

ESTACIONALIDAD EN EL PROCESO DE DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES: IMPACTO SOBRE LA EFICIENCIA Y LOS COSTES DE OPERACIÓN.

SALA-GARRIDO, RAMÓN

Ramon.Sala@uv.es

*Universidad de Valencia / Departamento de Matemáticas para la Economía.
Campus dels Tarongers, 46022 Valencia.*

HÉRNANDEZ-SANCHO, FRANCESC

Francesc.Hernandez@uv.es

*Universidad de Valencia / Departamento de Estructura Económica
Campus dels Tarongers, 46022 Valencia.*

MOLINOS-SENANTE, MARÍA

Maria.Molinos@uv.es

*Universidad de Valencia / Departamento de Estructura Económica
Campus dels Tarongers, 46022 Valencia.*

MOCHOLÍ-ARCE, MANUEL

Manuel.Mocholi@uv.es

*Universidad de Valencia / Departamento de Matemáticas para la Economía.
Campus dels Tarongers, 46022 Valencia.*

Recibido 13/11/2010

Revisado 15/02/2011

Aceptado 23/02/2011

RESUMEN: Muchas de las áreas turísticas se caracterizan, a menudo, por una demanda estacional de agua. La influencia de la estacionalidad en la gestión de los recursos hídricos es más intensiva en el contexto de la escasez. Es por ello que el uso de fuentes alternativas de agua en estas áreas se convierte en un aspecto clave. En este sentido, la gestión eficiente, tanto en términos técnicos como económicos favorece las posibilidades de reutilización de agua y, por tanto, aumenta el suministro de los recursos llamados no convencionales. En las zonas turísticas, la estacionalidad es un factor determinante en la eficiencia de las plantas de tratamiento de aguas residuales (EDARs), ya que estas operan a plena capacidad sólo durante la temporada de verano, mientras que el resto del año tienen problemas de infrautilización. A través de la metodología Free Disposal Hull (FDH), este trabajo analiza las diferencias de eficiencia entre las EDARs ubicadas en zonas turísticas con fuerte estacionalidad, en relación con las situadas en las zonas no turísticas. Asimismo, con el objetivo de identificar qué tecnología se encuentra más afectada por la estacionalidad, se han diferenciado las EDARs cuyo proceso es aireación prolongada de aquellas cuya tecnología es fangos activados.

Palabras claves: tratamiento aguas residuales, estacionalidad, aireación prolongada, fangos activados.

ABSTRACT: Many tourist areas are often characterized by seasonal water demand. The influence of the seasonality on the water management is more intensive in the context of water scarcity. So, the use of non-conventional water resources in these areas becomes a key aspect. In this sense, efficient performance, both in technical and cost terms favors water reuse possibilities and, therefore, increases the supply of the so called non-conventional resources. In tourist areas, seasonality is a determining factor in the efficiency of wastewater treatment plants (WWTPs) as these are operating at full capacity only during summer season while the rest of the year they have under-utilization problems. Using the Free Disposal Hull (FDH) methodology, this paper analyzes the efficiency differences between those WWTPs located in tourist areas with strong seasonality, in relation to those located in non-tourist areas. Moreover, on one hand, it has been determined the efficiency of WWTPs with extended aeration technology and, on the other hand, the efficiency of plants with activated sludge processes.

Keywords: wastewater treatment, seasonality, extended aeration, activated sludge

1. Introducción

La reutilización del agua presenta la gran ventaja de ofrecer un recurso alternativo de bajo coste que puede servir para paliar situaciones de escasez, preservar mejor los recursos naturales y contribuir a la gestión integrada del agua (Lazarova et al., 2007). Es por ello que resulta conocida la importancia creciente de la reutilización en muchos ámbitos territoriales especialmente en aquellos que están sometidos a duras condiciones de estrés hídrico.

La escasez de este recurso en las zonas costeras se agrava debido a que muchas de estas áreas se caracterizan por su alta densidad de población, y por una intensa actividad económica y turística, lo que significa fuertes demandas temporales de agua (Salgot y Tapias, 2004). Por lo tanto, el uso de recursos hídricos no convencionales se convierte en un aspecto clave.

En este sentido, la regeneración y reutilización de aguas residuales en las zonas turísticas tiene unas características específicas en comparación con otras zonas, incluidas las grandes variaciones de caudal entre estaciones, la necesidad de una gestión eficiente in situ de las aguas residuales generadas y los mayores requerimientos de depuración para reducir los riesgos potenciales para la salud al mínimo (Borboudakiet et al., 2005).

A pesar de los beneficios que comporta la reutilización de aguas residuales, cualquier análisis de su potencialidad en una determinada región, requiere un amplio conocimiento del proceso de regeneración de las aguas residuales tanto desde un punto de vista técnico como económico (Hernández y Sala, 2009).

Aunque la obtención de índices de eficiencia asociados a los procesos de tratamiento de aguas residuales no es un procedimiento muy extendido en la literatura, se ha demostrado la utilidad de este tipo de indicadores. Según Hernández y Sala, (2009), el funcionamiento eficiente, tanto en términos técnicos como económicos de las EDARs favorece las posibilidades de reutilización del agua y, por tanto, aumenta el suministro de los llamados recursos no convencionales.

