

EL PROBLEMA DE LA PLANIFICACIÓN HIDROLÓGICA: UNA APLICACIÓN AL CASO ESPAÑOL*

ARTURO GONZÁLEZ-ROMERO

Universidad Complutense de Madrid

SANTIAGO J. RUBIO

Universidad de Valencia

Este artículo consiste en un análisis teórico en términos de costes de transporte del agua, tarifas, renta del recurso y bienestar social de tres criterios aplicables en la planificación de los trasvases intercuenas. Los criterios estudiados han sido: la minimización de los costes de transporte del agua; la fijación de tarifas del agua iguales al coste de transporte medio; y la fijación de tarifas socialmente óptimas. Para ilustrar el análisis teórico se ha procedido a una simulación basada en los datos disponibles sobre recursos hidráulicos del país y su distribución por cuencas, así como en las estimaciones de demanda previas al Plan Hidrológico. Esta simulación nos ha permitido evaluar el coste social de la aplicación de criterios no óptimos.

Palabras clave: Recursos naturales. Planificación hidrológica.

El tema de la gestión eficiente del agua dulce en los países de la cuenca del Mediterráneo es actualmente un problema prioritario en la agenda de los organismos internacionales preocupados por la gestión de los recursos naturales y del medio ambiente⁽¹⁾.

Este problema tiene su origen en la escasez relativa del recurso y en la pérdida de calidad provocada por la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas². La escasez relativa del recurso surge de una distribución espacio-

** Los autores agradecen la financiación que la *European Science Foundation* ha prestado a este trabajo, y los valiosos comentarios de cuatro evaluadores y de los asistentes a nuestra presentación en el congreso arriba mencionado. No obstante, cualquier error que pueda encontrarse es de nuestra absoluta responsabilidad.

(1) Ver, por ejemplo, el interesante trabajo dirigido por Grenon y Batisse (1989) para las Naciones Unidas o *The Environmental Program for the Mediterranean* (1990) publicado por el Banco Mundial y el Banco Europeo de Inversiones.

(2) Los lectores interesados en los diferentes aspectos económicos de la gestión de este recurso natural pueden consultar la revisión de la literatura realizada por Young y Haveman (1985).

(3) El tema de las transferencias de agua entre cuencas hidrológicas ha sido ya estudiado por Hartman y Seastone (1970), Howe y Easter (1971) y Cummings (1974). Un análisis detallado de la planificación hidrológica a nivel de cuenca puede encontrarse en Andreu (1991).

temporal de la oferta distinta a la distribución espacio-temporal de la demanda, y puede crear problemas serios de abastecimientos durante determinadas épocas del año (verano, sequías) en determinadas áreas geográficas, a pesar de que las aportaciones naturales agregadas superen las demandas totales para un año medio con un régimen de precipitaciones normal.

Por esta razón la gestión de los recursos hídricos de un país requiere de una regulación espacio-temporal de las aportaciones naturales por parte de las autoridades responsables que se incrementa mediante la construcción de canales y embalses, consistiendo pues la planificación hidrológica en el diseño y gestión de una red de embalses y canales que asegure, para un nivel de garantía aceptable, los abastecimientos para todos los usuarios. Esta definición pone de relieve que los criterios que se utilicen para dimensionar la red y establecer los caudales que deben trasvasarse constituyen un elemento clave de la planificación hidrológica de un país.

En relación con este tema el trabajo que a continuación se presenta consiste en un análisis teórico en términos de costes de transporte del agua, tarifas, renta del recurso y bienestar social de tres de los criterios que pueden utilizarse en la planificación de los trasvases intercuenca⁽³⁾.

El dejar fuera del análisis el tema de la construcción de pantanos además de estar justificado por razones de espacio y escasez de recursos, se debe a que entendemos que es posible separar analíticamente esta cuestión de la anterior. Así pues, desde un punto de vista formal, se puede dividir el estudio de la gestión del recurso en dos partes, en la primera se incluiría el estudio de los trasvases intracuenca y la construcción de presas, mientras que en la segunda se analizaría básicamente la determinación de los caudales a trasvasar entre distintas cuencas hidrográficas. Obviamente, la definición de la planificación hidrológica a nivel estatal requerirá de la integración y consecuente adaptación de las partes.

El primero de los tres criterios estudiados es el de la *minimización de los costes de transporte* del agua. Este criterio se puede integrar fácilmente en el marco institucional que regula actualmente la gestión del recurso en España, que consiste, en pocas palabras, en proceder a la cuantificación de los recursos hidráulicos y las demandas por cuencas hidrográficas, para determinar los trasvases desde las cuencas con superávit a las cuencas deficitarias con el objeto de garantizar los abastecimientos en todas las cuencas⁽⁴⁾. En este caso lo que se ha hecho ha sido simplemente introducir un criterio económico en el proceso de toma de decisiones en el punto donde creemos tiene más sentido. La aplicación de este criterio, dadas unas demandas a satisfacer y unos recursos disponibles, garantiza la eficiencia económica en la utilización de la tecnología de transporte del agua. En lo que respecta a la financiación de los costes de transporte, se supone que corren a cuenta de los Presupuestos del Estado ya que las demandas estimadas en el Plan Hidrológico Nacional no incorporan la variable precio.

(3) El tema de las transferencias de agua entre cuencas hidrológicas ha sido ya estudiado por Hartman y Seastone (1970), Howe y Easter (1971) y Cummings (1974). Un análisis detallado de la planificación hidrológica a nivel de cuenca puede encontrarse en Andreu (1991).

(4) Por recursos hidráulicos se entiende el volumen de agua, bien subterránea o bien de superficie, que es recogida y transportada para su uso. Los usos básicos de este recurso son el abastecimiento urbano, diversos usos industriales, el enfriamiento de plantas de producción eléctrica y los regadíos.

El segundo criterio estudiado consiste en la fijación de *tarifas del agua iguales al coste de transporte medio*. En este caso se supone que las cantidades demandadas son determinadas endógenamente en función de la disposición al pago de los usuarios y de los costes de transporte, y que las autoridades deciden financiar estos costes vía una tarifa que recae sobre el usuario del recurso.

Finalmente, el último criterio consiste en determinar los caudales que han de ser trasvasados entre cuencas al objeto de *maximizar el bienestar social*. Para alcanzar una asignación óptima, como es sabido, las tarifas de agua deberán igualarse al coste de transporte marginal. Como ocurría en el caso anterior, el usuario financiará los costes de transporte vía una tarifa del agua.

Para ilustrar el análisis teórico se ha procedido a su simulación basada en los datos disponibles sobre los recursos hidráulicos del país y su distribución por cuencas, así como en las estimaciones de demandas previas al Plan Hidrológico⁽⁵⁾. Esta simulación constituye un ejemplo de los efectos que los distintos criterios tienen sobre las principales variables implicadas en el problema, incluyendo una medida del bienestar social. Ahora bien, dado que algunos de los parámetros económicos utilizados han tomado valores arbitrarios, las cifras obtenidas solamente admiten una lectura en términos relativos, y consecuentemente la simulación tan sólo cobra sentido como un apoyo al análisis teórico.

El trabajo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2, se caracteriza la situación española en lo referente a la explotación de los recursos hidráulicos incluyendo una comparación con otros países. En la sección 3, se presentan los tres criterios estudiados en este trabajo: la minimización de los costes de transporte medio, y la fijación de una tarifa socialmente óptima. En la sección 4, se presentan los datos disponibles relativos a recursos y demandas a partir de los cuales se obtiene el balance de la situación hidráulica en España. Con esta información, se resuelven los modelos de la sección 3 para un ejemplo, lo que nos permite ilustrar los distintos resultados de la aplicación de los diferentes criterios de gestión en términos de cantidades de agua trasvasada, costes de transporte, tarifas, renta del recurso y bienestar social. Estos resultados se presentan en la sección 5. En la última sección se recogen las conclusiones del trabajo.

2. LA PROBLEMÁTICA HIDROLÓGICA EN ESPAÑA

La problemática de España en relación a la explotación del recurso agua es algo diferente de la que en general se presenta en el resto de países de la OCDE. Diversos factores explican esta situación particular. En primer lugar, nos referiremos a aquellos que más contribuyen a diferenciar su equilibrio hidrológico del existente en el resto de los países occidentales; en segundo lugar, procederemos a profundizar con mayor detalle en los factores explicativos y condiciones específicas que caracterizan su situación.

2.1 Situación comparativa internacional

Primero, y con el fin de proceder a delimitar la problemática que en el ámbito hidrológico afronta España, se han examinado una serie de indicadores disponibles

(5) La fuente utilizada ha sido el documento *Plan Hidrológico. Síntesis de la documentación básica* de la Dirección General de Obras Hidráulicas, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid, 1990.

para diferentes países. El primero de ellos, y el más relevante, es el del total de recursos hidráulicos (Cuadro 1).

Para este indicador, España alcanza una de las cotas más elevadas en comparación con otros países de mayor tamaño y población, tales como Francia y Alemania; únicamente en Italia, el total de los recursos hidráulicos es mayor. Asimismo, resalta el hecho de que el total de recursos hidráulicos en España, al final de los años 80 y en comparación con 1970, es prácticamente dos veces superior, lo que refleja un ritmo de crecimiento relativamente elevado de este indicador en los últimos años. De hecho, en el resto de los países, sólo Francia alcanza tasas de crecimiento comparables a las registradas en España; en Estados Unidos y Reino Unido, los recursos hidráulicos durante estos años, sin embargo, no han variado, y en Italia han aumentado pero muy moderadamente.

También, y como característica diferencial de España en este contexto, es importante constatar que la problemática hidrológica de nuestro país tiene que ver fundamentalmente con el agua de superficie, que llega a representar el 91 por cien del total de los recursos hidráulicos (Cuadro 1). De entre todos los países de la OCDE, España es el país en el que los recursos de agua se sustentan de forma más intensa en el agua de superficie; en Francia y Alemania, las aguas subterráneas representan el 14,1 por cien del total, mientras que en Italia este porcentaje se sitúa en el 23,1 por cien.

Por otra parte, el total de recursos hidráulicos es una medida del grado alcanzado en la explotación de los recursos de agua dulce de un país (Cuadro 2). En el caso de España, los indicadores disponibles muestran también un elevado nivel de explotación de estos recursos. Así, el total de recursos hidráulicos como porcentaje de los recursos disponibles (aportaciones naturales), se sitúa, al final de los años 80, en la cota de 41,2 por cien, que representa el porcentaje más alto de entre los registrados en los países pertenecientes a la OCDE, y es prácticamente el doble de la registrada en 1970, que fue del 22,1 por cien.

Después de España, el país que utiliza de una forma más intensa sus recursos de agua es Italia, cuyos recursos hidráulicos sobre disponibilidades anuales se sitúa en el 30,1 por cien; le siguen Alemania y Francia, con un 27,5 y un 23,6 por cien, respectivamente; finalmente, en el caso del Reino Unido este indicador es muy reducido, llegando tan sólo al 12,1 por cien.

Si examinamos la situación de cada país en referencia esta vez al indicador de recursos hidráulicos por habitante, las cifras resultan también significativas para el caso de España. En concreto, nuestro país alcanza la cota más alta entre todos los países de la CE, situándose en 1186 m³/año.

