



Parametrización del consumo energético en las depuradoras de aguas residuales urbanas de la Comunidad Valenciana

Arturo Albadalejo Ruiz doctor del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Alicante

Juan Luis Martínez Muro Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales de la Comunidad Valenciana (Epsar)

José María Santos Asensi Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales de la Comunidad Valenciana (Epsar)

De todos los costes asociados con la operación y el mantenimiento de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), los relacionados con el consumo de energía tienden a ser los más significativos. El objetivo actual del estudio es determinar la relación óptima de consumo de energía para una EDAR. Para ello, fueron analizadas estadísticamente 453 EDAR de la Comunidad Valenciana (España) actualmente en servicio, cuantificando su impacto energético en términos de kWh por m³ de agua tratada. Los resultados obtenidos muestran un promedio de 0,42 kWh/m³, según una proporción de $\text{kWh/m}^3 = 0,2218 \times (\text{Log}(\text{Log}(he)))^{-0,1668}$, lo que demuestra que el ratio de consumo de energía aumenta cuando el tamaño de las EDAR disminuye en términos de habitantes equivalentes (he) servida.

Palabras clave

Estación depuradora de aguas residuales (EDAR) urbanas, gestión de EDAR, costes de la energía, eficiencia energética, consumo de energía.

Parameterization of energy consumption in wastewater treatment plants: case Valencia (Spain)

Of all the associated costs with the operation and maintenance of wastewater treatment plants (WWTP), those associated with energy consumption tend to be the most significant. The present study's objective is to determine the optimum ratio of energy consumption for a WWTP. To this end, 453 WWTPs of the Comunidad Valenciana (Spain), currently in service, were statistically analysed and their energetic impact quantified in terms of kWh per m³ of water treated. The results obtained show an average of 0,42 kWh/m³ according a ratio of $\text{kWh/m}^3 = 0,2218 \times (\text{Log}(\text{Log}(ei)))^{-0,1668}$, demonstrating that significantly increases power consumption when the size of the WWTP decreases in terms of equivalent inhabitants (ei) served.

Keywords

Urban wastewater treatment plant (WWTP), operation of WWTP, energy costs, energy efficiency, energy consumption.

1. Introducción

El consumo de energía en una EDAR varía de acuerdo con el tamaño de la misma, la carga contaminante de influente, el tipo de tratamiento y la tecnología utilizada, por lo que el coste de la energía variará de una a otra planta de tratamiento de aguas residuales.

La energía que se consume en una EDAR es principalmente de origen eléctrico, excepto en las grandes instalaciones con sistemas de cogeneración, y se utiliza fundamentalmente para: bombas, soplantes y aireadores, calefacción del digestor, deshidratación de lodos mediante centrifugación o filtros banda, desinfección ultravioleta y sistemas de desodorización.

Dentro de los costes de operación y mantenimiento de las EDAR, el coste de la energía es el mayor de todos, pues supone en la actualidad más del 56% de los costes totales de operación y mantenimiento (Albada-lejo y Trapote, 2013).

El objetivo de este estudio es determinar la relación entre el consumo de energía en una EDAR urbana y los parámetros principales de su operación, según la variación del tamaño de las depuradoras, definiendo:

- Las correlaciones prácticas entre dichos parámetros y el consumo energético real de las EDAR.
- Los ratios medios ponderados de consumo energético respecto a los parámetros principales de operación.

- Las fórmulas empíricas que pronostiquen el consumo energético de las EDAR (de la Comunidad Valenciana) en función de dichos parámetros según el tamaño de la depuradora, acotando el ámbito en el que se puedan aplicar y el grado de fiabilidad de las fórmulas.

Con tal fin, se analizan 453 EDAR de la Comunidad Valenciana actualmente en servicio, y se cuantifica su consumo de energía en relación a los parámetros más característicos de la operación y gestión. Posteriormente, se analizan las correlaciones entre dicho parámetros y se segmenta la muestra según el tamaño de las EDAR, para obtener los valores medios ponderados de la relación del consumo de energía respecto a dichas variables, y para definir las fórmulas empíricas que pronostiquen el consumo energético de las EDAR según dichas variables en función del tamaño de la EDAR, acotando el grado de fiabilidad de las fórmulas.

