

# HUELLA ENERGÉTICA EN EL CICLO INTEGRAL DEL AGUA

## en la Comunidad de Madrid

3232.86  
2017



fundacioncanal.com



Mateo Inurria, 2. 28036 Madrid



FUNDACIÓN CANAL  
Canal de Isabel II





**Autores:**

José Ferrer Polo

Daniel Aguado García

Ramón Barat Baviera

Joaquín Serralta Sevilla

Enrique Lapuente Ojeda

Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA)

Universitat Politècnica de València

Diciembre de 2016



## ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO	4
2	REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DEL NEXO AGUA-ENERGÍA EN EL CONTEXTO DEL CICLO INTEGRAL DEL AGUA	5
2.1	El ciclo urbano del agua. Esquema funcional	7
2.2	Casos de interés en el contexto internacional	9
2.3	Casos de interés en el contexto nacional	21
2.4	Conclusiones del estado del arte del nexo agua-energía	31
3	CARACTERIZACIÓN DE LA HUELLA ENERGÉTICA EN LAS EDAR GESTIONADAS POR CANAL DE ISABEL II	33
3.1	Metodología	33
3.2	Análisis energético de las EDAR gestionadas por Canal Isabel II	35
3.3	Comparación de los distintos sistemas de depuración	69
3.4	Conclusiones del estudio energético de las EDAR	72
4	ESTUDIO DE LOS CONSUMOS DESAGREGADOS EN LAS EDAR DE TORREJÓN DE ARDOZ Y LA EDAR DE VALDEMORILLO	78
4.1	Descripción de la EDAR de Torrejón de Ardoz	78
4.2	Análisis del consumo energético de la EDAR de Torrejón de Ardoz	93
4.3	Conclusiones del análisis desagregado en la EDAR de Torrejón de Ardoz	125
4.4	Descripción de la EDAR de Valdemorillo	128
4.5	Análisis del consumo energético de la EDAR de Valdemorillo	133
4.6	Conclusiones del análisis desagregado en la EDAR de Valdemorillo	152
5	CARACTERIZACIÓN DE LA HUELLA ENERGÉTICA EN EL RESTO DE INSTALACIONES DEL CICLO INTEGRAL DEL AGUA GESTIONADAS POR CANAL DE ISABEL II	155
5.1	Análisis energético de las instalaciones de alcantarillado	155
5.3	Estaciones de Tratamiento de Agua Potable (ETAP)	167
5.4	Instalaciones de distribución	170
5.5	Instalaciones de aducción	173
5.6	Conclusiones del estudio energético en el resto de instalaciones del ciclo integral del agua	178
6	CONSIDERACIONES FINALES	182
7	BIBLIOGRAFÍA	184
	ANEJO	185

**Nota aclaratoria:** En este informe se ha utilizado el punto (.) como símbolo decimal y la coma (,) como símbolo de separación de miles.



# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO

Canal de Isabel II dispone del orden de 600 puntos de suministro eléctrico que suponen un elevado consumo eléctrico anual. Conscientes de la importancia que el consumo eléctrico tiene en su organización Canal de Isabel II ha desarrollado unas líneas de actuación que buscan reducir el impacto de los costes energéticos en la gestión integral del agua.

Dentro del proceso de búsqueda de eficiencia en las actividades de Canal de Isabel II, y para una adecuada gestión del consumo, se ha detectado que resulta complicado realizar una valoración exhaustiva de la distribución de los consumos eléctricos de los distintos procesos que engloban el ciclo integral del agua. Al igual que ocurre en numerosas instalaciones del sector, esto es debido a que el sistema de desagregación de medidas eléctricas de los procesos no es lo suficientemente específico y la mayoría de las instalaciones no cuentan con los datos de consumo necesarios para realizar el análisis necesario del consumo energético.

Con el fin de obtener una primera aproximación al cálculo detallado de la huella energética, en la operación de las instalaciones se plantea este estudio, en el que se analiza la relación entre el agua y los consumos energéticos de las distintas fases que conlleva el ciclo integral del agua, teniendo como objetivo fundamental analizar las posibilidades de ahorro energético y optimización de los consumos eléctricos en Canal de Isabel II.

Este trabajo se ha estructurado en las siguientes fases<sup>1</sup>:

1. Revisión del estado del arte del nexo agua-energía en el contexto del ciclo integral del agua.
2. Caracterización de la huella energética en las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) gestionadas por Canal de Isabel II.
3. Estudio de consumos desagregados en 2 EDAR de distinta capacidad de tratamiento: la EDAR de Torrejón de Ardoz (23,950 m<sup>3</sup>/d en 2015) y la EDAR de Valdemorillo (1,524 m<sup>3</sup>/d en 2015).
4. Caracterización de la huella energética en el resto de instalaciones del ciclo integral del agua (alcantarillado, regeneración, aducción, distribución y estaciones de tratamiento de agua potable (ETAP)) gestionadas por Canal de Isabel II.

Los estudios de la huella energética en los distintos tipos de instalaciones (fases 2, 3 y 4) incluyen un apartado de propuesta de medidas para la reducción del consumo energético<sup>2</sup>. Dichas propuestas incorporan la estimación del porcentaje de ahorro esperable con la aplicación de cada una de las medidas. Queda fuera del alcance de este trabajo el estudio económico de los costes de implantación de dichas medidas. Un estudio económico detallado de los costes y beneficios de cada una de las medidas deberá ser abordado en estudios posteriores.

Dada la escasez de información acerca de la huella energética en las instalaciones del ciclo integral del agua, un informe de estas características puede servir de referencia dentro de dicho sector.

---

<sup>1</sup> Para el análisis de la huella energética realizado en las fases 2, 3 y 4 de este estudio se han utilizado los datos más recientes a fecha de realización de las diferentes fases (correspondientes a los consumos energéticos registrados durante el año 2015 y primera mitad del 2016).

<sup>2</sup> En la fecha de publicación de este informe final, algunas de las medidas propuestas ya están siendo implementadas por el Canal de Isabel II.



## 2 REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DEL NEXO AGUA-ENERGÍA EN EL CONTEXTO DEL CICLO INTEGRAL DEL AGUA.

Sin lugar a dudas la publicación en 2005 de la fuerte dependencia del binomio agua/energía en el Estado de California (Klein et al., 2005) supuso una llamada de atención sobre la importancia que tiene el consumo de energía en el ciclo del agua. Con los datos que manejaba la Comisión de la Energía del Estado de California del año 2001, el 19% de la electricidad y el 32% del consumo de gas natural en el Estado estaban asociados al uso del agua (ver Tabla 1).

Tabla 1. Consumo de energía en el estado de California, 2001

	Electricidad (GWh/año)	Gas Natural (Millones termias/año)	Diésel (Millones galones/año)
<b>Suministro de agua y tratamiento</b>			
Urbano	7,554	19	?
Agricultura	3,188		
<b>Usos finales</b>			
Agricultura	7,372	18	88
Residencial	27,887	4,220	?
Comercial			
Industrial			
Tratamiento agua residual	2,012	27	?
Total energía relacionada con el uso del agua	48,012	4,284	88
Total energía usada en California	250,494	13,571	?
Porcentaje	19 %	32 %	?

Dejando de lado los usos finales, y valorando únicamente el consumo en el ciclo urbano, los valores anuales se reducían considerablemente, quedando en el 3.8% el consumo de energía eléctrica y en el 0.3% la demanda de gas natural (ver Tabla 2).



Tabla 2. Consumo de energía en el ciclo urbano del agua, excluyendo usos finales, del estado de California, correspondiente al año 2001.

USO URBANO DEL AGUA	Electricidad	Gas Natural
Suministro de agua y tratamiento	3.0 %	0.1 %
Tratamiento agua residual	0.8 %	0.2 %
<b>Total</b>	<b>3.8 %</b>	<b>0.3 %</b>

En un estudio posterior (Carlson y Warlburger, 2007), extendido a sesenta mil instalaciones de tratamiento de agua potable y quince mil instalaciones de depuración de aguas residuales operativas en Estados Unidos se evaluó el consumo de electricidad en el 3% del total nacional, y el coste de operación de las instalaciones asociado a la energía en el 10% del total.

En un contexto más global, se estima que los gastos de electricidad son entre el 5 y 30% de los costes totales de operación en los servicios de agua y alcantarillado en todo el mundo, pudiendo alcanzar un 40% en algunos casos. El consumo mundial de energía que se emplea en el ciclo del agua es del 7% con una gran variabilidad entre países, 3% en Estados Unidos, 2.4% en Brasil y un 5.8% estimado para España, son algunos ejemplos (Ferro y Lentini, 2015).

Consciente Naciones Unidas de la estrecha relación e interdependencia del nexo Agua y Energía, dedicó el Día Mundial del Agua, 22 de marzo de 2014, expresamente a esta cuestión, con el objetivo, entre otros, de "aumentar la conciencia de las interrelaciones entre el agua y la energía", alertando que el cambio climático, derivado en gran medida del uso insostenible de la energía, incrementará el estrés hídrico y la escasez de agua en muchas regiones.

Buen ejemplo de la importancia de esta cuestión, en un contexto más próximo, nos lo da el impacto que el consumo de energía en el ciclo urbano del agua del Canal Isabel II tiene en la Comunidad de Madrid, 1.5% del total de electricidad, 600 puntos de suministro eléctrico, y un consumo anual de 360 GWh año. Pero no sólo el CYII consume electricidad, también la genera empleando distintas tecnologías: hidráulicas, cogeneración en el secado de fangos, biogás obtenido en el tratamiento de los fangos y microturbinas. Una buena muestra del interés que despierta este asunto para el CYII lo demuestra el Plan de Mejora de la Eficiencia Energética para el periodo 2010-2015, articulado sobre tres ejes: *Programa Invierte* (para aumentar la capacidad de generación de energía renovable), *Programa Renove* (para aumentar la eficiencia energética de equipos) y *Programa Revisa* (para aumentar la eficiencia energética de los procesos).

El principal objetivo de esta revisión del estado del arte es presentar un análisis de los estudios realizados a nivel nacional e internacional enfocados a cuantificar el consumo de energía en las distintas fases del ciclo del agua. Para ello se describirá brevemente las etapas del ciclo del agua y luego se presentarán los resultados de los estudios existentes en la bibliografía. Los ratios de consumos energéticos presentados, especialmente los correspondientes a estudios internacionales, deben ser tomados con precaución y no deben ser adoptados como referencia para las instalaciones del CYII, ya que en muchos casos se desconocen aspectos concretos de las instalaciones analizadas y además ni las condiciones socioeconómicas y culturales en el uso del agua ni la legislación existente en los distintos países son las mismas que en España.

La mayoría de los estudios analizados en este trabajo se centran fundamentalmente en la determinación de la intensidad energética de las distintas fases del ciclo del agua recopilando



datos de una gran cantidad de instalaciones. Un resumen de esta información con los valores promedio de intensidades energéticas recogidos en los diferentes estudios se muestra en la Tabla 26, página 32, dentro del apartado de conclusiones. Cabe destacar el estudio realizado por Carlson y Walburger (2007) en el cual, además de la recopilación de datos, se desarrollan modelos estadísticos que relacionan el consumo energético de cada una de las fases del ciclo del agua con distintas variables y establece una metodología para comparar la eficiencia energética de las distintas instalaciones analizadas.

## 2.1 El ciclo urbano del agua. Esquema funcional

Dejando de lado los usos finales, donde probablemente el uso doméstico del agua caliente en los hogares sea el factor más relevante en el consumo de energía, el ciclo del agua en las ciudades se puede describir siguiendo el esquema de:

- **Captación y transporte.** Se inicia esta fase con la toma del agua del medio natural y finaliza con el transporte, aducción, hasta la planta de tratamiento, también llamada potabilizadora. A esta fase se la denomina generalmente 'Abastecimiento en Alta'. La captación puede ser superficial, en el caso de que se realice de ríos, lagos, canales o embalses, y subterránea, cuando se obtiene mediante el bombeo en pozos del agua del acuífero. En el transporte, desde el punto de vista energético, será especialmente relevante el funcionamiento hidráulico, ya sea por gravedad o en conducción forzada, y, en algunos casos, la posibilidad de obtener energía con microturbinas en pequeños saltos de rotura de carga.
- **Potabilización.** Se incluye tanto el tratamiento necesario para la producción de agua potable para el consumo humano como el bombeo del agua bruta a la planta de tratamiento y la impulsión del agua tratada, en el caso de que los haya. En algunas instalaciones estos bombeos son los responsables del mayor consumo de energía eléctrica. Los tipos de tratamientos son muy variables dependiendo de la calidad del agua bruta y de los requisitos normativos que se le exija al agua de consumo humano. Estos requisitos, no hay que perderlo de vista, son variables en el tiempo (siendo cada vez más exigentes), y en el territorio, ya que depende de los países fijar la normativa de aplicación. Los sistemas de tratamiento pueden ser desde muy simples, apenas una ligera desinfección para garantizar la salubridad en el punto de consumo, generalmente en el caso de aguas de manantial o de pozo, hasta sistemas muy complejos, ya sea para eliminar compuestos perjudiciales para la salud o para obtener agua de fuentes no potables, caso del agua de mar. Aun así, se puede considerar como 'tratamiento convencional' el compuesto por alguno o varios de los siguientes procesos: desbaste, coagulación-floculación, decantación, filtración y desinfección, con tratamiento y eliminación del fango producido.
- **Distribución urbana.** Bajo este epígrafe se incluyen las infraestructuras necesarias para el suministro del agua producida en las instalaciones de potabilización hasta el punto de acometida del usuario particular a través de la red de distribución general. Es decir, queda fuera lo que sería la acometida particular del edificio con la red, los posibles rebombes de las comunidades de propietarios de viviendas (calderines), así como la red de distribución desde la acometida del edificio hasta la conexión con cada vivienda particular. Muchas veces a la hora de analizar el extenso mapa de conducciones y elementos auxiliares que constituyen la red de distribución, conviene diferenciar entre la red arterial, por la que circula el caudal que alimenta barrios y manzanas, y la secundaria, formada por ese numeroso conjunto de conducciones de pequeño diámetro que enlaza con las acometidas particulares de los edificios.
- **Alcantarillado.** Es la infraestructura necesaria para conducir el agua residual generada en las viviendas hasta su punto de tratamiento. Está integrada por la red de alcantarillado municipal y los colectores generales de conexión con la planta de tratamiento. La red



puede ser separativa, únicamente recoge vertidos de aguas residuales, o unitaria, también transporta pluviales en tiempo de lluvia. Respecto a la tipología hidráulica su funcionamiento puede ser únicamente por gravedad, o necesitar en determinadas zonas el uso de estaciones de bombeo. También se incluyen bajo este epígrafe, en su caso, los tanques de tormenta que en muchas ciudades se están ejecutando para la gestión del flujo generado por la escorrentía en tiempo de lluvia, con la intención de laminarlo y así reducir los caudales punta, o bien, con el objetivo de disminuir el impacto de las descargas urbanas al medio natural, minimizando el impacto que producen las primeras agua de lavado de viales, superficies urbanizadas, sin olvidar los sedimentos que se acumulan en el lecho de los colectores.

- **Depuración.** Al igual que en las plantas potabilizadoras, el bombeo de agua bruta y el del efluente tratado, en el caso de que sean necesarios, se incluyen bajo este apartado. La tipología de tratamientos para alcanzar los requisitos de calidad exigidos para el vertido en el medio receptor son muy variados. La calidad del agua bruta, mayor o menor presencia de vertidos industriales, el tamaño de la planta, el uso de tratamientos convencionales, la apuesta por tecnologías de bajo coste en municipios de pequeños tamaño, entre otros, son factores que afectarán a la elección del tratamiento que se considere más adecuado en cada caso. A efectos prácticos, se considera tratamiento 'convencional' el formado en la línea de agua por: pretratamiento (desbaste, tamizado, desarenado y desengrasado), seguido de tratamiento primario (decantación), tratamiento biológico de fangos activados y desinfección. El proceso biológico de fangos activados es el más extendido y ofrece buenos resultados, en sus distintas variantes o configuraciones, para adaptarse a distintas necesidades. La línea de fangos 'convencional' incluye el proceso de concentración (espesadores por gravedad o flotación), la estabilización o digestión del fango en exceso por vía aerobia o anaerobia (esta última se aplica en plantas de tamaño medio o grande) seguida de la deshidratación, como última etapa, antes del almacenamiento del fango deshidratado en silo y posterior evacuación. En plantas de pequeñas poblaciones se utiliza el proceso de oxidación total en el que se prescinde de la decantación primaria y de la digestión de fangos (consiguiéndose la estabilización en la propia línea de aguas). Pero el de fangos activados no es el único tratamiento biológico. En pequeñas aglomeraciones urbanas, las plantas compactas y los tratamientos de 'bajo coste' pueden ser una adecuada solución (lagunaje, humedales artificiales, filtros verdes...), en otros casos, los filtros percoladores, biodiscos, etc, en los que el consumo de energía es menor que en las plantas de fangos activados, conduce a buenos resultados. Por otra parte, la introducción de tecnologías más complejas, generalmente reactores biológicos de membranas está obteniendo buenos resultados a un coste que cada vez es más competitivo.
- **Reutilización y distribución.** Es bastante habitual que el tratamiento necesario, comúnmente denominado terciario, para alcanzar los objetivos de calidad del agua regenerada, según el RD1620/2007, se realice en la misma planta depuradora. Con carácter general, para considerar el caso de que en alguna instalación no fuera así, se contempla un posible transporte del agua depurada hasta el terciario. En la distribución se entiende la red necesaria para conducir el agua regenerada hasta el punto de consumo del usuario final. El tratamiento terciario 'convencional' incluye: tratamiento físico-químico, con decantación habitualmente lamelar, filtración en medio granular y desinfección, en la mayoría de los casos mediante radiación UV. En instalaciones recientemente ejecutadas este esquema de proceso es sustituido por el uso de membranas de micro o ultrafiltración. Por otra parte, en algunas instalaciones el elevado contenido en sales precisa de ósmosis inversa para ofrecer un agua apta para su posterior uso.

Esta división del ciclo del agua, con pequeñas variaciones, es utilizada por agencias, explotadores y expertos cuando se pretende cuantificar el consumo e intensidad energética que se produce en cada una de las fases del ciclo urbano del agua, y es el que va a ser utilizado a lo largo de este documento.



## 2.2 Casos de interés en el contexto internacional

En este apartado se revisan algunos estudios que por su relevancia deben ser incluidos y analizados, ofreciendo la información obtenida para que posteriormente sea valorada y contrastada con los registros disponibles en las infraestructuras e instalaciones del Canal Isabel II. Los estudios en cuestión son:

- Klein G., Krebs M., Hall V., O'Brien T y Blevins B. (2005) California's Water-Energy Relationship. CEC-700-2005-011-SF.
- Cooley H. y Wilkinson R. (2012) Implications of Future Water Supply Sources for Energy Demands. WaterReuse Research Foundation.
- UNESCO (2014) Water and Energy. The United Nations World Water Report Development Report.
- Carlson S.W. y Walburger A. (2007). Energy Index Development for Benchmarking Water and Wastewater Utilities. AWWA Research Foundation.

### 2.2.1 California's Water-Energy Relationship.

En este estudio se aporta una valoración del rango de consumo energético en las distintas fases del ciclo urbano del agua (ver Tabla 3).

Tabla 3. Rango de la intensidad energética en el estado de California, 2001.

CICLO URBANO DEL AGUA	Intensidad energética, kWh/m <sup>3</sup>	
	Inferior	Superior
Captación y transporte	0.00	3.70
Potabilización	0.03	4.22
Distribución urbana	0.18	0.32
Alcantarillado y depuración	0.29	1.21
Vertido	0.00	0.11
Reutilización y distribución	0.11	0.32

La fuerte diferencia entre los valores máximos y mínimos en captación, transporte y potabilización guarda una estrecha relación con la escasez de recursos naturales próximos a las ciudades, lo que obliga, en el Estado de California, a realizar costosos trasvases desde cuencas hidrográficas muy lejanas o recurrir a la desalación de agua de mar.