Si bien es innegable la aplicabilidad de los índices de eficiencia en el ámbito de la reutilización de aguas residuales, esta metodología requiere ser adaptada al ámbito territorial específico de estudio. Así, en el caso de las áreas turísticas, la estacionalidad constituye un factor ciertamente determinante de la eficiencia de los procesos ya que supone que una EDAR esté funcionando a plena capacidad sólo durante los meses de verano y sufre problemas de infrautilización el resto del año. (Muñoz y Caus, 2005). Dicha circunstancia se ve agravada por el hecho de que el aumento de la población no suele seguir una evolución gradual, sino que, se producen incrementos súbitos en fechas determinadas. Estas oscilaciones poblacionales implican importantes variaciones tanto en el caudal de agua residual a tratar como en la carga contaminante de la misma.

Con el objetivo de contribuir a un mejor conocimiento sobre la influencia de la estacionalidad en los procesos de tratamiento y en las opciones reales de reutilización de aguas residuales, en este trabajo se plantea analizar la eficiencia de un grupo de EDARs utilizando la metodología conocida como Free Disposal Hull (FDH). Para ello, se lleva a cabo una aplicación empírica sobre dos muestras de EDARs que operan en la Región de Valencia y se estudia el comportamiento diferencial entre aquellas situadas en zonas turísticas y con fuerte estacionalidad, respecto a las que no presentan estacionalidad. Dicho análisis se aplica a dos tipos distintos de tratamiento. Por un lado, se determina la eficiencia de las plantas cuya tecnología es Aireación Prolongada (AP) y por otro la de las plantas cuyo proceso es de Fangos Activados (FA). De esta forma, tras la aplicación de la metodología FDH se obtiene información sobre cuál de las dos tecnologías se encuentra más afectada por la estacionalidad.

2. Metodología

2.1. Determinación de la estacionalidad.

El objetivo de este trabajo es evaluar la influencia de la estacionalidad sobre la eficiencia de las EDARs. Por ello, un aspecto clave es determinar qué plantas presentan estacionalidad y cuáles no.

La presencia de estacionalidad en una EDAR se puede determinar en base a 2 criterios: volumen de agua residual tratado y carga contaminante eliminada expresada como habitantes equivalentes* (*he*). Dado que los municipios a los que dan servicio las EDARs analizadas no cuentan con red de saneamiento separativa, durante los episodios de lluvia dichas EDARs reciben una gran cantidad de aguas pluviales junto con el agua residual. El agua de lluvia, a diferencia del agua residual propiamente dicha, tiene una baja carga contaminante por lo que su depuración no implica un elevado coste.

Por ello, se ha considerado que el parámetro adecuado para determinar la estacionalidad de las plantas es el *he*.

Una vez definido el criterio de estacionalidad y conocidos los datos mensuales de *he* tratados por cada una de las plantas analizadas se han identificado las EDARs que presentan estacionalidad. Para ello, se ha considerado que si la media de *he* tratados durante los meses de julio y agosto es mayor en un 15% a la media anual, entonces la planta presenta estacionalidad[†].

2.2. Eficiencia.

Desde un punto de vista económico el término eficiencia se asocia con un uso racional de los recursos disponibles, es decir, se utiliza para describir aquel proceso productivo que emplea de una manera óptima todos sus factores de producción, según la tecnología existente. Farrell (1957) se convierte en el pionero del estudio de las funciones frontera utilizadas como referentes para la obtención de las medidas de eficiencia para cada unidad productiva. Una frontera de producción eficiente define la relación entre inputs y outputs que representa la máxima cantidad de output que se puede obtener para un nivel fijado de inputs, o bien, el nivel mínimo de inputs con el que alcanzar una cuantía dada de output. Al hacerlo, refleja el estado actual de la tecnología disponible para una industria. En su acepción más fundamental, una DMU (Decision Making Unit o Unidad de Decisión) es considerada eficiente si está situada en la frontera eficiente. Por otro lado, una DMU es considerada como ineficiente si se sitúa debajo de la frontera. El análisis envolvente de datos (Data Envelopment Analysis, DEA) y de envoltura de libre disposición (Free Disposal Hull, FDH) son dos técnicas alternativas disponibles para estimar una aproximación a la frontera eficiente. Estas dos técnicas de programación matemática permiten medir la distancia relativa a que se encuentra una DMU individual de esta frontera estimada y, por lo tanto, también producen medidas (generalmente en forma de índice) de la ineficiencia relativa de la citada DMU en comparación con las restantes unidades. Introducida por Charnes, Cooper y Rhodes (1978), DEA ha sido ampliamente utilizado porque se puede aplicar en múltiples situaciones y también ha sido objeto de un buen número de extensiones teóricas que han aumentado su flexibilidad, facilidad de uso y aplicabilidad. Para una descripción de esta metodología puede consultarse, Cooper, Seiford y Tone (2007) Hernández y Sala (2008), Cooper et al. (2004) y Hernández, Sala y Soler (2009), entre otros.

