

## **Medición de la calidad del agua del trasvase del Ebro (tramo Castellón-Mijares): valoración del coste económico asociado a la adecuación de calidades**

BEAMONTE CÓRDOBA, EDUARDO (\*), BERMÚDEZ EDO, JOSÉ D. (\*\*), CASINO MARTÍNEZ, ALEJANDRO (\*) Y VERES FERRER, ERNESTO J. (\*)

(\*)*Departamento de Economía Aplicada. Av. Naranjos s/n. 46022, VALENCIA.*

(\*\*)*Departamento de Estadística e Investigación Operativa. Universitat de València. C/ Dr. Moliner 50. 46100 Burjassot, VALENCIA.*

Tfo. 963 828 618 - E-mail: [beamonte@uv.es](mailto:beamonte@uv.es); [bermudez@uv.es](mailto:bermudez@uv.es); [Alejandro.Casino@uv.es](mailto:Alejandro.Casino@uv.es); [Ernesto.Veres@uv.es](mailto:Ernesto.Veres@uv.es)

### RESUMEN

Las implicaciones sobre la calidad del agua, medida ésta a través de los parámetros de carácter físico-químico empleados en la literatura específica, es uno de los principales problemas asociados a los trasvases de aguas superficiales. En este trabajo se realiza una valoración de la implicación económica del trasvase derivada de la adecuación de la calidad del agua resultante a los estándares de calidad exigidos por la legislación vigente, después de utilizar un indicador global para evaluar el efecto que sobre la calidad del agua tiene un posible trasvase de agua del río Ebro a la cuenca del Júcar, estableciéndose distintos supuestos de aporte de caudal, y referido a la comparación de calidades en su tramo Castellón-Mijares. Todo ello bajo la perspectiva del uso prepotable del agua. En el trabajo se utilizan los parámetros definitorios de la calidad físico-química del agua, para los que se dispone de suficiente información.

*Palabras clave:* calidad del agua, indicador, modelos de probabilidad, parámetros físico-químicos, simulación Monte Carlo.

### **Water quality measurement in the Ebro transfer (Castellón-Mijares section): economic valuation of quality adaptation**

### ABSTRACT

Water quality is one of the main problems in surface water transfer. In this work we make a economic valuation of a transfer of water from the Ebro River to the Júcar Basin, derived from the adequacy of water quality to legal quality standards. We propose a global quality index and different scenarios of river discharges are considered referred to the Castellón-Mijares section. In this work only physical and chemical parameters are used to define water quality, those parameters considered in the European Union Directives and from which sufficient information were available.

*Keywords:* water quality, index, probability models, physical and chemical parameters, Monte Carlo simulation.

JEL classification: C11, C15, C43, Q25.

Artículo recibido en Junio de 2006 y aceptado para su publicación en Mayo de 2007.

Artículo disponible en versión electrónica en la página [www.revista-eea.net](http://www.revista-eea.net), ref.: e-25210.

## 1. INTRODUCCIÓN

La polémica levantada por el trasvase Ebro-Júcar previsto por el Plan Hidrológico Nacional (Ley 10/2001 de 5 de julio) -en lo que sigue, PHN- y recientemente derogado en la práctica por el Real Decreto-Ley 2/2004 de 18 de junio, es un ejemplo paradigmático de la preeminencia de los criterios de cantidad frente a los de calidad a la hora de diseñar las políticas de agua en nuestro país. En efecto, todos los estudios técnicos, valoraciones de los expertos e intervenciones de la clase política -entendidas todas ellas en su doble sentido, pues cada hecho concreto ha dado lugar a valoraciones diametralmente opuestas atendiendo al sentir político del autor de las mismas- se han centrado en los aspectos cuantitativos del trasvase -dada la evidente necesidad de agua de las cuencas demandantes del trasvase-, y no en los aspectos relacionados con la calidad del agua trasvasada y sus posibles efectos sobre la del agua de la cuenca receptora.

Este hecho es bastante comprensible dado el déficit hídrico de las cuencas receptoras -Júcar, Segura y provincia de Almería-. Pero siendo esto cierto, y motivo fundamental de justificación al trasvase, no es menos cierto que no es la única condición necesaria para justificarlo: hace falta que haya un mínimo de calidad asociada a la cantidad del agua disponible. En zonas de clima húmedo, con existencia de agua superficial en abundancia, la calidad suele ir asociada a la cantidad, pero no ocurre así en zonas de clima árido -como la cuenca mediterránea-, en la que los ríos acostumbra a desembocar en el mar con un gran contenido, por ejemplo, de sales.

Desde un punto de vista técnico -línea que no desarrollaremos en este trabajo- la calidad del agua viene determinada por dos conceptos: la potencia hidráulica, relacionada con su posición en altitud; y la potencia osmótica, relacionada con su contenido en sales y conductividad (Naredo, 1997). La primera es la que permite mover el agua por gravedad, mientras que la segunda es la que la hace útil para abastecimientos y riegos. Ambas potencias apuntan a las dificultades de viabilidad del trasvase, como se pone de manifiesto en Naredo (2003). Lo que implica que deban tenerse en cuenta proyectos de desalación adicionales que, unidos a los costes de bombeo para salvar diferentes cotas del trayecto, aumenta el montante total del proyecto por lo que, antes de acometerlo, debiera cuantificarse en profundidad el coste final del metro cúbico del agua trasvasada (Estevan, 2003; Prada, 2003; Sahuquillo, 2001).

