

# **Viabilidad económica de la reutilización de aguas residuales: valoración económica de los beneficios ambientales.**

María Molinos Senante, Francesc Hernández Sancho  
*Departamento de Economía Aplicada II  
Universidad de Valencia.*

Ramón Sala Garrido  
*Departamento de Matemáticas para la Economía y la Empresa  
Universidad de Valencia.*

## **RESUMEN**

La reutilización de aguas residuales se perfila como una alternativa de gran futuro ya que aumenta la oferta de recursos hídricos y reduce el problema de la contaminación. En las últimas décadas, el avance tecnológico en materia de regeneración de aguas residuales ha sido muy importante, hasta el punto que en la actualidad, la viabilidad de los proyectos de reutilización de aguas residuales está supeditada fundamentalmente a aspectos económicos. Normalmente las metodologías utilizadas para determinar la viabilidad de un proyecto de reutilización de aguas residuales se centran en los costes internos. Sin embargo, la reutilización de aguas también genera importantes impactos positivos, especialmente de tipo ambiental. Es por ello, que en este papel se muestra una metodología que permite evaluar la viabilidad de un proyecto de reutilización de aguas residuales teniendo en cuenta no sólo los impactos internos, sino también los impactos externos. Por otra parte, se realiza una cuantificación del valor monetario de los beneficios ambientales derivados de los proyectos de reutilización de aguas residuales. Dicha valoración hace a través de la estimación de los precios sombra de los outputs no deseables derivados de la regeneración de aguas residuales.

**Palabras claves:** beneficios ambientales, función distancia direccional, precios sombra, reutilización agua residual, tratamiento agua residual, viabilidad económica.

**Área temática:**

## **ABSTRACT**

Water reuse is emerging as a promising alternative because it enables water resources to be increased and lowers pollution levels. In recent decades, significant technological progress has been made in the field of wastewater regeneration; and project feasibility is now mostly subject to just economic assessment. However, the economic aspect is perhaps the least addressed aspect of research into water regeneration and reuse. Methodologies used to analyze the economic feasibility of water reuse projects usually focus on internal costs. As a result, the true benefits and costs of many projects are not properly evaluated. This paper presents a methodology for assessing the economic feasibility of a water reuse project that takes into account the internal and external impacts. A monetary quantification of the environmental benefits is made. This assessment is made through an estimation of shadow prices for the undesirable outputs of wastewater regeneration. In this way, a useful economic feasibility indicator that includes both internal and external impacts is obtained for water reuse projects.

**Keywords:** directional distance function, economic feasibility, environmental benefits, shadow prices, wastewater reuse, wastewater treatment.

### *Agradecimientos:*

Los autores quieren agradecer la ayuda financiera recibida por el Gobierno de España a través del proyecto NOVEDAR-Consolider Project (CSD 2007-00055) y del Programa de becas FPU (AP2007-03483).

## **1. INTRODUCCIÓN**

Las recurrentes sequías vividas en las últimas décadas han puesto de manifiesto que a menudo, el suministro de agua no se encuentra equilibrado con la demanda (Hochstart et al. 2007). Por otro lado, más del 70% de la población europea se enfrenta a problemas de estrés hídrico siendo las zonas costeras semiáridas y las áreas altamente urbanizadas las que se encuentran más afectadas por esta situación, siendo España uno de los países (AQUAREC 2006). Además, el cambio climático global empeorará esta situación, especialmente en los países del sur de Europa, donde la mayor susceptibilidad a la sequía puede causar graves problemas ambientales, sociales y económicos (Bixio et al. 2006).

Por ello, la regeneración y reutilización de las aguas residuales se perfila como una alternativa de gran futuro ya que realiza dos funciones fundamentales: por una parte aumenta la oferta de recursos hídricos disminuyendo así la presión sobre los recursos naturales convencionales y, por otra parte, reduce el problema de la contaminación al evitar el vertido de agua residual en el medio ambiente.

En los últimos años, el avance tecnológico en materia de regeneración de aguas residuales ha sido muy importante, hasta el punto que en la actualidad, la viabilidad de los proyectos de reutilización de aguas residuales está supeditada fundamentalmente a aspectos económicos y de aceptación social y no tanto a la obtención de un efluente de calidad adecuada. En este sentido, disponer de un detallado análisis de costes resulta esencial a la hora de valorar la potencialidad de los proyectos de reutilización del agua regenerada (Asano 1998, 2007).