Como continuación de la metodología DEA, la técnica FDH apareció en Deprins, Simar y Tulkens (1984) y desde entonces su uso se está extendiendo en distintos tipos de aplicaciones (Leleu, 2009; Simar y Zelenyuk, 2010). Un estudio comparativo de estos dos enfoques puede proporcionar mayor información sobre las complejidades de medir la eficiencia productiva (Lovell, 1993; Grosskopf, 1996 y Simar y Wilson, 2000). DEA y FDH, como dos métodos deterministas no paramétricos, no asumen ninguna forma funcional particular de la función. En su lugar, la mejor tecnología en la práctica es la frontera de un conjunto de posibilidades de producción construido como la envolvente de todas las observaciones. Ambos métodos, usan técnicas de programación matemática para “envolver” los datos tan cerca como sea posible, sujeto a determinados supuestos de producción. FDH asume una disponibilidad fuerte de inputs y outputs, es decir, cualquier nivel de output(s) sigue siendo factible si cualquiera de los inputs se incrementa. La técnica DEA agrega la condición de convexidad a los supuestos mantenidos por FDH. Las fronteras no paramétricas convexas en el contexto DEA permiten combinaciones lineales de unidades de

* Un habitante equivalente se define como la carga orgánica biodegradable con una demanda química de oxígeno (DBO₅), de 60 gramos de oxígeno por día.

† Debido a la inexistencia de referencias en la literatura, se seleccionaron varios porcentajes (10%, 15% y 25%) constatándose que los resultados no cambian significativamente. En consecuencia, se ha tomado el criterio del 15% con el objetivo de que el número de plantas con y sin estacionalidad fuese lo más homogéneo posible.

producción observadas. De acuerdo con esta definición y, según la figura 1 todas las combinaciones lineales de observaciones A y C se encuentran en la frontera de producción eficiente:

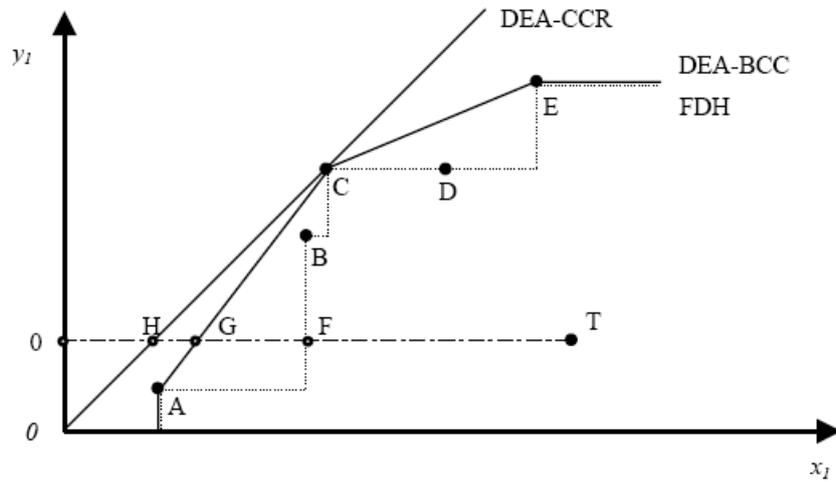


Figura 1: Metodologías para determinar la eficiencia productiva.

Pero en cambio, según la metodología FDH, la unidad B es eficiente mientras que bajo la metodología DEA esta unidad no es eficiente. La figura 1 ilustra los modelos DEA más ampliamente utilizados: el DEA-CCR -con rendimientos constantes a escala- y el DEA-BCC -que supone rendimientos variables a escala. Estos modelos junto con FDH definen diferentes conjuntos de producción y resultados de eficiencia. Por ejemplo, la unidad T, según DEA-CCR su eficiencia viene dada por el cociente entre: $0H/0T$, en DEA-BCC su score o índice de eficiencia es: $0G/0T$ mientras que en FDH es $0F/0T$.

La motivación básica para utilizar la metodología FDH frente a DEA es garantizar que se efectúen las medidas de la eficiencia sobre actuaciones observadas realmente y no sobre las proyecciones que representan unidades hipotéticas.

Dadas $k = 1, 2, \dots, K$ unidades de producción o DMU's, cada una de las cuales usa un vector de inputs $x^k = (x_1^k, x_2^k, \dots, x_N^k)(N \times 1)$ para generar un vector de outputs $y^k = (y_1^k, y_2^k, \dots, y_M^k)(M \times 1)$. La medida de eficiencia se obtiene al resolver para cada una de las unidades k' el siguiente problema de programación lineal entera:

$$\begin{aligned}
 E_I(y^k, x^k) &= \text{Min } \theta \\
 \text{s.a.} \\
 \sum_{k=1}^K \lambda_k y_{km} &\geq y_{k'm} \quad m = 1, \dots, M \\
 \sum_{k=1}^K \lambda_k x_{kn} &\leq \theta x_{k'n} \quad n = 1, \dots, N \\
 \sum_{k=1}^K \lambda_k &= 1, \quad k = 1, \dots, K \\
 \lambda_k &\in \{0, 1\}, \quad k = 1, \dots, K
 \end{aligned} \tag{1}$$

donde λ es un vector de variables de intensidad ($K \times 1$) y θ es el score de eficiencia.