Un segundo gran bloque de aspectos a considerar son los referidos a las repercusiones medioambientales del previsto trasvase: protección integral del Delta del Ebro, vigilancia de las especies protegidas existentes y control de la propagación de especies invasoras, posible aumento de la salinidad del agua tanto en la cuenca cedente como en las receptoras y su efecto final, y valoración de los efectos del trasvase en los estiajes y años de acusado déficit hídrico. En la bibliografía apuntada antes se recogen distintos planteamientos críticos al modelo propuesto.

Finalmente, el tercer aspecto hace referencia a las características físico-químicas finales del agua derivada de la mezcla de la procedente del Ebro con la del agua de la cuenca del Júcar. Este es el objetivo del presente trabajo: analizar las características físico-químicas que definen la calidad del agua de las cuencas cedente (Ebro) y receptora (Júcar), y de la mezcla resultante bajo ciertas hipótesis de combinación. Los instrumentos utilizados son propios de la metodología estadística, así como el índice de calidad global definido en Beamonte et. al. (2004) y que permite globalizar en un valor numérico la calidad del agua según los criterios administrativos de obligado cumplimiento definidos en la vigente legislación de la Unión Europea.

La importancia del trasvase, sus posibles implicaciones medioambientales, las implicaciones sobre la calidad del agua resultante y, finalmente, las comprensibles necesidades hídricas de las cuencas deficitarias muy relacionadas con la definición de los modelos de desarrollo territorial de las Comunidades Autónomas implicadas, exigen la consideración combinada de todas las variables intervinientes, que abarcan un amplio espectro de realidades económicas, ambientales, sanitarias, agrarias, etc.

En este trabajo no se abordan los aspectos relacionados con el coste de las obras del trasvase, en la idea de que éstos quedan debidamente justificados por las necesidades hídricas de las cuencas receptoras. Sí, en cambio, se intenta realizar una valoración de los costes derivados de la adecuación de la calidad del agua resultante a los estándares de calidad exigidos por la normativa europea sobre el agua prepotable. Todos ellos son aspectos esenciales cuando se contempla en conjunto la problemática de la distribución y gestión del agua. El interés por la valoración económica de la calidad del agua se pone de manifiesto en los trabajos de Steinnes (1992), Arrojo (1999), Otto y Holtkamp (1999), Júdez et al. (2001), Bergstrom et al. (2001) -donde se referencia un buen número de investigaciones sobre este tema- y Ribaudó (2003).

## 2. LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA

A pesar de la enorme influencia que tiene una correcta medición de la calidad del agua en el desarrollo sostenible, no existe en la literatura un índice de calidad de fácil construcción y de amplia aplicación (Hueting, 1991), si bien Provencher y Lamontagne (1977) fueron pioneros en la propuesta de un índice particular.

Los requerimientos específicos sobre la calidad del agua vienen recogidos en la legislación básica de la Unión Europea, que es de obligatorio cumplimiento para todos los países miembros. Existen distintas normativas atendiendo al uso humano o prepotable del agua (Directivas 75/440/CEE y 79/869/CEE); al uso piscícola o para la vida de los peces (Directiva 78/659/CEE); o la relativa a la contaminación causada por determinadas sustancias peligrosas vertidas en el medio acuático (Directiva 76/464/CEE).

Una calidad determinada ha de hacer referencia a un uso también preestablecido, presentando cada uno de ellos requerimientos específicos (Poch, 1999). Las categorías más usuales según empleos son las de las aguas prepotables, aguas piscícolas y aguas para el riego. La calidad del agua según usos viene medida mediante un conjunto de parámetros, en muchas ocasiones coincidentes. Debido a las garantías exigidas para la salvaguardia de la salud pública, las exigencias de control para el agua prepotable -que representa menos del 5% del consumo total de agua (Bielsa y Duarte, 2000)- son mayores que las establecidas para los otros usos. En lo que sigue nos basaremos en los límites de admisibilidad para el agua destinada al consumo humano, que prevé la existencia de cuatro niveles de calidad -denotados por A1, A2, A3 y +A3- dependiendo de las exigencias de tratamiento posterior: el nivel A1 precisa tratamiento físico simple y desinfección; el nivel A2 precisa tratamiento físico normal, químico y desinfección; el nivel A3 precisa tratamiento físico y químico intensivos, afino y desinfección; y el nivel +A3 precisa adicionalmente un estudio de tratamiento y mejora, incluyendo la mezcla.