Aunque evidentemente no hay dos sistemas de potabilización iguales, un estudio del Electric Power Research Institute (EPRI, 2000) tomando como muestra más de 30.000 instalaciones de Estados Unidos, de todo tipo y tamaño, ofrece una valor medio de intensidad energética de 0.38 kWh/m<sup>3</sup>, con muy pequeñas diferencias en función del tamaño de la población. Este valor incluye el bombeo de agua bruta a la potabilizadora, 0.03 kWh/m<sup>3</sup>, y el bombeo a la red de distribución, 0.32 kWh/m<sup>3</sup>. El resto, 0.03 kWh/m<sup>3</sup>, corresponde al tratamiento de potabilización, que para una planta considerada tipo (desbaste, coagulación, floculación, sedimentación, filtración, desinfección y tratamiento de los fangos producidos), se descompone de la siguiente manera para una instalación de tratamiento de agua superficial diseñada para un caudal tipo de 40.000 m<sup>3</sup>/d (ver Tabla 4).



Tabla 4. Intensidad energética de una planta potabilizadora que trata un caudal de 40.000 m<sup>3</sup>/d, en kWh/m<sup>3</sup>

Bombeo agua bruta		0.032		0.376
Tratamiento Potabilización	Aluminio	0.000	0.026	
	Polímero	0.001		
	Mezcla rápida	0.008		
	Balas floculación	0.002		
	Tanques sedimentación	0.002		
	Cal	0.000		
	Filtros	0.000		
	Cloro	0.000		
	Limpieza almacenamiento	0.000		
	Bombeo lavado filtros	0.003		
	Bombeo Lavado superficial filtros	0.002		
	Limpieza decantador	0.005		
	Bombeo fangos	0.001		
Bombeo agua tratada		0.318		

En cuanto a la energía empleada en la distribución desde la planta potabilizadora al consumidor, 0.32 kWh/m<sup>3</sup>, se observan fuertes oscilaciones de un municipio a otro en función de la topología de la red, la orografía del terreno, la antigüedad de las infraestructuras, etc.

Con las mismas salvedades, un valor medio utilizado para la valoración energética del transporte del agua residual hasta la planta depuradora, el alcantarillado, ha sido establecido en 0.04 kWh/m<sup>3</sup> para el Estado de California.

En depuración son más significativas las diferencias en cuanto a la intensidad energética debidas al tamaño de planta, a los requisitos de calidad a alcanzar en el efluente depurado y al sistema de tratamiento adoptado. Un valor central podría situarse, a la vista de las plantas operativas en el Estado de California, en 0.66 kWh/m<sup>3</sup>.

Con estos valores, la intensidad energética 'tipo' obtenida para la zona norte del Estado de California se muestra en la Tabla 5:

Tabla 5. Intensidad energética obtenida en la Zona Norte del Estado de California.

INTENSIDAD ENERGÉTICA 'TIPO'	kWh/m <sup>3</sup>
Captación y transporte	0.04
Potabilización	0.03
Distribución	0.32
Depuración	0.66
<b>Total</b>	<b>1.04</b>



## 2.2.2 Implications of Future Water Supply Sources for Energy Demands. WaterReuse Research Foundation.

Este estudio, apoyándose en la base de datos de la AWWA Research Foundation (AWWARF), maneja información contrastada de 125 sistemas de tratamiento de agua potable en instalaciones que servían a una población superior a 10.000 habitantes y de 266 plantas de tratamiento de aguas residuales diseñadas para tratar un caudal superior a los 5.700 m<sup>3</sup> diarios. Con esos datos el estudio ofrece valores medios, máximos y mínimos para la intensidad energética en las distintas fases del ciclo urbano que representan una muy buena referencia para evaluar el uso de la energía.

### Captación

En este concepto se incluye la toma del agua del medio natural. Para la captación del agua subterránea no ofrece valores, ya que dependerán fuertemente de la profundidad a que se halle la cota piezométrica del acuífero y de la eficiencia del conjunto bomba/motor, por lo que deberá ser determinada caso a caso. Respecto al consumo cuando la toma es superficial considera que en la mayoría de los casos es prácticamente nula.

### Transporte

Se refiere al transporte desde la fuente de suministro hasta la instalación de tratamiento. Los valores pueden ser muy dispersos, ya que en algunos casos se requieren grandes infraestructuras que conectan puntos muy distantes territorialmente con importantes desniveles a salvar. Por esta razón, ofrece resultados en función a la proximidad del recurso al punto de tratamiento, diferenciando entre un recurso que se extrae próximo al punto de consumo del que procede de cuencas alejadas, (ver Tabla 6)

Tabla 6. Intensidad energética para el transporte hasta la planta potabilizadora

INTENSIDAD ENERGÉTICA TRANSPORTE	Suministro local, kWh/ m <sup>3</sup>	Trasvase, kWh/ m <sup>3</sup>
Rango inferior	0.023	0.502
Valor medio	0.029	0.792
Rango superior	0.087	1.399

Dada la dispersión de resultados, se realizó un análisis detallado buscando un modelo de regresión que identificara las variables más significativas que influyen en el consumo de energía en el transporte. De este modo, trabajando con 76 instalaciones se obtuvo un modelo explicativo del 79% de la energía consumida utilizando como variables el caudal nominal de diseño, el caudal diario de trabajo y la potencia de bombeo instalada.

### Potabilización

La energía que se precisa en la planta de tratamiento está en relación directa con la calidad de la fuente de suministro y la tecnología utilizada para producir agua apta para el consumo humano.

En algunos casos con aguas subterráneas el tratamiento es mínimo, apenas cloración para garantizar la desinfección. En estos casos, el valor medio obtenido en este estudio es de 0.0025 kWh/m<sup>3</sup>, con un rango de variación que oscila entre 0.0021 y 0.0026 kWh/m<sup>3</sup>.



Si la planta potabilizadora (ETAP) sigue el esquema clásico de: coagulación, sedimentación, filtración en medio granular y desinfección, los valores obtenidos en función del caudal de tratamiento se indican en la Tabla 7 (en el estudio original las unidades son MGD, millones de galones por día, 1 MGD es equivalente a 3,787 m<sup>3</sup>/día):

Tabla 7. Intensidad energética de una ETAP clásica.

INTENSIDAD ENERGÉTICA ETAP CLÁSICA, kWh/m <sup>3</sup>	Capacidad planta, m <sup>3</sup> /d			
	<3,787	3,787-18,939	18,939-75,757	>75,757
Rango inferior	0.16	0.08	0.05	0.03
Valor medio	0.40	0.20	0.15	0.06
Rango superior	0.53	0.34	0.29	0.53

En un análisis específico sobre 92 instalaciones se pudo correlacionar el 67% del consumo de energía con el caudal nominal de diseño, el caudal de trabajo, la potencia instalada, la presencia de tratamientos de oxidación, filtración directa y filtración en lecho de arena, el uso de ozono y la eliminación del hierro como objetivo específico de tratamiento.

Sistemas alternativos de desinfección, como la radiación ultravioleta (UV) y el ozono, se están volviendo cada vez más frecuentes por los subproductos que produce el tratamiento con cloro, y los criterios más restrictivos en cuanto a la calidad del agua a obtener. En la Tabla 8 se aportan algunos datos cuando se utilizan estos sistemas de desinfección.

Tabla 8. Intensidad energética del proceso de desinfección en una ETAP.

INTENSIDAD ENERGÉTICA ETAP, SÓLO DESINFECCIÓN	Rango inferior, kWh/ m <sup>3</sup>	Valor medio, kWh/ m <sup>3</sup>	Rango superior, kWh/ m <sup>3</sup>
Desinfección UV			
Lámparas baja presión	0.017	0.015	0.018
Lámparas media presión	0.040	0.026	0.042
Desinfección ozono	0.032	0.042	0.116

El uso de agua salobre como fuente de suministro es cada vez más común en algunas instalaciones. La energía de tratamiento está directamente asociada al contenido en sales del agua bruta. Unos valores orientativos se indican en la Tabla 9.

Tabla 9. Intensidad energética de la desalación en función de la salinidad.

SALINIDAD AGUA BRUTA mg/l	INTENSIDAD ENERGÉTICA kWh/ m <sup>3</sup>
1,000 - 3,000	0.79 - 1.11
3,000 - 5,000	1.11 - 1.40
5,000 - 7,000	1.40 - 1.69
7,000 - 10,000	1.69 - 2.19



La intensidad energética de la desalación de agua de mar mediante ósmosis inversa depende de una serie de factores, tales como: la salinidad del agua bruta, temperatura, calidad del agua producto y la presencia de equipos de recuperación de energía. Con datos de 15 instalaciones posteriores al año 2005, el consumo energético medio es de 4.0 kWh/m<sup>3</sup>, con un rango de variación que oscila entre 3.7 y 4.2 kWh/m<sup>3</sup>.

### **Tratamiento terciario**

Los casos estudiados se pueden dividir en dos categorías: tratamiento terciario convencional y tratamiento mediante membranas. El tratamiento convencional consiste en filtración y desinfección. Un consumo medio de energía puede estimarse en 0.42 kWh/m<sup>3</sup>, con un rango que oscila entre 0.40 y 0.45 kWh/m<sup>3</sup>. El tratamiento mediante membranas consiste en una micro o ultrafiltración, seguida de ósmosis inversa y, generalmente, con desinfección por UV. Un consumo medio se sitúa en 1.1 kWh/m<sup>3</sup>, con una horquilla que se mueve entre 0.98 y 1.2 kWh/m<sup>3</sup>.

### **Distribución de agua potable**

Se entiende el transporte desde la planta potabilizadora hasta el consumidor final. La energía dependerá de la distancia y la orografía del terreno. El valor medio observado en este estudio se sitúa en 0.14 kWh/m<sup>3</sup>, con un rango de 0.095 y 0.23 kWh/m<sup>3</sup>.

Tomando como referencia 86 sistemas de distribución de agua potable en Estados Unidos, el 78% de la energía utilizada puede ser explicada a partir del caudal de diseño, la potencia instalada, la altura de elevación e información relativa al tratamiento. El estudio hace mención a la dificultad, a veces, de desligar la distribución de la potabilización.

### **Distribución y reutilización**

La necesidad energética puede ser mayor que en el caso anterior ya que en numerosas ocasiones la planta de tratamiento se localiza en el punto más bajo. El valor medio obtenido ha sido de 0.37 kWh/m<sup>3</sup>, con un rango de variación entre 0.26 y 0.79 kWh/m<sup>3</sup>.

### **Alcantarillado**

Se trata del transporte del agua residual producida en los hogares hasta la planta depuradora. Generalmente la conducción es por gravedad aunque en algunos casos se requieren bombeos a lo largo del trazado. El valor medio obtenido ha sido de 0.074 kWh/m<sup>3</sup>, con un rango que varía ente 0.037 y 0.12 kWh/m<sup>3</sup>.

Tomando datos de 171 instalaciones, el 67% del consumo de energía en la red de alcantarillado pudo ser explicado a partir del caudal medio, la potencia de bombeo instalada y el número de bombas.

### **Depuración**

La energía depende del tipo de tratamiento, de la eficiencia del sistema de elevación del agua bruta hasta la planta de tratamiento, del tamaño de la planta y de la calidad exigida al efluente de salida.

Para un tratamiento convencional: primario (eliminación de sólidos, grasas y aceites) seguido de tratamiento biológico (lagunas aerobias de estabilización, filtros percoladores, fangos activados y lagunaje), el consumo energético obtenido en función del tamaño de planta se muestra en la Tabla 10.



Tabla 10. Intensidad energética obtenida en una EDAR convencional

INTENSIDAD ENERGÉTICA EDAR CONVENCIONAL, kWh/m <sup>3</sup>	Capacidad planta, m <sup>3</sup> /d			
	3,787-18,939	18,939-75,757	75,757-189,394	>189,394
Rango inferior	0.40	0.37	0.32	0.25
Valor medio	0.61	0.53	0.42	0.37
Rango superior	0.82	0.66	0.53	0.55

Con 266 plantas depuradoras analizadas de tratamiento convencional, el 82% de la energía consumida pudo ser explicado en función del caudal diario tratado, la demanda biológica de oxígeno del agua bruta y el efluente de salida de la planta, la relación entre el caudal nominal de diseño de la instalación y el caudal de trabajo en las condiciones actuales, la presencia de filtros percoladores y la eliminación, o no, de nitrógeno como objetivo de calidad a exigir al vertido.

Para tratamientos más exigentes: Advanced Treatment I (DBO<sub>5</sub> efluente ente 10 y 20 mg/l) y Advanced Treatment II (DBO<sub>5</sub> efluente < 10 mg/l) los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 11 y Tabla 12.

Tabla 11. Intensidad energética EDAR con Advanced Treatment I

INTENSIDAD ENERGÉTICA EDAR ADVANCED I, kWh/m <sup>3</sup>	Capacidad planta, m <sup>3</sup> /d			
	3,787-18,939	18,939-75,757	75,757-189,394	>189,394
Rango inferior	0.50	0.53	0.32	0.48
Valor medio	0.58	0.66	0.53	0.53
Rango superior	0.77	0.77	0.55	0.55

Tabla 12. Intensidad energética en EDAR con Advanced Treatment II

INTENSIDAD ENERGÉTICA EDAR ADVANCED II, kWh/m <sup>3</sup>	Capacidad planta, m <sup>3</sup> /d			
	3,787-18,939	18,939-75,757	75,757-189,394	>189,394
Rango inferior	0.58	0.61	0.48	0.45
Valor medio	0.87	0.79	0.63	0.48
Rango superior	1.27	0.87	1.14	0.61

### Vertido

Generalmente el vertido es por gravedad, aunque a veces se requiere un pequeño bombeo. Con los valores obtenidos, se puede considerar una buena aproximación tomar el consumo en esta fase como cero.



### 2.2.3 Water and Energy. The United Nations World Water Report Development Report

Este reciente documento ofrece valores medios globales sin tener en consideración la distancia de transporte del agua o la eficiencia, aspectos que pueden variar notablemente de un lugar a otro, (ver Tabla 13).

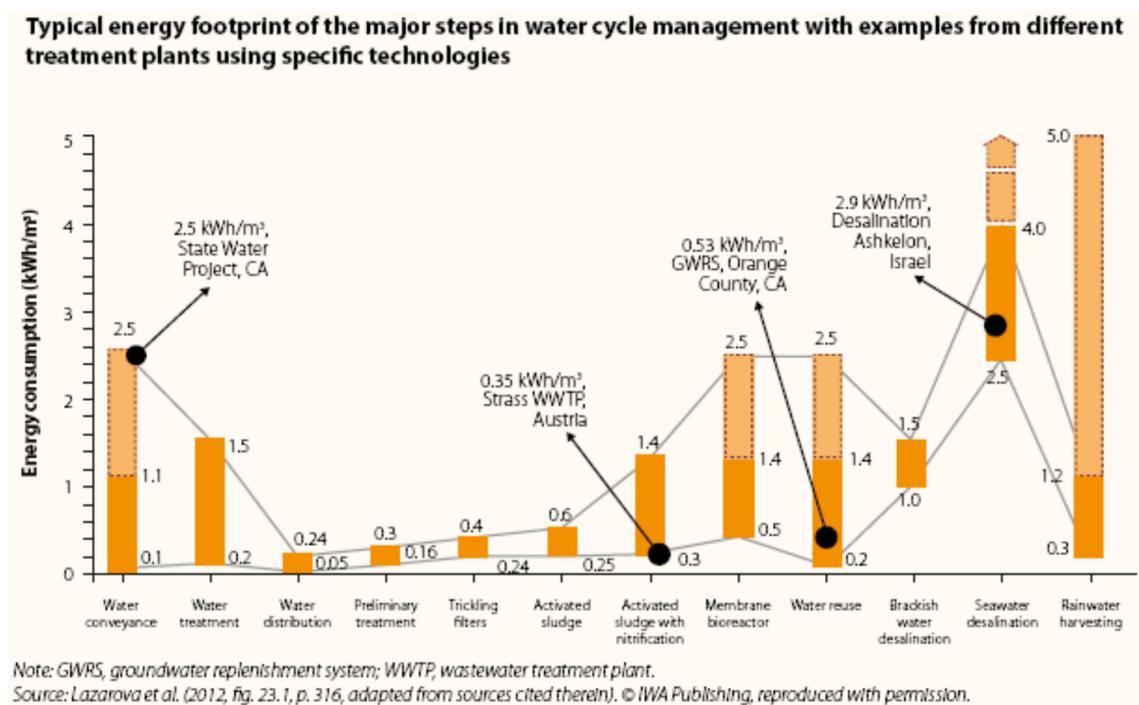
Tabla 13. Intensidad energética en el ciclo urbano

INTENSIDAD ENERGÉTICA CICLO URBANO	kWh/ m <sup>3</sup>
Abastecimiento de lago o río	0.37
Abastecimiento de acuífero	0.48
Depuración agua residual	0.62-0.87
Desalación	2.58-8.5

Como se puede observar en la Tabla 13 el suministro de agua superficial requiere poca energía para su captación en comparación con la procedente de pozo, pero puede precisar por contra un mayor nivel de tratamiento debido a la contaminación. Claramente la desalación es la más intensiva en el uso de energía dependiendo fuertemente de la concentración de sales del agua bruta.

Este documento incluye valores típicos sobre la intensidad energética en el ciclo del agua para distintos tipos de tratamiento, (ver Figura 1), obtenidos de Lazarova et al. (2012).

Figura 1. Valores típicos de la intensidad energética en el ciclo del agua para distintos tratamientos, en kWh/m<sup>3</sup>.





#### **2.2.4 Energy Index Development for Benchmarking Water and Wastewater Utilities. AWWA Research Foundation.**

Un enfoque muy interesante, del que se pueden extraer buenas conclusiones, nos lo ofrece el estudio de la AWWA publicado en 2007 (Carlson y Walburger, 2007). Haciendo referencia a la importancia que tiene el consumo de energía en los sistemas de abastecimiento y saneamiento en Estados Unidos (consumen un 3% de la electricidad nacional, siendo el coste energético en esas instalaciones un 10%, o más, del coste de operación), se propuso un ambicioso estudio que permitiera obtener ratios y sirviera para comparar unas instalaciones con otras de manera que se pudiera evaluar la eficiencia de cada sistema y al mismo tiempo motivar a los explotadores en la mejora de sus instalaciones.

Se lanzó un cuestionario a 1.700 instalaciones de abastecimiento, en plantas con capacidad para suministrar agua a más de 10.000 habitantes, y en 2.700 sistemas de saneamiento, con capacidad de tratamiento superior a 5.000 m<sup>3</sup>/d. Una vez filtrada la información recibida, el análisis se centró en 125 sistemas de abastecimiento y 266 sistemas de saneamiento.

En los sistemas de abastecimiento se analizó de manera global, e individualmente (suministro, potabilización y distribución), la relación entre la energía consumida y las variables más relevantes desde el punto de vista energético. De igual manera, en los sistemas de saneamiento se trabajó con el alcantarillado y las plantas de depuración.

Con el objeto de trabajar con un único indicador de la energía se tomó como referencia la energía primaria, convirtiéndose a ésta las distintas formas de las fuentes de energía utilizadas en cada instalación (electricidad, gas natural, fuel oil y propano). Así por ejemplo en el caso de la electricidad, la energía primaria contabiliza la energía empleada para su generación y transporte por la red de distribución.