Se trata de un problema de programación entera porque las variables λ son variables binarias, es decir, solamente pueden tomar valores 0 o 1, a diferencia de los modelos DEA que solamente exigen la

linealidad. Es decir, si al modelo (1) se le elimina la condición: $\lambda \in \{0,1\}$, se tiene un modelo DEA-BCC, y si se elimina además la condición de convexidad:

$$\sum_{k=1}^K \lambda_k = 1, \quad k=1, \dots, K \text{ se tiene un modelo DEA-CCR.}$$

En cualquier caso conviene advertir que el conjunto de posibilidades de producción es diferente en cada caso, así:

$$\begin{aligned} P_{CCR} &= \{(x, y) \in R^{n+m} / \lambda X \leq \theta x, \lambda Y \geq y, \lambda \geq 0\} \\ P_{BCC} &= \{(x, y) \in R^{n+m} / \lambda X \leq \theta x, \lambda Y \geq y, \lambda \geq 0, \sum \lambda = 1\} \\ P_{FDH} &= \{(x, y) \in R^{n+m} / \lambda X \leq \theta x, \lambda Y \geq y, \lambda \geq 0, \sum \lambda = 1, \lambda \in \{0,1\}\} \end{aligned}$$

La medida de eficiencia $E_I(y^k, x^k) = \theta$, esta acotada entre 0 y 1. Concretamente, se considera que una planta es eficiente si $\theta=1$, mientras que es ineficiente si $0 \leq \theta < 1$. La diferencia entre el índice θ y el valor 1, puede ser considerada como el potencial de reducción en inputs para obtener el mismo output.

Una vez se han obtenido los índices de eficiencia, nuestro objetivo es determinar la posible relación entre esta medición de eficiencia en inputs y la estacionalidad. Teniendo en cuenta que los scores obtenidos no tienen una distribución normal, para realizar este análisis de segunda etapa, utilizamos el Test de Mann-Whitney (el equivalente no paramétrico del análisis de varianza de un factor). Este análisis implica determinar si entre los dos grupos de plantas en los que ha sido dividida la muestra, existen o no diferencias significativas en los scores de eficiencia medios obtenidos previamente.

Finalmente nos planteamos cuantificar en qué medida las plantas estacionales podrían reducir sus costes de operación, si operasen con la misma eficiencia que el grupo de EDARs no estacionales. Para ello, siguiendo la propuesta metodológica desarrollada por Hernández y Sala (2009), se utiliza la siguiente expresión:

$$RCI = (E_I^{ne} - E_I^e) C_{med}^e \quad (2)$$

donde,

RCI : Reducción del coste de inputs,

E_I^{ne} : representa el valor medio de eficiencia en inputs para las plantas no estacionales,

E_I^e : simboliza el mismo indicador, pero para las plantas estacionales y

C_{med}^e : representa el coste medio de los inputs para las plantas estacionales.

Mediante la aplicación de esta metodología se pretende obtener un mayor conocimiento, e incluso, cuantificar la influencia de la estacionalidad en la eficiencia de las EDARs y, consecuentemente, en las opciones de reutilización. La aplicación empírica que se presenta está basada en una muestra de plantas que aplican dos tipos de tecnología, Aireación Prolongada (AP) y Fangos Activados (FA). Para cada tipo de tratamiento se han dividido las plantas en dos grupos según la influencia de la estacionalidad. La descripción detallada de la muestra utilizada se ofrece en el apartado siguiente.

3. Datos de la muestra

Los datos utilizados en esta aplicación empírica corresponden a 76 EDARs localizadas en la Región de Valencia. Tal y como se observa en la Tabla 1, la muestra total de plantas, se ha dividido en dos grupos en función de la tecnología utilizada (aireación prolongada -AP- y fangos activados -FA-). La capacidad de tratamiento de las plantas para la tecnología de AP está comprendida entre 10.000 y 75.000 *he*, mientras que para FA es de 30.000 a 150.000 *he*. Se ha tratado de encontrar una cierta homogeneidad en la capacidad de las plantas con el fin de evitar los efectos de esta variable sobre los niveles de

eficiencia. El proceso de FA es aplicado por 32 plantas de las cuales 14 presentan estacionalidad, mientras que 44 realizan el proceso de depuración usando la tecnología de AP siendo 20 las plantas que presentan estacionalidad.