2. Metodología

Se han considerado los datos de los años 2010 y 2011 de las EDAR de la Comunidad Valenciana, facilitados por la Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales de la Comunidad Valenciana, Epsar), aunque se ha tenido que eliminar de la investigación alguna EDAR por inconsistencias en los nuevos datos, por lo que se han estudiado 453 EDAR, en su mayoría del tipo aireación prolongada con procesos de

eliminación de nutrientes (principalmente nitrógeno) y con tratamientos terciarios de regeneración (**Figura 1**). En conjunto, estas plantas han depurado unos 489,87 hm³ anuales de media, que corresponden a 6.041.525 habitantes equivalentes (he).

A los efectos de homogeneizar la muestra, se han excluido aquellas EDAR de las que no se disponía de datos fiables o de todos los datos de DBO₅ de entrada o de salida. Se han realizado investigaciones comparativas estadísticas tomando como variable principal los m³ tratados o los he, para decidir cuál de las dos es más representativa para la investigación. Posteriormente, se ha segmentado la muestra de EDAR de forma que los tamaños muestrales sean representativos de la población, añadiendo las 8 EDAR de mayor tamaño como 3 segmentos, para poder afinar los resultados de las correlaciones a obtener.

A continuación se ha intentado encontrar los coeficientes de correlación entre todas las variables seleccionadas, para determinar en cuales centrar la investigación, y cuáles son las más significativas. Con las variables independientes seleccionadas, y tomando como variable dependiente el consumo de energía, se estiman por ajustes estadísticos las fórmulas matemáticas que relacionen por pares cada una de las variables independientes con las dependientes, con el mayor coeficiente de correlación posible.

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de aireación prolongada con eliminación de nitrógeno (nitrificación-desnitrificación) y eliminación de fósforo y terciario (elaboración propia de los autores).





2.1. Análisis de correlaciones entre todos los parámetros

Para centrar los objetivos de la parametrización, se ha realizado un análisis de todos los coeficientes de correlación entre cada una de las variables con cada una de las otras. Dicho análisis se ha efectuado mediante la herramienta 'Análisis de datos/Coefficientes de correlación' del *software* Microsoft Excel.

Evidentemente, para la investigación solo interesa la columna de correlación del consumo de energía kWh y, como ya se ha mencionado, se quitan los datos de DQO por ser redundante y los de valor negativo por no tener sentido, quedando resumido según la **Tabla 1**.

De estas correlaciones se pueden extraer ciertas conclusiones:

- La mayor correlación del consumo energético de las EDAR es respecto al número de he servidos.

- La siguiente mayor correlación del consumo energético de las EDAR es respecto a la cantidad de materia orgánica total depurada medida en t de suma de DBO₅ depurada, t de SS depurada, t de N_{tot} depurado y t de P_{tot} depurado.

- Las correlaciones del consumo energético de las EDAR más interesantes de estudiar separadamente son respecto a la cantidad de materia orgánica depurada medida en t de DBO₅ depuradas y las medidas en t de SS depuradas.

- La correlación individual del consumo energético respecto al N_{tot} (nitrógeno total) y el P_{tot} (fósforo total) depurado y medido en toneladas no es suficientemente significativa para realizar la investigación.

- Las correlaciones son entre parejas de parámetros de forma lineal, lo cual lleva a considerar, a partir de ahora, en la investigación las siguientes variables de estudio: kW/

Parámetro	kWh
m ³	0,9385
He	0,9747
ΔDBO ₅ (t)	0,9741
ΔSS (t)	0,9551
ΔN _{tot} (t)	0,8800
ΔP _{tot} (t)	0,8592
Δ Depur. (t)	0,9701

m³, MWh/t DBO₅, MWh/t SS, MWh/t N_{tot}, MWh/t P_{tot}, MWh/t Depur.