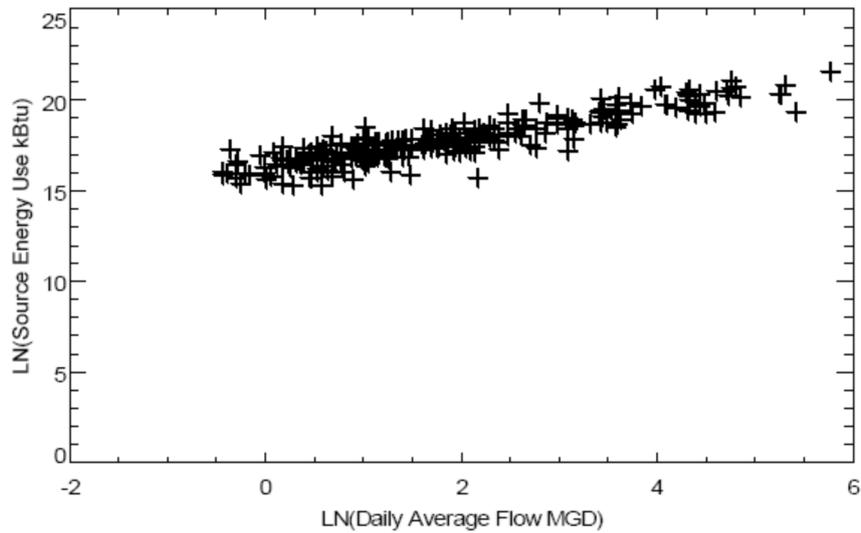
Para cada uno de los procesos analizados, se utilizó la información recibida de las encuestas remitidas a los explotadores. A título de ejemplo, y por el interés que pudiera tener como guía, en el Anejo 1 se incluye la ficha correspondiente a los sistemas de depuración.

La información se desagregó en variables para facilitar su análisis: 11 variables para caracterizar la carga de contaminación (caudal diario y de diseño, porcentaje de caudal de procedencia industrial, concentraciones en el agua bruta y efluente tratado de la demanda biológica de oxígeno, la demanda química de oxígeno y los sólidos suspendidos totales, factor de carga caudal), 23 para identificar los procesos seguidos en el tratamiento del agua residual en la planta depuradora, 9 para clasificar las depuradoras según el tipo de tratamiento utilizado, 5 parámetros para la red de alcantarillado, 15 relacionados con la energía utilizada y 12 sobre cuestiones de tipo general, en total 75 fueron las variables discretizadas.

En un primer análisis se observó la fuerte correlación de la energía con el caudal tratado por la planta, capaz por sí solo, de explicar el 82% del consumo de energía, (ver Figura 2). En esta figura se representa logarítmicamente el caudal en millones galones por día (1 MGD = 3,787 m<sup>3</sup>/d), y la energía primaria en BTU, unidad inglesa de energía (1 kBTU = 0.293 kWh).



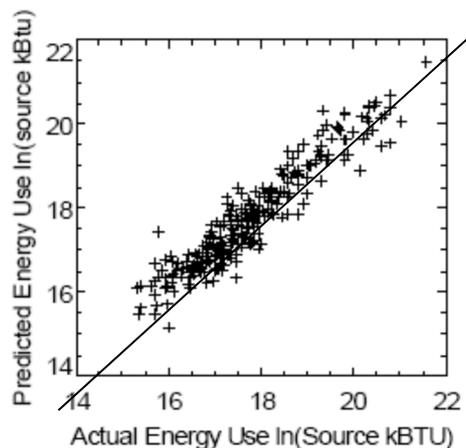
Figura 2. Relación consumo de energía y caudal tratado.



Al modelo de correlación obtenido de una sola variable (el caudal tratado) se le añadió una variable adicional de las recopiladas en la encuesta y se analizó sus significancia estadística con la prueba t de student. Se descartaron aquellas variables con valor inferior a 2 en la prueba por considerarlas poco significativas, quedando 32 parámetros candidatos para construir el modelo de ajuste. Finalmente, seis fueron los parámetros seleccionados como más significativos: caudal de trabajo, relación entre caudal medio y nominal, DBO del agua bruta y del efluente, eliminación de nutrientes como objetivo de calidad y existencia, o no, de filtro percolador. En la elección de los parámetros se tuvo en cuenta que estos parámetros fueran exigencias externas impuestas al explotador, dejando de lado la variabilidad debida a las decisiones tomadas por el diseñador o el explotador del sistema. Con el modelo ajustado (ver ecuación 1) se logró explicar el 89% de la energía consumida en la instalación, véase en la Figura 3 el ajuste obtenido con la representación logarítmica de energía utilizada y predicha por el modelo.

Ecuación 1 
$$\text{LN(Energía kBtu/yr)} = 15.8741 + 0.8944 \cdot \text{LN(caudal medio influente MGD)} + 0.4510 \cdot \text{LN(DBO influente mg/l)} - 0.1943 \cdot \text{LN(DBO efluente mg/l)} - 0.4280 \cdot \text{LN(Caudal Medio / Caudal de diseño)} - 0.3256 \cdot \text{LN(Filtro percolador? 0 or 1)} + 0.1774 \cdot \text{LN(Eliminación de nutrientes? 0 or 1)}$$

Figura 3. Relación entre la energía usada y la predicha por el modelo.





Una vez ajustado el modelo, se siguió la misma metodología que emplea la United States Environmental Agency (EPA); ENERGY STAR, en benchmarking energético de edificios. Esta metodología permite la comparación entre instalaciones, dando una idea de la distancia que las separa de la media y de aquellas otras que podrían considerarse como ideales por su reducida intensidad energética. Como resultado final asigna a cada instalación una puntuación entre 1, la peor, y 100, la mejor, que corresponde con el percentil en que se situaría a la vista del conjunto de instalaciones analizadas.

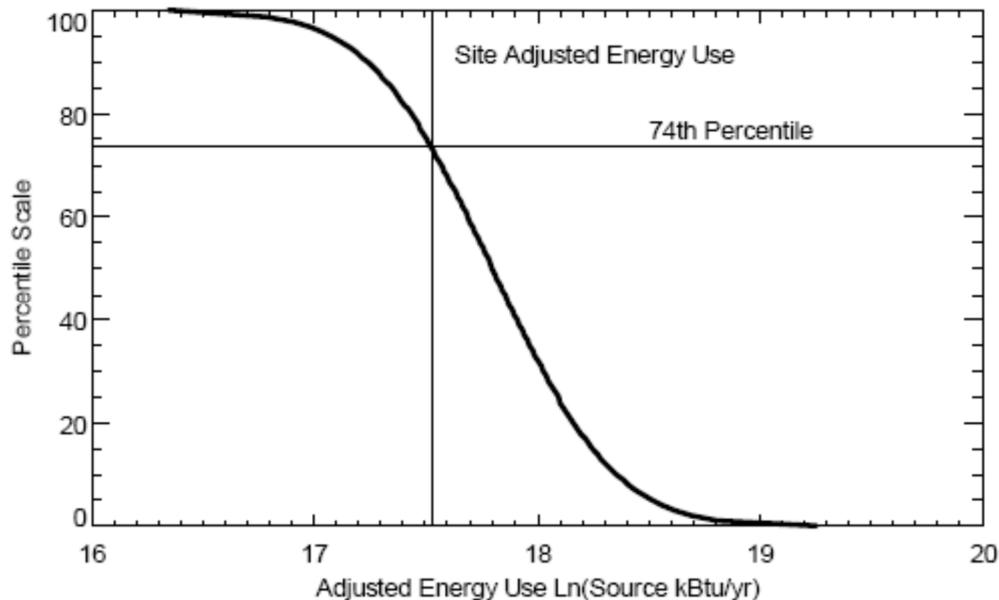
La puntuación otorgada a las plantas se realiza en base al consumo energético ajustado. Este consumo energético se calcula dividiendo el consumo real entre un factor de ajuste (ver ecuación 2). Este factor de ajuste tiene en cuenta la diferencia entre el consumo energético del tipo de plantas analizado y el consumo energético medio de todas las instalaciones (ver ecuación 3).

Ecuación 2 Consumo Ajustado = Consumo real /Factor de ajuste

Ecuación 3 Factor de ajuste = Consumo predicho por el modelo para este tipo de instalaciones / consumo ajustado medio total

De este modo, siguiendo el ejemplo del estudio, una planta con una puntuación de 74 indica que se situaría en el percentil 74, (ver Figura 4) y haciendo uso de la información que se aporta se puede valorar cómo variaría su puntuación frente a ahorros de energía. En el caso visto una reducción del consumo del 3% supondría pasar al percentil 75, mientras que se precisaría un ahorro del 26% para subir al 90.

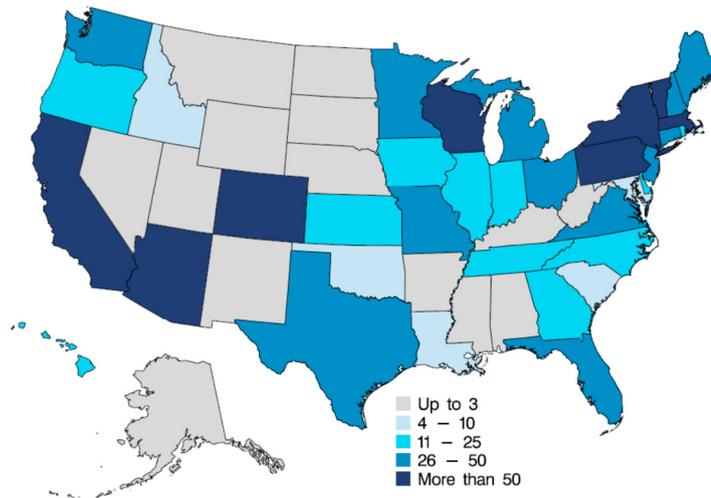
Figura 4. Relación entre la energía usada y el percentil.



Esta metodología de análisis (EPA ENERGY STAR Portfolio Manager) en plantas de tratamiento de aguas residuales está ganado protagonismo en Estados Unidos. En 2013, según datos publicados por ENERGY STAR (<http://www.energystar.gov/datatrends>) eran 1.783 las instalaciones que realizaban este tipo de benchmarking, con un caudal tratado de 16.8 billones de galones por día, siendo la puntuación media obtenida de 48. En la Figura 5 se muestra la implantación por Estados.

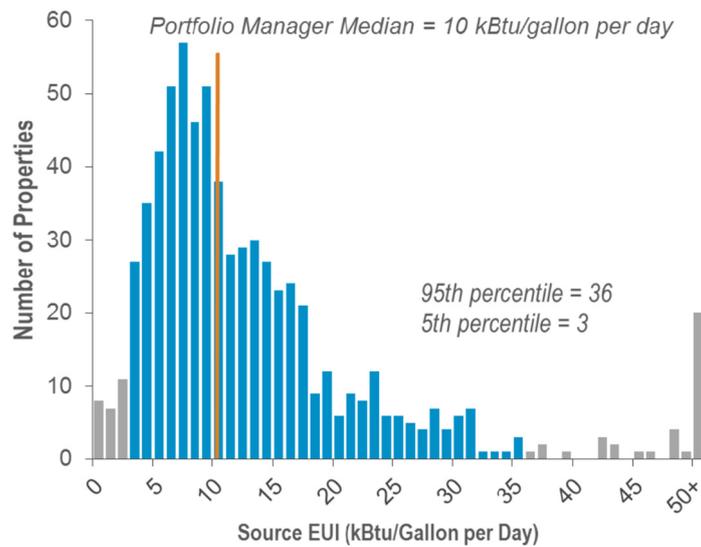


Figura 5. Instalaciones por estado en las que realiza benchmarking energético.



La intensidad de uso de energía primaria se situaba ente 5 y más de 50 kBTU/gallon por día (1 kBTU/GPD = 0.212 kWh/m<sup>3</sup>), siendo la mediana de 10 kBTU/GPD, (ver Figura 6).

Figura 6. Relación número de instalaciones y uso de energía primaria.



Las variables utilizadas en el modelo son las ya descritas anteriormente, a las que se une las necesidades de refrigeración o calefacción necesarias en algunas instalaciones para conseguir los objetivos de tratamiento deseados. La Figura 7 muestra los rangos de variación observados en las variables utilizadas.

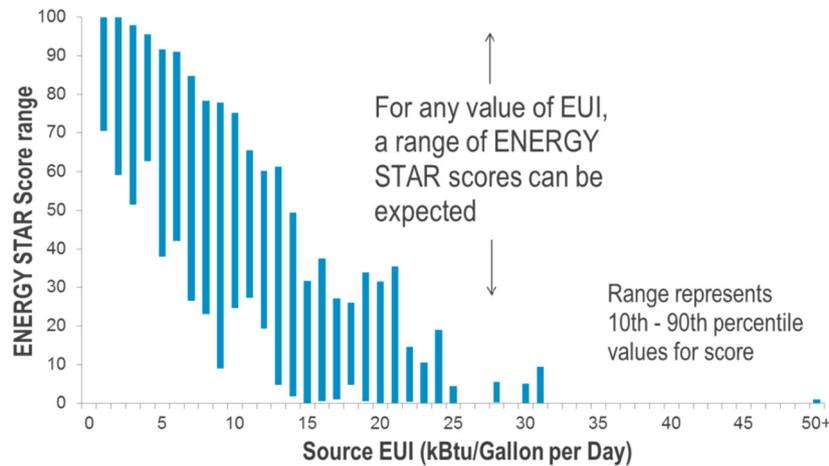


Figura 7. Rango de variación de las variables utilizadas.

		Range of Values		
Property Characteristic	5th percentile	Median	95th percentile	
Influent Flow (MGD)	0.2	3	74	
Influent Biological Oxygen Demand (mg/L)	102	200	391	
Effluent Biological Oxygen Demand (mg/L)	1	5	20	
Plant Load Factor (%)	25	60	100	
Trickle Filtration?		13% say yes		
Nutrient Removal?		57% say yes		
Heating Degree Days	928	5,343	7,877	
Cooling Degree Days	223	910	4,243	

Un interesante gráfico muestra la diferencia de puntuación que puede darse en distintas instalaciones con igual intensidad de uso de energía, (ver Figura 8). Esta variación se debe a que la puntuación se otorga en función del consumo de energía ajustado, que tiene en cuenta además del consumo de energía, el tipo de instalación, el caudal tratado y otra serie de factores ya comentados.

Figura 8. Relación entre la energía primaria consumida y la puntuación obtenida en distintas instalaciones.





## 2.3 Casos de interés en el contexto nacional

En este apartado se presentan algunos estudios relevantes desarrollados en España que por su proximidad geográfica, normativa de aplicación, similitud socioeconómica y tratamientos aplicados puede resultar de interés su comparación con los resultados que se obtengan en las instalaciones del Canal Isabel II. Los estudios en cuestión son:

- Sala L. (2007) Balances energéticos del ciclo del agua y experiencias de reutilización planificada en municipios de la Costa Brava. Seminario Internacional Agua, Energía y Cambio Climático. Valencia.
- Murgui M., Cabrera E., Pardo M., Cabrera E. Jr., (2009). Estimación del consumo de energía ligado al uso del agua en la ciudad de Valencia. Primeras Jornadas Ingeniería del Agua. Centro de Estudios Hidrográficos. Madrid.
- IDAE (2010). Estudio de Prospectiva. Consumo energético en el sector del agua.
- Martínez F.J. (2011). Estudio de la huella energética del abastecimiento urbano de agua de la provincia de Almería. Trabajo de Investigación del Máster Agua y Medio Ambiente en Áreas Semiáridas (AQUARID).
- Hardy, L.; Garrido, A. & Juana, L. (2012). Evaluation of Spain's Water-Energy Nexus. International Journal of Water Resources Development, 28(1), Special Issue: Water Policy and Management in Spain. Taylor & Francis, Leiden, the Netherlands.

### 2.3.1 Balances energéticos del ciclo del agua y experiencias de reutilización planificada en municipios de la Costa Brava.

En su ponencia en el Seminario Internacional Agua, Energía y Cambio Climático, Lluís Sala ofrece información sobre consumo de energía en la gestión del agua potable extraída de 29 fuentes de agua distintas, incluyendo: captación/extracción, potabilización y distribución (ver Tabla 14).

Tabla 14. Intensidad energética del abastecimiento en municipios de la Costa Brava.

<b>INTENSIDAD ENERGÉTICA MUNICIPIOS COSTA BRAVA</b>	<b>Captación/extracción, potabilización y distribución kWh/ m<sup>3</sup></b>
Agua superficial - transporte a cortas distancias (< 10 km)	0.0002-0.37
Agua superficial - transporte a largas distancias (> 10 km)	0.15-1.74
Agua subterránea - acuíferos locales	0.37-0.75
Agua subterránea - acuíferos lejanos	0.60-1.32
Desalación (incluye distribución)	4.94-5.41

Sobre el consumo de energía en la gestión del agua residual aporta datos provenientes de 18 estaciones depuradoras de aguas residuales que incluyen: recolección, transporte y tratamiento biológico (ver Tabla 15).



Tabla 15. Intensidad energética del saneamiento en municipios de la Costa Brava.

<b>INTENSIDAD ENERGÉTICA MUNICIPIOS COSTA BRAVA</b>	<b>Recolección, transporte y depuración, kWh/ m<sup>3</sup></b>
Fangos activados convencionales	0.43-1.09
Aireación prolongada	0.49-1.01
Lagunaje convencional	0.05

Respecto al consumo de energía en la gestión del agua regenerada, la información procede de 11 instalaciones. Los ratios no incluyen el transporte hasta la planta de regeneración (estos figuran en el apartado de depuración), y no se dispone de información, en todos los proyectos manejados, sobre los consumos de distribución hasta el usuario (ver Tabla 16).

Tabla 16. Intensidad energética en instalaciones de agua regenerada en municipios de la Costa Brava.

<b>INTENSIDAD ENERGÉTICA MUNICIPIOS COSTA BRAVA</b>	<b>Tratamiento regeneración, kWh/ m<sup>3</sup></b>
Humedales artificiales	0.00
Desinfección (Cloro o UV)	0.0001-0.16
Filtración (filtros de lecho pulsado) + desinfección (UV + cloro)	0.18
Filtración directa (filtros cerrados multicapa) + desinfección (UV + cloro)	0.50-1.21
Coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección (UV + cloro)	0.20-0.63

### 2.3.2 Estimación del consumo de energía ligado al uso del agua en la ciudad de Valencia.

Siguiendo los pasos dados en California, Murgui et al. (2009) evaluaron la intensidad energética ligada al ciclo urbano del agua en la ciudad de Valencia. Valencia y su área metropolitana reciben el agua superficial de los ríos Turia y Júcar tras su potabilización en las plantas de Manises y Picassent. Ambas instalaciones siguen el esquema clásico de tratamiento compuesto por: desbaste, coagulación-floculación y sedimentación, filtración en medio granular, desinfección y tratamiento de los fangos producidos. Respecto a la depuración de las aguas residuales son cuatro las plantas que tratan los efluentes urbanos que se producen: Pinedo I y II, Conca Carraixet y Quart-Benàger. Estas depuradoras disponen de tratamiento biológico de fangos activados y la línea de fangos cuenta con digestión anaerobia. Los resultados obtenidos ofrecen una intensidad energética media del ciclo urbano de 1.124 kWh/m<sup>3</sup>. Este valor es muy similar al obtenido en la zona norte de California (1.04 kWh/m<sup>3</sup>).

En este caso, la desagregación ofrecida por los autores del trabajo para los distintos procesos se muestra en la Tabla 17.



