

ESTUDIO DE VIABILIDAD DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN DEL FÓSFORO CONTENIDO EN LAS AGUAS RESIDUALES: UNA APROXIMACIÓN ECONÓMICA.

MARÍA MOLINOS-SENANTE

maría.molinos@uv.es

*Universidad de Valencia / Departamento de Economía Aplicada II
Campus del Tarongers, 46022 Valencia.*

RAMÓN SALA-GARRIDO

ramón.sala@uv.es

*Universidad de Valencia / Departamento de Matemáticas para la Economía y la Empresa.
Campus del Tarongers, 46022 Valencia.*

FRANCESC HERNÁNDEZ-SANCHO

Francesc.hernández@uv.es

*Universidad de Valencia / Departamento de Economía Aplicada II
Campus del Tarongers, 46022 Valencia.*

Recibido 28/05/2010

Revisado 17/09/2010

Aceptado 30/09/2010

RESUMEN: El fósforo es un recurso esencial, no renovable y cuyo vertido al medio ambiente provoca graves impactos negativos. Por ello, la recuperación del fósforo contenido en el agua residual se ha convertido en una necesidad para alcanzar el desarrollo sostenible. A pesar de la escasez de este elemento, en la actualidad el precio de venta de las rocas fosfáticas es inferior al del reciclaje del mismo, por lo que no existen incentivos económicos para la implementación de tecnologías de recuperación de este nutriente. En este trabajo se propone una metodología que permite evaluar la viabilidad económica de un proyecto de recuperación del fósforo contenido en las aguas residuales considerando no sólo los impactos internos sino también los externos. Para ello y haciendo uso de la función distancia direccional se estima el precio sombra del fósforo, el cual representa una aproximación a los beneficios ambientales derivados de evitar su vertido al medio ambiente. Así mismo, se realiza una aplicación empírica de esta metodología a una muestra estaciones depuradoras de aguas residuales (EDARs) que en la actualidad no cuentan con tratamiento de eliminación ni de recuperación de fósforo. La cuantificación e incorporación del beneficio ambiental en los estudios de viabilidad demuestra que la recuperación del fósforo contenido en las aguas residuales es un proceso viable no sólo desde el punto de vista ambiental sino también desde una perspectiva económica.

Palabras claves: Análisis coste-beneficio, beneficios ambientales, función distancia direccional, precios sombra, recuperación de fósforo, viabilidad económica.

ABSTRACT: Phosphorus is an essential, non-renewable resource and his discharged to the environment causes serious negative impacts. Therefore, phosphorus recovery from wastewater has become a necessity for sustainable development. Despite the scarcity of this element, nowadays the selling price of phosphate rock is

180 Molinos-Senante, M.; Sala-Garrido, R. y Hernández-Sancho, F.

lower than phosphorus recovery, which means that there are no economic incentives for the implementation of recovery technologies of this nutrient. This paper shows a methodology to assess the economic feasibility of wastewater phosphorus recovery project taking into account not just the internal impact, but also the external impact. For this, using the directional distance function the shadow price of phosphorus is estimated, which represents an approach to the environmental benefits obtained to prevent its discharge. Likewise, an empirical application of this methodology is carried out in a sample of wastewater treatment plants (WWTPs) that at present don't have any treatment for phosphorus removal or recovery. The quantification and incorporation of the environmental benefit in the economic feasibility studies for phosphorus recovery projects shows that this process is viable not only from environmental point of view but also from an economic perspective.

Keywords: Cost-benefit analysis, directional distance functions, economic feasibility, environmental benefits, phosphorus recovery, shadow prices.

1. Introducción

El fósforo es un recurso no renovable que constituye un macronutriente para el desarrollo de la vida y la producción agrícola y para el cual la naturaleza no cuenta con ningún elemento sustitutivo (USGS, 2005).

Según el estudio elaborado por EcoSanRes (2005), el consumo anual de P_2O_5 en el año 2050 será de 70 millones de toneladas, esta cifra implica que con este consumo, en unos 60 – 70 años la mitad de las reservas actuales de fósforo económicamente viables se habrán consumido. Estimaciones realizadas por otros autores (Steen 1998; Florida Institute of Phosphate Research 1999; Jasinki et al. 1999) muestran predicciones similares.

Teniendo en cuenta la escasez de este recurso, el reciclado del fósforo presente en el agua residual y en los fangos resultantes del proceso de depuración se ha convertido en una verdadera necesidad. Por otra parte, la recuperación de fósforo también supone importantes mejoras medioambientales y en la operación de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDARs). En este sentido, la necesidad de eliminar el fósforo presente en el agua residual ha incrementado en toda Europa como consecuencia de la aplicación de la Directiva 91/271/CEE (Directiva sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas), especialmente cuando el efluente es vertido en zonas catalogadas como sensibles a la eutrofización.

Aunque en la actualidad existen pocas implementaciones a escala industrial, existen distintas tecnologías que permiten el reciclado del fósforo contenido en las aguas residuales. Así, uno de los procesos más estudiados es la recuperación de fósforo en forma de fosfato de magnesio y amonio hexahidratado también conocido como MAP (magnesium ammonium phosphate) o estruvita. El reciclado de fósforo en forma de estruvita reduce la generación de fangos y consecuentemente los costes en reactivos químicos necesarios para la gestión de los mismos, el terreno necesario para su deposición y además permite la obtención de un producto con un alto valor como fertilizante agrícola (Römer, 2006; Shu et al. 2006; Martí et al. 2010). Es por ello que en la actualidad, la recuperación del fósforo presente en las corrientes residuales constituye un proceso básico para alcanzar el desarrollo sostenible.