2.2. Segmentación de las EDAR por tamaño

Debido a la gran cantidad de datos, y a las dispersiones de algunos valores en algunas de ellas por consideraciones particulares (el consumo energético considera muchos bombeos intermedios, EDAR que se ubican cerca de ríos con mucho caudal y poca contaminación...), es conveniente segmentar la muestra mediante histogramas que agrupen la población estadística en grupos similares.

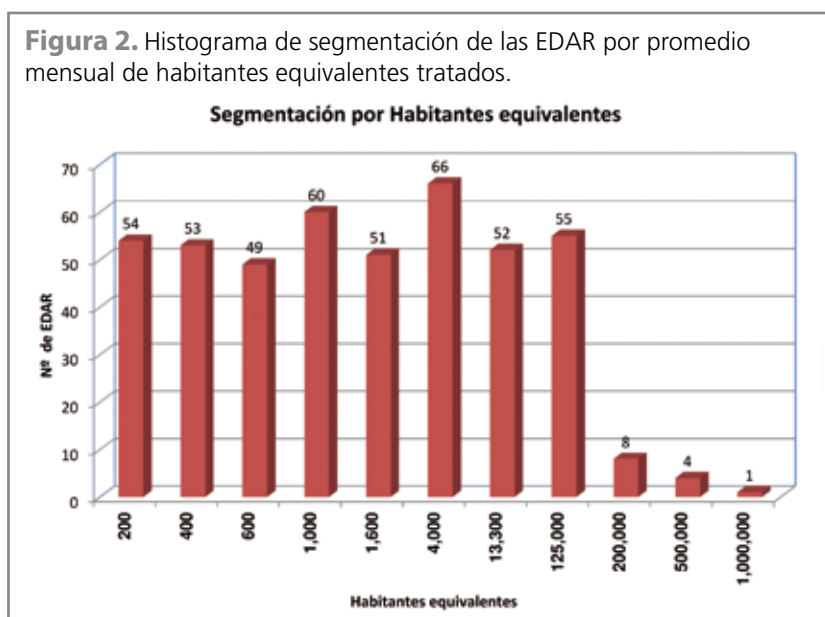
La segmentación física y biológicamente más lógica de hacer es por tamaño de EDAR, por lo que inicialmente se realiza la investigación con los 2 tipos de agrupación de tamaños más habituales en las EDAR:

- Por m³ tratados anualmente (en este caso, promedio mensual de más de 12 meses).

- Por he, considerando que esta segmentación es la que también se ha realizado en el informe del IDAE (IDAE, 2010).

No obstante, considerando que el coeficiente de correlación del consumo de energía es menor respecto al caudal tratado que respecto a los he servidos, y que según Albadalejo (2013) se demostró que era mejor la segunda opción de segmentación, en este caso solo se estudia la segmentación de las EDAR por he servidos.

Para la segmentación por tamaño de EDAR según el número promedio mensual de he tratados, se ha intentado que los tamaños de los grupos segmentados sean lo más parecidos posibles, aunque al final se han añadido 3 segmentos, ya que las 13



EDAR de mayor tamaño tratan ellas solas 3.313.000 he, más de 56,6% del promedio de los he tratados (6.041.525 he de promedio mensual). Hay que tener en cuenta que las 216 EDAR de los 5 primeros segmentos (hasta 1.000 he mensuales de promedio) solo tratan un 1,53% de los habitantes totales servidos.

En la **Figura 2** se puede observar cómo queda el histograma de la segmentación propuesta, con 11 segmentos, entre los que hay 9 segmentos con grupos de entre 49 y 66 EDAR, menos en los tres segmentos adicionales para las EDAR de mayor tamaño que tienen muy pocas EDAR cada segmento.

3. Planteamiento de datos

El planteamiento de trabajo con los datos se realiza según las segmentaciones propuestas anteriormente, con resúmenes de los datos para cada EDAR, ordenados por la variable de segmentación de menor a mayor, y calculando los promedios de cada

una de las EDAR. Esta operación se realiza gracias a la función de 'tabla dinámica' de Microsoft Excel.