Tabla 17. Intensidad energética del ciclo urbano en Valencia

INTENSIDAD ENERGÉTICA VALENCIA	kWh/ m <sup>3</sup>
Captación, bombeo, transporte, potabilización y distribución	0.13-0.31
Rebombeo	0.16
Drenaje	0.05
Depuración	0.1-0.54
Emisario	0.05
Transporte aguas reutilizadas	0-0.23
Tratamientos terciarios	0.2

La horquilla dada para la captación, bombeo, transporte, potabilización y distribución se debe a que una de las potabilizadoras, Manises, se sitúa a mayor cota topográfica que la otra, precisando de un bombeo adicional de 15 m.c.a. Cabe indicar que en Valencia el umbral de presión de servicio de la red de distribución es de 25 m.c.a., por lo que para atender las viviendas en algunos edificios se precisan rebombes adicionales estimados para el conjunto de la ciudad en 0.16 kWh/m<sup>3</sup>.

El ratio de drenaje no ha podido ser determinado y el valor ofrecido corresponde con una estimación. La intensidad energética en las depuradoras incluye tanto la energía eléctrica tomada de la red como la obtenida de la cogeneración del biogás producido por los fangos. El valor de 0.10 kWh/m<sup>3</sup> corresponde con Pinedo II en la que únicamente incluye un tratamiento primario. El desglose por plantas depuradoras obtenido, se incluye en la Tabla 18.

Tabla 18. Intensidad energética en las EDAR del área metropolitana de Valencia.

INTENSIDAD ENERGÉTICA DEPURACIÓN, kWh/m <sup>3</sup>	Red	Biogás	Total
Conca Carraixet	0.29	0.11	0.40
Pinedo I	0.20	0.12	0.32
Pinedo II	0.10	0.00	0.10
Pinedo II Ampliación	0.28	0.01	0.28
Quart-Benàger	0.54	0.00	0.54

### 2.3.3 Estudio de Prospectiva. Consumo energético en el sector del agua. Instituto para la Diversificación de la Energía (IDAE)

El Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) ha realizado a través de la Fundación OPTI (Observatorio de Prospectiva Tecnológica Industrial) un estudio de prospectiva que analiza la interdependencia entre agua y energía en España. Por la falta de datos estadísticos o inventarios lo suficientemente detallados o por la heterogeneidad de los datos, la estimación se limitó a la desalación y a la depuración urbana. El resumen ejecutivo del documento es de gran interés, incluyéndose a continuación las principales conclusiones.

Respecto a la desalación, dice: "El resultado de la estimación es que la desalación, que produce 1.5-2 hm<sup>3</sup>/año de agua dulce, es responsable de aproximadamente el 1% del consumo energético nacional. Mientras que las instalaciones modernas de ósmosis inversa consumen algo más de 3.5 kWh/m<sup>3</sup>, las más antiguas pueden tener consumos de unos 5 kWh/m<sup>3</sup> o superiores."



En cuanto a la depuración, dice: "La depuración de los 3,000 hm<sup>3</sup>/año de aguas residuales urbanas, por su parte, conlleva otro 1% del consumo energético nacional. Existe una gran diferencia entre la concepción tecnológica de las depuradoras pequeñas y las grandes. Las depuradoras pequeñas y de medio tamaño suelen carecer de sistemas de control de la aireación. Además, el diseño, basado en la robustez mecánica, implica un cierto sobredimensionamiento de equipos electromecánicos. Por ello, el consumo unitario en tales depuradoras es relativamente elevado. En grandes depuradoras, se optimiza el diseño, el dimensionamiento y el control para lograr consumos energéticos ajustados. En tales plantas, se pueden obtener valores de 20-30 kWh/(h.e.año), mientras que se estima que la media para el parque de depuradoras en España está en torno a los 50 kWh/(h.e.año). Se estima que la optimización energética de las depuradoras existentes puede significar una reducción en el consumo del 17.5%. El mayor impacto se podrá lograr en las pequeñas plantas mediante la implantación de sistemas de control del bombeo y la aireación y en modificaciones conceptuales en el pretratamiento."

El estudio ofrece ratios de consumo desagregados por tipos de tratamiento y tamaño del municipio que resultan de gran valor para caracterizar la gran variabilidad que se observa en el conjunto nacional

Las unidades de tratamiento estudiadas, diferenciando entre la línea de agua y de fangos, han sido:

- Línea de agua: desbaste, bombeo, desarenado, fosa séptica, fosa séptica + filtro biológico, depuradora compacta, biodiscos, SBR, aireación prolongada (desnitrificación), tratamiento primario, fangos activados convencional (desnitrificación).
- Línea de fangos: eliminación directa, espesado, deshidratación, digestión anaerobia.

Las potencias unitarias, expresadas en W/he, de los principales elementos de una planta depuradora, diferenciadas por tamaño de municipio se muestran en la Tabla 19



Tabla 19. Potencia unitaria (W/h.e.) de los principales elementos de una planta depuradora.

Tamaño del municipio	< 101	101 500	501 1.000	1.001 2.000	2.001 3.000	3.001 5.000	5.001 10.000	10.001 20.000	20.001 30.000	30.001 50.000	50.001 100.000
<b>Línea de agua</b>											
Bombeo	0.06	0.10	0.10	0.13	0.13	0.13	0.16	0.18	0.21	0.21	0.21
Motores y bombas desbaste	1.80	2.20	2.10	1.00	0.70	0.70	0.40	0.20	0.20	0.15	0.12
Motores y bombas desarenado			2.50	1.20	0.80	0.80	0.40	0.25	0.25	0.25	0.16
Motores y bombas primario											
Fosa séptica											
Fosa séptica + filtro biológico											
Compacto aeración extendida	30.0	20.0	6.70								
Aireación biodiscos		3.30	1.80								
Aireación extendida mecánica				9.50	6.70	6.50	6.20	5.00	4.70	4.70	4.70
Aireación extendida con soplantes				9.50	6.70	6.50	6.20	5.00	2.88	2.88	2.88
Fangos activos											
Aireación FA con desnitrificación											3.45
Agitación y retorno de fangos FA			5.70	1.60	1.30	2.00	1.80	1.50	0.90	0.80	0.40
Agitación y retorno de fangos desnitrificación											0.48
Decantación y bombeo fangos				0.40	0.32	0.25	0.25	0.14	0.12	0.08	0.05
Tratamiento terciario				0.52	0.42	0.33	0.33	0.18	0.16	0.10	0.07
<b>Línea de fangos</b>											
Espesador gravitacional		0.20	0.10	0.05	0.03	0.02	0.15	0.10			
Espesador mecánico									0.20	0.15	0.10
Eliminación Directa (humedo)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00						
Deshidratación sacos filtrantes			0.40	0.32	0.22						
Centrifugado						0.60	0.60	0.75	0.50	0.40	0.25
Digestión anaerobia y cogeneración											



Las potencias totales obtenidas en función del tamaño del municipio por habitante equivalente se muestran en la Tabla 20.

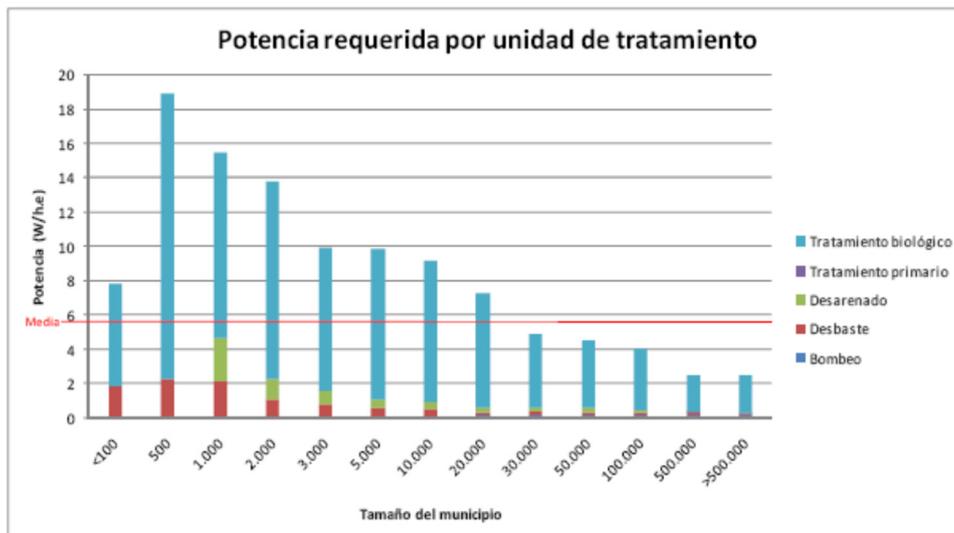
Tabla 20. Potencias por habitante (W/h.e.) de una planta depuradora en función de su tamaño.

Tamaño municipio, h.e.	Potencia (W/h.e.)
< 101	6.4
101 - 500	19.0
501 - 1,00	15.8
1,001 - 2,000	14.0
2,001 - 3,000	10.1
3,001 - 5,000	10.5
5,001 - 10,000	10.0
10,001 - 20,000	8.1
20,001 - 30,000	5.6
30,001 -50,000	5.1
50,001 - 100,000	4.4
100,000 -500,00	2.5
> 500, 000	2.4
<b>Total</b>	<b>5.6</b>

Siendo la media nacional de la potencia necesaria para la depuración de las aguas residuales urbanas de 5.6 W/h.e. que equivale a un consumo energético de 49 kWh/(h.e. año) o 0.67 kWh/m<sup>3</sup>.

La potencia requerida por unidad de tratamiento según el tamaño poblacional se muestra en la Figura 9.

Figura 9. Potencia requerida por unidad de tratamiento para distintos tamaños de EDAR.



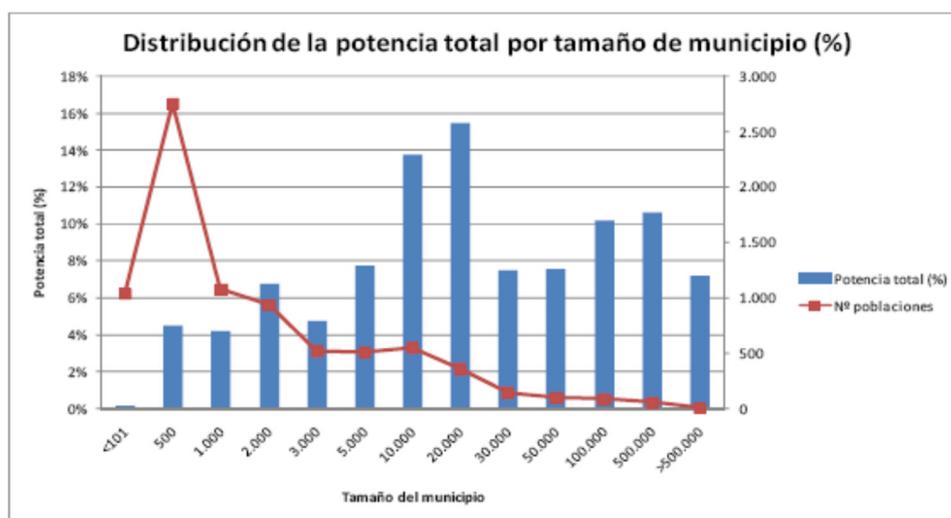


A la vista de estos resultados, el estudio realiza unas interesantes consideraciones:

- Las depuradoras para poblaciones de menos de 100 h.e. normalmente se operan por gravedad y una parte relevante carece de depuración biológica aerobia. Por ello, el consumo por habitante en este rango es bajo.
- En depuradoras pequeñas el peso del desbaste y desarenado en el consumo energético de la depuradora es relativamente grande. La explicación es que el correcto funcionamiento de estos equipos requiere de una potencia mínima de los motores y bombas, con el fin de evitar malfuncionamientos debido a atascos (robustez). El diseño, por tanto, no guarda una relación directa con el tamaño de la instalación, sino que se parte de una potencia mínima.
- En depuradoras pequeñas, la aireación se suele sobredimensionar. Ello se debe por una parte a los requisitos de robustez, similares a los del pretratamiento. Por otra, se emplea el sistema de aireación para la doble función de aireación y mezcla, a pesar de ser energéticamente ineficiente.
- El diseño de una depuradora se basa exclusivamente en parámetros de proceso y de ingeniería mecánica (robustez). No se realiza una evaluación coste/beneficio energético. De hecho, el ejercicio realizado en el marco de este estudio ha significado una cierta revelación, sobre la magnitud de las ineficiencias energéticas y, en consecuencia, de las oportunidades de mejora.

La distribución de la potencia total por tamaño de municipio se aprecia en la Figura 10.

Figura 10. Distribución de la potencia total por tamaño de municipio (%).



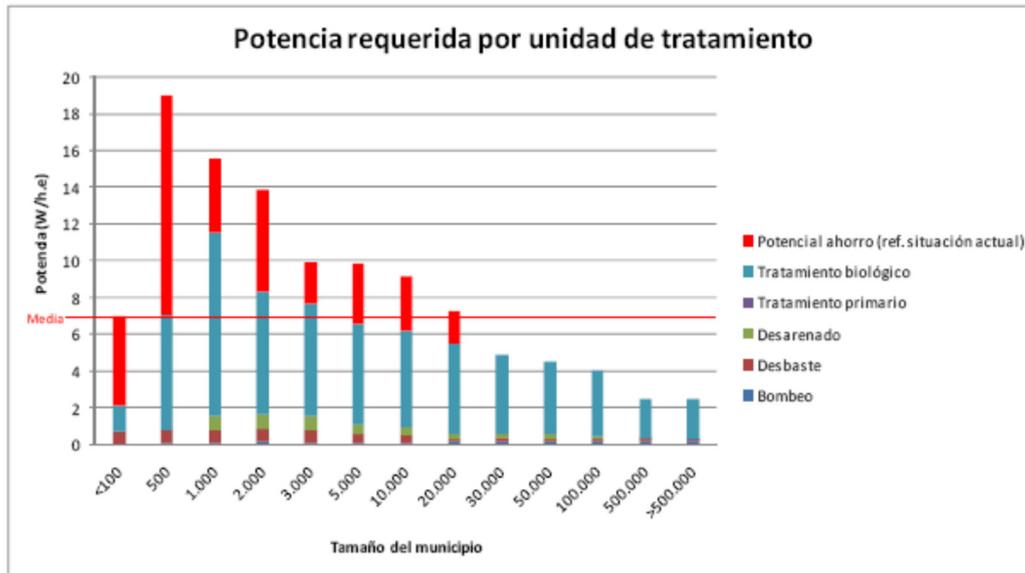
Según el estudio:

- Se observa que el 28% de la potencia total está instalada en municipios de menos de 5,000 habitantes que conforman el 84% del número total de municipios. En esta franja además se encuentran las depuradoras con equipamiento sobredimensionado por razones de robustez y simplificación del proceso.
- El 44% de la potencia está instalada en depuradoras de 5,000–50,000 habitantes, con el 14% del número de municipios. Estas depuradoras generalmente carecen de sistemas de control de la aireación, lo que se traduce en elevados consumos.
- El 28% restante de la potencia instalada se encuentra en depuradoras grandes (<50,000 h.e.), con consumos unitarios más ajustados.



A la vista de estos resultados se estima que implantando medidas, el ahorro energético global podría ser del 17.5%, con una mayor incidencia en las plantas de menor tamaño. Así, el consumo unitario actual de 5.6 W/h.e. (49 kWh/m<sup>3</sup>·año) se podría reducir en 0.98 W/h.e. (8.6 kWh/m<sup>3</sup>·año), (ver Figura 11).

Figura 11. Potencia requerida por unidad de tratamiento.



### 2.3.4 Estudio de la huella energética del abastecimiento urbano de agua de la provincia de Almería.

El trabajo de investigación realizado tiene por objeto la determinación de los consumos de energía eléctrica asociados al abastecimiento urbano de agua (captación, potabilización y distribución). El estudio se extendió a 102 municipios de la provincia de Almería, a los que se les remitió una encuesta de petición de información detallada. Los resultados fueron analizados con mayor grado de detalle en las poblaciones de más de 5.000 habitantes (21 municipios).

El volumen total de recursos destinados al abastecimiento urbano de la provincia ascendió durante 2010 a 69.18 hm<sup>3</sup>, de los cuales 49.81 hm<sup>3</sup> (72%) procedían de captaciones de aguas subterráneas, 2.70 hm<sup>3</sup> (4%) de aguas superficiales, 9.41 hm<sup>3</sup> (14%) de plantas desaladoras y 7.26 hm<sup>3</sup> (10%) de transferencias externas, en este caso correspondientes en su totalidad al trasvase del Negratín.

El consumo de energía eléctrica en 2010 asociado al abastecimiento urbano ascendió en esa provincia a 102.34 GWh, lo que arroja un ratio de intensidad energética de 1.48 kWh/m<sup>3</sup> de agua captada, con un rango que oscila entre 0.01 y 5.44 kWh/m<sup>3</sup>. Desagregando en función de la procedencia de los recursos se obtienen los datos mostrados en la Tabla 21.



Tabla 21. Intensidad energética en el abastecimiento urbano de Almería.

<b>INTENSIDAD ENERGÉTICA ABASTECIMIENTO URBANO ALMERÍA</b>	<b>Captación, potabilización y distribución, kWh/m<sup>3</sup></b>
Captaciones subterráneas	0.94
Desalación	4.50
Transferencia externa (trasvases)	2.24
<b>Global</b>	<b>1.48</b>

El trabajo también realiza una aproximación al consumo del ciclo urbano estimando los ratios energéticos del saneamiento, con los resultados mostrados en la Tabla 22.

Tabla 22. Intensidad energética en el saneamiento urbano de Almería.

<b>INTENSIDAD ENERGÉTICA SANEAMIENTO URBANO ALMERÍA</b>	<b>kWh/m<sup>3</sup></b>
Alcantarillado	0.05
Depuración	0.53
Vertido	0.05
<b>Global</b>	<b>0.63</b>

Con estos valores el consumo global de energía eléctrica ligado al ciclo urbano del agua se sitúa en el 4.2% del total provincial.

### 2.3.5 Evaluation of Spain's Water-Energy Nexus

Este trabajo aporta, a partir de datos recopilados en otros estudios, una estimación del consumo global de energía en los usos del agua en España (urbano, industrial y agrícola) (ver Tabla 23), y cifra en un 3.1% el consumo eléctrico del sector urbano respecto al total nacional, con un volumen de agua captada para uso urbano de 5,037 Hm<sup>3</sup>.



Tabla 23. Consumo global de energía en el ciclo urbano en España

CONSUMO GLOBAL ENERGÍA CICLO URBANO EN ESPAÑA	Volumen agua, Hm <sup>3</sup> /año	Electricidad GWh/año
Suministro y potabilización		
Urbano	4,343	3,182
Desalación	694	2,275
Distribución		
Residencial	2,540	440
Comercial	833	144
Municipal y otros	359	62
Saneamiento		
Alcantarillado	3,788	189
Depuración	2,842	1,454
Reutilización (incluye distribución)	1,510	887
Total		8,633
Consumo España		279,392
% Consumo Urbano / Total España		3.1 %

Con estos datos se puede hacer una estimación de la intensidad energética global y para cada uno de los procesos que integran el ciclo urbano del agua. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 24.

Tabla 24. Intensidad energética en el ciclo urbano.

INTENSIDAD ENERGÉTICA CICLO URBANO	kWh/m <sup>3</sup>
Suministro y potabilización	1.08
Distribución	0.17
Alcantarillado	0.05
Depuración	0.51
Reutilización (incluye distribución)	0.59
<b>Total</b>	<b>1.71</b>

Asimismo, tomando como referencia distintas fuentes documentales, ofrece un rango de variación de la intensidad energética ligada al ciclo urbano del agua en España, (ver Tabla 25).

Tabla 25. Rango de variación de la intensidad energética en el ciclo urbano.