A pesar de ello, tal vez el aspecto económico es el menos abordado en las investigaciones sobre la regeneración y reutilización de las aguas residuales, debido a que en general sólo se consideran los costes privados, mientras que los efectos externos (positivos y negativos) se relegan a una serie de pronunciamientos sobre las ventajas de realizar la regeneración y reutilización (Seguí 2004).

Aunque la cuantificación de las externalidades entraña dificultades, debido a la ausencia de mercado que regule su precio, en el contexto de la reutilización de aguas residuales, hay un interés creciente en la valoración monetaria de las mismas. Un ejemplo de este interés creciente lo encontramos en el trabajo de Godfrey et al. (2009) quienes realizan un análisis coste beneficio (ACB) aplicado a un sistema de reutilización de aguas grises en India. El valor monetario de las externalidades, en términos de beneficios ambientales y sanitarios, se cuantifica a través de referencias bibliográficas (North y Griffin, 1993; Hanley y Spash, 1993; Field, 1997; Curry y Weiss, 1993; Hutton y Haller, 2004). Estos autores utilizan métodos de valoración económica convencionales como el de los precios hedónicos y la disposición a pagar. Por otra parte, Seguí et al. (2009) usan la técnica del coste del viaje para determinar los beneficios ambientales derivados de un proyecto de reutilización de aguas residuales en el contexto de la restauración de un humedal. Cheng y Wang (2009) obtienen el

beneficio neto de un proyecto de reutilización de aguas residuales en una zona residencial de China. Para ello, los beneficios ambientales son cuantificados mediante la aplicación de una ecuación matemática desarrollada por el Ministerio de Medio Ambiente Chino.

A pesar de que muchos autores consideran los métodos convencionales de valoración económica (precios hedónicos, valoración contingente, coste del viaje, etc.) como técnicas consolidadas debido a que se encuentran avaladas por numerosas aplicaciones prácticas, en la comunidad científica (Diamond y Hausman, 1994; Shabman y Stephenson, 2000; Getzner, 2000; entre otros) no existe un consenso unánime sobre la validez de estas metodologías debido a que son difíciles de aplicar por las autoridades encargadas de evaluar los proyectos, sus elevados costes, así como por los límites y sesgos que presentan.

En este contexto y a partir del trabajo pionero de Färe et al. (1993) y sucesivos desarrollos (Färe y Grosskopf, 1998; Färe et al. 2001 y Färe et al. 2006), ha surgido una corriente de investigación en el marco de los estudios de eficiencia que permite cuantificar outputs no deseables carentes de mercado. Usando el concepto de función de distancia direccional, se calcula el precio sombra para aquellos bienes derivados de actividades humanas y procesos productivos que carecen de valor de mercado pero que generan importantes efectos medioambientales.

Entre las ventajas que aporta esta metodología de valoración de externalidades destacan las siguientes: (i) los precios sombra podrían ser utilizados para determinar los ingresos que se obtendrían en caso de privatización de algunos recursos. (ii) Las autoridades pueden utilizar la información proporcionada por los precios sombra para establecer tarifas para el uso de servicios ambientales, o para comparar las tarifas que actualmente reciben con los beneficios marginales que generan (Färe et al. 2001). (iii) Puede ayudar a entender a la sociedad los beneficios que se generan como consecuencia de los programas de mejora ambiental. (iv) Puede ser utilizada como metodología alternativa a la valoración contingente en la cuantificación de la disposición a pagar (Färe et al. 2001). La cuantificación de los precios sombra presenta unos costes muy reducidos frente a los siempre costosos procesos de encuestación.

El objetivo de este papel es cuantificar el valor monetario de los beneficios ambientales derivados de los proyectos de reutilización de aguas residuales. Mientras que los impactos internos pueden ser calculados directamente en términos monetarios, los beneficios ambientales son bienes que no son objeto de intercambio en el mercado y, por tanto, su cuantificación requiere de un método de valoración económica. Dicha valoración económica se realizará a través de la estimación de los precios sombra de los outputs no deseables derivados de la regeneración de aguas residuales.

## 2. METODOLOGÍA

Los análisis de viabilidad económica de proyectos de reutilización de aguas residuales deben realizarse utilizando metodologías convencionales propias del análisis económico. De esta forma el objetivo sigue siendo maximizar los beneficios totales derivados del proyecto.