El reciclado de fósforo (y también de otros nutrientes) presentes en el agua y fango residual requiere esfuerzos tanto en el ámbito técnico como en el económico (Dockhorn, 2009). Mientras que la viabilidad técnica de los procesos de recuperación de fósforo ha sido ampliamente estudiada (Shimamura et al. 2003; de-Bashan y Bashan 2004; Elliott y O'Connor, 2007; Pastor, 2008; Zhi-Long et al. 2010; entre otros), las contribuciones en el ámbito de la viabilidad económica son mucho más limitadas (Paul et al. 2001; Jeanmaire y Evans 2001; Shu et al. 2006; Berg et al. 2006; Dockhorn 2009).

En este sentido, se estima que los costes asociados a la recuperación del fósforo contenido en las corrientes residuales están comprendidos entre 2 €/kg P y 8 €/kg P en función de las condiciones de operación en las que se lleve a cabo el proceso (Dockhorn, 2007; Schaum, 2007). Por otra parte, el precio de venta de la roca fosfática en Estados

Unidos está en torno a 35 – 50 \$/t (U.S Geological Survey Home Page) dependiendo de la pureza de la misma. Estos valores muestran que en la actualidad no existen incentivos económicos para la implementación de tecnologías para la recuperación de fósforo en el sector de las aguas residuales ya que, desde el punto de vista de los costes, para la industria de los fertilizantes continúa siendo más rentable usar como materia prima la roca fosfática.

Sin embargo, es importante recordar que la recuperación del fósforo presente en las aguas residuales genera importantes beneficios ambientales ya que previene la eutrofización en el medio receptor del efluente e incrementa la disponibilidad de un recurso no renovable. Cuando se analiza la viabilidad económica de proyectos con efectos ambientales es muy importante no considerar sólo los costes y beneficios internos sino también las externalidades ambientales derivadas (Hernández et al. 2006). Sin embargo, la realización de estudios de viabilidad económica que tengan en cuenta los impactos ambientales es una tarea muy compleja ya que la mayoría de estos beneficios y costes no tienen un precio regulado por el mercado (Hernández-Sancho et al. 2010).

En este contexto, a partir de un trabajo pionero desarrollado por Färe et al. (1993), y sucesivos desarrollos (Färe y Grosskopf, 1998; Färe et al. 2001 and Färe et al. 2006) en el marco de los estudios de eficiencia, surge una corriente de investigación que pretende aportar una metodología de valoración de los llamados outputs no deseables, carentes de mercado. Haciendo uso del concepto de función distancia direccional, se logra calcular un precio sombra para aquellos bienes derivados de actividades humanas y productivas (residuos sólidos, agua residual, etc.) para los que el mercado no otorga ningún valor y que cuentan con importantes efectos medioambientales.

Es importante destacar que los llamados outputs no deseables pueden ser considerados como externalidades ambientales negativas asociadas a un proceso de producción en el sentido de que pueden convertirse en daño ambiental en caso de que fueran gestionados de manera incorrecta (Hernández et al. 2010). El tratamiento de aguas residuales es un proceso productivo en el que junto con el agua tratada se obtienen una serie de outputs no deseables o contaminantes entre los que se incluye el fósforo. El precio sombra de este contaminante es equivalente al daño ambiental evitado, y si asumimos que el nivel de contaminación actual es el óptimo, el precio sombra puede ser interpretado como una aproximación al beneficio ambiental derivado del proceso de recuperación del fósforo de las corrientes residuales.

2. Objetivos

Los objetivos de este trabajo son mostrar una metodología que permita evaluar la viabilidad económica del proceso de recuperación de fósforo de las aguas residuales en la que no sólo se tengan en cuenta los impactos internos sino también los externos y cuantificar, a través de una aplicación empírica, el valor monetario de los beneficios ambientales derivados del reciclaje de fósforo. Para este último fin, se hace uso de la propuesta metodológica desarrollada por Färe et al. (2006) en una muestra de 20 EDARs localizadas en la Comunidad Valenciana cuyo efluente es vertido en áreas con problemas

de eutrofización. Los resultados obtenidos permitirán determinar en que EDARs es más rentable la implementación de un proceso de recuperación de fósforo.

3. Metodología

El análisis coste-beneficio (ACB) es una metodología propia del análisis económico ampliamente utilizada para evaluar la viabilidad económica de proyectos. En este sentido, el ACB es una herramienta de gran utilidad como instrumento de soporte a la decisión. El ACB parte de la premisa de que un proyecto es económicamente viable sólo si todos sus beneficios superan al conjunto de sus costes. En base a esta idea, los beneficios de cada alternativa son comparados con sus costes utilizando una metodología analítica común (Molinos et al. 2010). El beneficio neto de cada opción es la diferencia entre sus beneficios y sus costes (ver Ecuación 1).

$$BN = B_T - C_T \quad (1)$$

Donde BN es el beneficio neto, B_T son los beneficios totales, y C_T son los costes totales. Según la Ecuación 1, si el BN es mayor que cero entonces el proyecto es económicamente viable, mientras que si el BN es menor que cero entonces el proyecto no es viable desde el punto de vista económico. La mejor alternativa es la que proporciona un mayor beneficio neto.

