, Delft.
 - Sopeña, M., 2002. *Análisis del sistema del río Mijares y diseño de un plan de gestión óptimo para la mitigación de sequías*. Proyecto final de Carrera tipo III. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
 - Spulber, N., A. Sabbaghi, 1998. *Economics of Water Resources: from regulation to privatization*. (Natural Resource Management and Policy) Springer; 2nd edition Publishers; 376 pp.
 - Sumpsi, J., M Fonseca, C. Ortega y E. Martínez, 1998. *Economía y política de gestión del agua en la agricultura 1^o ed. Madrid, España*: Ediciones Mundi-Prensa. 351 pp.
 - Tanaka, S., T. Zhu, J. Lund, et al, 2006. Climate Warming and Water Management Adaptation for California. *Climatic Change* 76(3-4) 361-384.
 - Thünen J.H. von, 1826. «Der Isolierte Staat in Beziehung auf Landwirtschaft un Nationalökonomie ». Perthes, Hamburg. (Traducción inglesa: « The Isolated State in relation to agriculture un economics ». Pergammon Press, Oxford, 1966).
 - Trujillo, L., 1994. Fijación de precios óptimos en el suministro urbano de agua. *Revista de Economía Aplicada* 2(5) 111-135.
 - USACE (U.S. Army Corps of Engineering), 1994. *Hydrologic Engineering Center's Prescriptive Reservoir Model, Program Description*. U.S. Army Corps of Engineering. Hydrologic Engineering Center, Davis, California, USA.

- Vaux, H., R.E. Howitt, 1984. Managing water scarcity: An evaluation of interregional transfers. *Water Resources Research* 20 785-792.
- Walras, L., 1874. *Éléments d'économie politique pure, ou théorie de la richesse sociale*
- Ward, F., A. Michelsen, 2002. The Economic Value of Water in Agriculture: concepts and policy applications. *Water Policy* 4 423-446.
- Ward, F.A., J.E. Booker, A.M. Michelsen, 2006. Integrated Economic, Hydrologic, and Institutional Analysis of Policy Responses to Mitigate Drought Impacts in Rio Grande Basin. *Journal of Water Resources Planning and Management* 132(6) 488-502.
- Ward, F., M. Pulido-Velázquez, 2008. Efficiency, equity, and sustainability in a water quantity-quality optimization model in the Rio Grande basin. *Ecological Economics* 66(1) 23-37.
- WATECO, 2003. Guidance Document No.1: Economics and the Environment. The implementation challenge of the Water Framework Directive. 72 pp. Produced by Working Group 2.6-WATECO. Luxembourg.
- Wieser, F.V., 1876. Über das Verhältnis der Kosten zum Wert (On the Relation of Cost to Value). En *Gesammelte Abhandlungen*. 377-404.
- Winpenny, J., 1994. *Managing water as an economic resource*. Routledge 1st edition, 144 pp. London.
- Yevjevich, V., 1967. An Objective Approach to Definition and Investigation of Continental Droughts. Hydrology Paper 23. Colorado State University; Fort Collins, Colorado.
- Young, J. and J.D. Bredehoeft, 1972. Digital computer simulation for solving management problems of conjunctive groundwater and surface water systems. *Water Resources Research* 8(3) 533-556.
- Young, R, 1996. Water Economics in L.A. En *Handbook of Water resources* Mays, ed. McGraw Hill, 3.1-3.57.
- Young, R., 2005. *Determining the Economic value of Water*. Washington DC, U.S.A. RFF Press. 340 pp.