Cabe resaltar también el elevado ritmo de crecimiento de este indicador en los últimos años, pues en 1970 su valor era de 731 m³/habitante. De hecho, España junto a Italia, son los dos países que presentan ritmos de crecimiento más altos, aunque en el caso de Italia el nivel actual alcanzado por el mismo es todavía muy inferior al de España, en concreto 980 m³/habitante.

Para los países europeos pertenecientes a la OCDE, la media de los recursos hidráulicos por habitante es de 690 m³; para los países miembros de la CEE la media es algo más elevada, 770 m³/habitante; no obstante, como puede observarse, estas cifras no dejan de ser apreciablemente inferiores a las registradas en España. Solamente, en el caso de los países de América del Norte, este indicador alcanza niveles más elevados que en España, pero también es verdad que el

Cuadro 1: RECURSOS HIDRÁULICOS TOTALES, DE SUPERFICIE Y SUBTERRÁNEOS
(Países OCDE, 1970 – finales de los 80)

	Recursos hidráulicos totales (millones m ³)					Agua superficial (% total/último año disponible)	Agua subterránea (% total/último año disponible)
	1970	1975	1980	1985	últimos 80		
Canadá	24057	28128	37864	41470	43888	97,8	2,2
EEUU	440000	472500	525000	476000	—	78,4	21,6
Japón	—	87600	88200	89200	89290	85,6	14,4
N. Zelanda	990	1045	1200	1900	—	—	—
Austria	—	2620	2190	2120	2120	47,4	52,6
Bélgica	9481	—	9030	—	—	91,4	8,6
Dinamarca	720	1205	—	—	1170	—	—
Finlandia	3300	3550	3700	4000	3001	92,1	7,9
Francia	23500	27000	37600	43172	43673	85,9	14,1
Alemania Occ.	29488	33544	42206	41216	44582	85,9	14,1
Grecia	4254	5847	6945	—	—	71,5	28,5
Irlanda	—	—	793	—	—	68,9	31,1
Italia	41900	—	56200	52000	56200	68,9	31,1
Luxemburgo	—	—	—	67	59	54,2	45,8
Holanda	13270	13734	14794	14471	—	92,1	7,9
Noruega	—	2380	—	2025	—	80,0	20,0
Portugal	—	—	1476	1271	1290	—	—
España	24600	36080	39920	45250	45845	91,0	9,0
Suecia	—	3979	—	2888	2996	80,7	19,3
Suiza	1140	1129	1103	1143	1166	18,8	81,2
Turquía	11760	16041	16200	19400	23750	72,7	27,3
Reino Unido	15583	13085	15547	13998	14502	81,3	18,7
Yugoslavia	—	7370	8767	—	—	—	—
N. América	464100	500600	562900	508500	510900	—	—
OCDE-Europa	197700	228600	263800	272700	285300	—	—
CEE	172900	198800	235000	241100	249900	—	—
OCDE	761500	835600	935100	892700	907700	—	—

Fuente: OCDE, *Environmental Data*, 1991.

Cuadro 2: RECURSOS HIDRÁULICOS TOTALES: % DE LA DISPONIBILIDAD ANUAL Y PER CAPITA
(Países OCDE, 1970 - finales de los 80)

	Recursos hidráulicos renovables (millones m ³ /año)	% sobre la disponibilidad anual					per cápita (m ³ /hab)				
		1970	1975	1980	1985	últimos 80	1970	1975	1980	1985	últimos 80
Canadá	2901000	0,8	1,0	1,3	1,4	1,5	1130	1239	1575	1635	1672
EEUU	2478000	17,8	19,1	21,2	18,8	-	2145	2188	2305	1952	-
Japón	547000	-	16,0	16,1	16,3	16,3	-	786	755	730	731
N. Zelanda	397000	0,2	0,3	0,3	0,5	-	351	339	382	579	-
Austria	90000	-	2,9	2,4	2,4	2,4	-	345	290	290	278
Bélgica	12500	75,8	-	72,2	-	-	982	-	917	-	-
Dinamarca	13000	5,5	9,3	-	-	9,0	145	238	-	-	228
Finlandia	113000	2,9	3,1	3,3	3,5	2,7	716	754	774	816	605
Francia	185000	12,7	14,6	20,3	23,3	23,6	463	512	696	783	782
Alemania Occ.	162000	18,2	20,7	26,1	25,4	27,5	486	543	686	675	728
Grecia	58650	7,3	10,0	11,8	-	-	484	646	720	-	-
Irlanda	50000	-	-	1,6	-	-	-	-	233	-	-
Italia	187000	22,4	-	30,1	27,8	30,1	781	-	996	910	980
Luxemburgo	5000	-	-	-	1,3	1,2	-	-	-	183	156
Holanda	90000	14,7	15,3	16,4	16,1	-	1018	1005	1046	999	-
Noruega	413000	-	0,6	-	0,5	-	-	594	-	488	-
Portugal	65600	-	-	2,3	1,9	2,0	-	-	158	131	125
España	111300	22,1	32,4	35,9	40,7	41,2	731	1016	1068	1175	1186
Suecia	186000	2,2	2,1	-	1,6	1,6	500	486	-	346	353
Suiza	47700	2,4	2,4	2,3	2,4	2,4	182	176	173	175	173
Turquía	134181	8,8	12,0	12,1	14,5	17,7	330	396	362	389	430
R. Unido	120000	13,0	10,9	13,0	11,7	12,1	319	265	276	247	253
Yugoslavia	265000	-	2,6	3,3	-	-	-	345	393	-	-
N. América	5379000	8,6	9,3	10,5	9,5	9,5	2050	2100	2230	1920	1860
OCDE-Europa	2214000	8,9	10,3	11,9	12,3	12,9	550	610	670	680	690
CEE	1060000	16,3	18,8	22,2	22,7	23,6	580	650	740	750	770
OCDE	8977000	8,5	9,3	10,4	9,9	10,1	1080	1120	1200	1100	1090

Fuente: OCDE, *Environmental Data*, 1991

crecimiento de este indicador para el conjunto de estos países en los últimos años ha sido prácticamente nulo⁽⁶⁾.

En el Cuadro 3 puede examinarse la distribución por usos de los recursos hidráulicos de cada país. En el caso de España se detecta que la mayor utilización de este recurso proviene del sector agrario, es decir de los regadíos, que llegan a absorber el 65,5 por cien del total de recursos hidráulicos. Solamente Italia alcanza un porcentaje comparable, con un 57,3 por cien de estos recursos destinados a regadíos.

Comparativamente, en Francia y Alemania, el principal uso del agua es el enfriamiento de centrales eléctricas. El 51,4 y el 67,4 por cien respectivamente, del total de recursos hidráulicos de estos países, se destina a esta finalidad. En cambio, en el Reino Unido el principal destino de los recursos hidráulicos es el uso urbano, que absorbe el 48,6 por cien del total de los recursos disponibles.

Cuadro 3: DISTRIBUCIÓN DE LOS RECURSOS HIDRÁULICOS TOTALES POR USOS PRINCIPALES (%) (Países OCDE 1970 - finales de los 80)

	Abastecimiento urbano	Regadíos	Usos industriales	Enfriamiento de centrales eléctricas
Canadá	11,3	7,1	9,1	55,6
EEUU	10,8	40,5	7,4	38,8
Japón	18,0	69,0	12,0	-
Nueva Zelanda	27,8	-	-	-
Austria	24,8	2,6	23,6	47,2
Dinamarca	41,0	34,2	19,2	-
Finlandia	14,1	0,7	30,9	-
Francia	13,5	5,8	10,3	51,4
Alemania Occ.	11,0	0,5	4,9	67,4
Italia	14,2	57,3	14,2	12,5
Luxemburgo	95,0	0,3	4,7	-
Holanda	7,7	-	1,8	63,5
Noruega	26,6	3,4	68,1	-
Portugal	-	-	-	-
España	11,6	65,5	22,9	-
Suecia	32,4	3,1	40,2	0,3
Suiza	58,5	-	17,6	-
Turquía	12,8	79,1	9,8	-
Reino Unido	48,6	0,8	7,8	17,6

Fuente: OCDE, *Environmental Data*, 1991.

(6) Sin embargo, la comparación de estos datos debe hacerse con suma cautela ya que las definiciones de cada país de las variables contempladas estadísticamente, pueden variar de forma considerable.

2.2 *Los principales problemas hidrológicos en España*

España no puede ser clasificada como un país árido. En términos per cápita, la disponibilidad anual de agua de superficie alcanza los 2800 m³ y si añadimos las aguas subterráneas, esta cifra se eleva hasta los 3290 m³. Dado que las demandas corrientes también por habitante ascienden a 865 m³, obtenemos una relación con superávit entre recursos disponibles (aportaciones naturales) y demandas a satisfacer. Sin embargo, la hidrografía española presenta dos problemas importantes que condicionan apreciablemente su equilibrio hidrológico.

En primer lugar, España se enfrenta a un problema derivado de la distribución espacial de los recursos existentes. Así de las diez cuencas que componen el mapa hidrográfico español (Mapa 1) algunas presentan un excedente notable de recursos mientras que otras son deficitarias.

Esta desigual distribución geográfica de los recursos es debida fundamentalmente a que los caudales naturales varían enormemente de unas cuencas a otras. Por esta razón, el territorio español puede dividirse en dos zonas, una húmeda y la otra seca. La zona húmeda comprende la región hidrográfica del Norte de España, que está formada por las cuencas de los ríos que desembocan en el Atlántico entre la frontera portuguesa y la francesa, y las cuencas hidrográficas de los ríos Duero, Ebro y Tajo. Por su parte, la España seca comprende el resto del país: la mitad sur de la península y el litoral mediterráneo. Además, esta área geográfica se caracteriza por una agricultura de alto valor añadido y por acoger una proporción muy elevada del total de la población española, dado que ésta vive en su mayor parte en las regiones costeras. Las cuencas hidrográficas que constituyen esta zona son las de los ríos Guadiana, Guadalquivir, Segura y Júcar, más las cuencas hidrográficas del Pirineo Oriental y la cuenca del Sur de España.

La diferencia fundamental entre ambas zonas es que mientras la zona húmeda dispone prácticamente de un 75 por cien de los recursos de agua de superficie, un 63 por cien de los recursos totales si incluimos las aguas subterráneas, las aportaciones específicas de la zona seca son muy reducidas.

Estas circunstancias nos colocan ante un hecho evidente, que la zona seca, y especialmente el litoral mediterráneo, resulta claramente deficitaria si se tienen en cuenta sólo los recursos de estas cuencas⁽⁷⁾.