3.1. Beneficios de la recuperación del fósforo.

El beneficio total de recuperar el fósforo contenido en las aguas residuales es la suma de los beneficios internos y los beneficios externos. Los beneficios internos son aquellos que están directamente relacionados con el proceso de reciclaje y pueden ser cuantificados directamente en unidades monetarias ya que su valor está determinado por el mercado. Por el contrario, los beneficios externos o externalidades positivas son las consecuencias positivas que se derivan del proyecto y que incrementan el bienestar de la población sin que haya una recompensa económica por ello. A diferencia de los beneficios internos, la cuantificación de las externalidades es mucho más compleja ya que estas no presentan valor de mercado y por lo tanto, requieren de la aplicación de métodos de valoración económica.

El beneficio total se puede definir como:

$$B_t = \sum_{t=0}^T (BI_t + BE_t) \quad (2)$$

Donde B_t es el beneficio total (€), BI son los beneficios internos (€), BE son los beneficios externos (€) y t es el año.

El término beneficio interno engloba los ingresos obtenidos como consecuencia de la venta del fósforo recuperado, así como los ahorros derivados de la reducción en los

costes de limpieza de tuberías debidos a la menor formación incontrolada de estruvita en estas, en reactivos químicos necesarios para la precipitación química del fósforo y en la gestión de los fangos ya que estos se producen en menor cantidad.

Es razonable asumir que en una EDAR se puede recuperar 1 Kg de estruvita por cada 100 m³ de agua residual tratada (Münch y Barr, 2001; van Dijk y Braakensiek, 1984). El producto obtenido puede utilizarse como fertilizante ya que presenta propiedades similares a las de los fertilizantes convencionales (Taruya et al. 2000; Ahmed et al. 2006; entre otros). En este sentido, Ueno y Fujii (2001) señalan que la estruvita obtenida a partir del agua residual en Japón se está vendiendo a las compañías fertilizantes a razón de 250 €/t, gastos de transporte excluidos. Münch y Barr (2001) tras un estudio de mercado, apuntaron que el precio al que se podría vender la estruvita en Australia estaría comprendido entre 188 y 314 €/t. Shu et al. (2006) estiman que el precio de mercado de este compuesto se sitúa en torno a 464 €/t. Más recientemente Dockhorn (2009), basándose en los precios de diferentes fertilizantes comercializados, asigna a la estruvita un valor de 763 €/t. Por lo tanto, las estimaciones realizadas por distintos autores indican que el precio de mercado de la estruvita está comprendido entre 188 y 763 €/t MAP.

Por otra parte, el ahorro en los costes de operación que supone la recuperación de fósforo respecto al tratamiento convencional de eliminación de este nutriente, Dockhorn (2009) lo cifra en 2-3 €/Kg P mientras que Shu et al. (2006) lo cuantifica en 0,79 – 3,92 AUD \$/Kg P.

En relación a los beneficios externos, la recuperación de fósforo de corrientes residuales genera externalidades positivas ya que incrementa la disponibilidad de un recurso no renovable y produce importantes beneficios ambientales en el medio receptor del efluente tratado. Esto es debido a que en aguas continentales como son los lagos y ríos, el nutriente limitante es el fósforo, es decir, se considera que en estos ecosistemas, el fósforo es el único elemento que limita el crecimiento de los productores primarios y aunque exista un exceso de otros nutrientes, sólo si se añade el nutriente limitante se producirá el crecimiento. Consecuentemente cuando se reduce la concentración de fósforo en el medio acuático se produce una disminución de los problemas de eutrofización y booms de algas acuáticas (Paul et al., 2001). Al mismo tiempo, la recuperación de fósforo reduce la concentración de este elemento en el fango, lo cual lo hace interesante para su uso agrícola ya que en muchas ocasiones la máxima cantidad permitida de fango a aplicar en los cultivos está limitada por el alto contenido en fósforo (Köhler, 2004).

Teniendo en cuenta los beneficios internos y externos anteriormente descritos, el beneficio total se expresa como:

$$B_t = \sum_{t=0}^T [(APR_t * PPR_t) + (ARF_t * CGF_t) + (ARR_t * CR_t) + (ARD_t * CLD_t) + BE_t] \quad (3)$$

Donde B_t = beneficio total (€), APR = cantidad anual de fósforo recuperado (Kg), PPR = precio de venta del fósforo recuperado (€/Kg), ARF = Cantidad anual de reducción de fango generado (Kg), CGF = coste de gestión del fango (€/Kg), ARR = cantidad anual de reducción de reactivos (Kg), CR = coste de reactivos (€/kg), ARD = cantidad anual de reducción de depósitos incontrolados de fósforo (Kg), BE = beneficio externo (€) y t = año.

Mientras que el beneficio interno puede medirse directamente en unidades monetarias, la cuantificación de las externalidades, al carecer de 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 inversión, la estimación de los impactos externos es el principal obstáculo a salvar (Hernández-Sancho et al. 2010). Tal y como se ha citado en el apartado 1, una forma de estimar los beneficios ambientales derivados de la recuperación del fósforo de las aguas residuales es a través de la cuantificación del precio sombra de este contaminante. Así el fósforo eliminado durante el tratamiento del agua residual puede considerarse como un output no deseado ya que en caso de que fuese vertido al medio ambiente, especialmente en áreas sensibles a la eutrofización, provocaría un grave impacto negativo sobre éste.

La metodología para la cuantificación de los 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 proporciona la máxima expansión de los outputs deseables y contracción de los outputs no deseables que es posible con la tecnología $P(x)$.