El agua residual a tratar por las instalaciones analizadas tiene un origen esencialmente doméstico y son raros los vertidos incontrolados de residuos de procesos industriales, tóxicos para el proceso biológico y que consecuentemente puedan afectar a la eficiencia de las plantas. Es por ello que para ambas tecnologías, se ha considerado que como consecuencia de la depuración se generan 4 outputs: sólidos en suspensión (SS) (y_1); materia orgánica medida como demanda química de oxígeno (DQO) (y_2); nitrógeno (N) (y_3) y fósforo (P) (y_4). Los inputs necesarios para llevar a cabo el proceso son: coste de la energía (x_1); coste de personal (x_2); reactivos (x_3); coste de mantenimiento (x_4); coste de gestión de residuos (x_5) y otros costes (x_6). El valor medio de estas variables está descrito en la Tabla 1 (entre paréntesis se indica el valor de la desviación estándar de cada variable considerada). La información estadística, referida al año 2008, ha sido suministrada por la Administración Autonómica competente en materia de saneamiento y depuración de aguas residuales (Entitat de Sanejament d'Aigües-EP SAR).

Tabla 1: Descripción de la muestra.

			TRATAMIENTO FA		TRATAMIENTO AP	
			Sin estacionalidad	Con estacionalidad	Sin estacionalidad	Con estacionalidad
NÚMERO DE EDARs			18	14	24	20
HE			58.639	45.789	21.364	17.603
VARIABLES						
OUTPUTS (Kg/año)	SS	y_1	1.150.957 (256.325)	940.527 (125.365)	206.662 (32.265)	314.302 (41.254)
	DQO	y_2	3.945.548 (502.254)	1.769.063 (325.211)	330.994 (45.325)	641.874 (85.250)
	N	y_3	134.716 (15.232)	81.328 (11.052)	13.526 (1.254)	28.218 (1.697)
	P	y_4	34.696 (2.362)	16.998 (1.852)	2.057 (245)	6.045 (8.321)
INPUTS (€/año)	Energía	x_1	245.826 (35.300)	272.995 (28.206)	130.688 (12.365)	112.193 (13.266)
	Personal	x_2	368.049 (41.362)	488.910 (56.362)	185.027 (25.528)	164.437 (21.365)
	Reactivos	x_3	79.762 (7.365)	60.206 (5.550)	35.247 (2.396)	31.304 (3.962)
	Mantenimiento	x_4	94.256 (10.694)	136.218 (18.365)	38.279 (2.365)	38.315 (3.365)
	Residuos	x_5	207.898 (21.369)	99.299 (11.354)	50.240 (1.366)	50.936 (5.369)
	Otros	x_6	45.522 (2.243)	72.099 (6.325)	32.687 (2.325)	26.422 (1.365)

En el gráfico 1 se representa el grupo de plantas afectadas por la estacionalidad correspondientes a los dos tratamientos considerados. Se observa el comportamiento diferencial en cuanto a los *he* tratados durante los meses de julio y agosto debido a la influencia de la actividad turística. Por otro lado y, según se muestra en el gráfico 2 el conjunto de plantas no afectadas por la estacionalidad presentan un comportamiento muy homogéneo en cuanto a los *he* tratados a nivel mensual.

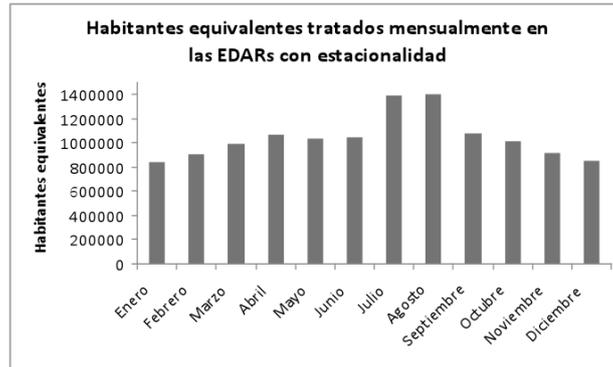


Gráfico 1: Habitantes equivalentes tratados mensualmente en las EDARs con estacionalidad.

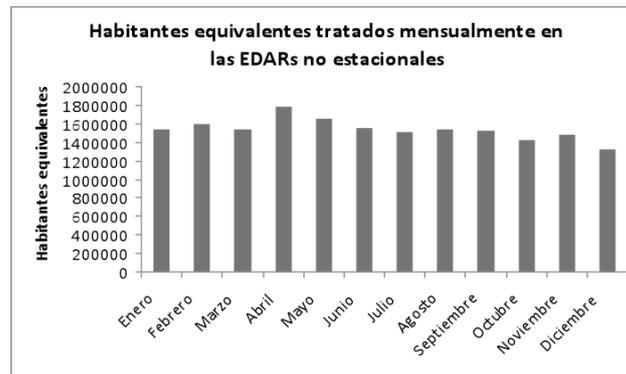


Gráfico 2: Habitantes equivalentes tratados mensualmente en las EDARs sin estacionalidad.

4. Resultados

Siguiendo la metodología anteriormente planteada se han obtenido índices de eficiencia para cada una de las plantas de la muestra según el tipo de tratamiento utilizado. Los cálculos han sido realizados mediante el software GAMS-CPLEX. A continuación se presentan los resultados alcanzados para el total de las plantas que forman la muestra, así como para el grupo de plantas estacionales y no estacionales para ambas tecnologías estudiadas.