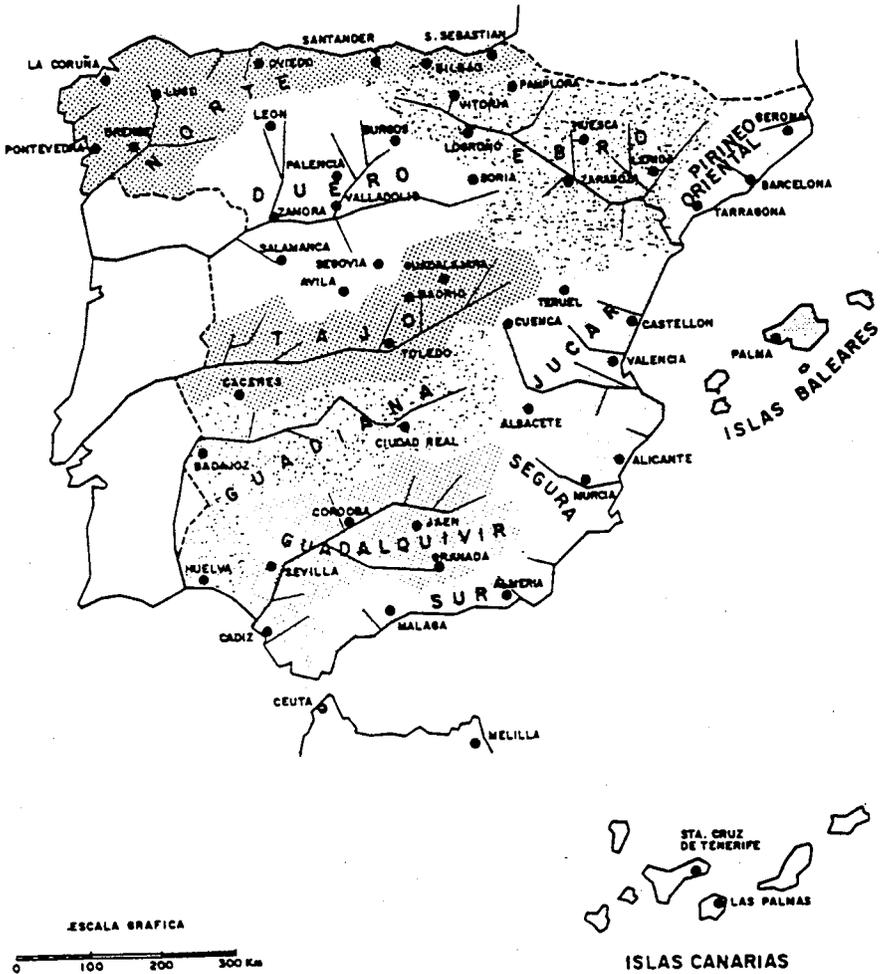
En segundo lugar, existe otro problema hidrológico relacionado con la distribución temporal de los recursos. En España, los ríos, sobre todo los del litoral mediterráneo, presentan un componente estacional muy marcado debido a un régimen de lluvia muy variable tanto a lo largo del año como de unos años a otros, produciéndose frecuentemente o épocas de sequías o inundaciones.

La respuesta a estos dos problemas, como ya se ha apuntado en la introducción, pasa por la construcción de embalses y trasvases que permitan una redistribución en el tiempo y en el espacio de los recursos, de manera que se garanticen los abastecimientos de agua para los distintos usos y para las distintas cuencas. La planificación hidrológica puesta en marcha recientemente en nuestro país persigue, entre otros, estos dos objetivos de regulación⁽⁸⁾.

(7) En el balance hidrológico que aparece en la sección 4 se presenta una estimación de los déficit y superávit por cuencas hidrográficas.

(8) En este trabajo se han enfocado los principales problemas hidrológicos desde un punto de vista cuantitativo, pero no hay que olvidar que un futuro muy próximo —quizás ya en la actualidad— el

Mapa 1. Cuencas hidrográficas españolas.



A continuación analizaremos teóricamente algunos criterios de posible aplicación a la hora de diseñar de planificación hidrológica en lo que respecta a la cuestión de la regulación espacial del recursos intercuenas.

problema cualitativo tendrá que ser considerado conjuntamente con los de la regulación temporal y espacial de los caudales.

3. DETERMINACIÓN DE LOS TRASVASES DE AGUA INTERCUENCAS

De lo apuntado en la sección anterior se deduce que España dispone de recursos suficientes para satisfacer tanto las demandas a corto como a largo plazo. Sin embargo esta situación de superávit a nivel agregado no debe soslayar la importancia de los diversos déficit que se observan a nivel de cuenca.

Dado este escenario, el principal problema a resolver consiste en como garantizar los abastecimientos en las cuencas con déficit. En el modelo teórico presentado en este trabajo, se definen de forma operativa tres de los posibles criterios que pueden utilizarse en la planificación de los recursos hidráulicos de un país.

Ahora bien, en primer lugar parece necesario proceder, aunque sea de forma esquemática, a la caracterización del marco institucional en que el problema referido debe ser resuelto. En relación a este punto se puede señalar que en España la Ley de Aguas de 1985 definió el marco institucional, que se caracteriza básicamente por definir la propiedad pública del agua, conferir a las Confederaciones Hidrográficas la responsabilidad de la administración de los recursos de la cuenca, y dejar en manos del Gobierno Central las decisiones sobre trasvases intercuencas, aunque éstas deberán ser aprobadas por el Parlamento, con el objetivo prioritario de garantizar los abastecimientos, en cantidad y calidad, en todo el territorio español.

Dentro de este marco institucional, se presentan tres criterios que pueden servir alternativamente de guía para la política hidráulica del Gobierno Central.

1.º Criterio: Minimización de costes totales

En este caso se analiza la situación en la que se decide abastecer las cuencas deficitarias según las previsiones hechas por el Plan Hidrológico Nacional, y financiar los costes de transporte del agua a cuenta de los Presupuestos del Estado. Dado este marco, la política hidráulica se reduce a calcular los caudales de agua que deben ser trasvasados a las cuencas deficitarias para satisfacer las demandas "teóricas" al mínimo coste⁽⁹⁾.

Para escribir y resolver analíticamente este problema consideraremos que existen n cuencas, de las cuales d son deficitarias y k excedentarias. Representaremos por R_h los recursos de la cuenca h y por \bar{x}_h las demandas "teóricas", donde $h=1, \dots, n$. Con esta notación la situación hidráulica española puede caracterizarse por la siguiente desigualdad.

$$\sum_{h=1}^n (R_h - \bar{x}_h) > 0 \quad (1)$$

La cantidad o caudal trasvasado de agua de la cuenca excedentaria i (origen) hasta cuenca deficitaria j (destino) vendrá dada por x_{ij} , donde $i=1, \dots, k$, siendo k el número de cuencas excedentarias y $j=k+1, \dots, n$, siendo $n-k$ el número de cuencas deficitarias. Los costes de transporte del agua serán función de la distancia (d_{ij}) entre la fuente u origen de la oferta i y el destino j , y de la magnitud del caudal transferido, $c_{ij}(x_{ij}; d_{ij})$, lo que indica que en este trabajo se sigue un

(9) Por demandas "teóricas" entendemos las estimadas por los técnicos de la Administración o por los gestores públicos de los recursos hidráulicos.

enfoque agregado en el que nos interesamos sólo por determinar el total de los caudales trasvasados⁽¹⁰⁾. Asimismo se supone que la función de costes de transporte es estrictamente convexa con respecto al caudal, y creciente con respecto a la distancia.

El problema a resolver se puede escribir, por tanto, de la siguiente manera

$$\text{Min } C = \sum_{j=1}^k \sum_{i=k+1}^n c_{ij}(x_{ij}) \quad (2)$$

$$\text{s.a. } R_i - \bar{x}_i - \sum_{j=k+1}^n x_{ij} \geq 0 \quad i=1, \dots, k \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^k x_{ij} - (\bar{x}_j - R_j) \geq 0 \quad j=k+1, \dots, n \quad (4)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad i=1, \dots, k, \quad j=k+1, \dots, n \quad (5)$$

lo que nos dice que el objetivo de la política hidráulica consiste en minimizar los costes totales de transporte de agua desde las cuencas con superávit a las cuencas con déficit para abastecer como mínimo la demanda insatisfecha de las cuencas deficitarias. El primer grupo de restricciones indican que el caudal total transferido desde las cuencas con superávit no puede exceder los recursos disponibles en éstas, una vez descontadas las demandas a satisfacer en la propia cuenca. El segundo grupo garantiza que el caudal total destinado a las cuencas con déficit debe ser al menos suficiente para cubrir las demandas no satisfechas (recuérdese que el nivel de la demanda está determinado de forma exógena por los gestores de los recursos).

Si las funciones de costes son estrictamente convexas, las condiciones de Kuhn-Tucker son necesarias y suficientes para que exista una solución única al problema, siendo estas condiciones

$$\frac{\partial \zeta}{\partial x_{ij}} = \frac{\partial c_{ij}}{\partial x_{ij}} - \lambda_i + \mu_j \geq 0, \quad x_{ij} \geq 0, \quad x_{ij} \frac{\partial \zeta}{\partial x_{ij}} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial \lambda_j} = R_i - \bar{x}_i - \sum_{j=k+1}^n x_{ij} \geq 0, \quad \lambda_i \geq 0, \quad \lambda_i \frac{\partial \zeta}{\partial \lambda_i} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial \mu_j} = \sum_{i=1}^k x_{ij} - (\bar{x}_j - R_j) \geq 0, \quad \mu_j \leq 0, \quad \mu_j \frac{\partial \zeta}{\partial \mu_j} = 0 \quad (8)$$

donde los multiplicadores λ_i pueden interpretarse como los precios sombra de los

(10) Con el objeto de simplificar la notación, no escribiremos en lo que sigue el parámetro de distancia en la función de costes.

recursos de agua, y los μ_j , como los precios sombra de las restricciones de demanda.

Sin ninguna de las restricciones (3) es operativa en el óptimo, las condiciones se reescriben como⁽¹¹⁾

$$CTMg_{ij}(x_{ij}) = -\mu_j, \quad i=1, \dots, k, \quad j=k+1, \dots, n \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^k x_{ij} - (\bar{x}_j - R_j) = 0, \quad j=k+1, \dots, n \quad (10)$$

Por tanto, la optimalidad implica la igualdad del coste de transporte marginal en cada cuenca

$$CTMg_{1j} = CTMg_{2j} = \dots = CTMg_{kj} = -\mu_j, \quad \text{para todo } j \quad (11)$$

aunque los costes de transporte marginales para las diferentes cuencas serán distintos.

Si para alguna de las cuencas excedentarias la restricción (3) se cumpliera en forma de igualdad, el precio sombra de los recursos hidráulicos de esa cuenca sería positivo, y los costes de transporte marginales serían distintos tanto por cuencas, como, para la misma cuenca, por orígenes, dándose que los costes de transporte marginales más elevados serían los que conectasen con las cuencas excedentarias que trasvasan todos sus excedentes⁽¹²⁾.

2.º Criterio: Tarifa igual a coste medio

Otra opción que se puede plantear es la de abastecer las cuencas deficitarias pero fijando una tarifa del agua que cubra los costes de transporte medios, evitando que éstos tengan que ser financiados a cuenta de los Presupuestos del Estado.