La parametrización de la función distancia direccional se realiza con la forma cuadrática (Chambers, 1998). Esta forma a diferencia de la función translog puede ser restringida para satisfacer la propiedad de traslación. Dado un vector direccional $g=(1,1)$ y aplicado a un problema con $k = 1, \dots, K$ unidades operando en un periodo, la función distancia cuadrática direccional para la unidad k es:

$$\begin{aligned}
D_o(x_k, y_k, b_k; 1, 1) &= \alpha + \sum_{n=1}^N \alpha_n x_{nk} + \sum_{m=1}^M \beta_m y_{mk} + \sum_{j=1}^J \gamma_j b_{jk} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \sum_{n'=1}^N \alpha_{nn'} x_{nk} x_{n'k} \\
&+ \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{m'=1}^M \beta_{mm'} y_{m'k} y_{mk} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^J \sum_{j'=1}^J \gamma_{jj'} b_{j'k} b_{jk} + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \delta_{nm} x_{nk} y_{mk} + \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J \eta_{nj} x_{nk} b_{jk} \\
&+ \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J \mu_{mj} y_{mk} b_{jk}
\end{aligned} \quad (5)$$

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:

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

La obtención de los precios sombra de los outputs no deseables requiere 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:

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

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 , y los precios de los outputs no deseables son q .

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, q_j , es el precio sombra de cada uno de ellos y viene determinado por la siguiente expresión:

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

3.2. Costes de la recuperación del fósforo.

De forma análoga al beneficio total, el coste total de recuperar el fósforo contenido en las aguas residuales es la suma de los costes internos y los costes externos. Mientras que el valor de los costes internos puede ser cuantificado directamente en unidades monetarias porque está determinado por el mercado, los costes externos no presentan valor de mercado y por lo tanto, su cuantificación exige aplicar métodos de valoración económica.

En cualquier caso, el coste total de recuperación del fósforo viene dado por:

$$C_t = \sum_{t=0}^T (CI_t + CE_t) \quad (9)$$

Donde C_t es el coste total (€), CI son los costes internos (€), CE son los costes externos (€) y t es el año.

Los costes internos de recuperación de este nutriente son el resultado de la suma de los costes de inversión (obra civil, equipamiento, maquinaria e instalaciones auxiliares), los costes de operación y mantenimiento adicionales al tratamiento convencional de eliminación de fósforo (reactivos para la precipitación química y mantenimiento de valores adecuados de pH) y los costes financieros. En general, los costes del proceso de recuperación de fósforo están fuertemente influenciados por el tipo de tecnología que se implemente. En este sentido, desde el punto de vista técnico, los procesos que han sido objeto de mayor investigación son el reciclado del fósforo contenido en el fango digerido y deshidratado, en efluentes concentrados o en las cenizas del fango residual (Lind et al. 2000, Maier et al. 2005, Pinnekamp et al. 2005).

En relación a los costes de inversión, estos dependen en gran medida del tamaño de la EDAR (Hernández et al. 2009). Según Montag et al. 2009, los costes de inversión para el

proceso de recuperación de fósforo contenido en el efluente y en el fango en una EDAR cuya capacidad es de 100.000 habitantes equivalentes (HE) ascienden a 3.732.549 € y 1.417.739 € respectivamente. Mientras que el coste de inversión para recuperar el fango contenido en las cenizas del fango asciende a 11.026.720 € para una planta incineradora capaz de tratar 15.000 toneladas de fango al año.

Los costes de operación y mantenimiento, dependen de la concentración de fósforo en la corriente residual a tratar así como de los reactivos químicos que se utilicen para operar la planta. Berg et al. 2006 estiman que dichos costes en una planta de 45.000 HE que recicla el fósforo mediante el proceso cristalización están comprendidos entre 2,14 y 2,90 €/HE año. Dockhorn 2009, para una planta de 350.000 HE que recupera el fósforo contenido en el fango, cifra estos costes en 2.800 €/t MAP si la concentración de PO₄-P es de 50 mg/l y en 520 €/t MAP cuando la concentración de PO₄-P asciende a 800 mg/L.

En lo que respecta a los costes externos, a diferencia de lo que ocurría con los beneficios, la recuperación de fósforo en forma de estruvita no genera ningún tipo de externalidad negativa. En este sentido, las investigaciones (Bridger et al. 1962; Lunt et al. 1964; Shu et al. 2006; entre otros) han demostrado que el fósforo recuperado puede ser aplicado en grandes dosis sobre los terrenos agrícolas sin afectar negativamente al crecimiento de las plantas. Además, debido a que la estruvita es insoluble en el agua, la aplicación de este fertilizante reduce los problemas de eutrofización e infiltración en las aguas subterráneas. Por lo tanto, podemos afirmar que la recuperación del fósforo contenido en las aguas residuales no produce ningún tipo de impacto externo negativo.

El coste total de recuperación del fósforo contenido en el agua residual se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$Ct = \sum_{t=0}^T CI_t + COM_t + CF_t \quad (10)$$

Donde CI es el coste de inversión (€), COM son los costes de operación y mantenimiento (€), CF son los costes financieros (€) y t es el año.