Dada su finalidad, en este trabajo no se distingue entre la calificación de guía e imperativos entre los parámetros contemplados en la Directiva 75/440/CEE. Para los primeros, a diferencia de para los segundos, no es obligatoria su consideración en la constatación de la calidad del agua, si bien sí es aconsejable, por lo que es previsible su futura incorporación en una definición de calidad. Por otra parte, la no disponibilidad de información suficiente condiciona el tratamiento estadístico posterior. Por ello, la Tabla 1 recoge los parámetros físico-químicos finalmente analizados, y se relacionan sus unidades de medida y valores límites para cada uno de los niveles de calidad explicitados en la normativa. Por el contrario, no han podido ser estudiados los parámetros físico-químicos guía siguientes: *coloración, temperatura, olor, nitratos, fluoruros, hierro disuelto, cobre, zinc, arsénico, cadmio, mercurio, sulfatos, agentes tensoactivos, fenoles, nitrógeno, amoníaco, estreptococos y salmonelas.*

**Tabla 1. Parámetros estudiados y sus límites de calidad**

Parámetro	Variable	Unidad de medida	A1	A2	A3
Boro	boro	mg/l	1	1	1
Cloruros	clorur	mg/l	200	200	200
Coliformes fecales	colfec	NMP/100 ml	20	2000	20000
Coliformes totales	coltot	NMP/100 ml	50	5000	50000
Conductividad	conduc	μS/cm a 20°C	1000	1000	1000
Demanda bioquímica de oxígeno	dbo5	mg/l O <sub>2</sub>	3	5	7
Demanda química de oxígeno al dicromato	dqodic	mg/l O <sub>2</sub>	30	30	30
Fosfatos	fosfat	mg/l	0.4	0.7	0.7
Manganeso	mangan	mg/l	0.05	0.1	1
Oxígeno disuelto	O2disc	% O <sub>2</sub>	>70	>50	>30
pH	pH		6.5 - 8.5	5.5 - 9	5.5 - 9
Sólidos en suspensión	solsus	mg/l MES	25		

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente.

### 3. PROCEDIMIENTO PARA LA CLASIFICACIÓN ADMINISTRATIVA DE LA CALIDAD DEL AGUA

La normativa supone que cierto parámetro cumple con uno de los niveles de calidad propuestos en la Tabla 1 cuando al menos el 95% de las muestras de agua obtenidas a lo largo de cierto período de tiempo -tres años, en nuestra legislación- está dentro del nivel considerado, y en las muestras en las que no se cumple lo anterior no existe una desviación de los valores de referencia en más del 50%. El procedimiento de clasificación administrativo se aplica entonces en dos fases. En primer lugar, cada parámetro se clasifica en un nivel de calidad si su percentil 95 muestral está en dicho nivel. En segundo lugar, el agua, en su conjunto, se clasifica según el nivel del parámetro peor clasificado.

El procedimiento descrito es claramente conservador. Si el 6% de determinaciones analíticas de cierto parámetro no llegaran a pertenecer al nivel A3, el agua en su conjunto quedaría clasificada como +A3 aunque todos los demás parámetros pertenecieran al nivel A1. Cuando existen pocos datos muestrales la influencia de valores extremos, fuera de rango, sobre la calidad global es desproporcionada.

Es posible definir un índice de calidad que respete el procedimiento de clasificación administrativa anterior. En efecto, definimos el vector de calidad administrativa de una muestra como el vector  $(a, b, c, d)$  que expresa el número de parámetros pertenecientes a cada nivel de calidad. Comparamos ahora dos muestras de agua a través de sus respectivos vectores  $(a_1, b_1, c_1, d_1)$  y  $(a_2, b_2, c_2, d_2)$  de la siguiente manera: si  $d_1$  es menor que  $d_2$ , la primera muestra es de mejor calidad que la segunda y, en caso de igualdad, procedemos a comparar  $c_1$  y  $c_2$ , y así sucesivamente.

El orden que el anterior criterio introduce entre los vectores de calidad administrativa conduce a la consideración de la peor calidad del agua -representada por el vector de calidad  $(0, 0, 0, k)$ , con  $k$  el número total de parámetros usados-, hasta la mejor calidad representada por el vector  $(k, 0, 0, 0)$ . El rango que asigna a cada muestra de agua el anterior criterio puede utilizarse para definir un índice de calidad. Beamonte et al. (2004) demuestran que el rango del vector de calidad administrativa  $(a, b, c, d)$  es:

$$I(a, b, c, d) = \frac{1}{6} (s_1^3 + 3s_1^2 + 2s_1) + \frac{1}{2} (s_2^2 + s_2) + a + 1,$$

donde  $s_1 = a + b + c$  y  $s_2 = a + b$ . Este índice resulta coherente con el procedimiento de clasificación administrativa y toma valores en el rango .

$$\left[ 1, \frac{(k+3)(k+2)(k+1)}{6} \right].$$

#### 4. UN MÉTODO ALTERNATIVO PARA LA CLASIFICACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA CONSIDERANDO INCERTIDUMBRE