El siguiente paso para la elaboración de los datos es calcular los promedios de cada segmento seleccionado para las variables dependiente de consumo energético seleccionado, que son las siguientes:

- Promedio de kWh/m³.
- Promedio de consumo de energía por DBO₅ tratada en MWh/t.
- Promedio de consumo de energía por SS tratado en MWh/t.
- Promedio de consumo de energía por N_{tot} en MWh/t.
- Promedio de consumo de energía por P_{tot} en MWh/t.
- Promedio de consumo de energía por total de t depurada en MWh/t.

Para los 11 segmentos seleccionados para tamaño de EDAR por número de habitantes equivalentes medios tratados mensualmente, en

la **Tabla 2** se muestrean los resultados de los promedios para cada segmento de las variables dependientes antes mencionadas, respecto a la variable independiente de m³ tratados.

4. Análisis de resultados

Seguidamente se realizó el análisis de los resultados, calculando la correlación del consumo energético con los parámetros fundamentales mencionados. Se calcularon las fórmulas de correlación para la segmentación realizada, con los ratios de consumo energético siguientes:

- Promedio de kWh/m³ tratado.
- Promedio de MWh/t DBO₅.
- Promedio de MWh/t SS.
- Promedio de MWh/t materias depuradas.

Para mejorar sucesivamente el ajuste, se decidió representar cada ratio del consumo de energía respecto al logaritmo del logaritmo del número de he, ya que se detectó que

Tabla 2. Segmentación de EDAR por promedio mensual de habitantes equivalentes.

Nº EDAR	he	Log (Log (promedio he))	Promedio he	Promedio kWh/m ³	Promedio MWh/t DBO ₅	Promedio MWh/t SS	Promedio DQO MWh/t	Promedio N _{tot} MWh/t	Promedio P _{tot} MWh/t	Promedio ΔDepur MWh/t
54	200	0,31	109	1,94	10,42	12,34	5,56	342,46	1.561,67	2,77
53	400	0,40	309	0,96	4,20	4,51	0,00	107,92	742,69	1,08
49	600	0,43	503	0,77	2,98	3,55	0,00	130,76	691,68	0,79
60	1.000	0,46	763	0,70	2,73	3,01	0,00	53,74	441,8	0,70
51	1.600	0,49	1.275	0,69	2,72	2,87	0,00	41,76	296,70	0,68
66	4.000	0,53	2.478	0,59	2,60	2,69	0,00	38,13	267,97	0,64
52	13.300	0,59	7.561	0,60	1,98	2,16	0,00	22,02	151,60	0,51
55	125.000	0,66	36.609	0,61	1,54	1,57	0,00	14,33	74,32	0,38
8	200.000	0,71	148.885	0,40	1,48	1,37	0,00	24,50	120,77	0,35
4	500.000	0,74	282.986	0,36	1,32	1,31	0,00	77,61	521,31	0,33
1	1.000.000	0,78	990.520	0,30	1,41	1,03	0,00	12,11	67,60	0,29
453				0,42	1,63	1,64	0,83	20,53	118,14	0,40



esa aplicación sucesiva de logaritmos decimales mejoraba los ajustes.

Se ajustó cada curva a la fórmula que mayor coeficiente de correlación tenía, siendo siempre el ajuste potencial ($K_1 \cdot E^{K_2}$) el que mayor aproximación presentaba (Figuras 3, 4, 5 y 6).