Sustituyendo las ecuaciones (3) y (10) en la ecuación general propuesta inicialmente (1) se obtiene la siguiente expresión:

$$BN = \sum_{t=0}^T \left[(APR_t * PPR_t) + (ARF_t * CGF_t) + (ARR_t * CR_t) + (ARD_t * CLD_t) + BE_t \right] - (CI_t + COM_t + CF_t) \quad (11)$$

4. Descripción de la muestra de datos

El estudio se ha realizado sobre una muestra de 20 EDARs que en la actualidad no cuentan con tratamiento de eliminación ni de recuperación de fósforo, pero cuyo efluente es vertido en áreas con problemas de eutrofización. Sin embargo, para estimar el beneficio ambiental que supondría la recuperación del fósforo contenido en el agua residual, se ha asumido que tras la implementación de las tecnologías adecuadas, la concentración de este nutriente en el efluente sería la determinada por la Directiva 271/91/CEE para zonas sensibles, es decir, 2 mg/L cuando la capacidad de la EDAR está comprendida entre 10.000 y 100.000 habitantes equivalentes (HE) y 1 mg/L si es mayor a 100.000 HE.

Todas las plantas objeto de estudio están localizadas en zonas de costa en el ámbito territorial de la Comunidad Valenciana y llevan a cabo un tratamiento del agua residual similar, caracterizado por la obtención de un output deseado (agua tratada) y cuatro outputs no deseados: sólidos en suspensión (SS), nitrógeno (N), fósforo (P) y materia orgánica medida como demanda química de oxígeno (DQO). Los inputs necesarios para llevar a cabo este proceso son energía, personal, gestión de residuos y mantenimiento. La información estadística se refiere al año 2008 y ha sido proporcionada por *Entitat de Sanejament d'Aigües de la Comunitat Valenciana – EPSAR*.

La tabla 1 muestra la descripción de dichas variables.

Tabla 1: Descripción de la muestra.

		MEDIA	DESVIACIÓN
INPUTS (€m ³)	Energía	0,088	0,054
	Personal	0,166	0,109
	Gestión Residuos	0,097	0,097
	Mantenimiento	0,037	0,024
OUTPUT DESEABLE (€año)	Agua tratada	1.317.540	1.101.344
OUTPUTS NO DESEABLES (kg/m ³)	SS	0,296	0,353
	N	0,039	0,035
	P	0,005	0,005
	DQO	0,630	0,415

5. Resultados

La función objetivo a minimizar (ver Metodología) hace referencia a las 20 unidades de la muestra. La resolución del problema no-lineal (6) se ha realizado a través del software GAMS. El valor de los parámetros se muestra en la tabla 2.

Tabla 2: Parámetros y coeficientes asociados a la función cuadrática.

α_0	46,62861751	α_{24}	-0,00000024	γ_{44}	0,00000341	η_{23}	-0,00000005
α_1	0,00883921	α_{33}	3,128917E-9	γ_{45}	-0,00001855	η_{33}	-0,00000001
α_2	0,00805580	α_{34}	6,193698E-9	γ_{55}	0,00001475	η_{43}	0,00000011
α_3	0,00000163	α_{44}	-0,00000010	δ_{11}	0,00000004	η_{14}	-0,00000075
α_4	0,00718565	β_{11}	-0,00000005	δ_{21}	0,00000007	η_{24}	0,00000083
β_1	-0,00747908	γ_{11}	0,00000003	δ_{31}	2,126832E-9	η_{34}	-0,00000004
γ_1	-0,00000954	γ_{12}	-0,00000001	δ_{41}	-0,00000004	η_{44}	-0,00000118
γ_2	0,00000762	γ_{13}	1,653004E-9	η_{11}	0,00000025	η_{15}	-0,00000130
γ_3	0,00007105	γ_{14}	-0,00000037	η_{21}	-0,00000002	η_{25}	-0,00000410
γ_4	0,00090995	γ_{15}	0,00000079	η_{21}	-0,00000002	η_{35}	0,00000021
γ_5	0,99154184	γ_{22}	0,00000006	η_{31}	-3,66252E-9	η_{45}	0,00000615
α_{11}	-0,00000024	γ_{23}	-0,00000008	η_{41}	0,00000003	μ_{11}	-4,19786E-9
α_{12}	-0,00000049	γ_{24}	0,00000049	η_{12}	-0,00000007	μ_{12}	0,00000007
α_{13}	0,00000002	γ_{25}	-0,00000196	η_{22}	-0,00000003	μ_{13}	8,382139E-9
α_{14}	0,00000013	γ_{33}	0,00000003	η_{32}	0,00000002	μ_{14}	0,00000009
α_{22}	0,00000002	γ_{34}	-0,00000023	η_{42}	-0,00000008	μ_{15}	-0,00000022
α_{23}	-0,00000001	γ_{35}	0,00000159	η_{13}	0,00000011		

La estimación de la función distancia direccional permite obtener el precio sombra de cada uno de los contaminantes eliminados durante el proceso de tratamiento del agua residual para cada una de las EDARs objeto de estudio. Teniendo en cuenta que el objetivo de este trabajo es cuantificar los beneficios ambientales derivados del reciclaje del fósforo contenido en el agua residual, nos centraremos en analizar los resultados obtenidos para este contaminante. El valor de los precios sombra del fósforo, expresado en €/kg, para cada una de las EDARs analizadas se muestra en la tabla 3. En concordancia con los trabajos existentes en la literatura (Ha NV et al. 2007; Hernández et al. 2010; entre otros), los precios sombra obtenidos son negativos, ya que representan un coste evitado. Estos precios sombra representan una aproximación a los beneficios ambientales obtenidos como consecuencia de la recuperación del fósforo del agua residual.