En los trabajos de Beamonte et al. (2004 y 2005) se propone tener en cuenta la incertidumbre en la clasificación de cada parámetro después de observados los datos disponibles. Así, en vez de dar por segura la clasificación asociada al percentil muestral 95, que es lo dispuesto en la legislación vigente, se planteaba medir la incertidumbre presente en el problema obteniendo un vector de clasificación. Dicho vector está formado por las probabilidades de clasificación en cada una de las cuatro categorías de calidad A1, A2, A3 y +A3. Si los datos observados permiten realizar una clasificación con completa certidumbre, por ejemplo en la categoría A1, el vector de probabilidades será  $(1, 0, 0, 0)$ ; en otro caso, el uno se repartirá en las distintas componentes del vector tanto más cuanto mayor incertidumbre se tenga sobre la clasificación correcta. La clasificación global del agua se obtendrá sumando los vectores de clasificación de todos los parámetros considerados y aplicando al vector suma la fórmula de  $I(a, b, c, d)$  propuesta en el apartado anterior.

En este trabajo se tiene en cuenta la mezcla de dos aguas, por lo que el estudio para cada parámetro requiere considerar la mezcla de dos variables aleatorias representando los niveles de ese parámetro en cada una de las dos procedencias distintas.

Por consiguiente, sean  $X$  e  $Y$  dos variables aleatorias representando los valores de un parámetro concreto en las aguas de la Confederación Hidrográfica del Júcar y de la Confederación Hidrográfica del Ebro respectivamente, por lo que pueden suponerse independientes. Si se realiza una mezcla de aguas, con una proporción  $p$  conocida de agua del Ebro, el valor resultante para ese parámetro en la correspondiente mezcla de aguas será  $Z = (1 - p)X + pY$  y la característica de interés para establecer la calidad del parámetro es  $\eta$ , el percentil 95 de la distribución de  $Z$ .

Si las variables aleatorias  $X$  e  $Y$  siguen una distribución Normal entonces la variable  $Z$  también estará normalmente distribuida al ser combinación lineal de variables aleatorias normalmente distribuidas. Por tanto  $\eta$  puede ponerse en función de las medias y varianzas de las distribuciones de  $X$  e  $Y$ , en concreto

$$\eta = (1 - p)\mu_X + p\mu_Y + (1.64)\sqrt{(1 - p)^2\sigma_X^2 + p^2\sigma_Y^2}.$$

A partir de la distribución final conjunta de los parámetros  $\mu_X$ ,  $\mu_Y$ ,  $\sigma_X^2$  y  $\sigma_Y^2$  se puede obtener, por Monte Carlo, una muestra aleatoria de la distribución final de  $\eta$  y con ella se calculan las probabilidades de que  $\eta$  pertenezca a las regiones relacionadas con cada uno de los niveles de calidad.

En Beamonte et al. (2005) se propone el modelo Lognormal mixto para aquellas situaciones en las que la transformación logarítmica de los datos resulte adecuada para los valores paramétricos no nulos y siendo el cero un valor frecuente para la característica a medir. En este caso, cabe asignar una masa de probabilidad positiva,

$\pi$ , al valor cero, de modo que el logaritmo de los datos positivos sigue una distribución Normal de media  $\mu$  y varianza  $\sigma^2$ .

Para el caso de que las variables aleatorias  $X$  e  $Y$  sigan sendas distribuciones Log-normales mixtas,  $X \approx LNM(X | \pi_X, \mu_X, \sigma_X^2)$  e  $Y \approx LNM(Y | \pi_Y, \mu_Y, \sigma_Y^2)$ , se tiene que el percentil 95 de  $Z$  no presenta una fórmula sencilla similar a la obtenida con anterioridad. En ese caso el cálculo de la distribución final de  $\eta$  se complica, pero todavía puede utilizarse un esquema Monte Carlo similar al empleado en el caso Normal.

Se genera una muestra de tamaño  $N$ ,  $\{x_1, \dots, x_N\}$ , a partir de una distribución Log-normal mixta cuyos parámetros han sido a su vez generados de la distribución final del vector  $(\pi_X, \mu_X, \sigma_X^2)$ . De forma similar se genera otra muestra  $\{y_1, \dots, y_N\}$  y se calcula la muestra aleatoria  $\{z_1, \dots, z_N\}$ , siendo  $z_i = (1-p)x_i + p y_i, i = 1, K, N$ , a partir de la cual se obtiene  $\eta$  como el percentil muestral 95. Repitiendo este proceso  $M$  veces, se obtiene  $\{\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_M\}$ , muestra aleatoria de la distribución final sobre  $\eta$  y a partir de aquí se procede como en el caso anterior. Los valores de  $N$  y  $M$  deben ser grandes para disminuir los errores numéricos en la aproximación Monte Carlo, pero aún así el procedimiento es suficientemente rápido.