Siguiendo a Seguí (2004) y a Hernández et al. (2006), el beneficio total se calcula considerando el beneficio interno, el beneficio externo y el coste de oportunidad. La función a maximizar adquiere la siguiente forma:

$$MaxB_T = B_I + B_E - CO \quad (1)$$

Donde  $B_T$  es el beneficio total (ingresos totales – costes totales),  $B_I$  es el beneficio interno (ingresos internos – costes internos),  $B_E$  es el beneficio externo (externalidades positivas – externalidades negativas) y  $CO$  es el coste de oportunidad.

### 2.1 Beneficio interno.

Los impactos internos son los que están directamente asociados al proceso de regeneración del agua residual y su posterior reutilización. El beneficio interno es la diferencia entre los ingresos internos y los costes internos. El término ingreso interno incluye los ingresos obtenidos como consecuencia de la venta del agua regenerada y otros sub-productos recuperados. Si el agua regenerada va a ser usada en la agricultura, el contenido en nitrógeno y fósforo de dicha agua supondrá un ahorro en los costes de fertilizantes, mientras que si el agua regenerada se destina a usos medioambientales, durante el tratamiento de aguas residuales se pueden recuperar estos nutrientes y ser vendidos posteriormente para otros usos. Los costes internos son el resultado de la suma de los costes de inversión, los costes de operación y mantenimiento, los costes financieros y las tasas.

El beneficio interno se expresa como:

$$B_I = \sum_{n=0}^n [(VA_n * PVA_n) + (PR_n * PVP_n) + (NR_n * PVN_n) - (CI_n + COM_n + CF_n + T_n)] \quad (2)$$

Donde  $B_I$  = beneficio interno (€),  $VA$  = volumen anual de agua residual regenerada ( $m^3$ ),  $PVA$  = precio de venta del agua regenerada (€/m<sup>3</sup>),  $PR$  = cantidad anual de fósforo recuperado (kg),  $PVP$  = precio de venta del fósforo recuperado (€/kg),  $NR$  = cantidad anual de nitrógeno recuperado (kg),  $PVN$  = precio de venta del nitrógeno recuperado (€/kg),  $CI$  = costes de inversión (€),  $COM$  = costes de operación y mantenimiento (€),  $CF$  = Costes financieros (€),  $T$  = tasas y  $n$  = año.

## 2.2 Beneficio externo.

Los proyectos de reutilización de agua residual generan externalidades positivas y negativas como por ejemplo riesgos químicos y biológicos, beneficios educativos, sanitarios y especialmente beneficios de tipo ambiental. En este sentido, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) argumenta que la utilización de agua regenerada proporciona los siguientes beneficios ambientales (EPA, 1998): (i) el uso de agua regenerada permite la liberación de volúmenes de agua incrementando los flujos vitales para los ecosistemas, (ii) reduce el vertido de contaminantes a las masas de agua sensibles a la eutrofización, (iii) el agua regenerada permite la creación o mantenimiento de hábitat en humedales y ríos y (iv) permite reducir y prevenir la contaminación, por ejemplo, la aplicación del agua regenerada en el riego agrícola puede servir de fuente de nutrientes y reducir la necesidad de aplicar fertilizantes sintéticos.

Según la ecuación 1, el análisis de la viabilidad económica de los proyectos de reutilización requiere, además de considerar los beneficios internos, la cuantificación de los impactos externos. El beneficio externo viene dado por:

$$B_E = \sum_{n=0}^n (EP_n - EN_n) \quad (3)$$

Donde  $B_E$  = beneficio externo (€),  $EP$  = externalidades positivas (€),  $EN$  = externalidades negativas (€) y  $n$  = año.

Mientras que cualquier impacto interno puede ser calculado directamente en unidades monetarias, la cuantificación de los impactos externos, al no tener un precio de mercado, requiere del uso de métodos de valoración económica. Es por ello que a la hora de determinar la viabilidad económica de un proyecto de reutilización de aguas residuales, la estimación de los impactos externos es el principal obstáculo a salvar ya que los impactos internos son fácilmente cuantificables en base a los precios determinados por el mercado. Todo ello ha llevado a que en la mayoría de las ocasiones, las decisiones en materia de reutilización de aguas residuales se basen fundamentalmente en los costes financieros del proyecto sin prestar atención a los impactos no monetarizables como es la protección del medio ambiente.

Sin embargo, en un estudio de viabilidad económica completo deben considerarse tanto los impactos internos como los externos. Una forma de estimar los beneficios ambientales derivados de los proyectos de regeneración y reutilización de aguas residuales, tal y como se ha citado en el apartado 1, es a través de la cuantificación de los precios sombra de los outputs no deseables derivados de la regeneración de las aguas residuales.