En este caso las tarifas del agua serían función de los caudales trasvasados y se determinarían conjuntamente recurriendo a las funciones de beneficios

$$\pi_{ij} = t_j x_{ij} - c_{ij}(x_{ij}), \quad (12)$$

donde t_j es la tarifa del agua, y a las correspondientes funciones inversas de demanda

$$t_j = P_j(x_j), \quad j=k+1, \dots, n \quad (13)$$

La tarifa a fijar y los caudales trasvasados se obtendrían de la solución al siguiente sistema de ecuaciones e inecuaciones

$$\pi_{ij} = P_j(x_j) x_{ij} - c_{ij}(x_{ij}) = 0, \quad i=1, \dots, k \quad j=k+1, \dots, n \quad (14)$$

$$R_i - \bar{x}_i - \sum_{j=k+1}^n x_{ij} \geq 0, \quad i=1, \dots, k \quad (15)$$

(11) Téngase en cuenta que al ser los costes crecientes con respecto al caudal trasvasado, la restricción (4) se satisficará en el óptimo en forma de estricta igualdad.

(12) Si p.e. $\lambda_1^* > 0$ y $\lambda_i^* = 0$ para $i \neq 1$, las condiciones de optimalidad son $CTMg_{1j} = \lambda_1^* - \mu_j^*$ y $CTMg_{ij} = -\mu_j^*$ para todo $i \neq 1$, por lo que $CTMg_{1j} - \lambda_1^* = CTMg_{ij}$, resultando que $CTMg_{1j} > CTMg_{ij}$.

$$x_j = R_j + \sum_{i=1}^k x_{ij}, \quad j = k+1, \dots, n \quad (16)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad i = 1, \dots, k, \quad j = k+1, \dots, n \quad (17)$$

Si el sistema de ecuaciones (14) tiene una solución que satisfaga las restricciones (15) y (16), ésta nos da los caudales que se deben trasvasar y las tarifas a aplicar en cada cuenca deficitaria. En ese caso la solución cumplirá las siguientes condiciones

$$CTMe_{1j} = CTMe_{2j} = \dots = CTMe_{kj} = t_j = p_j(x_j), \quad \text{para todo } j \quad (18)$$

Si la solución del sistema de ecuaciones (14) no cumple alguna de las restricciones (15), entonces se tendría que volver a resolver el sistema (14) incorporando la correspondiente restricción (15) en forma de igualdad⁽¹³⁾. Con la tarifa el gobierno cubriría los costes de transporte pero además obtendría unos ingresos adicionales iguales a la *renta del recurso*, ya que no hay que olvidar que existen dos fuentes de abastecimiento, los recursos propios de la cuenca y los caudales trasvasados⁽¹⁴⁾.

3.ª Criterio: Tarifa igual a coste marginal

La última alternativa que se considera en este estudio es la correspondiente a una política hidrológica óptima desde un punto de vista social. En ese caso los trasvases óptimos de agua intercuenca serán los que maximicen el valor de la función de bienestar social definida como la suma del excedente del consumidor, el excedente del productor y la renta del recurso. El excedente del consumidor vendrá dado por la siguiente expresión

$$D_j = \int_0^{x_j} P_j(s) ds - P_j(x_j)x_j, \quad j = k+1, \dots, n \quad (19)$$

el excedente del productor por⁽¹⁵⁾

$$S_i = \sum_{j=k+1}^n (P_j(x_j)x_{ij} - \int_0^{x_{ij}} CTMg_{ij}(s) ds), \quad i = 1, \dots, k \quad (20)$$

y la renta del recurso para las cuencas importadoras por $M_j = P_j(x_j)R_j$, $j = k+1, \dots, n$, siendo la función de bienestar social

$$W = \sum_{j=k+1}^n (D_j + M_j) + \sum_{i=1}^k S_i$$

(13) Este tipo de política establece una estructura de tarifas que en el caso en que los mercados estén lo suficientemente integrados puede dar lugar a la aparición de arbitraje entre las cuencas deficitarias. Si se considera que el arbitraje puede ser lo bastante importante como para modificar sustancialmente los caudales definitivos, se tendría que operar a nivel agregado para conseguir una única tarifa del agua.

(14) Ha de entenderse que como el recurso deviene escaso en la cuenca, la tarifa se aplicará a todos los usuarios independientemente de cual sea la fuente de abastecimiento.

(15) Téngase en cuenta que las Conferencias Hidrográficas de las cuencas exportadoras no pagan ninguna renta porque los recursos hidráulicos se han definido como de propiedad pública.

como puede observarse en el Gráfico 1.

Al sustituir D_j y S_i por (19) y (20), y M_j por la expresión de la renta, la función de bienestar social puede expresarse como

$$W = \sum_{j=k+1}^n \left(\int_0^{x_j} P_j(s) ds - P_j(x_j)x_j + P_j(x_j)R_j \right) + \sum_{i=1}^k \sum_{j=k+1}^n \left(P_j(x_j)x_{ij} - \int_0^{x_{ij}} CTM_{g_{ij}}(s) ds \right)$$

donde sustituyendo x_j por (16), resulta

$$W = \sum_{j=k+1}^n \left[\int_0^{x_j} P_j(s) ds - P_j(x_j)(R_j + \sum_{i=1}^k x_{ij}) + P_j(x_j)R_j + \sum_{i=1}^k P_j(x_j)x_{ij} - \sum_{i=1}^k \int_0^{x_{ij}} CTM_{g_{ij}}(s) ds \right]$$

que simplificando se convierte en

$$W = \sum_{j=k+1}^n \left(\int_0^{x_j} P_j(s) ds - \sum_{i=1}^k \int_0^{x_{ij}} CTM_{g_{ij}}(s) ds \right) \quad (21)$$

de manera que el problema a resolver es el siguiente

$$\text{Max } W = \sum_{j=k+1}^n \left(\int_0^{x_j} P_j(s) ds - \sum_{i=1}^k c_{ij}(x_{ij}) \right) \quad (22)$$

$$\text{s.a. } R_i - \bar{x}_i - \sum_{j=k+1}^n x_{ij} \geq 0, \quad i=1, \dots, k \quad (23)$$

$$x_j = R_j + \sum_{i=1}^k x_{ij}, \quad j=k+1, \dots, n \quad (24)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad i=1, \dots, k, \quad j=k+1, \dots, n \quad (25)$$

Ahora, tenemos un único conjunto de restricciones, (23), el cual garantiza que el caudal transferido no puede exceder los recursos disponibles de las cuenca, ya que (24) es la definición de la cantidad demandada de agua en la cuenca j , que puede eliminarse del problema por sustitución en la función objetivo.

Si la función de bienestar social es estrictamente cóncava, las condiciones de Kuhn-Tucker son necesarias y suficientes para garantizar que exista una única solución al problema.

En este caso las condiciones de Kuhn-Tucker son

$$\frac{\partial \zeta}{\partial x_{ij}} = P_j(x_j) - \frac{\partial c_{ij}}{\partial x_{ij}} - \lambda_i \leq 0, \quad x_{ij} \geq 0, \quad x_{ij} \frac{\partial \zeta}{\partial x_{ij}} = 0 \quad (26)$$

$$i = 1, \dots, k, \quad j = k+1, \dots, n$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial \lambda_i} = R_i - \bar{x}_i - \sum_{j=k+1}^n x_{ij} \geq 0, \quad \lambda_i \geq 0, \quad \lambda_i \frac{\partial \zeta}{\partial \lambda_i} = 0 \quad (27)$$

$$i = 1, \dots, k$$

las cuales se simplifican para un óptimo interior en la condición habitual de optimalidad: precio = coste marginal. De estas condiciones se obtendrán tanto los caudales trasvasados, como las tarifas a aplicar en cada cuenca⁽¹⁶⁾. Resultando que la solución exigirá la igualación de los costes de transporte marginales para la misma cuenca

$$CTM_{g_{1j}} = CTM_{g_{2j}} = \dots = CTM_{g_{kj}} = t_j = P_j(x_j) \text{ para todo } j \quad (28)$$

Si en el óptimo alguna de las restricciones (27) se cumplen en forma de igualdad, sería necesario redefinir la función objetivo para incorporar el excedente del consumidor de las cuencas excedentarias que tuviesen precios sombra positivos, y sustituir las correspondientes restricciones (27) por restricciones de igualdad del tipo

$$R_i - \bar{x}_i - \sum_{j=k+1}^n x_{ij} = 0 \quad (29)$$

donde x_i representa la cantidad demandada de agua de la cuenca i .

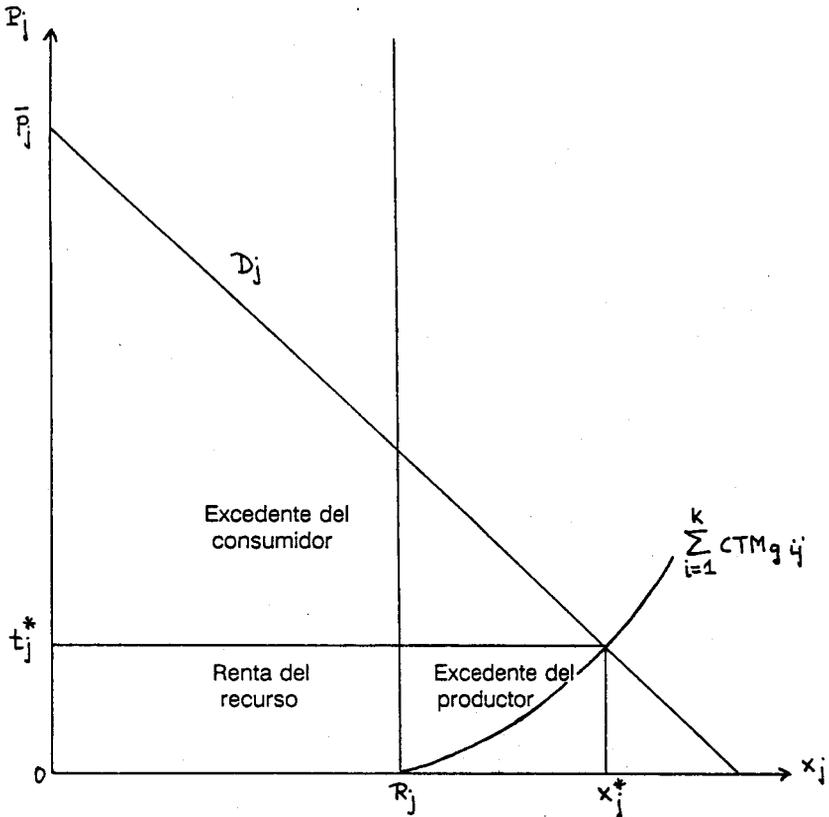
Resolviendo el nuevo problema de maximización obtendríamos una condición de optimalidad que exigiría que la tarifa en las cuencas importadoras fuese igual a la tarifa en las cuencas exportadoras más el coste de transporte marginal. Así, este nuevo problema permitiría calcular la estructura de tarifas óptimas, que incluiría las tarifas a fijar en las cuencas excedentarias.

En el Gráfico 2 se representan los resultados que se obtendrían, en términos de tarifa y caudales, de la aplicación de las distintas políticas hidráulicas definidas. En ella se observa que la tarifa socialmente óptima es mayor que la tarifa que se obtiene aplicando el 2º criterio, y que los caudales son menores cuando se maximiza el bienestar social.