4.1. Aireación Prolongada (AP).

Para determinar si la estacionalidad influye en la eficiencia de las EDARs que operan bajo tecnología de AP, se ha resuelto el modelo matemático (1) para una muestra de $k = 1, 2, \dots, 44$ plantas asumiendo que cada una de ellas utiliza un vector de inputs $x^k = (x_1^k, x_2^k, x_3^k, x_4^k, x_5^k, x_6^k)$ para obtener un vector de outputs $y^k = (y_1^k, y_2^k, y_3^k, y_4^k)$. Los resultados aparecen en la Tabla 2. Se observa que el conjunto de plantas que operan bajo esta tecnología presentan un comportamiento ciertamente eficiente. Si diferenciamos la muestra en función de la estacionalidad, son las plantas no afectadas por este factor las que actúan con una mayor eficiencia. De hecho, el 75% de las EDARs no estacionales funciona con un nivel máximo de eficiencia, es decir, 3 de cada 4 instalaciones están situadas sobre la frontera de producción eficiente. Mientras que para las plantas con estacionalidad el porcentaje de eficientes es del 55%. El resultado obtenido en el test de Mann-Whitney confirma que las diferencias entre ambos grupos a nivel de eficiencia son significativas.

Con el fin de explicar con mayor detalle este comportamiento diferencial entre los dos grupos de plantas, se han elaborado ratios de coste de operación y mantenimiento por *he* tratado, siempre en valores medios. Según se observa en la Tabla 3, las plantas afectadas por la estacionalidad presentan un mayor coste por *he* tratado. Así mismo, de manera global, los costes de operación y mantenimiento en estas plantas son un 9% superiores. Todas las partidas de costes son mayores (con la excepción del apartado

Varios) siendo los más elevados los términos relativos a los costes de mantenimiento y gestión de residuos.

Tabla 2: Eficiencia de las EDARs con tecnología de aireación prolongada.

TECNOLOGÍA AIREACIÓN PROLONGADA (44 PLANTAS)		
	PLANTAS CON ESTACIONALIDAD	PLANTAS SIN ESTACIONALIDAD
NÚMERO TOTAL	20	24
UNIDADES EFICIENTES	11	18
% UNIDADES EFICIENTES	55,0 %	75,0 %
ÍNDICE EFICIENCIA (MEDIA)	0,868	0,922
TEST DE MANN-WHITNEY	0,049	

Tabla 3: Ratios de coste de operación por *he* para EDARs con aireación prolongada.

	<i>he</i>	Energía (€/he)	Personal (€/he)	Reactivos (€/he)	Manten (€/he)	Residuos (€/he)	Varios (€/he)	Total (€/he)
AP- No estacional	21.364	6,117	8,661	1,650	1,792	2,352	1,530	22,101
AP- estacional	17.604	6,373	9,341	1,778	2,177	2,893	1,501	24,063
%	0,82	1,04	1,08	1,08	1,21	1,23	0,98	1,09

Una vez constatado el distinto comportamiento en términos de eficiencia entre las plantas afectadas por la estacionalidad y las no estacionales, nos planteamos, según la metodología descrita, calcular el coste relativo que supone la estacionalidad para las plantas situadas en zonas turísticas. Teniendo en cuenta que el nivel medio de eficiencia de las plantas no estacionales es de 0,922 y el de las estacionales es de 0,868 y sabiendo que el coste medio por planta para este último grupo es de 433.501 €/año, se obtiene que si estas plantas actuaran con el mismo nivel de eficiencia que las no estacionales podrían ahorrarse un 5,41% de sus costes en media. Esta cifra representa el impacto económico derivado de la estacionalidad.

4.2. Fangos Activos.

Al igual que para la tecnología de AP, para obtener los valores de eficiencia de las EDARs, se ha resuelto el modelo matemático (1) para una muestra de $K = 1, 2, \dots, 32$ plantas cada una de las cuales utiliza un vector de inputs $x^k = (x_1^k, x_2^k, x_3^k, x_4^k, x_5^k, x_6^k)$ para obtener un vector de outputs $y^k = (y_1^k, y_2^k, y_3^k, y_4^k)$. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.

Se observa que dentro del conjunto de plantas que presentan dicha tecnología existe una notable diferencia en términos de eficiencia entre las plantas afectadas por la estacionalidad y las no estacionales. De hecho, las primeras cuentan con un índice medio del 0,761 frente a un 0,894 de las segundas. Además, en el primer grupo solamente un 28,6% de las plantas son eficientes mientras que en las no estacionales este porcentaje se sitúa en un 72,2%. Es importante constatar que el test de Mann-Whitney confirma que son significativas las diferencias entre ambos grupos en términos de eficiencia.

Tabla 4: Eficiencia de las EDARs con tecnología de fangos activados.