INTENSIDAD ENERGÉTICA CICLO URBANO, kWh/m <sup>3</sup>	Mínimo	Medio	Máximo
Captación y transporte	0	0.21	2.10
Potabilización	0.11	0.57	4.67
Distribución	0.12	0.21	0.22
Depuración	0.41	0.53	0.61
Reutilización y transporte	0.32	0.59	0.85
Vertido	0	0.05	0.11



## 2.4 Conclusiones del estado del arte del nexo agua-energía.

El repaso a las referencias nacionales e internacionales evidencia la importancia que ha adquirido la evaluación del uso de la energía en el ciclo urbano del agua. Probablemente, por su impacto a nivel internacional, el estudio pionero presentado por el Estado de California en 2005 (Klein et al., 2005) marcó una seria preocupación por esta cuestión al estimar que el 19% de la energía usada en ese Estado estaba asociada al uso del agua, ya sea en la agricultura, comercio, industria o viviendas. Fijando la atención únicamente en el ciclo urbano del agua (suministro, potabilización, alcantarillado, depuración y reutilización), y dejando de lado los usos finales (rebombes en edificios y agua caliente sanitaria, mayoritariamente), el consumo de energía eléctrica de este sector se evaluaba en el 3.8% del total del Estado. Estudios posteriores, extendidos al conjunto de Estados Unidos, ratificaban que el consumo de electricidad se situaba en el 3% del total nacional y que el coste de operación de las instalaciones, asociado a la energía, era del 10% del total. Evidentemente estos valores pueden variar significativamente de unos países a otros, y así Naciones Unidas estima que los gastos de electricidad oscilan entre el 5 y el 30% de los costes totales de operación en los servicios de agua y alcantarillado en todo el mundo, pudiéndose alcanzar en algunos casos un 40%.

A raíz de este estudio se han publicado bastantes trabajos en los que se analiza la intensidad energética de las distintas fases del ciclo del agua. La Tabla 26 resume los valores recogidos en los distintos estudios.

En una primera instancia, conocer los ratios de intensidad energética entre distintas instalaciones permitirá establecer rangos de variabilidad para cada proceso vinculado al ciclo urbano del agua en relación a determinadas características o exigencias, ya sea por ejemplo, el tipo de tratamiento adoptado o la calidad a obtener en el agua tratada, pero será insuficiente para valorar la 'eficiencia' o 'rendimiento' de ese proceso, ya que la gran variabilidad de los parámetros que interviene en cada sistema hace muy difícil la comparación directa entre instalaciones. Para poder realizar esa comparación resulta de gran interés el estudio realizado por la AWWA Research Foundation (Carlson y Walburger A. 2007), en el que, tras presentar un modelo explicativo del uso de la energía en cada fase del ciclo urbano del agua ligado a los parámetros que se consideran en cada caso más significativos, se sigue la metodología que utiliza la United States Environmental Agency (EPA); ENERGY STAR para el benchmarking energético de edificios. Esta metodología consiste en comparar el consumo energético ajustado de cada instalación y otorgar una puntuación del 1 al 100 en función del percentil en el que se sitúa dicho consumo ajustado respecto del resto de instalaciones. El consumo ajustado se obtiene a partir del consumo energético real y de un factor de ajuste que tiene en cuenta el tipo de instalación, el caudal tratado y la contaminación eliminada entre otros factores.



Tabla 26. Resumen de los valores de intensidad energética en las distintas fases del ciclo urbano del agua.

Referencia	Lugar:	Intensidad energética media (kWh/m <sup>3</sup> )						
		Captación y transporte		Potabilización	Desalación	Distribución	Depuración	Reutilización
Klein et al., (2005)	California	0.04		0.03		0.32	0.66	
Cooley H. and Wilkinson R. (2012)	Estados Unidos	0.029		0.06 - 0.4 <sup>1</sup>	4	0.14	0.37 - 0.61 <sup>1</sup>	
UNESCO (2014)	Distintos países	0.37 <sup>2</sup>	0.48 <sup>3</sup>		2.58 - 8.5		0.62 - 0.87	
Sala L. (2007)	Costa Brava	0.0002 - 0.37 <sup>2</sup>	0.37-0.75 <sup>3</sup>		4.94 - 5.41		0.46 - 1.05	
Murgui et al., (2009)	Valencia					0.16 <sup>4</sup>	0.35 <sup>5</sup>	
IDAE (2010)	España				3.5-5		0.34 <sup>6.1</sup> 0.68 <sup>6.2</sup>	
Martínez F.J. (2011)	Almería		0.94 <sup>3</sup>		4.5		0.53	
Hardy et al., (2012)	España	0.21		0.57 <sup>7</sup>		0.17	0.51	0.59

1 en función del caudal de tratamiento

2 aguas superficiales

3 aguas subterráneas

4 rebombeos

5 obtenido en grandes EDAR

6.1 dato original en Kw/h.e. Calculado asumiendo una dotación de 200 l/h.e. Valor obtenido en plantas grandes.

6.2 dato original en Kw/h.e. Calculado asumiendo una dotación de 200 l/h.e. Valor medio de todas las plantas.

7 incluye desalación



## 3 CARACTERIZACIÓN DE LA HUELLA ENERGÉTICA EN LAS EDAR GESTIONADAS POR CANAL DE ISABEL II.

El objetivo de este apartado es analizar los consumos energéticos de las EDAR, estableciendo relaciones entre dichos consumos y las características de las EDAR y detectando aquellas EDAR que presenten consumos energéticos superiores al resto para proponer actuaciones encaminadas a la reducción de su huella energética. Para la realización del análisis del consumo energético en las EDAR, Canal de Isabel II aportó la siguiente información de las 156 EDAR que gestiona: caudal medio diario, consumo energético y características del influente y efluente correspondientes al año 2015, año de construcción y características de la EDAR (tipo de proceso, existencia de bombeo de cabecera, existencia de tratamiento terciario...).

### 3.1 Metodología

Para la realización del análisis de la huella energética se han clasificado las 156 EDAR gestionadas por Canal de Isabel II en distintos grupos en función de la tecnología de tratamiento. Los grupos considerados han sido los siguientes:

- EDARs con proceso de aireación prolongada: Incluye 102 EDARs. Esta tecnología se caracteriza por la simplificación de los elementos de tratamiento de la EDAR realizando la depuración de las aguas residuales y la estabilización del fango generado en el mismo reactor biológico. Por este motivo esta tecnología prescinde de la decantación primaria y de unidades de proceso para la estabilización del fango.
- EDARs con proceso de fangos activados y digestión aerobia: Incluye 11 EDARs. Esta tecnología se caracteriza por realizar la depuración de las aguas residuales mediante una etapa de decantación primaria y un posterior proceso biológico de fangos activados. La estabilización de los fangos generados en el decantador primario y en el proceso biológico se realiza en un reactor específico por vía aerobia.
- EDARs con proceso de fangos activados y digestión anaerobia: Incluye 25 EDARs. Esta tecnología se caracteriza por realizar la depuración de las aguas residuales mediante una etapa de decantación primaria y un posterior proceso biológico de fangos activados. La estabilización de los fangos generados en el decantador primario y en el proceso biológico se realiza en un reactor específico por vía anaerobia.
- EDARs con proceso de soporte sólido: Incluye 7 EDARs. Esta tecnología se caracteriza por el crecimiento de microorganismos encargados del proceso de depuración sobre la superficie de distintos tipos de soporte.
- EDARs con otras tecnologías: Incluye 11 EDARs

Para cada uno de estos grupos de EDAR se ha realizado un estudio estadístico para establecer las relaciones existentes entre los valores de consumo energético y las características de la EDAR, tales como caudal de tratamiento, existencia de bombeo de cabecera, sistema de aireación utilizado, eliminación de nutrientes, existencia de sistema de cogeneración... Finalmente, se ha realizado una comparación entre los distintos grupos de



instalaciones. Para poder realizar la comparación entre las distintas EDAR se han utilizado los valores de consumo energético por metro cúbico de agua tratada y por kilo de DQO eliminada. Para el grupo de EDARs con otras tecnologías la realización de este análisis estadístico no ha sido posible debido al reducido número de EDARs que presentaba cada tecnología englobada en ese grupo.

En este estudio estadístico se han utilizado distintos tipos de representaciones gráficas y de análisis, como gráficos Box-Whisker, gráficos de distribución empírica acumulada, gráficos de probabilidad normal y gráficos LSD de los análisis de la varianza realizados. A continuación, se explica brevemente en qué consiste y la utilidad de cada uno de ellos. Una explicación más detallada se puede encontrar en Romero y Zúnica (2012).

Gráfico Box-Whisker:

- Es un gráfico basado en cuartiles formado por un rectángulo (Box - caja) y dos brazos (Whisker - bigotes). El rectángulo comprende el 50% de los valores centrales de los datos, y se extiende entre el primer y el tercer cuartil. Dentro del rectángulo se representa la mediana (línea que divide en dos partes al rectángulo). Los brazos se extienden desde el menor hasta el mayor de los valores observados que pueden considerarse normales. Los valores observados que están fuera de los brazos (los que difieren del cuartil más cercano en más de 1.5 veces la extensión del rectángulo), se consideran valores extremos (outliers) y se representan como puntos aislados.
- Permite visualizar la pauta de variabilidad del conjunto de datos analizado, así como detectar valores extremos (outliers) que puedan invalidar las conclusiones de un posterior análisis estadístico, como por podría ser la aplicación de un análisis de la varianza.

Gráfico de la función de distribución empírica acumulada.

- La función de distribución empírica acumulada para un valor concreto del conjunto de datos analizado se define como la proporción de valores que son inferiores o iguales a dicho valor.
- Es un gráfico útil para visualizar la distribución del conjunto de datos analizado, y en este estudio, permite conocer qué porcentaje de EDARs tienen un consumo inferior o igual a un valor dado.

Gráficos de probabilidad normal

- Es un gráfico en el que se representan los valores observados del conjunto de datos analizado frente a los valores que se obtendrían de una distribución normal teórica. Cuando la distribución de los valores observados se aproxima a la distribución normal, los puntos representados en el gráfico tenderán a formar una línea recta. Si los valores observados presentan otro tipo de distribución, aparecerá curvatura en el gráfico.
- Permite conocer si la pauta de variabilidad del conjunto de datos de datos analizado sigue o no una distribución normal. Esto es importante, porque cuando el conjunto de datos analizado se aleja de la distribución normal, los parámetros estadísticos habituales (como la media o la desviación típica) dejan de ser representativos del centro o la dispersión de los datos, y no son útiles para comparar o extraer conclusiones.

Análisis de la varianza (ANOVA)

- Es una técnica estadística que descompone la variabilidad total del conjunto de datos en dos partes: una parte debida al efecto del factor que se está analizando (es decir, una variable que es diferente de un grupo a otro), y otra parte residual, que recoge el efecto de todos los factores restantes. Ambas partes se comparan mediante un test estadístico (un contraste de hipótesis basado en la función de distribución F de Snedecor), para determinar si el efecto del factor analizado es estadísticamente significativo.



- Permite conocer si hay o no hay diferencia estadísticamente significativa entre los valores medios de varios grupos de datos.

Gráfico de intervalos LSD (Least Significance Difference)

- El intervalo LSD se obtiene para cada nivel del factor que se está analizando, aplicando el procedimiento desarrollado por Fisher basado en la t-Student, que tiene en cuenta todos los niveles del factor y permite comparar simultáneamente los valores medios de todos los niveles del factor. Cuando los intervalos se solapan, se puede concluir que no hay diferencias estadísticamente significativas, para el nivel de confianza seleccionado (habitualmente el 95%).
- Permite visualizar gráficamente qué grupos de datos presentan diferencia estadísticamente significativa en su valor medio. Cuando el factor analizado con el ANOVA tiene más de dos niveles, y el resultado del ANOVA indica que el factor es estadísticamente significativo, interesa precisar entre qué niveles del factor hay diferencia estadísticamente significativa, lo cual se puede hacer mediante la representación gráfica de los intervalos LSD.

Todos los análisis estadísticos mostrados en el presente informe se han realizado utilizando la herramienta Statgraphics. Las técnicas aplicadas también se encuentran disponibles en distintos programas de estadística, tales como: SPSS, R o los toolbox de estadística de Matlab.

## 3.2 Análisis energético de las EDAR gestionadas por Canal Isabel II

### 3.2.1 EDAR con sistema de oxidación total

En la actualidad Canal Isabel II gestiona un total de 102 EDAR que incorporan el proceso de oxidación total. En la Tabla 27 se muestra un listado con el nombre de estas EDAR junto el año de construcción, el caudal medio diario tratado, la composición media del agua residual influente y el consumo energético medio diario.

Tabla 27. Listado de EDAR gestionadas por el Canal de Isabel II que incorporan el proceso de oxidación total.

Nombre	Año	Caudal m <sup>3</sup> / día	INFLUENTE					Consumo energético kW·h / día
			DBO <sub>5</sub>	SS	DQO	N	P	
			mgO <sub>2</sub> /l	mg/l	mgO <sub>2</sub> /l	mgN/l	mgP/l	
Aldea del Fresno	1989	1,237.0	150	80	253	44	7.34	226.9
Aoslos	2004	127.9	11	24	45	12	1.10	101.0
Aranjuez Norte	2010	847.1	556	230	639	50	7.38	1,127.2
Arroyo Valenoso	---	---	---	---	---	---	---	497.2
Batres	2005	110.1	347	250	458	44	6.56	414.1
Belmonte de Tajo	2004	187.7	376	276	486	44	6.12	523.9
Berzosa de Lozoya	2012	97.6	22	60	81	18	2.08	258.1
Brea de Tajo	2003	131.5	106	119	228	35	2.70	241.3
Bustarviejo	1993	2,605.9	40	82	80	8	1.44	605.3



Nombre	Año	Caudal m <sup>3</sup> / día	INFLUENTE					Consumo energético kW-h / día
			DBO <sub>5</sub>	SS	DQO	N	P	
			mgO <sub>2</sub> /l	mg/l	mgO <sub>2</sub> /l	mgN/l	mgP/l	
Cabanillas	2015	76.1	132	135	299	49	5.96	---
Cadalso de los Vidrios	2003	1,365.7	146	96	269	37	6.02	411.2
Campo Real	2003	1,157.7	524	302	941	66	9.55	1,289.6
Carabaña	2003	521.9	101	80	213	41	3.91	860.8
Cenicientos	2003	1,381.3	128	83	233	27	4.13	516.9
Chapinería	2004	548.6	243	178	446	55	8.15	552.3
Chinchón	2004	899.5	370	272	483	41	6.24	1,105.6
Cincovillas	2004	77.7	9	29	44	12	1.24	88.2
Cobeña	1993	1,257.6	247	224	509	57	9.11	1,114.6
Colmenar de Oreja	2004	777.4	399	290	503	45	6.32	973.5
Colmenar del Arroyo	2004	707.4	158	97	275	24	4.04	378.7
Colmenarejo Este	2003	505.6	77	225	281	31	7.93	370.0
Colmenarejo Oeste	2004	1,885.4	248	236	512	56	10.73	1,180.3
Conjunta de Ambite	2004	2,688.0	82	91	181	33	3.32	1,201.2
Conjunta de Gascones	2004	694.5	37	93	125	18	2.61	455.6
El Atazar	2004	15.7	29	51	93	25	3.41	54.6
El Espartal	2012	42.0	195	197	430	63	7.80	101.8
El Paraíso	1991	163.3	80	132	194	29	3.69	141.2
El Vellón, El Molar y Pedrezuela	2002	2,066.0	164	174	344	48	6.81	965.0
Estremera	2003	463.9	125	128	238	31	3.79	407.6
Fresnedillas de la Oliva	2004	698.0	256	183	445	57	8.80	389.9
Fuente El Saz	1992	3,827.3	140	193	305	25	6.59	2,013.2
Fuentidueña de Tajo	2004	219.2	250	211	537	67	8.39	490.0
Gandullas	2004	143.4	9	24	42	12	1.09	84.5
Guadalix de la Sierra	1979	2,548.7	83	80	169	27	3.89	804.6
Guatén	2004	6,510.0	378	279	479	43	6.45	4,095.1
Horcajo de la Sierra	2004	77.0	14	31	56	19	1.95	111.8
Horcajuelo de la Sierra	2004	136.3	31	50	105	15	1.70	115.5
Hoyo de Manzanares	1986	1,993.5	47	73	125	16		635.1
La Cabrera	1988	1,378.1	69	87	161	22	3.31	599.9
La Hiruela	2004	24.0	19	50	72	16	1.57	45.9
La Hoya	2003	6.1	345	802	832	39	14.12	40.2
La Mina	1997	441.1	321	324	840	54	7.50	124.3
La Paradilla	2003	6.0	300	531	758	41	11.43	12.0



Nombre	Año	Caudal	INFLUENTE					Consumo energético
			DBO <sub>5</sub>	SS	DQO	N	P	
		m <sup>3</sup> / día	mgO <sub>2</sub> /l	mg/l	mgO <sub>2</sub> /l	mgN/l	mgP/l	kW·h / día
Las Herreras	2003	8.5	113	389	292	16	7.04	41.9
Las Rozas	1992	900.7	249	334	575	69	12.74	713.5
Los Santos de la Humosa	2003	284.4	457	334	854	88	10.78	370.4
Lozoyuela	2004	489.6	37	88	116	22	2.61	341.2
Madarcos	2004	92.7	10	22	40	11	1.00	64.9
Manjirón	2004	174.1	33	60	104	23	3.65	154.8
Meco	2010	1,857.3	527	366	896	62	7.97	2,579.4
Montejo de la Sierra	2004	409.6	10	26	41	9	0.74	293.2
Morata de Tajuña	2005	1,218.9	520	259	622	52	6.95	1,269.5
Navalafuente	1996	906.5	40	47	94	13	1.92	235.8
Navalagamella	2004	528.1	242	167	442	78	11.58	525.1
Navarredonda	2004	142.7	8	18	36	8	0.85	127.8
Navas de Buitrago	2004	89.0	10	20	46	11	1.45	77.5
Navas del Rey	1986	505.2	210	149	382	63	7.36	732.2
Orusco de Tajuña	2004	936.3	67	79	148	23	1.82	518.0
Paredes de Buitrago	2004	55.8	21	57	75	17	1.95	74.3
Patentes Talgo	2002	50.0	449	673	1277	118	23.15	127.3
Peralejo	1998	46.7	1112	2,167	3271	90	17.83	41.7
Perales de Tajuña y Tielmes	2004	4,388.1	51	59	123	21	1.36	2,870.2
Pezuela de las Torres	2004	357.5	104	81	220	45	5.02	298.9
Pinilla de Buitrago	2004	137.3	15	28	60	13	1.23	118.0
Pinosol	2000	46.0	148	177	330	56	9.71	77.1
Piñuecar	2004	149.0	8	18	33	10	1.02	82.8
Pozuelo del Rey	2004	185.4	166	147	351	68	6.49	252.3
Prádena del Rincón	2004	126.0	30	39	78	15	1.61	99.8
Puebla de la Sierra	2004	124.8	30	72	73	11	1.28	123.6
Quijorna	1991	700.8	290	177	521	99	13.18	1,154.0
Ribatejada - Fresno	2003	855.2	76	70	150	27	3.57	490.9
Riosequillo	1990	1,831.6	21	49	51	5	1.03	210.4
Robledillo de la Jara	2012	82.8	19	46	73	16	2.12	229.0
Robregordo	2004	139.3	8	41	36	9	0.86	90.3
Rozas de Puerto Real	2003	374.8	107	71	186	37	4.68	141.0
San Mamés	2004	152.2	12	26	49	12	1.38	158.5
San Martín de Valdeiglesias N	2003	99.1	80	41	141	49	4.68	231.8
San Martín de Valdeiglesias NE	2003	48.0	77	55	134	13	1.58	141.7
Serrada de la Fuente	2004	27.0	21	38	80	23	2.11	60.3