Según Hernández et al. (2010), la regeneración de aguas residuales puede considerarse un proceso productivo en el que se obtiene un output deseable (agua regenerada) junto con una serie de compuestos (materia orgánica, fósforo, nitrógeno...),

estos contaminantes eliminados del agua residual pueden considerarse como outputs no deseables ya que en caso de que fuesen vertidos al medio ambiente provocarían graves impactos negativos sobre este.

La metodología de valoración de precios sombra de outputs no deseables (Färe et al. 2006) se basa en el concepto de función distancia direccional. Conceptualmente, la función distancia generaliza el concepto de función de producción convencional y mide la diferencia entre los outputs producidos en el proceso bajo estudio y los outputs producidos en el proceso más eficiente. Se considera que el proceso más eficiente es aquel que minimiza el consumo de inputs y la generación de outputs no deseables y al mismo tiempo maximiza la producción de outputs deseables. Asumiendo que el proceso de producción utiliza un vector de inputs  $x = (x_1, \dots, x_N) \in R_+^N$ , para producir un vector de outputs deseables  $y = (y_1, \dots, y_M) \in R_+^M$ , y un vector de outputs no deseables  $b = (b_1, \dots, b_J) \in R_+^J$ , y siendo  $g = (g_y, g_b)$  un vector direccional y  $g \neq 0$ , la función distancia direccional se define como:

$$D_0(x, y, b; g_y, g_b) = \text{Max} \{ \beta : (y + \beta g_y, b - \beta g_b) \in P(x) \} \quad (4)$$

La función distancia direccional proporciona la máxima expansión de los outputs deseables y contracción de los outputs no deseables que es posible con una determinada tecnología  $P(x)$ .

La parametrización de la función distancia se realiza con la forma cuadrática. Esta forma a diferencia de la función translog puede ser restringida para satisfacer la propiedad de traslación. Aplicado a un problema con  $k= 1, \dots, K$  unidades operando en  $t = 1, \dots, T$  periodos, y siguiendo la dirección (1,1) la función distancia cuadrática direccional para la unidad  $k$  en el periodo  $t$  es:

$$\begin{aligned} D_o^t(x_k^t, y_k^t, b_k^t; 1,1) = & \alpha + \sum_{n=1}^N \alpha_n x_{nk}^t + \sum_{m=1}^M \beta_m y_{mk}^t + \sum_{j=1}^J \gamma_j b_{jk}^t + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \sum_{n'=1}^N \alpha_{nn'} x_{nk}^t x_{n'k}^t \\ & + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{m'=1}^M \beta_{mm'} y_{mk}^t y_{m'k}^t + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^J \sum_{j'=1}^J \gamma_{jj'} b_{jk}^t b_{j'k}^t + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \delta_{nm} x_{nk}^t y_{mk}^t + \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J \eta_{nj} x_{nk}^t b_{jk}^t \\ & + \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J \mu_{mj} y_{mk}^t b_{jk}^t \end{aligned} \quad (5)$$

Para calcular los parámetros  $(\alpha_0, \alpha_n, \alpha_{nn}, \beta_m, \beta_{mm'}, \gamma_j, \gamma_{jj}, \delta_{nm}, \eta_{nj}, \mu_{mj})$  se debe minimizar la suma de la distancia entre la frontera de producción y las observaciones individuales para cada periodo:

$$\begin{aligned}
 \text{Min} &= \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \left[ (D_0^t(x_k^t, y_k^t, b_k^t; 1, 1) - 0) \right] \\
 \text{s.t. :} & \\
 (i) & D_0^t(x_k^t, y_k^t, b_k^t; 1, 1) \geq 0, k = 1, \dots, K, t = 1, \dots, T, \\
 (ii) & \frac{\partial D_0^t(x_k^t, y_k^t, b_k^t; 1, 1)}{\partial b_j} \geq 0, j = 1, \dots, J, k = 1, \dots, K, t = 1, \dots, T, \\
 (iii) & \frac{\partial D_0^t(x_k^t, y_k^t, b_k^t; 1, 1)}{\partial y_m} \leq 0, m' = 1, \dots, M, k = 1, \dots, K, t = 1, \dots, T, \\
 (iv) & \frac{\partial D_0^t(x_k^t, y_k^t, b_k^t; 1, 1)}{\partial x_n} \geq 0, n = 1, \dots, N, \\
 (v) & \sum_{m=1}^M \beta_m - \sum_{j=1}^J \gamma_j = -1; \sum_{m'=1}^M \beta_{mm'} - \sum_{j=1}^J \mu_{mj} = 0; m = 1, \dots, M; \\
 & \sum_{j'=1}^J \gamma_{jj'} - \sum_{m=1}^M \mu_{mj} = 0; j = 1, \dots, J; \sum_{m=1}^M \delta_{nm} - \sum_{j=1}^J \eta_{nj} = 0; n = 1, \dots, N; \\
 (vi) & \alpha_{nn'} = \alpha_{n'n}; \beta_{mm'} = \beta_{m'm}; m \neq m', \gamma_{jj'} = \gamma_{j'j}, j \neq j'
 \end{aligned} \tag{6}$$