5. Conclusiones y recomendaciones

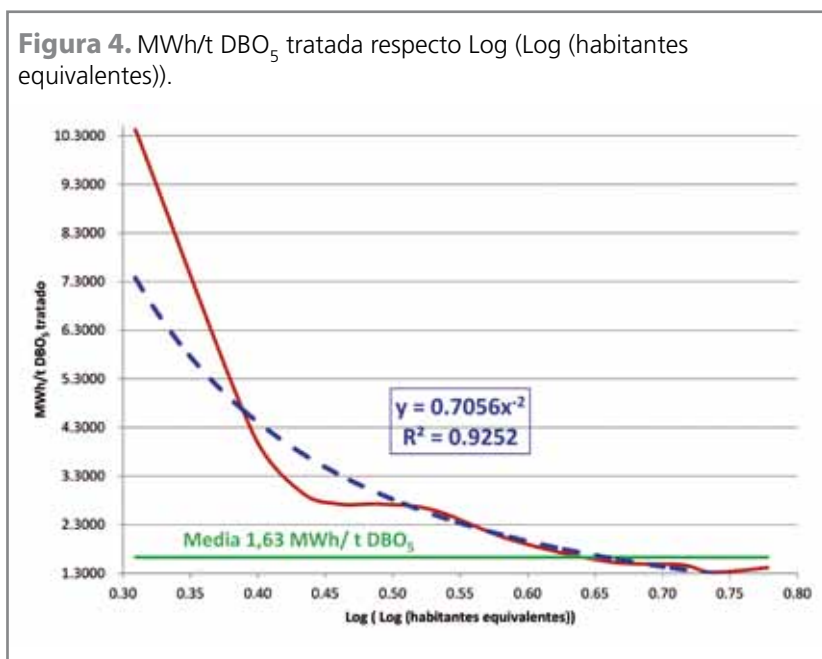
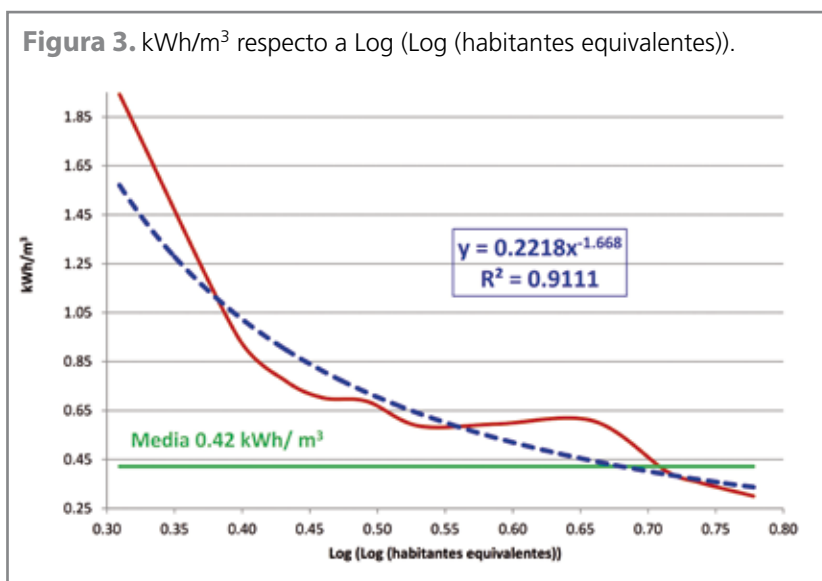
5.1. Conclusiones

Las conclusiones más relevantes que pueden extraerse de la investigación realizada son las siguientes:

- La variable que debe servir como variable independiente, y sobre la cual se debe realizar la segmentación es la de habitantes equivalentes, ya que en ella se incluye, de una forma universalmente reconocida, tanto el caudal a tratar como la carga contaminante de entrada del mismo. Este hecho se hace muy relevante con los datos estudiados, ya que hay varias EDAR que tratan unos caudales muy elevados con una carga contaminante muy baja, por lo que cualquier investigación que trate los datos estadísticamente desde el punto de vista meramente de caudales tratados en m^3 tiene unas fuertes desviaciones.

- Una vez segmentada la muestra por habitantes equivalentes, el parámetro que mejor correlaciona el consumo de energía es el de kWh/ m^3 , lo cual parece lógico, ya que parte de la carga contaminante de cada m^3 de agua tratada se tiene en cuenta en la variable independiente (habitantes equivalentes).

- Evidentemente, aunque la media ponderada de esa correlación sería del valor de $= 0,42 \text{ kWh}/m^3$, se puede afinar más, con un coeficiente de correlación $R^2 = 0,911$, a una ecuación de la forma potencial siguiente:



$$Y = 0,2218 X^{-1,668} \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde:

- Y = Consumo energético de la EDAR medido en kWh/ m^3 tratado;
- X = Log (Log (n° de habitantes equivalentes tratados)).