Una vez cuantificado el precio sombra del fósforo en €/kg y conocida la cantidad de este nutriente que podría ser recuperado por cada metro cúbico de agua residual tratada así como el volumen anual de agua tratada por cada EDAR, se obtiene directamente el valor monetario del beneficio ambiental de la recuperación de fósforo expresado en €/m³ y €/año (ver Tabla 3).

Tabla 3: Precio sombra del fósforo y beneficios ambientales de su recuperación.

EDAR	Precio sombra (€/Kg)	Fósforo recuperado (Kg/m ³)	Volumen de agua residual (m ³ /año)	Beneficio ambiental (€/m ³)	Beneficio ambiental (€/año)
1	-57,245	0,004	1.192.232	0,231	275.047
2	-49,055	0,003	596.472	0,309	184.338
3	-74,019	0,005	1.318.212	0,363	478.107
4	-41,207	0,004	800.195	0,237	189.599
5	-22,940	0,002	520.403	0,116	60.167
6	-51,933	0,020	2.568.842	0,474	1.217.212
7	-32,784	0,004	780.956	0,195	152.082
8	-41,812	0,015	3.092.992	0,237	733.273
9	-20,873	0,005	769.513	0,006	4.751
10	-62,780	0,003	845.995	0,253	214.040
11	-17,880	0,001	1.416.255	0,008	11.142
12	-41,600	0,003	565.956	0,249	140.792
13	-53,628	0,005	1.909.878	0,172	327.756
14	-36,881	0,004	667.136	0,283	188.473
15	-47,073	0,009	1.424.665	0,354	504.321
16	-79,815	0,011	3.267.300	0,310	1.011.819
17	-31,651	0,002	721.243	0,123	89.030
18	-44,269	0,002	569.720	0,174	99.119
19	-61,848	0,002	922.553	0,130	119.823
20	-27,254	0,001	400.297	0,087	34.802
MEDIA	-42,740	0,005	1.317.540	0,218	301.785

Según los resultados mostrados en la tabla 3, el precio sombra medio del fósforo es de -42,740 €/kg, es decir, que por cada kilogramo de fósforo que deja de verse en el medio ambiente se evita un daño o se genera un beneficio ambiental de 42,740 €. Así mismo, se observa que el beneficio ambiental total expresado en €/m³ es muy variable entre las diferentes EDARs estudiadas ya que el valor mínimo es de 0,006 €/m³ mientras que el máximo es de 0,474 €/m³. La media ponderada, en función del volumen de agua tratada por cada una de las EDARs, es de 0,218 €/m³.

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 recuperación del fósforo contenido en las aguas residuales, en el que no sólo se tienen en cuenta los impactos internos sino también las externalidades ambientales derivadas del proyecto.

En este sentido, asumimos una EDAR con una capacidad de tratamiento de 100.000 HE en la que se implementa un proceso para la recuperación del fósforo, en forma de estruvita, contenido en el fango digerido. El volumen anual de agua tratada es 500.000 m³ con una concentración de fósforo en el influente de 9 mg/L y de 1 mg/L en el efluente. Se considera que el periodo de amortización es de 20 años y la tasa de interés es del 6 %.

Tabla 4: Costes, beneficios y estimación de la viabilidad económica.

		MEDIA
COSTES INTERNOS (€año)	Inversión	70.887
	Operación y mantenimiento	14.000
	Costes financieros	4.253
INGRESOS INTERNOS (€año)	Venta de estruvita	2.378
	Ahorro en los costes de operación	10.000
VIABILIDAD INTERNA (€año)	Ingresos internos – Costes internos	- 76.762
BENEFICIOS EXTERNOS (€año)	Beneficios medioambientales	170.960
VIABILIDAD COMPLETA (€año)	Beneficios internos – Beneficios externos	94.198

La tabla 4 muestra que si el estudio de viabilidad se realiza en base a los costes y beneficios internos medios cuantificados y recopilados en diferentes trabajos bibliográficos (ver Metodología), el proceso de recuperación de fósforo no es viable económicamente porque el beneficio neto obtenido es negativo. En cambio, si además de los impactos internos se considera también el valor medio de los beneficios ambientales (Tabla 3), dicho proceso es viable en términos económicos ya que en este caso el resultado es positivo. Es importante destacar que en la cuantificación de las externalidades, únicamente se han estimado los beneficios ambientales, y no el incremento en la disponibilidad del recurso, lo cual implica que si dicho impacto hubiera sido cuantificado e incorporado en el estudio de viabilidad los resultados obtenidos hubieran sido todavía más favorables. En definitiva, podemos afirmar que en base a los resultados obtenidos, el proceso de recuperación del fósforo es económicamente viable siempre y cuando se tengan en cuenta los beneficios ambientales derivados del mismo.

6. Conclusiones

El fósforo es un recurso esencial y no renovable que puede ser recuperado del agua residual y del fango de depuración, contribuyendo así al desarrollo sostenible. Además, el reciclado del fósforo de dichas corrientes residuales genera importantes beneficios ambientales y en la operación de las EDARs.

Sin embargo, la recuperación de este nutriente requiere importantes esfuerzos tanto en el ámbito técnico como financiero. En este sentido, el precio de venta de las rocas fosfáticas es inferior al precio de recuperación del fósforo, lo que implica que no existen incentivos económicos para la implementación de tecnologías de recuperación del mismo en el sector de las aguas residuales.