Nombre	Año	Caudal m <sup>3</sup> / día	INFLUENTE					Consumo energético kW-h / día
			DBO <sub>5</sub>	SS	DQO	N	P	
			mgO <sub>2</sub> /l	mg/l	mgO <sub>2</sub> /l	mgN/l	mgP/l	
Serranillos del Valle	2005	1,222.3	355	261	477	41	6.15	884.6
Sevilla la Nueva	2004	1,164.0	459	327	838	94	14.99	1,081.9
Sieteiglesias	2003	155.5	12	26	47	17	1.54	115.8
Somosierra	2004	145.7	10	27	41	9	0.78	93.8
Talamanca del Jarama	2013	1,239.3	140	177	313	31	4.97	968.6
Titulcia	2005	152.0	333	246	455	43	6.08	418.0
Torrelaguna	1988	805.9	357	310	775	85	11.20	845.9
Valdaracete	2004	167.9	71	93	167	34	4.25	305.8
Valdeavero	2004	372.4	269	283	495	53	7.74	201.2
Valdelaguna	2004	287.9	334	240	454	40	6.16	402.5
Valdemorillo	1993	1,524.4	275	200	490	58	11.18	1,604.8
Valdepiélagos	2013	174.9	170	167	375	55	7.04	307.4
Valderrey	2003	54.9	302	397	625	69	12.17	144.7
Valdetorres del Jarama	2013	1,559.2	59	73	136	25	3.72	547.0
Valdilecha	2003	725.3	128	124	270	53	5.05	1,042.7
Venturada	1988	567.6	84	124	222	37	5.69	485.4
Villa del Prado	2001	2,648.0	134	78	237	52	4.44	1,400.2
Villamanrique de Tajo	2004	81.4	206	163	436	70	8.87	190.7
Villamanta	2004	647.5	229	189	408	43	7.08	549.6
Villanueva de la Cañada	1992	3,270.1	275	272	538	64	11.60	2,307.1
Villarejo de Salvanés	2004	1,156.9	239	218	496	64	6.79	1,270.4
Villaviciosa de Odón	2002	5,236.9	178	123	354	54	7.79	3,292.2
Zarzalejo	2003	1,256.2	53	325	226	24.31	5.77	1,003.8

Tal y como se puede observar en la Tabla 27, existe una serie de estaciones depuradoras de aguas residuales (marcadas en rojo) cuyos valores promedio anuales del influente cumplen los requisitos de vertido de DBO<sub>5</sub> y DQO establecidos por la directiva europea CE 91/271. Se trata en su mayoría de EDAR de poblaciones de la Sierra que tratan caudales bajos (< 150 m<sup>3</sup>/día) y en las que la intrusión de aguas provenientes de deshielo provoca una elevada dilución en su carga contaminante. Esta situación no se produce durante todo el año por lo que el proceso de depuración es necesario para cumplir los límites de vertido en todo momento. Dado que gran parte del consumo energético de las estaciones depuradoras se produce en el proceso biológico de eliminación de materia orgánica, los datos de consumo de estas depuradoras no se tendrán en cuenta en el análisis porque no sería necesario dicho tratamiento biológico y su consideración podría desvirtuar las conclusiones del análisis, especialmente en lo relativo al consumo de energía por Kg de DQO eliminada. En el análisis tampoco se tendrán en cuenta las EDAR de Arroyo Valenoso y Cabanillas por no disponer de la información completa requerida.



Puesto que el consumo energético está directamente relacionado con el caudal de tratamiento, y la cantidad de materia orgánica eliminada, a partir de los datos facilitados, se ha calculado el consumo energético normalizado respecto de estas dos variables, obteniendo el consumo en kilovatios por metro cúbico de agua tratada ( $\text{kWh}/\text{m}^3$ ) y en kilovatios por kilogramo de materia orgánica eliminada medida como Demanda Química de Oxígeno – DQO ( $\text{kWh}/\text{Kg}$  de DQO). Estas dos variables se han representado en la Figura 12 para todas las EDARs que incorporan proceso biológico de eliminación de materia orgánica por oxidación total. Como se puede ver en la Figura 12a, hay una serie de estaciones depuradoras que presentan un consumo energético por metro cúbico de agua tratada muy elevado en comparación con el resto (La Hoya, Las Herreras, Batres y El Atazar).

El valor medio de consumo energético específico de todas las EDAR con proceso de oxidación total es  $1.25 \text{ kWh}/\text{m}^3$ . Para visualizar la pauta de variabilidad del consumo energético por metro cúbico de agua tratada en todas estas EDAR, se presenta en la Figura 13a el gráfico Box-Whisker correspondiente a su distribución. Este gráfico Box-Whisker pone de manifiesto claramente la existencia de EDARs que presentan un consumo específico extremadamente elevado (*outliers*, consumos por encima de  $3 \text{ kWh}/\text{m}^3$  marcados con una cruz roja en la figura) en comparación con el resto de instalaciones de este tipo. Esas EDAR son las indicadas anteriormente: Batres, El Atazar, La Hoya y Las Herreras. Además, la Figura 13a también revela que los consumos presentan una distribución con marcada asimetría positiva, que se aleja de la distribución normal.

Para poder conocer qué porcentaje de instalaciones (en tanto por uno) tiene un consumo menor o igual que uno dado, se presenta en la Figura 13b la función de probabilidad acumulada determinada directamente a partir de los datos. En esta figura se observa que el 50% de estas instalaciones tiene un consumo específico inferior a  $0.89 \text{ kWh}/\text{m}^3$  y que el 75% de las instalaciones presenta un consumo específico inferior a  $1.5 \text{ kWh}/\text{m}^3$ .

La Figura 13 muestra la representación probabilística normal del consumo energético por metro cúbico de agua tratada, en la que se aprecia claramente que a partir de  $1.5 \text{ kWh}/\text{m}^3$ , los valores se alejan de la recta roja, que sería la correspondiente a la distribución normal. Debido a la presencia de valores extremos y asimetría positiva, para poder analizar e interpretar bien los resultados, se han utilizado estadísticos robustos (percentiles) y se ha realizado el análisis ANOVA excluyendo los *outliers*.



Figura 12. Consumo energético de las EDARs con proceso de oxidación total por: **(a)** m<sup>3</sup> de agua tratada (kWh/m<sup>3</sup>) **(b)** Kg de DQO eliminada (kWh/Kg DQO)

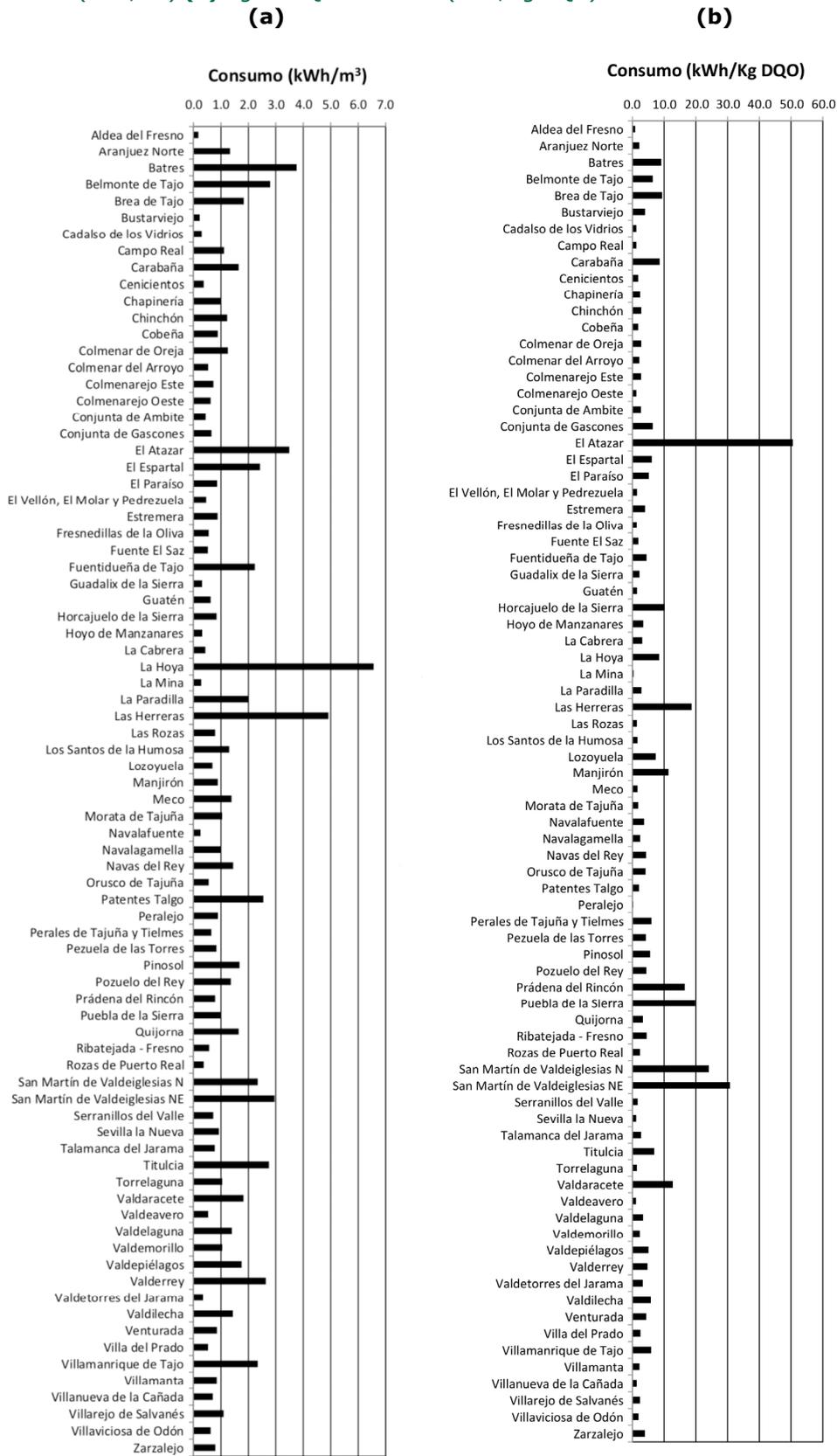
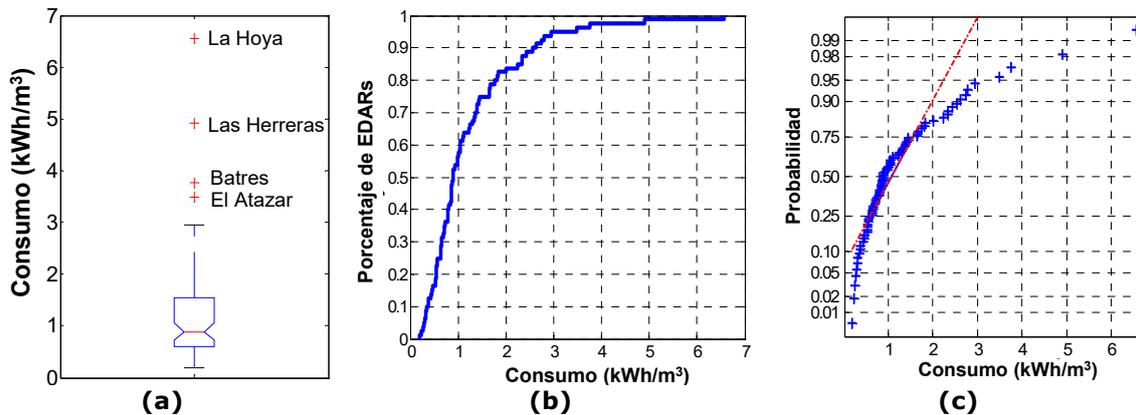


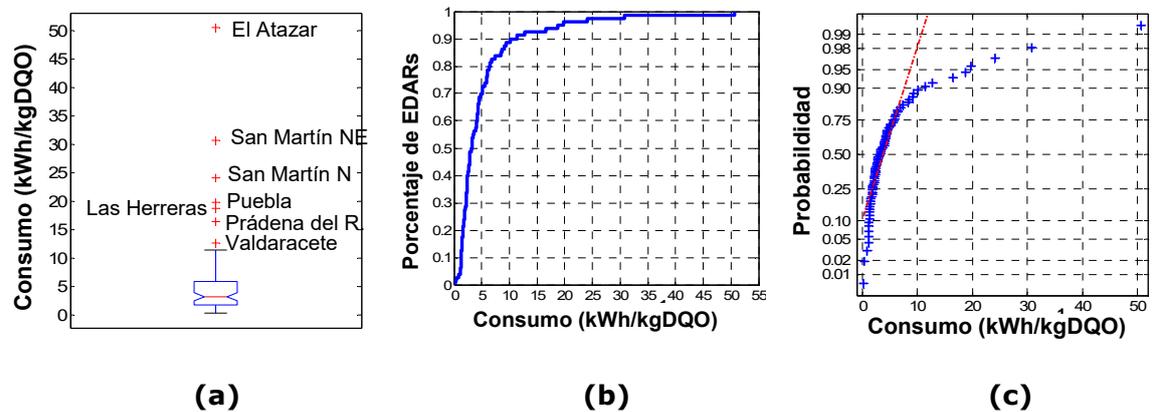


Figura 13. Representaciones estadísticas del consumo energético de las EDARs con proceso de oxidación total por  $m^3$  de agua tratada ( $kWh/m^3$ ): (a) Box-Whisker (b) Función empírica de distribución acumulada y (c) Función de probabilidad normal.



Estos mismos gráficos se han realizado para el consumo energético por kg de DQO eliminada. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 14. Al igual que en el caso anterior existe una serie de estaciones depuradoras con consumos energéticos específicos muy superiores al resto (*outliers*, marcados con una cruz roja en la Figura 14a). Esas EDAR son: El Atazar, Las Herreras, San Martín de ValdeIglesias Noreste, San Martín de ValdeIglesias Norte, Puebla de la Sierra, Prádena del Rincón y Valdaracete. Cabe destacar que las EDAR de El Atazar y Las Herreras son las únicas EDAR que presentan valores muy superiores al resto tanto en consumo energético por metro cúbico de agua tratada como por kg de DQO eliminada.

Figura 14. Representaciones estadísticas del consumo energético de las EDARs con proceso de oxidación total por kilo de materia orgánica eliminada ( $Kwh/kg_{DQO}$ ): (a) Box-Whisker (b) Función empírica de distribución acumulada y (c) función de probabilidad normal.

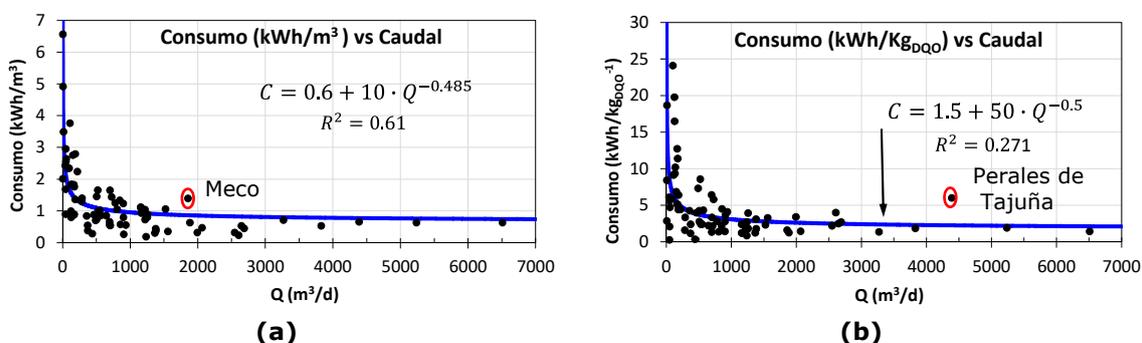


La Figura 15 muestra el consumo energético normalizado tanto por metro cúbico de agua tratada (Figura 15a), como por kilo de materia orgánica eliminada (Figura 15b), frente al caudal de tratamiento de cada EDAR. A la vista de la Figura 15a se observa que el consumo energético por metro cúbico es tanto mayor cuanto menor es el caudal de tratamiento, produciéndose un aumento considerable de dicho consumo para caudales de tratamiento inferiores a  $300 m^3/d$ . Para caudales de tratamiento elevados el consumo se estabiliza en una asíntota en torno a  $0.6 kWh/m^3$ .



En la Figura 15a se observa que los elevados consumos energéticos de 3 de las cuatro EDAR con consumos específicos superiores a los 3 kWh/m<sup>3</sup> (outliers de la Figura 13a) se deben a los bajos caudales de tratamiento. El caudal tratado en las EDAR de El Atazar, Las Herreras y La Hoya es inferior a 16 m<sup>3</sup>/día. Para el caudal tratado en la EDAR de Batres (110 m<sup>3</sup>/día) sería esperable un menor consumo energético específico, por lo que sería conveniente analizar con mayor detalle las causas de su elevado consumo energético. También sería conveniente analizar con mayor detalle la EDAR de Meco (marcada en rojo en la Figura 15a), que tratando un caudal relativamente elevado (1,857 m<sup>3</sup>/día) presenta un consumo energético específico muy superior al resto de instalaciones que tratan caudales similares (1.4 kWh/m<sup>3</sup> de Meco frente a valores inferiores a 0.6 kWh/m<sup>3</sup> del resto de instalaciones). El hecho de que la EDAR de Meco disponga de un tratamiento terciario convencional (tratamiento físico-químico con decantación laminar, filtración por filtro de arena a presión y desinfección por UV e hipoclorito) puede ser una de las causas de ese elevado consumo energético.

Figura 15. Consumo energético de las EDAR con proceso de oxidación total por: **(a)** metro cúbico de agua tratada (kWh/m<sup>3</sup>) **(b)** Kilo de DQO eliminada (kWh/Kg DQO). Se incluyen en la Figura la modelización con una función potencial de los datos de consumo energético registrado.



El mismo patrón de comportamiento se observa en el consumo energético por kg de DQO eliminada (Figura 15b), en la que se observa un incremento significativo en el consumo de aquellas instalaciones que tratan un caudal inferior a 300 m<sup>3</sup>/d y un consumo específico más o menos estable en torno a 1.5 kWh/kgDQO para las EDAR que tratan caudales elevados. La tendencia observada se ha modelado con una función potencial presentando un ajuste adecuado en ambos casos. En el consumo por kg de DQO eliminada, debido a la gran variabilidad en la DQO del agua residual a tratar, hay una mayor dispersión de los puntos que se refleja en un peor ajuste (menor valor del coeficiente de correlación). El efecto de la DQO del agua influente en el consumo energético normalizado por kg de DQO eliminada se observa claramente en las EDAR de mayor caudal. En las EDAR con un caudal por encima de 3,000 m<sup>3</sup>/día se observa un punto claramente alejado de la línea de tendencia. Ese punto corresponde con la EDAR de Perales de Tajuña y Tielmes, que trata un caudal de 4,388 m<sup>3</sup>/día con una DQO en el agua residual influente muy baja (123 mg/l). El resto de las EDAR con caudales superiores a 3,000 m<sup>3</sup>/día son Fuente El Saz, Guatén, Villanueva de la Cañada y Villaviciosa de Odón cuyos valores de DQO en el agua residual influente son muy superiores (305, 479, 538 y 354 mg/l, respectivamente). La baja DQO del agua de entrada provoca que el consumo energético por kg de DQO eliminada de la EDAR de Perales de Tajuña y Tielmes sea de 6 kWh/kg DQO eliminada mientras que en las demás el consumo específico no sobrepasa los 1.9 kWh/kg DQO. Esa baja DQO se debe a la intrusión de aguas limpias y se está trabajando actualmente para intentar solucionar el problema.

Debido a que entre todas las EDARs que incorporan proceso biológico de eliminación de materia orgánica por oxidación total hay diferencias en diversos factores como el nivel de



eliminación de nutrientes alcanzado o la presencia de bombeo de cabecera, se ha comparado el efecto sobre el consumo energético específico en las EDAR de los siguientes factores:

- Equipo utilizado para la aireación del proceso biológico.
- Existencia o no de bombeo de cabecera.
- Eliminación de nutrientes.