Así, se puede indicar que las EDAR de gran tamaño, que tratan un elevado número de habitantes equivalentes (> 100.000 he), consumen muy por debajo de la media, y que

las EDAR de pequeños tamaños (< 2.000 he), aunque sean muchas, tratan poco volumen de entre todas en relación con las grandes, pero consumen hasta 6 veces más energía que la media.

- Otro parámetro que indica una buena correlación del consumo de energía con la variable independiente (he) es el de la suma de contaminantes eliminados: DBO₅, SS, N y P en t. La media lineal de esa correlación sería del valor de $= 0,40$ MWh/t total tratada (DBO₅, SS, N y P), que

Figura 5. MWh/t SS tratados respecto Log (Log (habitantes equivalentes)).

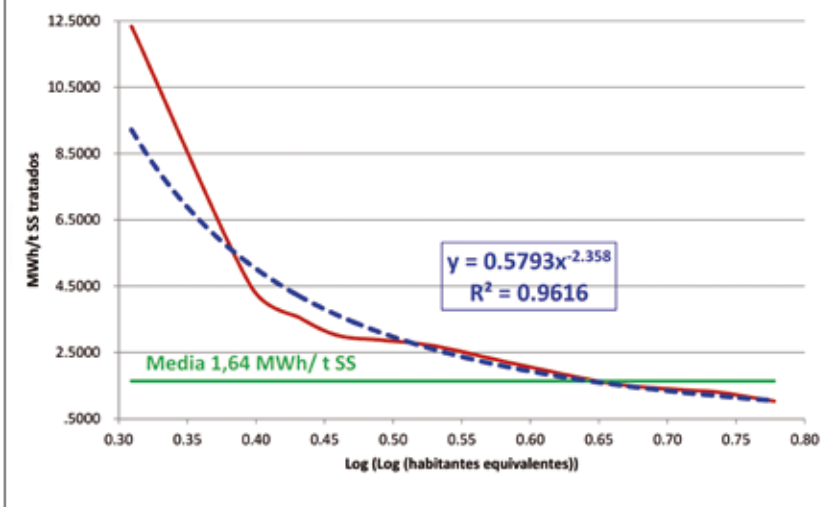
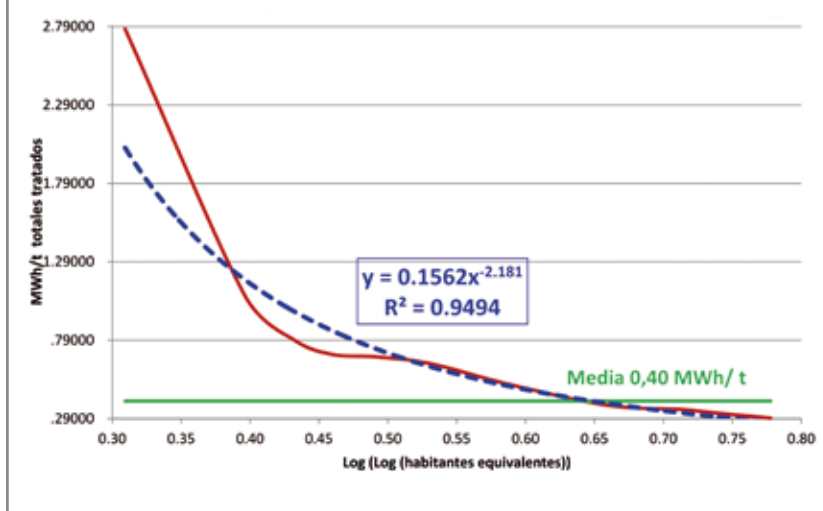


Figura 6. MWh/t contaminación total respecto Log (Log (habitantes equivalentes)).



se puede afinar más con un coeficiente de correlación $R^2 = 0,9494$ a una ecuación de la forma potencial siguiente:

$$Y = 1,5620 X^{-2,181} \quad \text{(Ecuación 2)}$$

donde:

- Y = consumo energético de la EDAR medido en MWh/t total tratada.
- X = Log (Log (nº de habitantes equivalentes tratados)).