## 5. APLICACIÓN

El proyecto del trasvase Ebro-Júcar preveía la salida del agua, en la cuenca cedente, en un punto localizado entre las estaciones de control de la Red ICA de Cherta y de Tortosa, más cercano a aquella que a ésta. La cota del punto de toma de aguas ronda los diez metros sobre el nivel del mar, dándole un carácter de trasvase cuesta arriba. Independientemente de una primera salida del agua trasvasada prevista en la subcuenca del río Cenia, al norte de la provincia de Castellón, para satisfacer la demanda de riego agrícola de los acuíferos costeros de los Llanos de Vinaroz y de Oropesa-Torreblanca, que no suponen mezcla de aguas, el primer punto de llegada para la mezcla con aguas de la cuenca del Júcar estaba previsto en puntos de la Rambla de la Viuda (en su cruce con el río Monleón) y del pantano de M<sup>a</sup> Cristina, que recoge las aguas de los ríos Monleón y Lucena.

Los datos utilizados en este trabajo han sido proporcionados por las Confederaciones Hidrográficas del Ebro y del Júcar, y abarcan un amplio período temporal: desde octubre de 1980 hasta agosto de 2004 para los datos de las estaciones del Ebro en Cherta y en Tortosa, y desde marzo de 1994 hasta junio de 2004 para los datos de las estaciones ubicadas en torno a la Rambla de la Viuda y al pantano de M<sup>a</sup> Cristina. No obstante, los datos finalmente tratados -dada la necesidad de la comparación entre

cuencas- se han ceñido al intervalo de tiempo común que es el de referencia de los datos de la cuenca del Júcar.

Dada la menor cantidad de datos existentes en el Júcar, la información finalmente tratada es ligeramente menor para la cuenca del Júcar que para la del Ebro. Los datos sobre la calidad del agua son los observados en las siguientes estaciones de control de la calidad ICA controladas por las Confederaciones Hidrográficas del Ebro y del Júcar.

- Cuenca del Ebro: estación 027 (Ebro en Tortosa), situada en el municipio de Tortosa (Tarragona) y estación 512 (Ebro en Cherta), situada en el municipio de Cherta (Tarragona).
- Cuenca del Júcar: estación E607 (embalse de Alcora), situada en el cauce del río Lucena, municipio de Alcora (Castellón) y E608, también situada en el cauce del río Lucena, término municipal de Lucena del Río.

La Tabla 2 recopila el número de datos considerados en el trabajo, distinguiendo parámetros y cuenca hidrográfica de procedencia de los mismos, poniéndose de manifiesto la mayor cantidad de información procedente de la Confederación Hidrográfica del Ebro.

**Tabla 2. Número de datos por parámetro y confederación**

Parámetro	Júcar	Ebro	Total
Boro	38	15	53
Cloruros	41	239	280
Coliformes fecales	38	162	200
Coliformes totales	32	163	195
Conductividad	30	257	287
Demanda bioquímica de oxígeno	115	238	353
Demanda química de oxígeno al dicromato	32	48	80
Fosfatos	25	238	263
Manganeso	7	130	137
Oxígeno disuelto	125	239	364
pH	34	257	291
Sólidos en suspensión	116	238	354
Caudal	102	132	234

De los doce parámetros considerados, tres presentan el mismo nivel de calidad en las dos confederaciones. *Boro* y *pH*, que claramente están en nivel A1, y *oxígeno disuelto*, que es peor que el nivel A3 en ambas confederaciones. El parámetro *manganeso* muestra una calidad ligeramente mejor en el Ebro, donde se clasifica en uno de los niveles A1 o A2 con probabilidad uno, que en el Júcar, donde también podría llegar a clasificarse como A3 aunque con una probabilidad de tan sólo 0.116.

Los demás parámetros considerados muestran una peor calidad en el Ebro y en alguno de ellos la diferencia de calidad es muy grande. En otros, sin embargo, las diferencias son más pequeñas. Es el caso de la conductividad, clasificado peor que A3 en el Ebro, y en A1 en el Júcar, pero con valores medios, en ambos casos, cercanos al límite de 1000  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , por encima y por debajo, respectivamente.

Considerando incertidumbre, las Tablas 3 y 4 muestran como variarían las probabilidades de clasificación en los cuatro niveles de calidad para dos de esos parámetros que presentan mejor calidad en el Júcar, fosfatos y coliformes totales.

**Tabla 3. Probabilidades de los niveles de calidad para el parámetro *fosfatos***

Porcentaje	0%	25%	50%	75%	100%
A1	0.860	0.646	0.434	0.233	0.016
A2	0.118	0.322	0.524	0.714	0.914
+A3	0.021	0.031	0.042	0.053	0.070

La primera fila de la Tabla 3 muestra el porcentaje de agua del Ebro en la mezcla de aguas. Así, la columna encabezada con 0% refleja la calidad actual del agua de la Confederación Hidrográfica del Júcar, la encabezada por 100% la calidad del Ebro, y las otras tres columnas muestran distintos escenarios de un hipotético trasvase. El nivel de calidad A3 no es posible para el parámetro *fosfatos*, por lo que no ha sido considerado.

**Tabla 4. Probabilidades de los niveles de calidad para el parámetro *coliformes totales***

Porcentaje	0%	25%	50%	75%	100%
A2	1.000	0.748	0.509	0.248	0.000
A3	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002
+A3	0.000	0.252	0.490	0.751	0.998

En lo que respecta a los *coliformes totales*, el nivel de calidad A1 tiene probabilidad nula en todos los casos, por lo que no se ha considerado en la Tabla 4.