Obsérvese también que si los costes de transporte son una función convexa del caudal de aguas trasvasado, se obtienen beneficios en la actividad de abaste-

(16) Al igual que ocurría con la fijación de la tarifa según el coste medio, puede originarse un arbitraje entre las cuencas deficitarias debido a la existencia de diferentes tarifas. En ese caso, habría que replantearse el problema anterior (22)-(25) e incorporar una restricción adicional que exigiese explícitamente la igualación de las tarifas de las distintas cuencas, o bien, adoptar un enfoque agregado, es decir, redefinir el problema para una función de demanda para el conjunto de las cuencas deficitarias. Obviamente, la nueva solución supondrá una pérdida de bienestar con respecto a la solución de múltiples tarifas.

Gráfico 1. Componentes de la función de bienestar social.

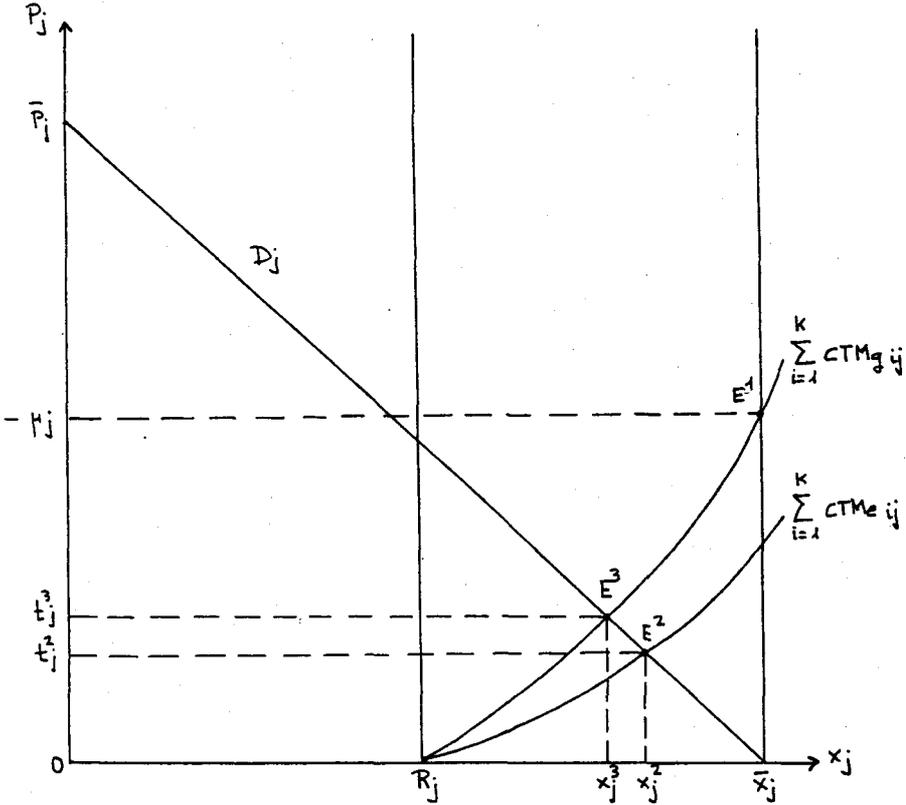


cimiento de las cuencas deficitarias además de la correspondiente renta del recurso que, como puede verse en el gráfico 2, será mayor que la que se obtiene cuando se fija una tarifa igual al coste medio.

Basándose en estos resultados, existen dos claros argumentos a favor de la fijación de una tarifa igual al coste de transporte marginal: por una parte se alcanza el máximo bienestar social, y, por otra, se sigue una política hidráulica que favorece o acompaña una política fiscal tendente a la reducción del déficit presupuestario. Como argumento en contra, se podría citar el coste político que implica enfrentarse a un componente cultural milenar, por el que el agua se ha considerado y se sigue considerando por los usuarios un bien libre.

En el caso de una fuerte oposición ciudadana a la fijación de tarifas óptimas, el segundo óptimo sería fijar una tarifa igual al coste medio. Esta tarifa, al ser menor que la tarifa óptima, podría ser aceptada más fácilmente por los usuarios, y desde el punto de vista fiscal sigue siendo una política hidráulica positiva. En

Gráfico 2. Trasvases de agua y tarifas.



la sección 5 evaluamos la reducción en el bienestar social que supone este tipo de política, obteniendo así el coste de oportunidad en términos de bienestar social del criterio de fijación de la tarifa igual a coste medio.

Finalmente, se puede señalar que adoptar una política hidráulica guiada por la minimización de los costes de transporte, resulta claramente definida desde el punto de vista fiscal. Adicionalmente, las ganancias en términos del excedente del consumidor serán menores que los costes, resultando una pérdida de bienestar.

4. RECURSOS Y DEMANDAS: EL BALANCE HIDRÁULICO NACIONAL

La puesta en marcha de la planificación hidrológica en España ha requerido de una cuantificación previa de los recursos existentes, tanto en su dimensión temporal como en su dimensión espacial, y de una estimación de las demandas teóricas de agua que ha dado lugar a un mayor conocimiento de la realidad hidrológica española.

4.1 Recursos

Actualmente, se disponen de datos referentes a recursos que permiten hacerse una idea bastante ajustada a la realidad de los valores medios de los recursos hidráulicos disponibles (aportaciones naturales) por cuencas hidrográficas.

Las aportaciones naturales se han dividido para su cuantificación en superficiales y subterráneas. En lo que respecta a las aportaciones superficiales se ha trabajado con una serie desde 1940 a 1985, a partir de la cual se ha determinado la aportación media anual por cuencas hidrográficas en Hm^3 por año. En el Cuadro 4 se recogen estos valores medios y también aparecen los valores de las precipitaciones totales, así como el ratio entre ambos (aportación natural/precipitación) que es un parámetro de interés en cada cuenca, ya que indica el porcentaje de lluvia anual que se convierte en caudal y circula por los ríos⁽¹⁷⁾.

Sin embargo, el esfuerzo de cuantificación de los recursos ha ido más lejos incluyendo una primera aproximación de la distribución espacial de éstos en el interior de cada cuenca hidrográfica, aunque los datos todavía se consideran preliminares y sujetos a posibles revisiones.

Por otra parte, se ha llevado a cabo un importante estudio de los acuíferos a nivel nacional, realizado por el Servicio Geológico de Obras Públicas, con el objeto de conocer cuales son las aportaciones naturales de aguas subterráneas y completar de esta manera la cuantificación de los recursos hidráulicos disponibles (aportaciones naturales). En el Cuadro 4 aparecen todos los valores referidos a aportaciones naturales desagregados por cuencas hidrográficas.

Otros datos de interés relacionados con el lado de la oferta del recurso son los referentes al número de presas y de trasvases existentes.

Las presas al permitir la regulación de los caudales que transitan por los ríos garantizan la disponibilidad del recurso y constituyen el elemento clave en la conversión de las aportaciones naturales en recursos garantizados⁽¹⁸⁾.

Según las últimas estadísticas disponibles sobre embalses en España existían a finales de 1989 un total de 1.297 embalses contabilizando los ya construidos, los que estaban en construcción y los que estaban en proyecto o estudio⁽¹⁹⁾. Los embalses en explotación representan una capacidad de 49.241 Hm^3 , mientras que los embalses en construcción suponían 5.436 Hm^3 , y en proyecto o estudio se estaba considerando un incremento de la capacidad total del orden de los 22.826 Hm^3 .

De las series históricas disponibles se concluye que se ha dado un esfuerzo importante en la construcción de presas y, sobre todo, sostenido a lo largo del presente siglo, destacando el período que se inicia en la década de los cincuenta, así se puede comprobar que desde 1950 a 1985 se construyeron en España 579

(17) Aunque España se encuentra dividida en diez cuencas hidrográficas, a la hora de elaborar los planes hidrológicos, se establecen las subdivisiones siguientes: la cuenca del Norte de España se divide en tres, Norte I, II y III, la del Guadiana en dos, denominadas Guadiana I y II, y de la cuenca del Guadalquivir se suele separar la correspondiente a los ríos Guadalete y Barbate. Resultando en total catorce planes hidrológicos.

(18) El término recursos garantizados en la documentación española se corresponde con el de recursos hidráulicos en la nota 4, y hace referencia a la parte de los recursos hidráulicos disponibles o totales (aportaciones naturales) que se detraen del ciclo hidrológico para su uso.

(19) Véase *Estadística sobre embalses y producción de energía hidroeléctrica en 1989 y años anteriores*, Dirección General de Obras Hidráulicas, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, 1990, pp. 41-56.

Cuadro 4: RECURSOS HIDRÁULICOS DISPONIBLES
(Aportaciones naturales) (Hm³/año)

Cuencas hidrográficas	Aguas superficiales (S)	Precipitación (P)	S/P	Aguas subterráneas	Total
Norte I	12059,53	20817,00	0,579	—	12059,53
Norte II	13456,55	23450,00	0,574	2636,00	165092,55
Norte III	5964,62	9492,00	0,628	339,00	6303,62
Duero	15168,00	50868,00	0,298	1875,00	17043,00
Tajo	12511,60	35698,00	0,350	1818,00	14329,60
Guadiana I	4875,68	29172,00	0,167	656,00	5530,68
Guadiana II	1373,00	4646,00	0,299	98,00	1471,00
Guadalquivir	6861,13	32330,00	0,212	2087,00	8948,13
Guadalete-Barbete	353,00	4859,00	0,073	228,00	581,00
Sur	1566,00	9904,00	0,158	1308,00	2874,00
Segura	998,10	7170,00	0,139	909,00	1907,10
Júcar	4147,43	23382,00	0,177	3633,00	7780,43
Ebro	19961,00	51495,00	0,387	3078,00	23039,00
Pirineos Orientales	2550,00	—	—	250,00	2800,00
Total Peninsular	101844,64	303283,00	0,327	18915,00	120769,64

Fuente: MOPU, *Plan Hidrológico*, 1990.

presas⁽²⁰⁾. Hoy en día se prosigue con esta política porque se ve como el instrumento indispensable para garantizar los abastecimientos en el futuro.

Junto a la construcción de presas, la construcción de trasvases constituyen el otro instrumento necesario para la regulación espacial de los recursos de agua. Actualmente se contabilizan hasta un total de 55 trasvases, de los cuales 38 están en explotación, 3 en construcción, 1 está previsto para un futuro inmediato, 12 fueron considerados en su día o están en estudio y 1 es un trasvase histórico que data del siglo II, denominado "Canal de Cella" que conecta la cuenca del río Júcar con la del río Ebro⁽²¹⁾.

Aunque se disponen de datos sobre las cantidades máximas de agua que se pueden trasvasar para la mayoría de los trasvases construidos, no existen datos sobre cantidades trasvasadas, por lo que resulta difícil evaluar los efectos que tienen estos trasvases sobre los recursos disponibles en cada cuenca.

(20) Véase *Plan Hidrológico. Síntesis de la documentación básica*, Dirección General de Obras Hidráulicas, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, 1990, pp. 32-33. Como curiosidad histórica se puede señalar que en la provincia de Alicante se encuentra el embalse de Tibi, construido durante los años 1579 a 1594 y considerado el más antiguo de Europa en funcionamiento con una capacidad de 370.000 m³. Pantano que en la actualidad se encuentra en estado ruinoso y con aguas altamente contaminadas.