- No obstante, considerando que no todas las EDAR pueden tener eliminación de N y P (principalmente las pequeñas), es mejor adoptar las siguientes correlaciones entre el consumo de energía y la contaminación eliminada:

- MWh/cantidad de DBO₅ depurada en t, cuya media lineal sería de 1,63 MWh/t de DBO₅ depurada y cuya mejor curva de aproximación con correlación del $R^2 = 0,9252$ es la siguiente de forma potencial:

$$Y = 0,7056 X^{-2} \quad \text{(Ecuación 3)}$$

donde:

- Y = consumo energético de la EDAR medido en MWh/t de DBO₅ tratado.
- X = Log (Log (nº de habitantes equivalentes tratados)).
- MWh/cantidad de SS depurada en t, cuya media lineal sería de 1,64 MWh/t de SS depurada y cuya mejor curva de aproximación con correlación del $R^2 = 0,9282$ es la siguiente de forma potencial con:

$$Y = 0,5793 X^{-2,358} \quad \text{(Ecuación 4)}$$

donde:

- Y = consumo energético de la EDAR medido en MWh/t de SS tratado.
- X = Log (Log (nº de habitantes equivalentes tratados)).

5.2. Recomendaciones

La primera recomendación que puede hacerse, a la vista de la investigación realizada, es que se debe tender a diseñar EDAR que traten más de 100.000 he para ser eficientemente energéticas, por lo que en la medida de lo posible se debe intentar concentrar los caudales de aguas residuales para optimizar el consumo energético por m³ tratado, por t de DBO₅ tratada, por t de SS tratada y por t total tratada (DBO₅, SS, N y P).

A partir de esos tamaños, el consumo energético se reduce debido a las sinergias que producen las economías de escala y a que aumentan las posibilidades de rentabilizar la implantación de sistemas de cogeneración reutilizando el biogás producido y el calor de los gases de escape de la combustión para aumen-



A la vista de los resultados, es recomendable diseñar EDAR que traten más de 100.000 he para ser eficientemente energéticas, por lo que se debería intentar concentrar los caudales de aguas residuales para optimizar el consumo energético por m³ tratado

tar el rendimiento de los digestores y el secado de los fangos.

Evidentemente, además del ahorro energético en las grandes EDAR, se suman las sinergias en costes de empleados, de costes generales, de compra de productos, etc., lo cual es la conclusión más importante de esta investigación para planificadores y diseñadores de EDAR urbanas.


Los parámetros fijados en el apartado anterior sirven para comprobar

si el diseño y la operación y mantenimiento de las EDAR es el adecuado o se está desviando.

Otra importante conclusión es que para EDAR de tamaños pequeños (< de 500 o 250 he), en las que no se puedan concentrar los caudales para tratarlos en EDAR de mayor capacidad, se deben utilizar otras metodologías y sistemas de depuración más eficientes energéticamente, ya que el consumo se puede

elegir exponencialmente. Existen diferentes metodologías (oxidación total, macrofitas, tanques Imhoff, flujo pistón...) que deberían ser seleccionadas según las condiciones de contorno que se tengan en cada caso, aunque energéticamente no sean tan eficientes, ya que pueden presentar otras ventajas como menor coste de operación y mantenimiento en dedicación de mano de obra, eliminación de fangos, uso de productos químicos, etc.

Bibliografía

- [1] Albadalejo Ruiz, A. (2013). Parametrización del consumo energético de las depuradoras de aguas residuales de la Región de Murcia. Alicante.
- [2] Albadalejo Ruiz, A.; Trapote Jaume, A. (2013). Influencia de las tarifas eléctricas en los costes de operación y mantenimiento de las depuradoras de aguas residuales. Tecnoaqua, núm. 3, págs. 48-54.
- [3] IDAE (2010). Estudio de prospectiva de consumo energético en el sector del agua. Madrid. 

REGÍSTRESE EN

WWW.TECNOAQUA.ES

PARA CONSULTAR Y DESCARGARSE MÁS
ARTÍCULOS TÉCNICOS, PROCESOS Y SISTEMAS,
REPORTAJES, ENTREVISTAS, VÍDEOS Y TODA
LA INFORMACIÓN DEL SECTOR DEL AGUA