Utilizando los doce parámetros aquí estudiados nuestro índice de calidad considerando incertidumbre tomaría valores en el rango [1, 560]. Se recogen dichos valores en la Tabla 5.

**Tabla 5. Índices de calidad para la mezcla de aguas.**

Porcentaje	0%	25%	50%	75%	100%
Índice de calidad	256	208	166	131	100

De un modo análogo, el primer valor de la segunda fila de la Tabla 5 es el valor actual del índice de calidad del agua de la Confederación Hidrográfica del Júcar, el de la encabezada por 100% corresponde al índice del Ebro, y las otras tres columnas muestran el índice correspondiente a distintos escenarios de un hipotético trasvase.

Estos índices de calidad obtenidos considerando incertidumbre guardan una alta correlación con los correspondientes índices calculados siguiendo el criterio administrativo. En Beamonte et al. (2004) ya se pone de manifiesto esta circunstancia y se demuestra, de hecho, que la correlación aumenta con el número de datos.

## 6. APROXIMACION A UNA VALORACION DE LOS COSTES DERIVADOS DE LA DIFERENCIA ENTRE CALIDADES

La constatación de la peor calidad del agua trasvasable procedente del Ebro obliga, finalmente, a considerar los posibles costes necesarios para la mejora de dicha calidad en el agua resultante. La cuestión de la calidad es esencial a la hora de valorar económicamente y en términos de utilidad un proyecto de esta naturaleza. Una primera aproximación puede partir del reconocimiento económico que se hace en la actualidad sobre el valor de la calidad del agua, cuando se acepta el precio que se paga por el agua embotellada, en un entorno en el que los 120 €/m<sup>3</sup> es un valor mínimo (Arrojo et al. 2002).

En este sentido, la *conductividad* es un parámetro que se puede utilizar como referente para aproximarse a una cuantificación económica de la incidencia que sobre los costes tiene la calidad del agua. No tiene el mismo valor económico un metro cúbico de agua de 200 µs/cm, que otro con 1029 µs/cm, que es la *conductividad* media de las aguas trasvasables desde el Bajo Ebro. Si bien en aguas destinadas al riego la salinidad de las aguas -en especial, los *cloruros*- genera notables diferencias de productividad, al tiempo que puede inducir graves impactos por degradación edáfica y salinización del suelo a medio y largo plazo, el problema resulta más grave en aguas de uso prepotable. En efecto, en este tipo de aguas destinadas al consumo humano, la normativa exige cada vez mayores niveles de calidad, por lo que su uso final urbano puede exigir importantes costes de desalinización y depuración que deben contabilizarse (Arrojo et al. 2002).

Un ejemplo de valoración cercano a la situación estudiada en este trabajo es el contenido en el análisis económico del PHN (MIMAM, 2000), que asume, para un posible trasvase alternativo desde la cuenca del Tajo, unos costes para el tratamiento del agua derivados de la exigencia de mayor calidad para la misma que oscilarían entre 6 y 15 cent€/m<sup>3</sup>.

En nuestro caso debe tenerse en cuenta que en las proximidades al punto previsto en el Ebro para la toma de aguas del trasvase, la *conductividad* media se cifra en 1029 µs/cm, y la concentración media de *sulfatos* en 185.3 mg/l, por encima de los límites máximos recomendados por la UE en su Directiva 75/440 para aguas prepotables, fijados en 1000 µs/cm (ver Tabla 1) y en 150 mg/l, respectivamente. Pero, además, estudios temporales realizados sobre la evolución de la calidad del agua del Ebro muestran la existencia de una tendencia histórica al empeoramiento

(Aragüés et al. 1996), incidiendo también en ello la posible detracción de agua prevista en otras potenciales actuaciones aguas arriba de Cherta, punto de captación de aguas previsto inicialmente para el trasvase. Y, también, la pérdida de calidad del agua se incrementaría durante el transporte y la estancia en las infraestructuras de regulación, especialmente en verano por evaporación. Estevan (2002) ha valorado en 1400  $\mu\text{s}/\text{cm}$  la *conductividad* media del agua trasvasada por el efecto conjunto de las dos incidencias anteriores.

De los usos previstos por el PHN para el agua trasvasada, el 47% corresponde al uso prepotable. Por ello es necesario contabilizar adecuadamente los costes de desalación para alcanzar los estándares de calidad exigidos por la normativa. El tratamiento para eliminar, cuando menos en parte -hasta los 500  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , por ejemplo-, estos problemas de salinidad exigiría la aplicación de micro y nano-filtración e, incluso, procesos de ósmosis inversa. Valero et al. (2001) cuantifican los costes derivados de estas actuaciones en torno a los 18 cent€/m<sup>3</sup>, en ausencia de otros factores como la posible minoración de caudales por evaporación en el transporte. Teniendo en cuenta dicha valoración y el intervalo de mejora de estos problemas de salinidad del agua trasvasable -reducción de la *conductividad* desde los 1029 hasta los 500  $\mu\text{s}/\text{cm}$ -, podemos cuantificar, aunque sea de forma aproximada, en 0.034 cent€/m<sup>3</sup>, el coste medio asociado a la reducción de una unidad, en  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , la correspondiente *conductividad* del agua. Este será el valor que vamos a utilizar a continuación.