Para obtener los precios sombra de los outputs no deseables es necesario examinar la relación existente entre el máximo de la función de ingreso y la función distancia direccional. Dado el vector de precios de los outputs deseables  $p = (p_1, \dots, p_M) \in R_+^M$  y siendo  $q = (q_1, \dots, q_J) \in R_+^J$  el vector de precios de los outputs no deseables, la función ingreso que contabiliza los ingresos generados por los outputs no deseables se define como:

$$R(x, p, q) = \text{Max}_{y,b} \{ py - qb : (y,b) \in P(x) \} \tag{7}$$

La función ingreso,  $R(x,p,q)$ , proporciona el mayor ingreso viable que se puede obtener a partir de los inputs,  $x$ , cuando el vector de precios de los outputs deseables es  $p$ .

La estimación de los precios sombra de los outputs no deseables requiere asumir que el precio sombra de uno de los outputs deseables coincide con su valor de mercado. Sea  $y$ , un output deseable cuyo precio de mercado es  $p$  igual a su precio sombra  $p_m$ , y sea  $b$  cada uno de los outputs no deseables su precio sombra viene determinado por la siguiente expresión:

$$q_j = -p_m \frac{\partial D_0(x, y, b; g) / \partial b_j}{\partial D_0(x, y, b; g) / \partial y_m} \tag{8}$$



### 2.3 Coste de oportunidad

El coste de oportunidad se define como el valor de los bienes en términos de pérdida de usos alternativos de dichos bienes. Así, el coste de oportunidad estará dado por aquel uso que proporcione el mayor rendimiento económico.

En un proyecto de reutilización de aguas residuales, el coste de oportunidad generalmente hace referencia a los terrenos que ocupa la estación depuradora de aguas residuales (EDAR). Normalmente, estos terrenos no tienen un elevado valor, pero puede haber situaciones donde otros usos alternativos generen importantes ingresos.

Sustituyendo las ecuaciones (2) y (3) en la ecuación general propuesta inicialmente (1), se obtiene la siguiente expresión:

$$MaxB_T = \sum_{n=0}^n \left[ (VA_n * PVA_n) + (PR_n * PVP_n) + (NR_n * PVN_n) \right. \\ \left. - (CI_n + COM_n + CF_n + T_n) + (EP_n - EN_n) - CO_n \right] \quad (9)$$

En este papel se propone la valoración monetaria de los beneficios ambientales derivados de un proyecto de reutilización de aguas residuales. Para ello, haciendo uso del concepto de función distancia direccional, se cuantifican los precios sombra de los outputs no deseables obtenidos en el proceso de regeneración de las aguas residuales. Dicha cuantificación, tal y como recoge la ecuación (1), es necesaria para determinar la viabilidad económica de este tipo de proyectos.

### 3. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA DE DATOS.

Para la aplicación empírica de este estudio se ha utilizado una muestra compuesta por 35 EDARs de las cuales se han seleccionado 13 EDARs ya que en estas su efluente es reutilizado con fines ambientales. Todas las instalaciones están localizadas en la Comunidad Valenciana y realizan un proceso similar en el que se obtiene un output deseable (agua regenerada) y cuatro outputs no deseables: sólidos en suspensión (SS), nitrógeno (N), fósforo (P) y materia orgánica medida como demanda química de oxígeno (DQO). Los inputs necesarios para la regeneración del agua residual son energía, personal, reactivos, gestión de residuos y otros. En la tabla 1 se recogen los valores de estos parámetros. La información estadística ha sido suministrada por la *Entitat de Sanejament d'Aigües – EPSAR* y pertenece al año 2007.

Tabla 1: Descripción de la muestra.