TECNOLOGIA FANGOS ACTIVADOS (32 PLANTAS)		
	PLANTAS CON ESTACIONALIDAD	PLANTAS SIN ESTACIONALIDAD
NÚMERO TOTAL	14	18
UNIDADES EFICIENTES	4	13
% UNIDADES EFICIENTES	28,6 %	72,2 %
ÍNDICE EFICIENCIA (MEDIA)	0,761	0,894
TEST DE MANN-WHITNEY	0,011	

De cara a explicar de manera más exhaustiva el comportamiento diferencial observado entre los dos grupos de plantas se han construido los correspondientes ratios de coste por *he*. Según se constata en la tabla 5 las plantas bajo la influencia de la estacionalidad presentan un mayor ratio de coste por *he* tratado. En términos globales este grupo de plantas cuenta con un ratio superior en un 39% al de las plantas no estacionales, siempre en media. Las partidas en las que aparecen las diferencias más relevantes son los costes de mantenimiento, personal, energía, además del apartado “varios”.

Tabla 5: Ratios de coste de operación por *he* para EDARs con fangos activados.

	<i>he</i>	Energía (€/he)	Personal (€/he)	Reactivos (€/he)	Manten (€/he)	Residuos (€/he)	Varios (€/he)	Total (€/he)
FA- No estacional	58.639	4,192	6,277	1,360	1,607	3,545	0,776	17,758
FA- estacional	45.789	5,962	10,678	1,315	2,975	2,169	1,575	24,673
%	0,78	1,42	1,70	0,97	1,85	0,61	2,03	1,39

Al igual que ocurría en el anterior tipo de tratamiento analizado, una vez confirmado el distinto comportamiento eficiente entre las plantas afectadas por la estacionalidad y las no estacionales nos proponemos, según la metodología ya especificada con anterioridad, calcular el coste que representa el efecto estacional para las plantas situadas en zonas turísticas, siempre en términos relativos. Conociendo que el nivel medio de eficiencia de las plantas no estacionales es de 0,894 y el de las estacionales es de 0,761, y que el coste medio por planta para este último grupo es de 810.210 €/año se obtiene que si estas plantas se comportasen con la misma eficiencia que las no estacionales podrían ahorrarse un 13,27% de sus costes, siempre en valores medios. Este resultado simbolizaría el efecto económico que tiene la estacionalidad sobre estas plantas.

Una vez constatada la relevancia del factor estacional en el comportamiento eficiente de las plantas y su repercusión directa en el incremento de los costes de operación se exige la búsqueda de posibles soluciones viables al menos en el contexto de los tratamientos más habituales. En este sentido, es importante destacar que las dos tecnologías analizadas pertenecen a los denominados tratamientos biológicos y por lo tanto se caracterizan por su alta inercia o baja velocidad de respuesta, es decir, tienen una baja flexibilidad de adaptación a condiciones de sobrecarga bruscas o transitorias. Este hecho es de gran importancia a la hora de determinar las soluciones que se pueden aportar en las EDARs con estacionalidad.

Así, es fundamental la fase de diseño de la instalación, siendo necesario realizar numerosos estudios técnicos previos para seleccionar la tecnología más adecuada teniendo en cuenta las oscilaciones existentes tanto en términos de caudal como de carga contaminante a lo largo del año. Si bien es necesario estudiar cada EDAR de forma individual para determinar la solución más apropiada en cada caso, una característica común a todas ellas sería la modularidad. En las situaciones en las que la planta cuenta con varias líneas de tratamiento en paralelo puede explotarse de forma más eficiente ya que los equipos de operación de la planta (bombas, soplantes, turbinas, etc.) están adaptados al caudal real que se está tratando y consecuentemente no hay un innecesario consumo de energía. Además, de esta forma, también se garantiza que la calidad del efluente sea en todo momento la adecuada, evitando situaciones en las que por sobrecarga de la planta disminuye el rendimiento de eliminación de contaminantes.

En el caso de plantas que ya se encuentran en operación, si las variaciones de caudal no son muy importantes en cuanto al volumen o a la duración de las mismas, una solución fácil de implementar es la construcción de tanques de homogeneización ya que este elemento permite regular el caudal de entrada a los distintos elementos que integran la EDAR.

Una solución parcial en situaciones de estacionalidad puntual son los tratamientos físico-químicos ya que este tipo de tratamiento presenta una velocidad de respuesta inmediata a los cambios en el agua a tratar, tanto en lo que se refiere a caudales como al grado de contaminación. Sin embargo, este tipo de proceso presenta unos costes más elevados que los tratamientos biológicos asociados al consumo de reactivos químicos. No obstante, podría optarse por un esquema de tratamiento basado en un sistema

biológico convencional para la población permanente y un físico-químico complementario para las puntas estacionales. A su vez, la utilización de un tratamiento físico-químico previo al biológico sobrecargado puede permitir reducir la carga contaminante afluente a la planta de manera que el sistema biológico pudiese actuar en condiciones adecuadas.

5. Conclusiones

La presencia de estacionalidad implica que durante gran parte del año las poblaciones a las que prestan servicio las EDARs permanecen casi vacías, mientras que en épocas vacacionales se da una alta ocupación. Esta situación provoca ineficiencias en el proceso de tratamiento de las aguas residuales ya que únicamente se encuentran operando a plena capacidad durante una parte del año, lo cual implica mayores costes de operación y posibles problemas de calidad en el efluente.