(21) Véase la referencia de la nota 20.

Del total de los trasvases construidos 28 son trasvases intracuenca y los 10 restantes son trasvases intercuenca, de éstos, 5 se encuentran en la zona húmeda y 5 en la zona seca. En esta última zona cabe destacar el trasvase Tajo-Segura que conecta el embalse de Bolarque en el río Tajo con el embalse de Talave en el río Mundo, que es un afluente del río Segura, y que tiene una capacidad máxima de $33 \text{ m}^3/\text{segundo}$. Los caudales de agua trasvasados se utilizan para el abastecimiento de ciudades y regadíos. De hecho este canal integra la cuenca del Tajo con las de los ríos Segura y Júcar, ya que parte de las aguas que llegan al Segura alimentan la cuenca del Júcar a través de uno de los tres trasvases existentes Segura-Júcar. Actualmente está en construcción un trasvase entre la cuenca del Segura y la del Sur de España que se alimentará también con aguas procedentes del Tajo, con lo que este río quedará finalmente conectado con las tres cuencas con déficit que existen en España.

En la zona húmeda el principal trasvase es el de Zadorra-Arratia que conecta la cuenca del Ebro con la del Norte, con una capacidad máxima de $54 \text{ m}^3/\text{segundo}$. El agua trasvasada se utiliza para el abastecimiento de Bilbao. El resto de los trasvases son de menor importancia con capacidades máximas muy inferiores a las del trasvase Zadorra-Arratia.

Finalmente nos gustaría mencionar un ejemplo de cooperación internacional en la explotación de los recursos de agua, aunque sea a pequeña escala. Se trata de los trasvases que unen el lago Lanous en el río Carol (cuenca del Ebro) con el río Ariege en Francia, y el río Ariege de nuevo con el río Carol. A través de estos trasvases España presta agua a Francia para la producción de energía eléctrica y, posteriormente, Francia le restituye los caudales prestados.

4.2 Demandas

La cuantificación de las demandas de agua es una de las tareas básicas de la planificación hidrológica, puesto que ésta tiene como objetivo prioritario asegurar los abastecimientos.

Ahora bien, como el conocimiento de los consumos actuales de agua resulta limitado y parcial se ha recurrido al cálculo de unas *demandas teóricas* que se definen por los gestores de los recursos de agua como los caudales que se precisan para cada actividad cuando se consideran las necesidades basadas en unas *dotaciones* razonables y ajustadas a la realidad⁽²²⁾.

El cálculo de las demandas teóricas se ha realizado por sectores, distinguiendo la demanda urbana de la industrial y de la agraria. El total se ha obtenido por agregación de las demandas correspondientes a estos tres sectores.

Para el cálculo de las demandas urbanas se han estimado las poblaciones para las distintas cuencas hidrográficas a partir de diversas extrapolaciones de los últimos censos disponibles, y se han aplicado unas dotaciones teóricas que se han fijado, en general, en función del número de habitantes de cada población. La dotación media utilizada para este tipo de demanda ha sido de $307/\text{litros}/\text{habitante}/\text{día}$.

(22) Obsérvese que en la definición no se hace referencia a cuál pueda ser la disposición a pagar de los consumidores por lo que no se puede hablar de cantidad demandada en sentido estricto. Téngase en cuenta que la determinación *económica* de las demandas de agua exigirá la estimación de una función de demanda de agua que recogiese la disposición a pagar de los consumidores.

Para la estimación de los valores de las demandas industriales se han identificado éstas con los consumos actuales en las cuencas en que existía información disponible, pero en la mayoría de los casos se ha recurrido al uso de distintas dotaciones teóricas ($m^3/\text{trabajador/día}$) dependiendo del tipo de industria, que después se han multiplicado por el número de trabajadores ocupados en cada uno de los distintos tipos de industrias que aparecen en las estadísticas oficiales disponibles.

Finalmente, las demandas agrarias se han calculado en base a la información existente de superficies actualmente en riego por cuencas hidrográficas. A estas superficies se les ha aplicado unas dotaciones teóricas definidas en función de la climatología y de la tipología de los cultivos. Como cifra ilustrativa la dotación media definida para las demandas agrarias ha sido de $7.617 m^3/\text{hectárea/año}$. En el Cuadro 5 aparecen las demandas actuales (1988) por cuencas hidrográficas para estos tres sectores así como los totales en $Hm^3/\text{año}$.

4.3 El balance hidráulico nacional

Con los datos de los apartados anteriores se puede obtener un balance anual de la situación hidráulica actual, que permite hacerse una idea, aunque sea aproximada, de los desequilibrios existentes en España. En el Cuadro 6 aparecen los recursos garantizados, las demandas y el balance para cada una de las cuencas y los totales peninsulares⁽²³⁾.

Como puede observarse en dicho cuadro, la España peninsular presenta un fuerte superávit de $13772.87 Hm^3/\text{año}$. Pero esta situación excedentaria no se da en todas las cuencas hidrográficas. Así, existen tres cuencas que tienen importantes déficit, destacando el de la cuenca del Júcar por encima de los $1000 Hm^3/\text{año}$. Sin embargo, la situación de desequilibrio más preocupante corresponde a la cuenca del Segura, ya que no sólo los recursos garantizados sino también los recursos totales (ver Cuadro 4) son inferiores a las demandas totales. El balance nos permite por tanto detectar aquellas cuencas en las que existe o puede existir a corto plazo un problema de abastecimiento que, como puede verse en el mapa de la sección 2 están situadas en el sudeste de España, en el litoral mediterráneo.

La simple inspección visual de las distancias entre las distintas cuencas hidrográficas, así como del tamaño de los déficits registrados, permite reducir el problema hidrológico español a la cuestión de cómo abastecer las cuencas del litoral mediterráneo, Júcar y Segura, mediante el trasvase de recursos desde las cuencas circundantes con superávit, Ebro, Tajo, Guadiana y Guadalquivir.

La cuenca del Sur y la de Guadalete-Barbate, si bien son deficitarias, sus déficit son de pequeña magnitud, por lo que dada su ubicación podrían ser razonablemente atendidos por la cuenca del Guadalquivir, que presenta un significativo superávit.

(23) En el balance no aparecen los recursos correspondientes a las aportaciones naturales, sino tan sólo los recursos garantizados. En lo que respecta a los déficits existentes, no hay que olvidar que se están utilizando las demandas teóricas y no los consumos actuales, por lo que el déficit debe interpretarse como una estimación de la demanda insatisfecha en la cuenca. También es posible la existencia de recursos garantizados no contabilizados. Por otra parte, dada su especificidad, hemos dejado fuera del balance las cuencas correspondientes a las islas Baleares y a las islas Canarias.

Cuadro 5: DEMANDAS DE AGUA (Hm³/año)

Cuencas hidrográficas	Abastecimiento urbano	Industria	Regadíos	Total
Norte I	66,59	31,33	358,88	456,80
Norte II	147,46	332,32	—	479,78
Norte III	217,44	243,52	5,24	466,20
Duero	214,43	—	3375,37	3589,80
Tajo	573,33	160,59	2119,41	2853,33
Guadiana I	96,40	71,27	1976,70	2144,37
Guadiana II	2918,00	66,69	75,25	171,12
Guadalquivir	365,48	281,70	2759,30	3046,48
Guadalete-Barbate	96,68	41,90	237,20	375,78
Sur	228,94	14,01	542,00	784,95
Segura	193,08	—	1861,08	2054,16
Júcar	499,36	107,00	2535,39	3141,75
Ebro	644,70	324,18	6682,73	7651,61
Pirineos Orientales	823,00	—	545,00	1368,00
Total Peninsular	4096,07	1674,51	23073,55	28944,13

Fuente: MOPU, *Plan Hidrológico*, 1990.

5. SIMULACIONES

Con la finalidad de investigar en términos cuantitativos los diferentes resultados que se obtendrían de la aplicación de los criterios estudiados en este trabajo, procederemos en esta sección a resolver un ejemplo numérico⁽²⁴⁾. En el ejemplo elegido las funciones de costes se postulan con forma funcional cuadrática y las funciones de demanda, lineales.

1.º Criterio: Minimización de costes totales

Se supone que existen ocho funciones de costes de la forma $C_{ij} = d_{ij}x_{ij}^2$, donde $i = 1,2,3,4$ representan las cuatro cuencas con superávit: Ebro, Tajo, Guadiana I y Guadalquivir, y $j = 5,6$ representan las dos cuencas con déficit, Júcar y Segura. Obsérvese que estas funciones garantizan la estricta convexidad de los costes para todo $x_{ij} \geq 0$. Todos los parámetros d_{ij} son positivos, los costes están dados en miles de pesetas y los caudales en Hm³.

(24) Para calcular las soluciones que se presentan a continuación, se ha utilizado el programa GINO (*Generalized Reduced Gradient*) de Lasdon y Waren. El "output" del programa para cada criterio se recoge en el Apéndice.

Cuadro 6: BALANCE HIDRÁULICO (1988) (Hm³/año)

Cuencas hidrográficas	Recursos garantizados	Demandas	Balance
Norte I	1100,00	456,80	+643,20
Norte II	1807,00	479,78	+1327,22
Norte III	943,00	466,20	+476,80
Duero	9465,00	3589,80	+5875,20
Tajo	6281,00	2853,33	+3427,67
Guadiana I	2610,00	2144,37	+465,63
Guadiana II	407,00	171,12	+253,88
Guadalquivir	4416,00	3406,48	+1009,52
Guadalete-Barbate	364,00	375,78	-11,78
Sur	533,00	784,95	-251,95
Segura	1742,00	2054,16	-312,16
Júcar	2003,00	3141,75	-1138,75
Ebro	9289,00	7551,61	+1737,39
Pirineos occidentales	1657,00	1368,00	+289,00
Total Peninsular	42617,00	28844,13	+13772,87

Fuente: MOPU, *Plan Hidrológico*, 1990.

Para estas funciones de costes, el conjunto de condiciones (9) y (10), generan el siguiente sistema de ecuaciones

$$2d_{ij}x_{ij} + \mu_j = 0, \quad i = 1,2,3,4 \quad j = 5,6 \quad (30)$$

$$\sum_{i=1}^4 x_{ij} = \bar{x}_j - R_j, \quad j = 5,6 \quad (31)$$

a partir del cual se calculan x_{ij} y μ_j . Por tanto, aquí se investiga la existencia de una solución interior que satisfaga las restricciones (3) y (5) como desigualdades estrictas.

En los Cuadros 7 y 8, se presentan los valores de los parámetros de distancia y los datos utilizados en las simulaciones.

Para dar valores a los parámetros de distancia, se ha utilizado la distancia en kilómetros entre las poblaciones más importantes de las distintas cuencas, y se ha tomado como base 10 la distancia entre las poblaciones más importantes de las cuencas deficitarias: Valencia en la cuenca del Júcar y Murcia en la cuenca del Segura. Se obtienen así ocho números puros que representan una estructura de posiciones relativas entre distintos centros que hemos incorporado a las correspondientes funciones de costes.