Para poder analizar estos factores de manera objetiva, se han representado los gráficos *Box-Whisker* del consumo energético para cada factor, lo que permite identificar la pauta de variabilidad del conjunto de datos correspondiente a cada factor, así como detectar valores extremos (*outliers*) que serán eliminados del posterior análisis estadístico mediante un análisis de la varianza.

### 3.2.1.1 Efecto del sistema de aireación en el consumo energético.

Una parte importante del consumo energético de las EDAR se produce en el proceso biológico de eliminación de materia orgánica, el cual tiene lugar por vía aerobia mediante el aporte de oxígeno a los reactores. Este aporte se puede realizar con distintas tecnologías, las cuales tienen distintas eficiencias y rendimientos, por lo que según la tecnología adoptada en una determinada EDAR el consumo final para una misma eliminación de materia orgánica puede ser mayor o menor. En el caso particular de los datos facilitados de las EDAR que incorporan oxidación total, los equipos utilizados para la aireación son: soplantes, turbinas, rotores y turbocompresores. El uso de turbinas es bastante reducido ya que sólo se utilizan en 4 EDAR. La presencia de turbocompresores es testimonial ya que tan sólo son dos las EDAR que la incorporan presentando además estas dos EDAR consumos unitarios muy dispares (una 0.63 kWh/m<sup>3</sup> y la otra 1.39 kWh/m<sup>3</sup>), por lo que no se ha introducido esta tecnología en la comparación estadística realizada. Concretamente la EDAR que presenta el consumo específico más elevado es la EDAR de Meco (ya comentada anteriormente por presentar un consumo energético superior al esperado en función del caudal que trata). Es posible que el elevado consumo energético específico se deba al hecho de utilizar turbocompresores para la aireación, puesto que estos equipos se suelen utilizar para EDAR que tratan un mayor caudal.

En la Figura 16a se muestra el gráfico *Box-Whisker* del consumo energético por metro cúbico de agua tratada, de las tres tecnologías de aireación previamente comentadas. Tanto en el caso de las EDAR aireadas mediante soplantes como en el de rotores, aparecen valores extremos (*outliers*), es decir, EDAR que presentan un consumo energético normalizado (kWh/m<sup>3</sup>) muy superior al de la mayoría de las EDAR con esa misma tecnología. Estos datos extremos no se han considerado en el análisis de la varianza (ANOVA) realizado para determinar si hay diferencias estadísticamente significativas en el valor medio del consumo energético normalizado según la tecnología de aireación implementada.

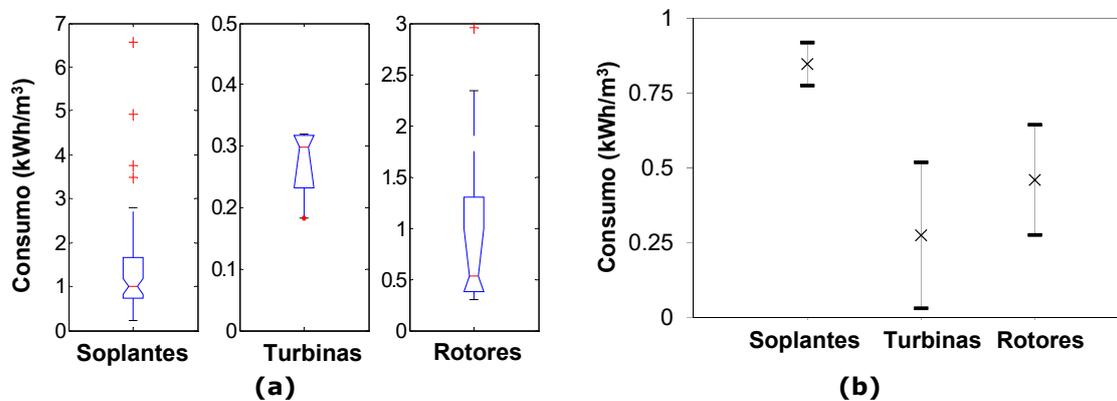
En la Tabla 28 se muestran los resultados del ANOVA, obtenido con la aplicación StatGraphics, en el que se puede observar que hay diferencias significativas (nivel de confianza del 95%,  $\alpha=0.05$ ) entre el consumo normalizado medio según el tipo de tecnología de aireación implementada. En este análisis se descompone la varianza total de los datos de consumo energético específico en dos componentes, la existente dentro de cada tecnología y la varianza entre tecnologías, y posteriormente el ratio se compara con un test estadístico F de Fisher para determinar si es o no significativo el efecto del factor estudiado.

Para conocer entre qué tecnologías de aireación hay diferencias estadísticamente significativas se presentan en la Figura 16b, los Intervalos LSD (*Least Significance Difference*) para la media del consumo energético normalizado por metro cúbico de agua



tratada (kWh/m<sup>3</sup>) según la tecnología empleada. Como se puede ver en esta figura, las EDAR aireadas por medio de soplantes tienen de media un consumo unitario mayor que las que utilizan turbinas o rotores (0.85 kWh/m<sup>3</sup> frente a 0.27 y 0.46 kWh/m<sup>3</sup>), y que entre estas dos últimas tecnologías no hay diferencia estadísticamente significativa en base a los datos disponibles. El hecho de que las EDAR aireadas mediante soplantes presenten un consumo específico muy superior al de las turbinas puede estar indicando un sobredimensionamiento de las soplantes instaladas en estas EDAR de oxidación total, y/o una operación ineficiente de las mismas. Por tanto, sería muy recomendable estudiar en estas EDAR la posibilidad de optimizar la operación de los sistemas de aireación mediante la implementación de sistemas de control avanzados (como los basados en lógica difusa), para adaptar la cantidad de aire suministrado a las necesidades del proceso biológico en cada momento. Los resultados obtenidos en este estudio muestran un importante potencial de mejora en las instalaciones con sistema de aireación por soplantes.

Figura 16. **(a)** Gráficos Box-Whisker del consumo energético específico de las EDARs con proceso de oxidación total según la tecnología de aireación **(b)** Intervalos LSD (*Least Significance Difference*) para la media del consumo energético específico según la tecnología de aireación (excluyendo los valores identificados como extremos en los Box-Whisker correspondientes).



Al realizar la comparación entre las distintas tecnologías de aireación en el consumo normalizado por kg de DQO eliminada se obtienen conclusiones similares, obteniéndose valores de consumo energético específico más elevados para las EDAR aireadas mediante soplantes (ver Figura 17 y Tabla 29).

Tabla 28. Resultados del Análisis de la Varianza (ANOVA) para la media del consumo energético de las EDAR con proceso de oxidación total según la tecnología de aireación que implementan. Están excluidos los valores de consumo identificados como extremos en los Box-Whisker correspondientes, así como la tecnología de turbocompresores ya que sólo había dos EDAR que la utilizaban.

Análisis de varianza					
Fuente	Suma de Cuadrados	gdl	Cuadrado Medio	Ratio-F	P-Valor
Entre grupos	1.91909	2	0.9595430	12.33	0.0000
Dentro de grupos	4.20329	54	0.0778387		
<b>Total (Corr.)</b>	<b>6.12238</b>	<b>56</b>			

gdl – Grados de Libertad



Figura 17. **(a)** Gráficos Box-Whisker del consumo energético específico de las EDARs con proceso de oxidación total según la tecnología de aireación **(b)** Intervalos LSD (*Least Significance Difference*) para la media del consumo energético específico según la tecnología de aireación (excluyendo los valores identificados como extremos en los gráficos Box-Whisker correspondientes).

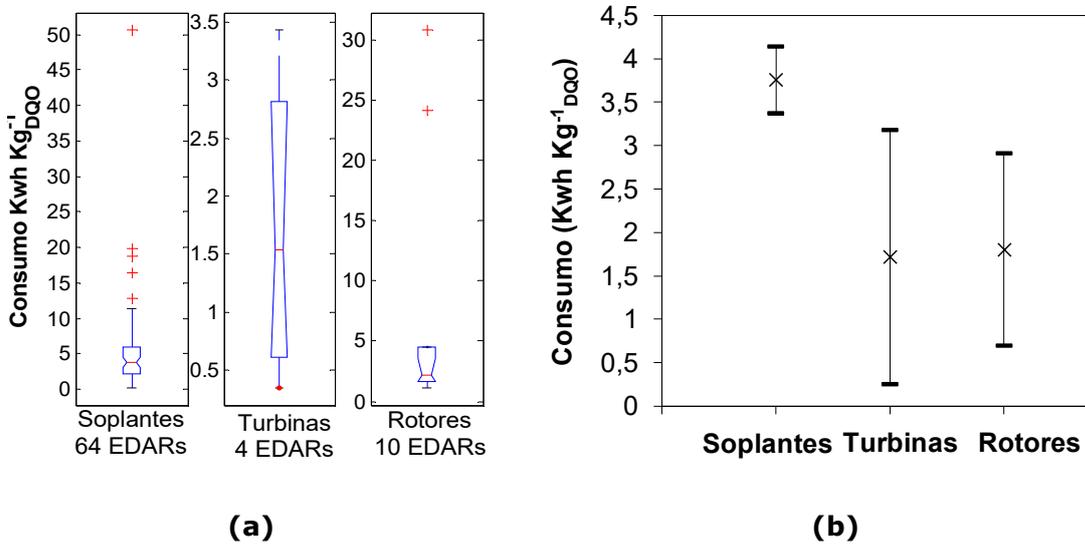


Tabla 29. Resultados del Análisis de la Varianza (ANOVA) para la media del consumo energético específico de las EDAR con proceso de oxidación total según la tecnología de aireación que implementan. Están excluidos los valores de consumo identificados como extremos en los gráficos Box-Whisker correspondientes, así como la tecnología de turbocompresores ya que sólo había dos EDAR que la utilizaban.

Análisis de varianza					
Fuente	Suma de Cuadrados	gdl	Cuadrado Medio	Ratio-F	P-Valor
Entre grupos	36.4205	2	18.21020	4.23	0.0187
Dentro de grupos	279.536	65	4.30056		
<b>Total (Corr.)</b>	<b>315.957</b>	<b>67</b>			

gdl – Grados de Libertad

### 3.2.1.2 Efecto del bombeo de cabecera en el consumo energético.

En el conjunto de datos facilitado, 55 de las 80 EDAR con proceso de oxidación total tienen bombeo de cabecera, mientras que las 25 EDAR restantes no lo tienen. El bombeo de cabecera permite elevar el agua residual a la cota necesaria para que discurra por gravedad a través de los distintos elementos que conforman la instalación, permitiendo vencer los desniveles existentes así como las pérdidas de carga tanto continuas como localizadas. Para determinar si la existencia o no de bombeo de cabecera tiene un efecto significativo sobre el consumo energético específico de la EDAR, se ha comparado el consumo energético (kWh/m<sup>3</sup>) de los dos grupos de EDAR (el grupo de las que tienen bombeo y el grupo de las que no lo tienen) mediante un Análisis de la Varianza (ANOVA) y se ha estudiado por separado la distribución de cada grupo mediante gráficos *Box-Whisker* (Figura 5a). El gráfico *Box-Whisker* muestra en ambos casos una distribución asimétrica positiva y con presencia de valores extremos (*outliers*), es decir, EDAR cuyo consumo energético es excesivamente grande en comparación con el resto de EDAR de su grupo. Los resultados del ANOVA y los



intervalos LSD muestran que la media de consumo energético específico de las EDAR sin bombeo de cabecera ( $0.778 \text{ kWh/m}^3$ ) es inferior a las EDAR con bombeo de cabecera ( $1.034 \text{ kWh/m}^3$ ), aunque dicha diferencia no se pueda considerar estadísticamente significativa (ver Figura 18).

Figura 18. Comparación del consumo energético de las EDAR con proceso de oxidación total que tienen bombeo de cabecera con las que no lo tienen: **(a)** Gráficos Box-Whisker **(b)** Intervalos LSD (*Least Significance Difference*) para la media del consumo energético (excluyendo los valores identificados como extremos en los Box-Whisker correspondientes).

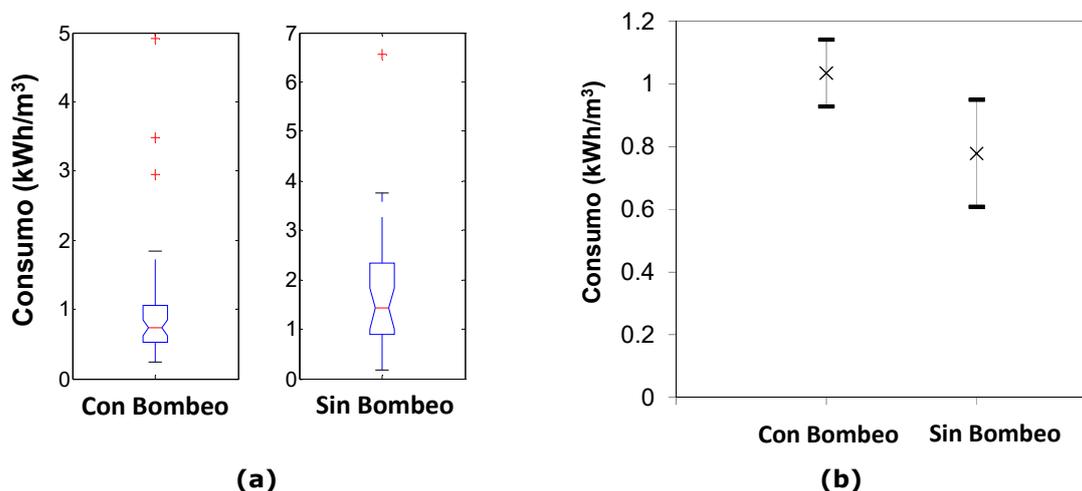


Tabla 30. Resultados del Análisis de la Varianza (ANOVA) para la media del consumo energético de las EDAR con proceso de oxidación total según tengan o no bombeo en cabecera de la instalación. Están excluidos los valores de consumo identificados como extremos en los Box-Whisker correspondientes.

Análisis de varianza					
Fuente	Suma de Cuadrados	gdl	Cuadrado Medio	Ratio-F	P-Valor
Entre grupos	0.94431	1	0.944310	3.23	0.0767
Dentro de grupos	20.1743	69	0.292382		
<b>Total (Corr.)</b>	<b>21.1186</b>	<b>70</b>			

gdl – Grados de Libertad

Al analizar únicamente las EDAR con un caudal superior a  $750 \text{ m}^3/\text{día}$  en las que el consumo energético específico es independiente del caudal tratado (ver Figura 15a) se observa que los valores medios de consumo energético específico son  $0.778 \text{ kWh/m}^3$  en las EDAR con bombeo de cabecera y  $0.388 \text{ kWh/m}^3$  en las EDAR sin bombeo de cabecera. Los resultados del ANOVA (ver Tabla 31) y los intervalos LSD muestran que en las EDAR con proceso de oxidación total y caudal de tratamiento superior a  $750 \text{ m}^3/\text{día}$ , la media de consumo energético de las que tienen bombeo de cabecera es superior a las que no lo tienen, siendo la diferencia estadísticamente significativa (ver Figura 19).



Figura 19. Comparación del consumo energético específico de las EDAR con proceso de oxidación total que tienen bombeo de cabecera con las que no lo tienen: **(a)** Gráficos Box-Whisker **(b)** Intervalos LSD (*Least Significance Difference*) para la media del consumo (excluyendo los valores identificados como extremos en los gráficos Box-Whisker correspondientes). Sólo las EDAR con caudal de tratamiento superior a 750 m<sup>3</sup>/día están incluidas.

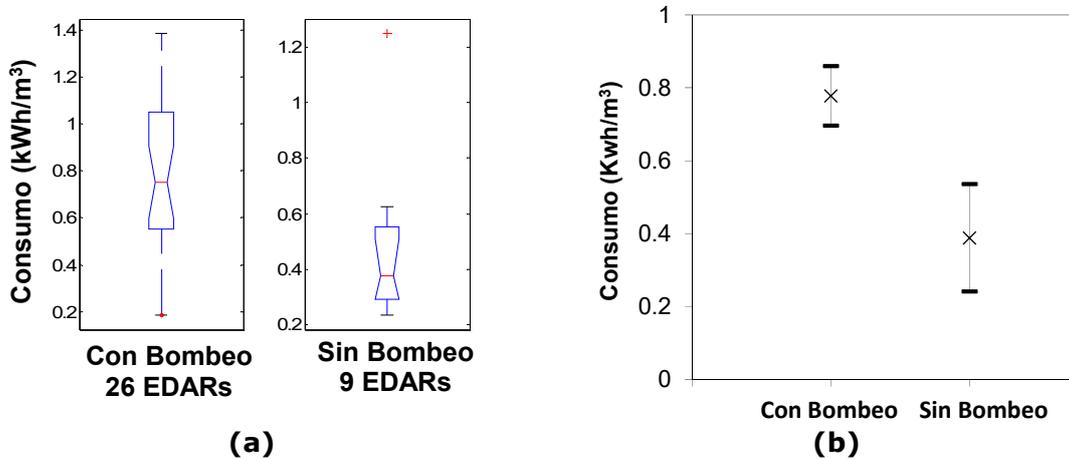


Tabla 31. Resultados del Análisis de la Varianza (ANOVA) para la media del consumo energético específico de las EDAR con proceso de oxidación total y caudal de tratamiento superior a 750 m<sup>3</sup>/día según tengan o no bombeo en cabecera de la instalación. Están excluidos los valores de consumo identificados como extremos en los gráficos Box-Whisker correspondientes.

Análisis de varianza					
Fuente	Suma de Cuadrados	gdl	Cuadrado Medio	Ratio-F	P-Valor
Entre grupos	0.928681	1	0.9286810	11.07	0.0022
Dentro de grupos	2.68569	32	0.0839277		
<b>Total (Corr.)</b>	<b>3.61437</b>	<b>33</b>			

gdl – Grados de Libertad

Por todo ello, se puede concluir que en las EDAR que tratan un caudal bajo el efecto de otros factores sobre el consumo energético específico enmascara el efecto de la existencia de bombeo de cabecera, sin que se observe diferencia alguna entre las EDAR con bombeo y las EDAR sin bombeo. Por el contrario en las EDAR que tratan un caudal más elevado la existencia del bombeo de cabecera afecta significativamente al consumo energético. Aunque existen otros factores no contemplados, la diferencia en torno a 0.3 kWh/m<sup>3</sup> observada entre el consumo energético específico de las EDAR sin y con bombeo de cabecera pone de manifiesto que el consumo de dicho bombeo es apreciable y conviene optimizarlo mediante la instalación de variadores de frecuencia en las bombas y sistemas de control para reducir el número de arranques de las bombas y mantener el nivel del agua en el pozo de bombeo lo más alto posible.

A diferencia de las conclusiones obtenidas anteriormente, al realizar la comparación del consumo energético en kWh por kg de DQO eliminada para las depuradoras con caudales tratados superiores a 750 m<sup>3</sup>/día no se observa diferencia entre el consumo específico de las EDAR con bombeo de cabecera respecto de las que no lo tienen (ver Figura 20 y Tabla 32). El hecho de que se obtengan consumos diferentes en kWh por metro cúbico de agua tratada pero consumos similares en kWh por kg de DQO se debe a la gran diferencia existente en la DQO del agua residual influente en las EDAR con bombeo de cabecera (valor promedio de 431 mg/l) frente a las que no lo tienen (valor promedio de 273 mg/l).