Puesto que el presente trabajo se centra en la calidad del agua resultante del trasvase, sobre ésta va a concretarse la valoración económica, si bien somos conscientes de la existencia de otros costes que deberían contemplarse en cualquier balance coste-beneficio completo. Entre ellos destacamos los costes derivados de las pérdidas de caudales por el transporte, en gran medida realizado a cielo abierto y, por ello susceptibles de evaporación; los costes energéticos necesarios en los tramos de elevación por bombeo; y los costes derivados de un posible cambio climático cuyos efectos, avanzados como hipótesis plausibles por la comunidad científica, exigen tener en cuenta la posibilidad de fallos cada vez más frecuentes en las disponibilidades de caudales para el trasvase.

El PHN tenía previsto una aportación de agua trasvasada de unos 41.5 Hm<sup>3</sup> para este tramo del trasvase, de los 315 Hm<sup>3</sup> para el conjunto de la cuenca del Júcar. Aceptando el porcentaje del 47% previsto por el PHN para el uso prepotable del agua trasvasada, 19.5 Hm<sup>3</sup> representa la cantidad sobre la que valorar las implicaciones económicas de la mezcla de aguas de diferente calidad.

A estos efectos utilizaremos la *conductividad* como parámetro referente. La *conductividad* media del agua en el punto de salida en el Ebro es, como ya se ha apuntado, de 1029  $\mu\text{s}/\text{cm}$  -superior al límite admitido por la normativa europea para el uso prepotable del agua-, mientras que la *conductividad* media del agua en las estaciones E607 y E608 sobre el río Lucena es de 953  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , por debajo del nivel máximo admitido por la normativa. Teniendo en cuenta el coste medio asociado a la reducción de una

unidad, en  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , de la correspondiente salinidad que ha quedado explicitado, la Tabla 6 cuantifica el esfuerzo económico, por  $\text{Hm}^3$  y en ausencia de otros factores, necesario para la mejora de la calidad del agua trasvasable procedente del Ebro, contemplando distintos objetivos posibles de calidad y tomando como referencia la *conductividad*.

**Tabla 6. Coste derivado de la mala calidad del agua trasvasable procedente del Ebro (tramo Castellón-Mijares), en miles de € por  $\text{Hm}^3$**

Objetivo de calidad para la conductividad	Coste necesario para la mejora de la calidad
953 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (misma calidad que la del agua sin trasvase)	25.84
500 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (nivel estándar de calidad)	179.86
200 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (nivel de calidad del agua embotellada)	281.86

Reducir la salinidad del agua del Ebro al nivel de la del agua del punto receptor en la cuenca del Júcar estudiado en este trabajo, para el total de los  $19.5 \text{ Hm}^3$  previstos como máximo caudal trasvasable para uso urbano, supondría, con los mismos supuestos utilizados para confeccionar la Tabla 6, un coste de 503.88 miles de €. Los correspondientes costes, en euros por metro cúbico, para los tres supuestos de la Tabla 6 son, respectivamente, 0.02584, 0.17986 y 0.28186.

## 7. CONCLUSIONES

La introducción de incertidumbre mejora sustancialmente la medición de la calidad asociada a un agua concreta. Los criterios de valoración administrativos son excesivamente rígidos, al asignar una determinada calidad con una aparente sensación de certidumbre, frente a la consideración de la incertidumbre inherente al problema que sí es contemplada por el índice estocástico aplicado en este trabajo. La introducción de distribuciones de probabilidad iniciales permite graduar situaciones intermedias que la rigidez de la valoración administrativa considera iguales.

En Beamonte et al. (2004) se desarrolla una aproximación no paramétrica a partir de la distribución Multinomial, que requiere -al no tener en cuenta el orden existente en la categorización de los datos- un tamaño muestral elevado. En este trabajo el comportamiento de los datos se modeliza a través de una distribución Lognormal, más eficiente que la anterior al utilizar información en forma de distribución inicial.

Respecto a la aplicación efectuada, las conclusiones obtenidas apuntan a que la calidad del agua del Ebro es inferior a la del Júcar, cuando es medida a través de las doce características físico-químicas estudiadas en este trabajo. Globalmente, el índice de calidad propuesto toma el valor 256 para el Júcar, y sólo de 100 para el Ebro. Consecuentemente, conforme la mezcla de aguas tenga una mayor proporción de agua del río Ebro la calidad resultante disminuye.

Además, la aproximación a los costes derivados de la mala calidad de las aguas trasvasables confirma claramente el esfuerzo económico derivado de la mezcla de aguas. Teniendo en cuenta los mismos la conclusión final es clara: la justificación del trasvase se basa fundamentalmente en criterios de cantidad -por las necesidades de agua de las cuencas receptoras- y no de calidad, en cuanto que ésta disminuye con la mezcla, con la consiguiente exigencia de esfuerzo económico adicional en su tratamiento posterior para su uso urbano.