Cuadro 7: PARÁMETROS DE DISTANCIA

d_{15}	d_{25}	d_{35}	d_{45}	d_{16}	d_{26}	d_{36}	d_{46}
13,25	15,75	15,43	17,88	23,15	18,25	14,33	13,96

Cuadro 8: DATOS

Recursos (Hm ³ /año)					
Cuencas con superávit				Cuencas deficitarias	
R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
9289	6281	2610	4152,27	2003	1742
Demandas teóricas (Hm ³ /año)					
Cuencas con superávit				Cuencas deficitarias	
\bar{x}_1	\bar{x}_2	\bar{x}_3	\bar{x}_4	\bar{x}_5	\bar{x}_6
7551,61	2853,33	2144,37	3406,48	3141,75	2054,16

Fuente: MOPU, *Plan Hidrológico*, 1990.

En el Cuadro 8 se recogen los datos correspondientes a los recursos garantizados y demandas "teóricas" que aparecen en el Balance Hidráulico Nacional que se presentó en la sección 4⁽²⁵⁾.

Las soluciones al sistema (30)-(31) aparecen en el Cuadro 9. En dicho cuadro, se puede comprobar que las cantidades satisfacen las restricciones de no negatividad, y que los caudales totales transferidos desde las cuencas con superávit son inferiores que los recursos que restan en estas cuencas después de satisfacer sus propias demandas, lo que implica que los precios sombra sean cero.

2.º Criterio: Tarifa igual a coste medio

Para calcular las tarifas y los caudales trasvasados en este caso, es necesario definir las funciones de demanda para cada cuenta deficitaria. Como se ha señalado anteriormente, la forma funcional elegida para estas funciones es la lineal

(25) Las cuencas del Sur y Guadalete Barbate no aparecen en la tabla porque se ha decidido integrarlas en la cuenca del Guadalquivir dada la proximidad geográfica de estas tres cuencas. Por esta razón, el superávit de la cuenca del Guadalquivir del Cuadro 8 no coincide con el del Balance Hidráulico de la sección 4.

$$x_j = a_j - b_j p_j, \quad j = 5,6 \quad (32)$$

Entonces, la condición de beneficio nulo (14), que escribimos como beneficio medio igual a cero, nos da la siguiente expresión

$$(1/b_j)(a_j - x_j) - d_{ij} x_{ij} = 0, \quad i = 1,2,3,4; j = 5,6 \quad (33)$$

donde x_j , el consumo de agua, viene dado por (16), de forma que sustituyendo x_j por esa expresión en la condición (33) y operando, se obtiene el sistema de ecuaciones

$$(1/b_j) \sum_{i=1}^4 x_{ij} + d_{ij} x_{ij} = (1/b_j)(a_j - R_j) \quad (34)$$

$$i = 1,2,3,4; j = 5,6,$$

que en el caso de tener solución y ésta satisfacer las restricciones (15) y (17), permite obtener los caudales de agua a trasvasar, así como calcular las tarifas a fijar en las cuencas importadoras.

A fin de asignar valores a los parámetros, se ha procedido de la forma siguiente: i) hacer corresponder las demandas "teóricas" con las asociadas a precios cero, y ii) asignar una elasticidad de demanda más alta a aquella cuenca que presenta un consumo más elevado de agua para usos agrarios.

Con este fin y en correspondencia con la información ofrecida por el Balance Hidráulico Nacional, el Cuadro 10 presenta la distribución porcentual del consumo de agua por usos en las cuencas del Júcar y del Segura.

El siguiente sistema de funciones de demandas satisface las condiciones i) y ii)

$$\begin{aligned} x_5 &= 3141.75 - p_5 \\ x_6 &= 2054.16 - p_6 \end{aligned} \quad (35)$$

donde las cantidades se miden en Hm^3 y los precios en miles de pesetas.

Cuadro 9: MINIMIZACIÓN DE COSTES TOTALES: SOLUCIONES

Origen	Destino	5	6	Caudal total transferido	Excedente
1		330,93	56,32	387,25	1350,13
2		278,40	71,44	349,84	3077,83
3		284,17	90,98	375,15	90,48
4		245,23	93,40	338,63	407,16
Caudal total recibido		1138,75	312,16	1450,91	
Recursos		2003,00	1742,00		
Consumo		3141,75	2054,16		
Costes		4238413,00	1161855,60		

Cuadro 10: USOS DEL AGUA EN LAS CUENCAS DE LOS RÍOS JÚCAR Y SEGURA

Uso (Hm ³ /año)		Urbano	Industrial	Regadíos	Total
5	Júcar	499,36 (15,9%)	107,00 (3,4%)	2535,39 (80,7%)	3141,75
6	Segura	193,08 (9,4%)	-	1861,08 (90,6%)	2054,16

Para estos valores de los parámetros, el sistema de ecuaciones (34) tiene una solución que satisface las restricciones exigidas, como se puede observar en el Cuadro 11.

Basándose en las cantidades que aparecen en el Cuadro 11 se pueden calcular los valores de las tarifas, los ingresos, su división entre renta del recurso y costes de transporte, así como el bienestar social. Estos valores aparecen en el Cuadro 12.

3.ª Criterio. Tarifa igual a coste marginal

Para las funciones de costes y de demanda definidas, las tarifas óptimas, suponiendo una solución interior, se calculan resolviendo las condiciones (26) en forma de igualdad

$$(1/b_j)(a_j - x_j) - 2d_{ij}x_{ij} = 0, \quad i = 1,2,3,4; j = 5,6 \quad (36)$$

que nos dan el siguiente sistema de ecuaciones cuando se sustituye x_j por (24)

$$(1/b_j) \sum_{i=1}^4 x_{ij} + 2d_{ij}x_{ij} = (1/b_j)(a_j - R_j) \quad (37)$$

$$i = 1,2,3,4; j = 5,6,$$

Para los valores de los parámetros que aparecen en (35) y los que se recogen en el Cuadro 7, y los datos sobre recursos del Cuadro 8, se obtienen las cantidades para los caudales trasvasados del Cuadro 13.

A partir de estas cifras y utilizando las funciones de demanda, se calculan las tarifas socialmente óptimas y los ingresos, la distribución de éstos entre renta del recurso, costes de transporte y beneficios, y finalmente, restando los costes al excedente total del consumidor se obtiene el bienestar social. Estos valores económicos se encuentran en el Cuadro 14.

Esta sección finaliza con un análisis comparativo entre la solución que se obtiene cuando la política hidráulica se guía por el criterio de igualar la tarifa al coste medio, y la que se obtiene cuando se aplica el criterio de igualar la tarifa al coste marginal (Cuadro 15).

Como se observaba en el análisis gráfico, el total de caudales trasvasados entre las cuencas disminuye, para este ejemplo, en un 44 por cien y, consecuentemente, disminuyen sustancialmente los costes de transporte, lo que era de esperar teniendo en cuenta la estricta convexidad de los costes. Sin embargo, la pérdida de bienestar en valores relativos es muy pequeña, del 0.79 por cien, lo que

Cuadro 11: TARIFA IGUAL A COSTE MEDIO: SOLUCIONES (I)

Origen	Destino	5	6	Caudal total transferido	Excedente
1		68,22	10,88	79,10	1658,48
2		57,39	13,80	71,19	3356,48
3		58,58	17,57	76,15	389,48
4		50,55	18,04	68,59	677,20
Caudal total recibido		234,74	60,29	295,03	
Recursos		2003,00	1742,00		
Consumo		2237,74	1802,29		

Cuadro 12: TARIFA IGUAL A COSTE MEDIO: SOLUCIONES (II)

	5	6
Tarifa	904,01	251,87
Ingresos	2022939,30	453942,78
Renta	1810732,00	438757,54
Coste	212207,31	15185,24
Excedente total del consumidor	4526679,50	2078067,40
Bienestar social	4314472,10	2062882,10

Cuadro 13: TARIFA IGUAL A COSTE MARGINAL: SOLUCIONES (I)

Origen	Destino	5	6	Caudal total transferido	Excedente
1		38,03	6,02	44,02	1693,37
2		31,99	7,63	39,62	3388,05
3		32,65	9,72	42,37	423,26
4		28,18	9,98	38,16	707,63
Caudal total recibido		130,85	33,35	164,2	
Recursos		2003,00	1742,00		
Consumo		2133,85	1775,35		

Cuadro 14: TARIFA IGUAL A COSTE MARGINAL: SOLUCIONES (II)

	5	6
Tarifa	1007,90	278,81
Ingresos	2150707,40	494985,30
Renta	2018823,70	485687,02
Coste	65928,59	4645,70
Beneficio	65955,13	4652,61
Excedente total del consumidor	4427365,30	2070919,20
Bienestar social	4361436,70	2066273,50

se debe a que el componente de costes en la función de bienestar social es muy pequeño en comparación con el excedente total del consumidor.

En el último cuadro 16, aparecen las cifras que permiten evaluar los costes en términos de bienestar social e ingresos fiscales de una política basada en el criterio de igualar la tarifa al coste medio de transporte. A partir de los datos de la tabla citada, se obtiene que una disminución de las tarifas del 10,3 por cien y del 9,6 por cien respectivamente, van asociadas a una pérdida de bienestar social del 0,79 por cien y a una disminución de los ingresos netos por la tarifa del agua del 12,6 por cien. En este caso, la disminución de los ingresos es superior a las disminuciones de las tarifas, pero la pérdida de bienestar social es mínima en términos porcentuales.

Comparando el bienestar asociado al criterio de minimización de costes para unas demandas "teóricas" dadas con el que se obtiene cuando se aplican los otros criterios, resultan una pérdida del 74,2 por cien en comparación con el criterio de igualar la tarifa al coste medio, y del 74,4 por cien en comparación con el criterio de igualar la tarifa al coste marginal. Desde el punto de vista fiscal, el coste es evidente. En este caso el gobierno no obtendrá ningún ingreso fiscal procedente de la actividad de transporte del agua, pasando de una situación de superávit a una situación de déficit en relación a esa actividad.

6. CONCLUSIONES

A partir de los datos actualmente disponibles, se puede afirmar que la solución a los problemas hidrológicos en España, en el corto y medio plazo, pasa por asegurar el abastecimiento de las cuencas del litoral mediterráneo Júcar y Segura, y por la construcción de nuevas presas que permitan la regulación temporal de los recursos. Asimismo, cabe pensar que, dado el superávit de recursos hídricos existente a nivel nacional, los problemas hidrológicos a largo plazo en España tendrán que ver principalmente con la calidad de los abastecimientos, esto es, con la contaminación de las aguas, lo que exigirá tanto una regulación de la cantidad como de la calidad del recurso por parte de los gestores del agua.