		<b>MEDIA MUESTRA 35 EDARs</b>	<b>MEDIA MUESTRA 13 EDARs</b>	<b>DESVIACIÓN MUESTRA 35 EDARs</b>	<b>DESVIACIÓN MUESTRA 13 EDARs</b>
<b>INPUTS (€m<sup>3</sup>)</b>	Energía	0,054	0,072	0,037	0,021
	Personal	0,086	0,075	0,049	0,040
	Reactivos	0,038	0,030	0,029	0,019
	Residuos	0,046	0,025	0,038	0,011
	Otros	0,011	0,008	0,008	0,006
<b>OUTPUT DESEABLE (m<sup>3</sup>/año)</b>	Agua regenerada	4.203.312	3.166.290	3.192.313	2.400.849
<b>OUTPUTS NO DESADOS (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	SS	0,297	0,380	0,239	0,246
	N	0,025	0,028	0,012	0,017
	P	0,004	0,006	0,003	0,004
	DQO	0,678	0,667	0,387	0,323

#### 4. RESULTADOS.

Teniendo en cuenta que el objetivo de este papel es cuantificar los beneficios ambientales derivados de los proyectos de reutilización de aguas residuales, se ha aplicado la metodología descrita en el apartado 2.2 a una muestra formada por 13 EDARs cuyo efluente es reutilizado con fines ambientales.

La estimación de la función distancia direccional permite obtener el precio sombra de cada uno de los contaminantes eliminados durante el proceso de regeneración de las aguas residuales para cada una de las EDARs objeto de estudio. El valor de los precios sombra obtenidos, expresados en €/kg, se muestra en la tabla 2.

Los precios sombra obtenidos tienen signo negativo debido a que desde el punto de vista del proceso productivo no están asociados a outputs comerciables que puedan generar un ingreso. Sin embargo, desde una óptica ambiental estos precios pueden ser interpretados de manera positiva dado que representan los beneficios ambientales derivados del proyecto de reutilización de aguas residuales.

Tabla 2: Precios sombra para los contaminantes (€/kg).

<b>EDAR</b>	<b>SS</b>	<b>N</b>	<b>P</b>	<b>DQO</b>
1	-0,010	-10,473	-62,840	-0,062
2	-0,001	-1,500	-9,000	-0,007
3	-0,008	-38,840	-45,826	-0,243
4	-0,002	-1,500	-2,166	-0,007
5	-0,059	-59,104	-70,792	-0,360
6	-0,004	-61,267	-367,602	-0,534
7	-0,001	-1,500	-3,519	-0,012
8	-0,007	-35,126	-42,126	-0,192
9	-0,003	-10,810	-28,579	-0,403
10	-0,010	-21,705	-130,227	-0,152
11	-0,016	-73,904	-167,671	-0,238
12	-0,006	-55,209	-63,809	-0,235
13	-0,007	-56,693	-78,794	-0,242
<b>MEDIA</b>	<b>-0,010</b>	<b>-35,188</b>	<b>-82,535</b>	<b>-0,207</b>

La tabla 2 muestra que para todas las plantas objeto de estudio el mayor beneficio ambiental está asociado a la eliminación de fósforo seguido del nitrógeno. Esto es debido a que un exceso de estos dos nutrientes en el medio acuático genera problemas de eutrofización. Hoy en día, en el ámbito de las masas de agua continentales, la eutrofización es uno de los problemas ambientales de mayor magnitud debido a que el crecimiento excesivo de fitoplancton y algas produce una disminución en los niveles de oxígeno disuelto y consecuentemente la pérdida de biodiversidad acuática. Hay que tener en cuenta que el nitrógeno y fósforo no influyen de igual modo en el proceso de eutrofización. En las aguas continentales el fósforo es el nutriente limitante al crecimiento de algas. En cambio, en las aguas marítimas la situación es más compleja, siendo posible que el nitrógeno sea el nutriente limitante. La mayoría de actuaciones de reutilización de aguas residuales con fines ambientales tienen como destino humedales u otras masas de agua continentales, es por ello que el valor del precio sombra obtenido para el fósforo sea superior al del nitrógeno.

En cuanto al precio sombra de la materia orgánica (medida como DQO) el valor obtenido es considerablemente inferior al del N y P. Esto es debido a que las masas de agua tienen cierta capacidad para autodepurar dicho contaminante. Sin embargo, un vertido excesivo de materia orgánica puede provocar un déficit de oxígeno en el agua llegando a situaciones de hipoxia y anoxia.

Una vez cuantificados los precios sombra de los contaminantes en €/kg y conocida la cantidad de contaminantes eliminados por m<sup>3</sup> de agua regenerada, se obtiene directamente el valor monetario del beneficio ambiental de la reutilización de aguas residuales expresado en €/m<sup>3</sup> y €/año. (Ver tabla 3).