Esta situación se produce porque los estudios de viabilidad económica de este tipo de proyectos se centran exclusivamente en los impactos internos sin considerar los beneficios carentes de mercado como es el incremento en la disponibilidad del recurso y la protección ambiental que se deriva de evitar el vertido de este contaminante.

En este trabajo se muestra una metodología que permite evaluar la viabilidad económica del proceso de recuperación del fósforo contenido en el agua residual considerando no sólo los impactos internos sino también los externos. Así mismo, se ha

realizado una aplicación empírica en la que se cuantifica en términos monetarios el beneficio ambiental derivado del reciclaje de dicho elemento en una muestra formada por 20 EDARs.

Los resultados obtenidos muestran que el beneficio ambiental es muy variable entre las distintas instalaciones analizadas, siendo el precio sombra medio 42,740 €/Kg. Conocido el volumen de agua residual tratada y la cantidad de fósforo recuperado por cada planta analizada se ha expresado dicho beneficio ambiental en €/m³ y €/año, de forma que pueda ser integrado en el correspondiente análisis de viabilidad económica.

En este sentido, cuando se analiza un proyecto de recuperación del fósforo contenido en el agua residual considerando únicamente los costes y beneficios internos, los resultados obtenidos muestran que este tipo de proyectos no son viables en términos económicos. En cambio, si además de estos impactos se incorporan los beneficios ambientales derivados de evitar el vertido de fósforo al medio natural, el beneficio neto obtenido es positivo, es decir, en este caso el proceso es rentable. En definitiva, se puede afirmar que la recuperación de fósforo es un proceso viable económicamente siempre y cuando se tengan en cuenta los beneficios ambientales derivados del mismo.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer la ayuda financiera recibida del Gobierno de España a través del proyecto NOVEDAR-Consolider (CSD2007-00055) y del programa de becas FPU (AP2007-03483).

Referencias bibliográficas

1. US Geological Survey, 2005. Phosphate rock.
http://minerals.er.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/phospmcs05.pdf.
2. EcoSanRes (2005). http://www.ecosanres.org/pdf_files/Fact_sheets/ESR4lowres.pdf
3. Steen, I. "Phosphorus availability in the 21st century management of a non-renewable resource", *Phosphorus and Potassium*, 217 (1998): 25-31.
4. Florida Institute of Phosphate Research. (2005). Phosphorus prime.
5. Jasinski, S.M., Kramer, D.A., Ober, J.A. y Searls, J.P. "Fertilizers- Sustaining Global Food Supplies", USGS Fact Sheet FS (1999): 155-199.
6. Römer, W. "Vergleichende Untersuchungen zur Pflanzenverfügbarkeit von Phosphat aus verschiedenen P-Recycling-Produkten im Keimpflanzenversuch", *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 169 (2006): 826-832.
7. Shu, L., Schneider, P., Jegatheesan, V. y Johnson, J. "An economic evaluation of phosphorus recovery as struvite from digester supernatant", *Bioresource Technology*, 97 n°17 (2006): 2211-2216.
8. Marti, N., Pastor, L., Bouzas, A., Ferrer, J. y Seco, A. "Phosphorus recovery by struvite crystallization in WWTPs: Influence of the sludge treatment line operation", *Water Research*, 41 n°7 (2010): 2371-2379.
9. Dockhorn, T. "About the economy of phosphorus recovery", *International Conference on Nutrient Recovery from Wastewater Streams*. Ashley, Mavinic and Koch (eds). (IWA Publishing, London, UK, 2009).