Cuadro 15: COMPARACIÓN DE LOS CRITERIOS SEGUNDO Y TERCERO

	Caudal total transferido (2.º criterio)	Caudal total transferido (3.º criterio)	Variación (%)
1	79,10	44,02	-44,34
2	71,19	39,62	-44,34
3	76,15	42,37	-44,35
4	68,59	38,16	-44,36
Caudal total recibido	295,03	164,20	-44,34
Ingresos	2476882,10	2645692,70	+6,81
Renta	2249489,50	2504510,70	+11,33
Coste	227392,55	70574,29	-68,96
Beneficio	0	7007,74	
Excedente total del consumidor	6604746,90	6498284,50	-1,61
Bienestar social	6377354,20	6427710,20	0,79

Cuadro 16: COSTE SOCIAL DE LOS CRITERIOS PRIMERO Y SEGUNDO

Criterio	1.º	2.º	3.º
Ingresos netos	-5400268,60	+2249489,50	+2575118,40
Tarifas: Júcar		904,1	1007,90
Segura		251,87	278,81
Bienestar	1644814,60	6377354,20	6427710,20

En lo que respecta al problema asignativo actual se han estudiado tres posibles aproximaciones que ofrecen soluciones distintas en lo que se refiere a caudales trasvasados, costes de transporte, tarifas de agua, ingresos fiscales y bienestar social. Los resultados apuntan a que, actualmente, en las cuencas del Júcar y del Segura el agua ha dejado de ser un bien libre para convertirse en un bien económico, y que, consecuentemente, la gestión óptima del recurso exigiría que todos los usuarios pagasen una tarifa por su uso.

Por otra parte, con este estudio se ha querido presentar de forma operativa una metodología que pensamos puede ser útil para la planificación de los recursos hidrológicos del país. Obviamente, la aplicación de esta metodología a la realidad requerirá de la estimación previa de las funciones de costes de transporte y de demanda, dado que creemos que no es posible diseñar una política hidráulica bien fundamentada hasta que no se disponga de información sobre la disposición al

pago de los consumidores, y de las correspondientes estimaciones de las funciones de costes basadas en la evidencia empírica disponible⁽²⁶⁾.

Además de estos estudios otro prerequisite a satisfacer para la aplicación a la realidad de la metodología propuesta es un buen conocimiento de cual es la distribución espacial de los déficit en el interior de las cuencas hidrográficas, ya que sin esta información resulta imposible diseñar una red de abastecimientos independientemente de cual sea el criterio que guíe la política hidráulica.

También nos gustaría señalar que en España el marco institucional posibilita una solución integrada (centralizada) a los problemas de abastecimiento mediante trasvases de caudales de unas cuencas a otras debido a que la Ley de Aguas de 1985 establece que éstos deberán aprobarse en el Parlamento. Sin embargo, no habría que descartar que los conflictos interregionales que puede suscitar un tema como el de los trasvases retrasen o tergiversen la puesta en marcha de una política hidráulica que necesariamente exigirá que determinadas comunidades cedan parte de sus recursos a las Comunidades Valenciana y Murciana. En relación con este último punto, quisieramos llamar la atención sobre el hecho de que la aplicación del segundo y tercer criterio generarían una renta del recurso que podría utilizarse para compensar a las cuencas abastecedoras y para financiar proyectos de reconversión agraria ahorradores de agua en las cuencas deficitarias, lo que contribuiría a mitigar los posibles conflictos interregionales provocados por el tema de los trasvases.

Finalmente, nos gustaría referirnos a una de las posibles extensiones de este trabajo, que consistiría en plantear y resolver un modelo integrado de explotación de aguas superficiales y subterráneas que permitiese evaluar los efectos de los trasvases sobre las tasas de extracción de los acuíferos. Este modelo, que necesariamente tendría que ser dinámico, nos ofrecería las claves para definir una gestión integrada del conjunto de las aportaciones naturales del recurso⁽²⁷⁾.



(26) Por otra parte esta información permitiría contrastar la validez de la hipótesis sobre los rendimientos a escala que hemos establecido en este trabajo, de la que dependen crucialmente los resultados obtenidos. Obviamente, los problemas más serios surgirían si los rendimientos de la función de transporte fuesen crecientes debido a un posible incumplimiento de las condiciones suficientes en los problemas de optimización, lo que exigiría quizás una aproximación de "segundo óptimo". Si operasen rendimientos constantes las variaciones en la solución serían fáciles de prever. La solución consistiría en seleccionar el abastecimientos más barato para cada cuenca deficitaria, o la estructura de abastecimientos más baratos, si las restricciones sobre los caudales trasvasados (tipo (3)) son operativas para el óptimo del problema.

(27) Este tema ha sido ya tratado en la literatura en distintos artículos entre los que mencionaremos el trabajo clásico de Burt (1964) y los más recientes de Noel, Delworth y Moore (1980), Noel y Howitt (1982) y Bredehoeft y Young (1983). En España, el profesor Castro de la Universidad de Murcia, está actualmente trabajando en una tesis sobre éste y otros temas dedicados a la gestión de acuíferos.

APÉNDICE

MODEL: TOTAL COST MINIMIZING⁽²⁸⁾

- 1) $26.50 * X15 - Y5 = 0;$
- 2) $31.50 * X25 - Y5 = 0;$
- 3) $30.86 * X35 - Y5 = 0;$
- 4) $35.76 * X45 - Y5 = 0;$
- 5) $X15 + X25 + X35 + X45 = 1138.75;$
- 6) $46.30 * X16 - Y6 = 0;$
- 7) $36.50 * X26 - Y6 = 0;$
- 8) $28.66 * X36 - Y6 = 0;$
- 9) $27.92 * X46 - Y6 = 0;$
- 10) $X16 + X26 + X36 + X46 = 312.16;$

END

SOLUTION STATUS: FEASIBLE TO TOLERANCES

VARIABLE	VALUE
X15	330.932108
Y5	8769.700849
X25	278.403202
X35	248.176950
X45	245.237731
X16	56.323244
Y6	2607.766134
X26	71.445648
X36	90.989747
X46	93.401366

ROW	SLACK OR SURPLUS
1)	.000000
2)	.000000
3)	.000000
4)	.000000
5)	-.000000
6)	.000000
7)	.000000
8)	.000000
9)	.000000
10)	.000000

(28) En el lenguaje del programa los operadores * y ^ representan las operaciones de multiplicación y exponencial, y YJ con J=5,6 son los multiplicadores asociados a las demandas "teóricas" de la cuenca J (μ).

MODEL: AVERAGE COST RATING

- 1) $14.25 * X15 + X25 + X35 + X45 = 1138.75;$
- 2) $X15 + 16.75 * X25 + X35 + X45 = 1138.75;$
- 3) $X15 + X25 + 16.43 * X35 + X45 = 1138.75;$
- 4) $X15 + X25 + X35 + 18.88 * X45 = 1138.75;$
- 5) $24.15 * X16 + X26 + X36 + X46 = 312.16;$
- 6) $X16 + 19.25 * X26 + X36 + X46 = 312.16;$
- 7) $X16 + X26 + 15.33 * X36 + X46 = 312.16;$
- 8) $X16 + X26 + X36 + 14.96 * X46 = 312.16;$

END

SOLUTION STATUS: FEASIBLE TO TOLERANCES

VARIABLE	VALUE
X15	68.225234
X25	57.395833
X35	58.586154
X45	50.558412
X16	10.879576
X26	13.800668
X36	17.575868
X46	18.041704

ROW	SLACK OR SURPLUS
1)	-.000010
2)	.000000
3)	.000000
4)	.000000
5)	.000000
6)	.000000
7)	.000000
8)	.000000

MODEL: MARGINAL COST RATING

- 1) $27.50 * X15 + X25 + X35 + X45 = 1138.75;$
- 2) $X15 + 32.50 * X25 + X35 + X45 = 1138.75;$
- 3) $X15 + X25 + 31.86 * X35 + X45 = 1138.75;$
- 4) $X15 + X25 + X35 + 36.76 * X45 = 1138.75;$
- 5) $47.30 * X16 + X26 + X36 + X46 = 312.16;$
- 6) $X16 + 37.50 * X26 + X36 + X46 = 312.16;$
- 7) $X16 + X26 + 29.66 * X36 + X46 = 312.16;$
- 8) $X16 + X26 + X36 + 28.92 * X46 = 312.16;$

END

SOLUTION STATUS: FEASIBLE TO TOLERANCES

VARIABLE	VALUE
X15	38.033083
X25	31.996086
X35	32.659647
X45	28.184473
X16	6.021339
X26	7.638027
X36	9.727424
X46	9.985243

ROW	SLACK OR SURPLUS
1)	-.000010
2)	.000000
3)	.000000
4)	.000000
5)	.000000
6)	.000000
7)	.000000
8)	.000000

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andreu, J. (1991): *La infraestructura hidráulica y el macroplaneamiento*, Valencia, Generalitat Valenciana.
- Bredheoef, J.D. y R.A. Young (1983): "Conjunctive use of groundwater and surface water: risk aversion", *Water Resources Research*, 19, págs. 1111-1121.
- Burt, O.R. (1964): "The economics of conjunctive use of ground and surface water", *Hilgardia*, 36, págs. 31-111.
- Cummings, R.G. (1974): *Interbasin water transfers. A case study in Mexico*, Baltimore, Johns Hopkins University Press.
- Chiang, A.C. (1984): *Fundamental methods of mathematical economics*, New York, MacGraw-Hill.
- Generalitat Valenciana y Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (1986), *El agua en la Comunidad Valenciana*, Madrid.
- Grenon, M. and M. Batisse (eds.) (1989): *Futures for the Mediterranean Basin*, Oxford, Oxford University Press.
- Howe, C.W. y K.W. Easter (1971): *Interbasin transfers of water: economic issues and impacts*, Baltimore, Johns Hopkins University Press.
- Hartman, L.M. y D.A. Seastone (1970): *Water transfers: economic efficiency and alternative institutions*, Baltimore, Johns Hopkins University Press.
- Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Confederación Hidrográfica del Júcar (1988): *Plan hidrológico. Documentación básica*, Madrid.
- Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Dirección General de Obras Hidráulicas (1990): *Estadísticas sobre embalses y producción de energía hidroeléctrica en 1989 y años anteriores*, Madrid.
- Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Dirección General de Obras Hidráulicas (1990): *Plan hidrológico. Síntesis de la documentación básica*, Madrid.
- Noel, J.E. y R.E. Howitt (1982): "Conjunctive multibasin management: an optimal control approach", *Water Resources Research*, 18, págs. 753-763.

- Noel, J.E., B. Delworth y C.V. Moore (1980): "Optimal regional conjunctive water management", *American Journal of Agricultural Economics*, 62, págs. 489-498.
- OECD (1992): *Environmental Data 1991*, Paris.
- Young, R.A. y R.H. Haveman (1985): 'Economics of water resources: a survey', en: *Handbook of Natural Resources and Energy Economics*, ed. por Allen V. Kneese y James L. Sweeney, Amsterdam, North-Holland.
- The World Bank and The European Investment Bank (1990): *The environmental program for the Mediterranean*, Washington.

Fecha de recepción del original: Septiembre, 1992
Versión final: Marzo, 1993

ABSTRACT

This paper consists of a theoretical analysis, in terms of water transport costs, tariffs, return on resources and social welfare, of three criteria applicable to the planning of interbasin transfer. The criteria studied are the minimization of water transport costs, the fixing of water tariffs equal to average transport costs and the fixing of socially optimal tariffs. In order to illustrate the theoretical analysis, a simulation has been carried out based on available data on national water resources and its distribution within geographical basins, as well as estimations of demand prior to the Hydrologic Plan ("Plan Hidrológico"). This simulation allows us to evaluate the social cost of applying non-optimal criteria.

Keywords: Natural resources. Hydrologic Planification.