Utilizando la variable habitantes equivalentes tratados como criterio para determinar la estacionalidad de las plantas y a través de la aplicación de la metodología FDH en una muestra de 76 EDARs se constata que las plantas afectadas por la estacionalidad son menos eficientes en términos de costes que aquellas plantas que no presentan un comportamiento estacional.

El análisis de eficiencia se ha realizado sobre dos tipos de tratamiento diferente. Por una parte se ha estudiado la eficiencia de las EDARs con tecnología de aireación prolongada y, por otro lado, la de las plantas cuyo proceso es fangos activados. Si bien los resultados muestran que para ambas tecnologías, las plantas no estacionales son más eficientes que las estacionales, lo cierto es que este factor afecta en mayor medida a las que presentan tecnología de fangos activos.

En este sentido, el análisis de eficiencia y de los costes de operación de las plantas muestra que en el caso de la aireación prolongada, en términos medios, los costes de operación de las plantas estacionales son un 9% mayor que los de las plantas no estacionales, mientras que para la tecnología de fangos activados esta cifra se eleva hasta el 39%. Así mismo, se ha cuantificado que si las EDARs con estacionalidad tuviesen la misma eficiencia que las no estacionales podrían ahorrarse, en términos medios, un 5,41% de sus costes en el caso de aireación prolongada y un 13,27% para el proceso de fangos activados.

En definitiva, la aplicación de la metodología FDH a la muestra de EDARs objeto de estudio demuestra que la estacionalidad es un factor ciertamente determinante en la eficiencia de costes de las EDARs.

Agradecimientos

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

Referencias bibliográficas

1. Lazarova, V., Stumy, V., Catimal, R., Sao, Y.C. y Sang, G.T. The role of water reuse for the sustainable development of tourist areas. *Eau, l'Industrie, les Nuisance*. 2007; 307: 59-71.
2. Salgot, M. y Tapias, J.C. Non-conventional water resources in coastal areas: A review of the use of reclaimed water. *Geological Acta*. 2004; 2 (2): 121-133.
3. Borboudaki, K.E., Paranychianakis, N.V. y Tsagarakis, K.P. Integrated Wastewater Management Reporting at Tourist Areas for Recycling Purposes, Including the Case Study of Hersonissos, Greece. *Environmental Management*. 2005; 36 (4): 610 – 623.
4. Hernández, F. y Sala, R. Technical efficiency and cost analysis in wastewater treatment processes: A DEA approach. *Desalination*. 2009; 249 (1): 230-234.
5. Muñoz, J. y Caus, J.M. Maximización del beneficio ambiental en la explotación de una EDAR de una zona turística costera. In Spanish. *Technical Workshop: The integration of reclaimed water in water resource management*. Lloret de Mar, Octubre, 2005.

6. Farrell, M.J. The Measurement of Productive Efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society A*. 1957: 120: 253 – 281.
7. Charnes, A., Cooper, W.W. y Rhodes, E. Measuring the Inefficiency of Decision Making Units. *European Journal of Operational Research*. 1978: 2 (6): 429 – 444.
8. Cooper, W.W., Seiford, L.M. y Tone, K. *Data Envelopment Analysis*, Springer, New York, 2007.
9. Hernández, F. y Sala, R. Medida de la eficiencia ambiental en la industria de la cerámica española. *Rect@*. 2008: Vol. 9: 87-100.
10. Cooper, W., Seiford, L. y Zhu, J. *Handbook on Data Envelopment Analysis*. Kluwer Academic Publisher, Boston. 2004.
11. Hernández, F. y Sala, R. y Soler, V. Eficiencia productiva y externalidades territoriales en la PYME industrial: Análisis dinámico del efecto distrito. *Rect@*. 2009: 10: 97-221.
12. Deprins, D., Simar, L. y Tulkens, H. Measuring Labor Inefficiency in Post Offices. In M. Marchand, P. Pestieau and H. Tulkens (eds.) *The Performance of Public Enterprises: Concepts and Measurements*. American: Noth – Holland. 1984: 243-267.
13. Leleu, H. Mixing DEA and FDH models together. *Journal of Operational Research Society*. 2009: 60 (12): 161 – 176.
14. Simar, L. y Zelenyuk, V. Stochastic FDH/DEA estimators for frontier analysis. *Journal of Productivity Analysis*. 2010: In press.
15. Lovell, C.A.K. Production frontiers and productive efficiency, in H.O. Fried, C.A.K. Lovell and S.S. Schmidt (eds). *The Measurement of Productive Efficiency: Technique and Applications*. Oxford University Press. New York. 1993.
16. Grosskopf, S. Statistical Inference and Nonparametric Efficiency. A Selective Survey. *Journal of Productivity Analysis*. 1996: 7: 161 – 176.
17. Simar, L. y Wilson, P.W. Statistical inference in nonparametric frontier models: The estate of the art. *Journal of Productivity Analysis*. 2000: 13: 49 – 78.