Finalmente, destacar que la metodología presentada en este trabajo es inmediatamente aplicable a otros tramos del trasvase. Aplicada a todos ellos puede obtenerse una aproximación al coste total exigido por la adecuación de la calidad del agua del Ebro a los distintos puntos previstos para su mezcla con aguas de las cuencas receptoras.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAGÜÉS, R.; QUÍLEZ, D. Y RAMÍREZ, I. (1996). "Riego, calidad del agua y calidad del suelo: la cuenca del Ebro como caso de estudio". En Jornadas de la AIH, Las aguas subterráneas en las cuencas del Ebro, Júcar e Internas de Cataluña y su papel en la planificación hidrológica. Lérida.
- ARROJO, P. (1999): "El valor económico del agua". Revista CIDOB d'Afers Internacionals, 45-46: pp. 145-169.
- ARROJO, P., MÍGUELEZ, E. Y BARAKAT, M. (2002): Análisis y valoración socioeconómica de los trasvases del Ebro previstos en el Plan Hidrológico Nacional Español, Adena-WWF, Madrid.
- BEAMONTE, E, BERMÚDEZ, J., CASINO, A. Y VERES, E. (2004): "Un indicador global para la calidad del agua. Aplicación a las aguas superficiales de la Comunidad Valenciana", Estadística Española, 46, pp. 357-384.
- BEAMONTE, E, BERMÚDEZ, J., CASINO, A. Y VERES, E. (2005): "A global stochastic index for water quality: the case of the river Túrria (Spain)", Journal of Agricultural, Biological and Environmental Statistics, 10, pp. 424-439.
- BERGSTROM, J. C.; BOYLE, K. J. Y POE, G. L. (2001): The Economic Value of Water Quality. Edward Elgar Publishers, Northampton.
- BIELSA, J. Y DUARTE, R. (2000): "La eficiencia técnica de riego: Análisis de las conexiones y la utilidad de sus diversas definiciones", Revista Española de Estudios Agrosociales y Pesqueros, 189, pp. 103-118.
- ESTEVAN, A. (2002): La gestión del agua en el Mediterráneo Español. Informe elaborado por GEA-21 para la Plataforma de Defensa de l'Ebre.

- ESTEVAN, A. (2003): "El Plan Hidrológico Nacional: destapando la olla". Archipiélago, 57, pp. 43-57.
- HUETING, R. (1991): "Correcting nacional income for environmental losses: a practical solution for a theoretical dilemma". En Constanza, R. (ed.), Ecological Economics. The Science and Management of Sustainability, Columbia University Press, New York, pp. 194-213.
- JÚDEZ, L.; IBÁÑEZ, M.; PÉREZ UGALDE, C.; DE ANDRÉS, R.; URZAINQUI, E. Y FUENTES-PILA, J. (2001): "Valoración del uso recreativo de un humedal español. Tests y comparación de diferentes métodos de valoración". Revista Española de Estudios Agrosociales y Pesqueros, 201: pp. 83-104.
- MIMAM (2000): Plan Hidrológico Nacional-Análisis Económicos, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- NAREDO, J.M. (1997): "Spanish water accounts (summary report)". En San Juan, C. y Montalvo, A. (eds.), Environmental economics in the European Union, Mundi-Prensa y Universidad Carlos III, Madrid, pp. 369-443.
- NAREDO, J.M. (2003): "La encrucijada de la gestión del agua en España". Archipiélago, 57, pp. 17-33.
- OTTO, D. Y HOLTkamp, J. (1999): "Valuation of Water Quality in Livestock Regions: An Application to Rural Watersheds in Iowa". Journal of Agricultural & Applied Economics, 31 (1): pp. 177-184.
- POCH, M. (1999): Las calidades del agua, Rubes Editorial S.L., Barcelona.
- PRADA, C. de (2003): "La 'racionalidad oculta' del Plan Hidrológico Nacional". Archipiélago, 57, pp. 58-68.
- PROVENCHER, M. Y LAMONTAGNE, M.P. (1977) : Méthode de détermination d'un indice d'appréciation de la qualité des eaux selon différentes utilisations. Ministère de Richesses Naturelles, Québec.
- RIBAUDO, M. O. (2003): "The Economic Value of water Quality". Agricultural Economics, 29 (2): pp. 235-236.
- SAHUQUILLO, A. (2001): "El Plan Hidrológico Nacional y el uso conjunto". En Iríbar, V., Grima, J. y Sánchez Vila, X. (eds.), Las aguas subterráneas en el Plan Hidrológico Nacional, Mundi-Prensa, Madrid.
- STEINNES, D. N. (1992): "Measuring the Economic Value of Water Quality: The Case of Lakeshore Land". The Annals of Regional Science, 26 (2): pp. 171-176.
- VALERO, A.; UCHE, J. Y SERRA, L. (2001): La desalación como alternativa al PHN. <http://circe.cps.unizar.es/spanish/isgwes/spain/desala.html>.