10. Shimamura, K., Tanaka, T., Miura, Y. y Ishikawa, H. "Development of high-efficiency phosphorus recovery method using a fluidized-bed crystallized phosphorus removal system", *Water Science and Technology*, 48 n°1 (2003): 163-170.
11. de-Bashan, L.E. y Bashan, Y. "Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer (1997-2003)", *Water Research*, 38 (2004): 4222-4246.
12. Elliott, H.A. y O'Connor, G.A. "Phosphorus management for sustainable biosolids recycling in the United States", *Soil Biology and Biochemistry*, 39 n°6 (2007): 1318-1327.
13. Pastor, L. "Estudio de precipitación y recuperación del fósforo presente en las aguas residuales en forma de estruvita ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$)". Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. (2008).
14. Z.Long-Yen, S.H. Chen, S.M. Wang, L.F. Lin, Y.J. Yan, Z.J. Zhang y J.S. Chen. "Phosphorus recovery from synthetic swine wastewater by chemical precipitation using response surface methodology", *Journal of Hazardous Materials*, 176 n°1-3 (2010): 1083-1088.
15. Paul, E., Laval, M.L. y Sperandio, M. "Excess sludge production and costs due to phosphorus removal", *Environmental Technology*, 22 (2001): 1363-1372.
16. Jeanmaire, N. y Evans, T. "Technico-Economic Feasibility of P-recovery from municipal wastewaters", *Environmental Technology*, 22 n°11 (2001): 1355-1361.
17. Berg, U., Knoll, G., Kaschka, E., Weidler, P.G. y Nüesch, R. "Is phosphorus recovery from waste water feasible?", *Environmental Technology*, 28 (2006): 165-172.
18. Dockhorn, T. "Stoffstrommanagement und Ressourcenökonomie in der kommunalen" Abwasserwirtschaft, TU Braunschweig 74, ISSN 0934-9731, (2007).
19. Schaum, C.A. "Verfahren für eine zukünftige Klärschlammbehandlung-Klärschlammkonditionierung und Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlammmasche", *Schriftenreihe WAR*, TU Darmstadt 185, (2007).
20. U.S Geological Survey Home Page: <http://minerals.usgs.gov/minerals/>
21. Hernández, F., Urkiaga, A., De las Fuentes, L., Bis, B., Chiru, E., Balazs, B. y Wintgens, T. "Feasibility studies for water reuse projects: an economical approach", *Desalination*, 187 (2006): 253-261.
22. Hernández-Sancho, F., Molinos-Senante, M. y Sala-Garrido, R. "Estudio de viabilidad económica para el tratamiento de aguas residuales a través de un análisis coste-beneficio", *Recta*, 11 (2010): 1-25.
23. Färe, R., Grosskopf, S., Lovell, C.A. y Yaisawarng, S. "Derivation of shadow prices for undesirable outputs: a distance function approach", *Review of Economics and Statistics*, 75 n°2 (1993): 374-380.
24. Färe, R. y Grosskopf, S. "Shadow pricing of good and bad commodities", *American Journal of Agricultural Economics*, 80 (1998): 584-590.
25. Färe, R., Grosskopf, S. y Weber, W. "Shadow prices of Missouri public conservation land", *Public Finance Review*, 29 n°6 (2001): 444-460.
26. Färe, R., Grosskopf, S. y Weber, W. "Shadow prices and pollution costs in U.S. agriculture". *Ecological economics*, 56, (2006): 89-103.
27. Hernández, F., Molinos, M. y Sala, R. "Economic valuation of environmental benefits from wastewater treatment processes: An empirical approach for Spain", *Science of the Total Environment*, 408 n°4 (2010): 953-957.
28. Molinos, M., Hernández, F. y Sala, R. "Economic feasibility study for wastewater treatment: a cost-benefit analysis", *Science of the Total Environment*, 408 n°20 (2010): 4396-4402.
29. Münch, E.V. y Barr, K. "Controlled struvite crystallization for removing phosphorus from anaerobic digester sidestreams", *Water Research*, 35 (2001): 151-159.
30. Van Dijk, J.C. y Braakensiek, H. "Phosphate removal by crystallization in a fluidized bed", *Water Science & Technology*, 17 (1984): 133-142.

31. Taruya, T., Ueno, Y. y Fujii, M. "Development of phosphorus resource recycling process from sewage". *1st World Water Congress of IWA*, Paris, 03-06 July, 2000. Poster NP-046.
32. Ahmed, S.Y., Shiel, R.S. y Manning, D. "Use of Struvite, a Novel P Source Derived from Wastewater Treatment, in Wheat Cultivation", *18th World Congress of Soil Science*, (Philadelphia, Pennsylvania, USA, 9-15 July, 2006).
33. Ueno, Y. y Fujii, M. "Three years experience of operating and selling recovered struvite from full-scale plant", *Environmental Technology*, 22 (2001): 1373-1381.
34. Köhler, J. "Phosphorus recycling: regulation and economic analysis", In: *Phosphorus in Environmental Technologies: Principles and Applications*, ed. E. Valsami Jones, (IWA publishing, London, UK, (2004): 529-546).
35. Chambers, R.G. "Input and output indicators", In: Färe, R., Grosskopf, S. and Russell, R. (Eds.), *Index numbers: essays in honour of Sten Malmquist*. Kluwer Academic Publishers, Boston, (1998).
36. Lind, B.B., Ban, Z. y Bydén, S. "Nutrient recovery from human urine by struvite crystallization with ammonia adsorption on zeolite and wollastonite", *Bioresource Technology*, 73 (2000): 169-174.
37. Maier, W., Weideler, A., Krampe, J. y Rott, U. "Entwicklung eines Verfahrens zur Phosphat-Rückgewinnung aus ausgefaultem Nassschlamm oder entwässertem Faulschlamm als gut Pflanzenverfügbares Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP)", Schlussbericht des durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (Osnabrück) geförderten Forschungsvorhabens AZ 21042, (2005).
38. Pinnekamp, J., Gethke, K. y Montag, D. "Stand der Forschung zur Phosphorrückgewinnung", 38. Essener Tagung für Wasser-und Abfallwirtschaft, Aachen, 11.3.2005. Schriftenreihe Gewässerschutz-Wasser-Abwasser, Nr. 198, Aachen 2005.
39. Hernández, F. y Sala, R. "Technical efficiency and cost analysis in wastewater treatment processes: A DEA approach", *Desalination*, 249 n°1 (2009): 230-234.
40. Montag, D., Gethke, K. y Pinnekamp, J. "Different strategies for recovering phosphorus: Technologies and costs", *International Conference on Nutrient Recovery from Wastewater Streams*. Ashley, Mavinic and Koch (eds). (IWA Publishing, London, UK, 2009).
41. Bridger, G.L., Salutsky, M.L. and Starostka, R.W. "Metal ammonium phosphates as fertilizers". *Agricult. Food Chem.*, 10 (1962): 181-188.
42. Lunt, O.R., Kofranek, A.M. and Clark, S.B. "Availability of minerals from magnesium ammonium phosphates". *Agricult. Food Chem.*, 12 (1964):497-504.
43. Ha, N.V., Kant, S. y Maclaren, V.W. "Shadow prices of environmental outputs and production efficiency of household-level paper recycling units in Vietnam", *Ecological Economics*, 65 n°3 (2008): 98-110.