Tabla 3: Beneficios ambientales de la reutilización de aguas residuales.

<b>EDAR</b>	<b>SS (€m<sup>3</sup>)</b>	<b>N (€m<sup>3</sup>)</b>	<b>P (€m<sup>3</sup>)</b>	<b>DQO (€m<sup>3</sup>)</b>	<b>B. TOTAL (€m<sup>3</sup>)</b>	<b>B. TOTAL (€año)</b>
1	0,004	0,257	0,449	0,049	<b>0,759</b>	<b>6.430.921</b>
2	0,001	0,036	0,084	0,011	<b>0,132</b>	<b>946.054</b>
3	0,003	1,996	0,313	0,114	<b>2,425</b>	<b>12.638.415</b>
4	0,001	0,079	0,015	0,005	<b>0,099</b>	<b>272.081</b>
5	0,010	0,746	0,164	0,154	<b>1,073</b>	<b>3.156.721</b>
6	0,003	0,319	0,540	0,513	<b>1,376</b>	<b>3.719.680</b>
7	0,001	0,095	0,046	0,010	<b>0,151</b>	<b>207.631</b>
8	0,002	0,821	0,167	0,101	<b>1,091</b>	<b>1.804.343</b>
9	0,001	0,306	0,340	0,443	<b>1,090</b>	<b>1.033.818</b>
10	0,002	0,735	0,566	0,079	<b>1,383</b>	<b>4.137.498</b>
11	0,002	0,739	0,309	0,026	<b>1,075</b>	<b>3.299.762</b>
12	0,001	0,988	0,114	0,029	<b>1,131</b>	<b>1.148.305</b>
13	0,001	2,061	0,403	0,059	<b>2,525</b>	<b>2.203.367</b>
<b>MEDIA</b>	<b>0,003</b>	<b>0,611</b>	<b>0,286</b>	<b>0,122</b>	<b>1,022</b>	<b>3.153.738</b>

El mayor beneficio ambiental, en valor medio, está asociado a la eliminación de nitrógeno ya que representa casi un 60% del beneficio total. Le sigue en importancia el fósforo con un peso porcentual del 28%. Este resultado se debe a que dichos contaminantes son los que presentan un mayor precio sombra (ver tabla 2). El beneficio ambiental derivado de un proyecto de reutilización de aguas residuales es muy variable entre las distintas plantas consideradas, ya que el mínimo valor es de 0,132 €m<sup>3</sup> mientras que el máximo es de 2,525 €m<sup>3</sup>. La media ponderada, en función del volumen de agua residual tratada, es 1,022 €m<sup>3</sup>.

Por último, se aporta información acerca del beneficio ambiental expresado en €/año. La integración de dicho valor en la ecuación (1) permite obtener un indicador sobre la viabilidad económica de un proyecto de reutilización de aguas residuales, en el que no sólo se consideran los impactos internos sino también las externalidades derivadas del proyecto.

## 5. CONCLUSIONES.

Debido al importante avance tecnológico experimentado en los últimos años en materia de regeneración de aguas residuales, en la actualidad, la viabilidad de los proyectos de reutilización de aguas residuales está supeditada fundamentalmente a aspectos económicos y sociales. Es por ello que el análisis económico está cobrando cada vez más importancia en el desarrollo e implementación de proyectos de regeneración y reutilización de aguas residuales. Sin embargo, en la mayoría de las

ocasiones, los estudios de viabilidad económica de este tipo de proyectos se centran exclusivamente en los impactos internos sin considerar los beneficios no monetarizables que se derivan de los mismos como es la protección del medio ambiente.

La valoración en términos monetarios de las externalidades ambientales derivadas de un proyecto de reutilización de aguas residuales resulta necesaria para justificar su viabilidad económica. Sin embargo, esta es una tarea compleja debido a su naturaleza de no mercado. Para ello, los economistas han desarrollado diferentes metodologías de valoración económica.

En este trabajo se propone la cuantificación de los precios sombra de los outputs no deseables obtenidos en el proceso de regeneración de las aguas residuales como método de valoración económica de los beneficios ambientales asociados a la reutilización de aguas residuales.

Se ha realizado una aplicación empírica con una muestra de 13 WWTPs cuyo efluente es reutilizado con fines ambientales. Los resultados obtenidos muestran que el mayor beneficio ambiental está asociado al hecho de evitar el vertido de nitrógeno y fósforo debido a que estos nutrientes son los principales responsables de la eutrofización de las masas de agua continentales.

El valor monetario de los beneficios ambientales expresado en €/año, podrá ser integrado en el estudio de viabilidad económica de un proyecto de reutilización de aguas residuales obteniendo así un indicador útil que tenga en cuenta no sólo los impactos internos sino también los externos.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.**

- Hochstrat, R., Joksimovic, D., Wintgens, T., Melin, T. y Savic, D. (2007). “Economic considerations and decision support tool for wastewater reuse scheme planning”. *Water Science & Technology*, 56 (5), 175-182.
- AQUAREC. (2006). “Water Reuse System Management Natural”. Bixio, D. y Wintgens T. (eds). Project Report.
- Bixio, D., Thoeye, C., De Koning, J., Joksimovic, D., Savic, D., Wintgens, T. y Melin, T. (2006). “Wastewater reuse in Europe”. *Desalination*, 187, 89-101.
- Asano, T. ed. (1998). “Wastewater Reclamation and Reuse”, Vol. 10, Water Quality Management Library, Technomic Publishing, PA.
- Asano, T. (2007). “Water Reuse: Issues, Technologies and Applications”. Metcalf & Eddy/AECOM.

- Seguí, L. (2004). “Sistemas de Regeneración y Reutilización de Aguas Residuales. Metodología para el Análisis Técnico-Económico y Casos”. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Godfrey, S., Labhassetwar, P. y Wate. S. (2009). “Greywater reuse in residential schools in Madhya Pradesh, India-A case study of cost-benefit analysis”. *Resources, Conservation and Recycling*, 53, 287-293.
- North, J. y Griffin, C. (1993). “Water source as a housing characteristics: hedonic property valuation and willingness to pay for water”. *Water Resources Research*, 29 (7), 1923-1929.
- Hanley, N. y Spash, C.L. (1993). “Cost-benefit analysis and the environment”. Cheltenham, UK, Edward Elgar.
- Field, B.C. (1997). “Environmental economics”. McGraw-Hill.
- Curry, S. y Weiss, J. (1993). “Project analysis in developing countries”. McMillan Publishers.
- Hutton, G. y Haller, L. (2004). “Evaluation of the costs and benefits of water and sanitation improvements at the global level”. World Health Organization.
- Seguí, L., Alfranca, O. y García J. (2009). “Techno-economical evaluation of wáter reuse for wetland restoration: a case study in a natural park in Catalonia, Northeastern Spain”. *Desalination*, 246, 179-189.
- Chen, R. y Wang, C. (2009). “Cost-benefit evaluation of a decentralized water system for wastewater reuse and environmental protection”. *Water Science & Technology*, 59 (8), 1515-1522.
- Diamond, P.A. y Hausman, J.A. (1994). “Contingent valuation: is some number better than no number?” *Journal of Economic Perspectives*, 8 (4), 45-64.
- Shabman, L. y Stephenson, K. (2000). “Environmental valuations and its economic critics”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 126 (6), 382-388.
- Getzner, M. (2000). “Extending the Framework of Valuing Regional Biodiversity”. 3er International Conference of the European Society for Ecological Economics. May 3-6. Viena.
- Färe, R., Grosskopf, S., Lovell, C.A, y Yaisawarng, S. (1993). “Derivation of shadow prices for undesirable outputs: a distance function approach”. *Review of Economics and Statistics*, 75 (2), 374-380.

- Färe, R. y Grosskopf, S. (1998). “Shadow pricing of good and bad commodities”. *American Journal of Agricultural Economics*, 80, 584-590.
- Färe, R., Grosskopf, S. y Weber, W. (2001). “Shadow prices of Missouri public conservation land”. *Public Finance Review*, 29 (6), 444-460.
- Färe, R., Grosskopf, S. y Weber, W. (2006). “Shadow prices and pollution costs in U.S. agriculture”. *Ecological economics*, 56, 89-103.
- Hernández, F., Urkiaga, A., De las Fuentes, L., Bis, B., Chiru, E., Balazs, B. y Wintgens, T. (2006). “Feasibility studies for water reuse projects: an economical approach”. *Desalination*, 187, 253-261.
- EPA. (1998). “Water recycling and reuse: the environmental benefits”. Ed. Water Division Region IX. <http://www.epa.gov/region09/water/recycling/brochure.pdf>.
- Hernández, F., Molinos, M. y Garrido, S. (2010). “Economic valuation of environmental benefits from wastewater treatment processes: An empirical approach for Spain”. *Science of the Total Environment*, 408 (4), 953-957.