Figura 20. Comparación del consumo energético de las EDAR con proceso de oxidación total que tienen bombeo de cabecera con las que no lo tienen: **(a)** Gráficos Box-Whisker **(b)** Intervalos LSD (*Least Significance Difference*) para la media del consumo (excluyendo los valores identificados como extremos en los gráficos Box-Whisker correspondientes). Sólo las EDAR con caudal de tratamiento superior a 750 m<sup>3</sup>/día están incluidas.

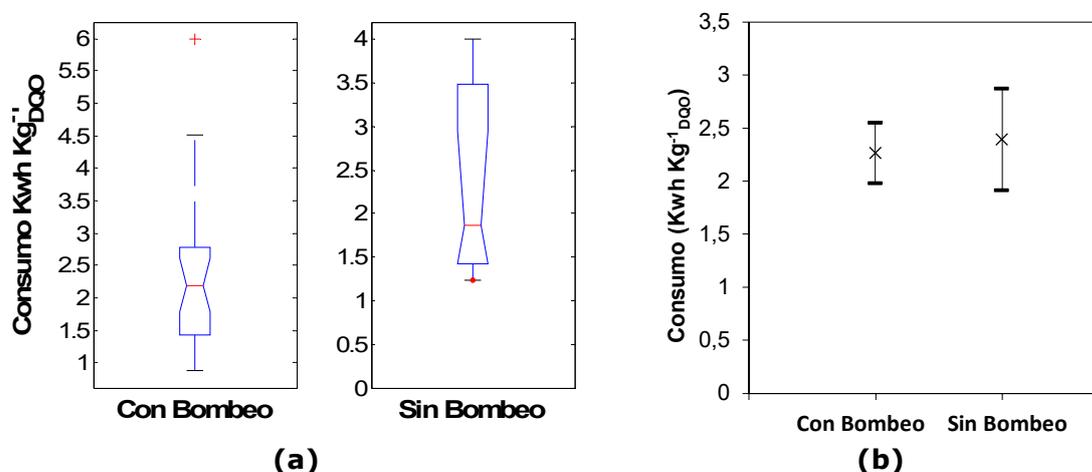


Tabla 32. Resultados del Análisis de la Varianza (ANOVA) para la media del consumo energético de las EDAR con proceso de oxidación total y caudal de tratamiento superior a 750 m<sup>3</sup>/día según tengan o no bombeo en cabecera de la instalación. Están excluidos los valores de consumo identificados como extremos en los gráficos Box-Whisker correspondientes.

Análisis de varianza					
Fuente	Suma de Cuadrados	gdl	Cuadrado Medio	Ratio-F	P-Valor
Entre grupos	0.112659	1	0.112659	0.11	0.7387
Dentro de grupos	31.8466	32	0.995206		
<b>Total (Corr.)</b>	<b>31.9592</b>	<b>33</b>			

gdl – Grados de Libertad

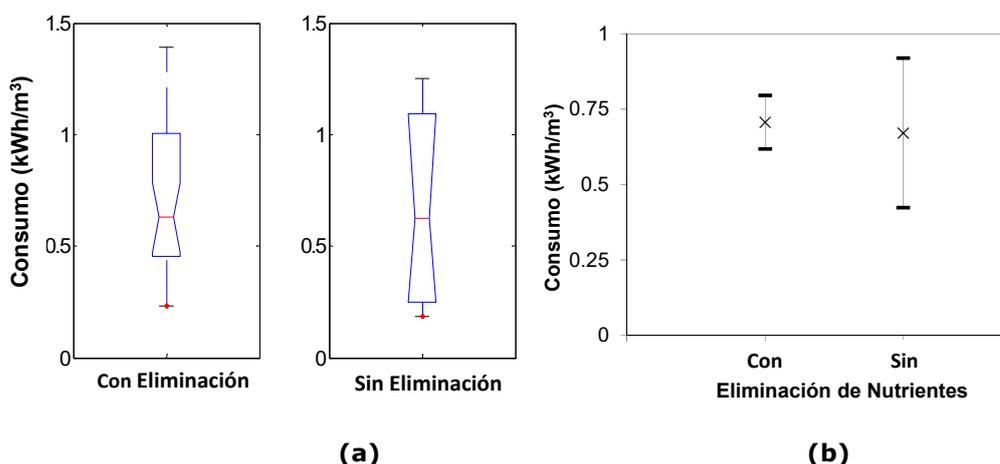
### 3.2.1.3 Efecto de la eliminación de nutrientes en el consumo energético.

La eliminación de nitrógeno se lleva a cabo mediante los procesos de nitrificación y desnitrificación. El proceso de nitrificación presenta una importante demanda de oxígeno y por tanto afecta al consumo energético del sistema de aireación. El proceso de desnitrificación elimina materia orgánica sin aporte de oxígeno por lo que disminuye el sobre coste energético del proceso de nitrificación. En aquellas EDAR que incluyen el esquema típico de pre-desnitrificación la agitación del reactor anóxico y el bombeo de recirculación interna contribuyen a aumentar el consumo energético. Respecto de la eliminación de fósforo, su eliminación por vía biológica exige la existencia de grandes volúmenes anaerobios que requieren de un sistema de agitación. Para determinar si la existencia de estos procesos tiene un efecto significativo en los datos de consumo energético facilitados, se han dividido las 35 EDARs que tienen un caudal de tratamiento superior a 750 m<sup>3</sup>/día en dos grupos, las que no eliminan nutrientes (31 EDARs) y las que sí que eliminan nutrientes (4 EDARs). Para cada grupo se ha representado su distribución mediante un gráfico Box-Whisker (Figura 21a) y se ha comparado el efecto mediante un Análisis de la Varianza (ANOVA) cuyos resultados se recogen en la Tabla 33 y la Figura 21b. El gráfico Box-Whisker muestra en ambos casos una distribución simétrica y sin presencia de valores extremos. Los resultados del ANOVA y los intervalos LSD muestran claramente que no hay



diferencia en media, por lo que se concluye que no hay un efecto estadísticamente significativo, es decir, los datos no muestran diferencia en el valor medio del consumo energético normalizado ( $\text{kWh}/\text{m}^3$ ) tengan o no tengan implementados procesos para la eliminación de los nutrientes presentes en el agua residual.

Figura 21. Comparación del consumo energético de las EDAR con proceso de oxidación total que eliminan nutrientes con las que no los eliminan: **(a)** Gráficos Box-Whisker del consumo energético **(b)** Intervalos LSD (*Least Significance Difference*) para la media del consumo energético (excluyendo los valores identificados como extremos en los Box-Whisker correspondientes). Sólo las EDAR con caudal de tratamiento superior a  $750 \text{ m}^3/\text{día}$  están incluidas.



Al realizar la comparación del consumo normalizado por kg de DQO eliminada entre las EDAR con y sin eliminación de nutrientes se obtienen conclusiones similares a las anteriores, no observándose diferencias entre ambos grupos (ver Figura 22 y Tabla 34).

Tabla 33. Resultados del Análisis de la Varianza (ANOVA) para la media del consumo energético de las EDAR con proceso de oxidación total y caudal de tratamiento superior a  $750 \text{ m}^3/\text{día}$  según eliminen o no los nutrientes presentes en el agua residual.

Análisis de varianza					
Fuente	Suma de Cuadrados	gdl	Cuadrado Medio	Ratio-F	P-Valor
Entre grupos	0.00443904	1	0.00443904	0.04	0.8479
Dentro de grupos	3.9213	33	0.118827		
<b>Total (Corr.)</b>	<b>3.92574</b>	<b>34</b>			

gdl – Grados de Libertad



Figura 22. Comparación del consumo energético de las EDAR con proceso de oxidación total que eliminan nutrientes con las que no los eliminan: (a) Gráficos Box-Whisker (b) Intervalos LSD (Least Significance Difference) para la media del consumo (excluyendo los valores identificados como extremos en los gráficos Box-Whisker correspondientes). Sólo las EDAR con caudal de tratamiento superior a 750 m<sup>3</sup>/día están incluidas.

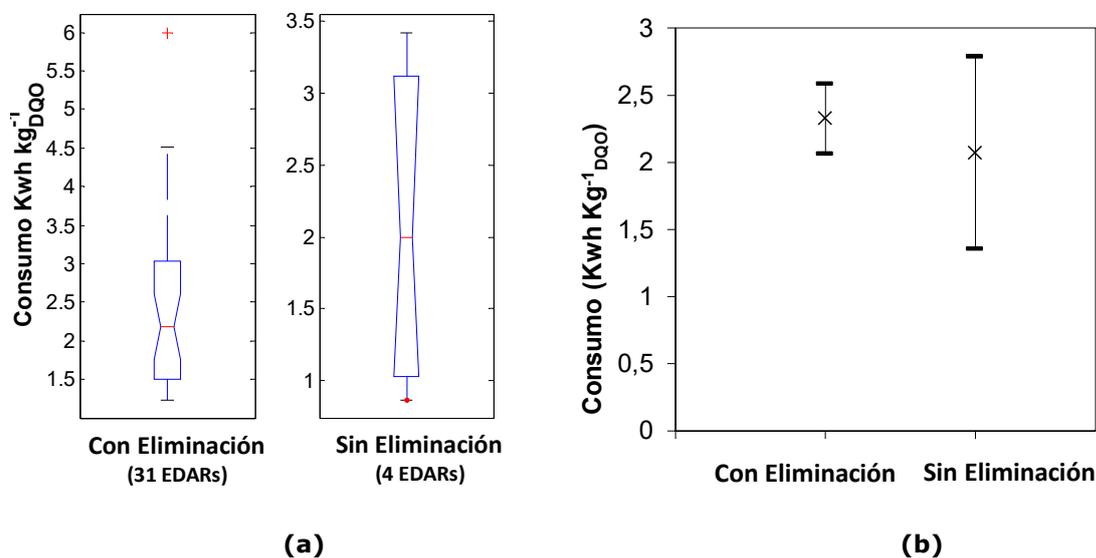


Tabla 34. Resultados del Análisis de la Varianza (ANOVA) para la media del consumo energético de las EDAR con proceso de oxidación total y caudal de tratamiento superior a 750 m<sup>3</sup>/día según eliminen o no los nutrientes del agua residual.

Análisis de varianza					
Fuente	Suma de Cuadrados	gdl	Cuadrado Medio	Ratio-F	P-Valor
Entre grupos	0. 22796	1	0. 22796	0. 23	0. 6349
Dentro de grupos	31.7313	32	0. 991602		
<b>Total (Corr.)</b>	<b>31.9592</b>	<b>334</b>			

gdl – Grados de Libertad



### 3.2.2 EDAR con sistema de fangos activados y digestión aerobia

En la actualidad Canal Isabel II gestiona un total de 11 EDAR que incorporan el proceso de fangos activados con digestión aerobia de fangos. En la Tabla 35 se muestra un listado con el nombre de estas EDAR junto el año de construcción, el caudal medio diario tratado, la composición media del agua residual influente y el consumo energético medio diario. Se trata de depuradoras bastante antiguas con más de 20 años de funcionamiento.

Tabla 35. Listado de EDAR gestionadas por el Canal de Isabel II que incorporan el proceso de fangos activados con digestión aerobia.

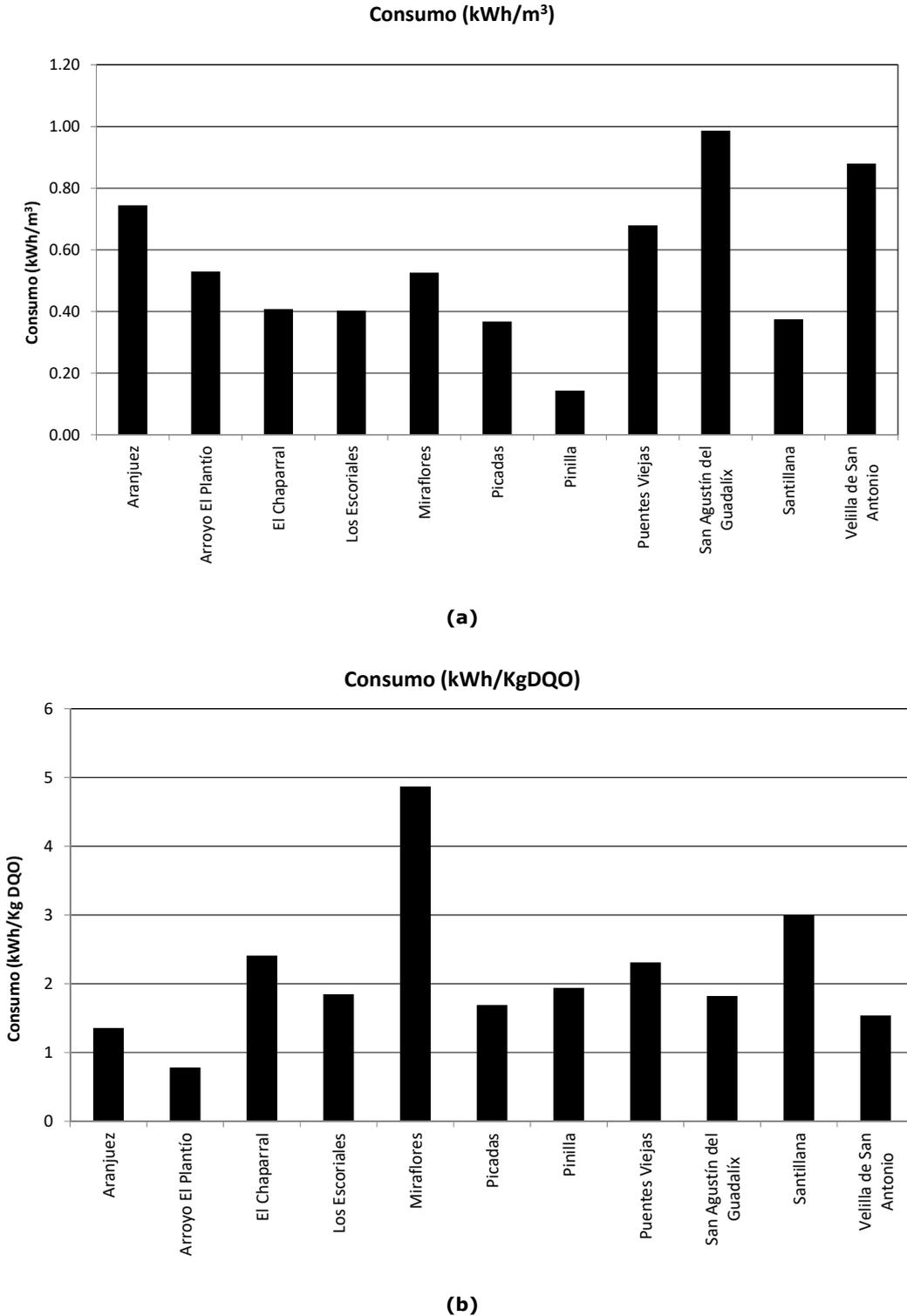
Nombre	Año	Caudal m <sup>3</sup> / día	INFLUENTE					Consumo energético kW·h / día
			DBO <sub>5</sub>	SS	DQO	N	P	
			mgO <sub>2</sub> /l	mg/l	mgO <sub>2</sub> /l	mgN/l	mgP/l	
Aranjuez	1989	11,124.7	502	312	601	52	6.97	8,278.2
Arroyo El Plantío	1988	12,647.8	371	359	730	78	14.07	6,691.6
El Chaparral	1988	12,113.3	81	107	196	21	2.74	4,934.3
Los Escoriales	1986	11,596.2	109	119	249	24	3.33	4,667.8
Miraflores	1992	3,520.6	61	70	133	13	2.06	1,851.5
Picadas	1987	4,152.6	112	155	247	20	3.10	1,525.2
Pinilla	1987	4,940.9	46	74	98	7	1.19	709.2
Puentes Viejas	1987	1,270.3	143	272	312	24	4.64	863.3
San Agustín del Guadalix	1990	3,497.1	279	266	570	64	10.30	3,448.5
Santillana	1988	17,988.7	59	87	145	14	1.76	6,742.0
Velilla de San Antonio*	1996	9,926.1	337	308	613	63	8.04	8,733.5

\* se trata de un proceso biológico en 2 etapas

La Figura 23a muestra el consumo energético por metro cúbico de agua tratada de las EDAR que incorporan el proceso de fangos activados con digestión aerobia. El consumo energético por metro cúbico promedio de las distintas EDAR es de 0.55 kWh/m<sup>3</sup>. Dentro de este grupo de EDAR no se observan valores muy alejados del resto. Los valores más elevados corresponden a las EDAR de San Agustín del Guadalix (0.99 kWh/m<sup>3</sup>) y Velilla de San Antonio (0.88 kWh/m<sup>3</sup>). Con la información que se dispone no es posible averiguar las causas de este elevado consumo energético específico (podría deberse a la existencia de bombeo de cabecera y a la relativamente elevada carga contaminante) por lo que sería recomendable realizar un análisis desagregado de los consumos energéticos de estas instalaciones para poder proponer medidas de reducción de la huella energética. Por otra parte, la EDAR de Pinilla presenta el consumo energético por metro cúbico más bajo (0.14 kWh/m<sup>3</sup>). Este valor tan reducido se debe a la baja carga contaminante del agua de entrada.



Figura 23. Consumo energético de las EDAR con proceso de fangos activados y digestión aerobia (a) m<sup>3</sup> de agua tratada (kWh/m<sup>3</sup>) (b) Kg de DQO eliminada (kWh/Kg DQO)



La Figura 23b muestra el consumo energético por kg de DQO eliminada de las EDAR con digestión aerobia de fangos. Al analizar dicho consumo energético se obtiene un valor promedio de 2.14 kWh/kg de DQO eliminada. Este valor promedio está condicionado por el



elevado consumo específico que presenta la EDAR de Miraflores (4.87 kWh/kg de DQO). Sin tener en cuenta esta EDAR, el valor promedio se reduce hasta 1.85 kWh/kg de DQO. El valor tan elevado de la EDAR de Miraflores se debe a la baja carga orgánica del agua influente (DQO = 133 mg DQO/l). El consumo por metro cúbico de esta EDAR está próximo al valor medio de este tipo de EDAR pero debido a la baja DQO del agua residual el consumo por Kg de DQO eliminada es muy superior al resto. Esta diferencia respecto de los valores medios entre el consumo por metro cúbico y por DQO eliminada se observa en las EDAR con una baja carga orgánica, como es el caso de la EDAR de Pinilla, que su consumo energético por metro cúbico era el más reducido de todas las EDAR mientras que por kg de DQO está próximo al valor medio. No obstante, cabe señalar que aunque ambas EDAR (Miraflores y Pinilla) tratan un agua residual con una baja carga orgánica el consumo energético por kg de DQO de la EDAR de Pinilla es muy inferior al de la EDAR de Miraflores, lo que indica la existencia de un elevado potencial de reducción en el consumo energético de esta EDAR.

Para visualizar la pauta de variabilidad del consumo energético por metro cúbico de agua tratada en todas estas EDAR, en la Figura 24 y en la Figura 25 se incluyen las representaciones estadísticas (Box-Whisker, función empírica de distribución acumulada y función de probabilidad normal) del consumo energético por m<sup>3</sup> de agua tratada y por kg de DQO eliminada. En los gráficos Box-Whisker Figura 24a y Figura 25a se observa que no existe ningún outlier en el consumo energético por metro cúbico de agua tratada mientras que sí se observa que la EDAR de Miraflores presenta un consumo por DQO eliminada anormalmente alto.

En la Figura 24b y en la Figura 24c se puede observar que el 50% de estas EDAR presenta un consumo energético igual o inferior a 0.53 kWh/m<sup>3</sup> y 1.85 kWh/kgDQO, respectivamente, y el 90% de las EDAR presenta un consumo inferior a 0.88 kWh/m<sup>3</sup> y 3 kWh/kgDQO, respectivamente.

En la Figura 24c y en la 25c se observa que la pauta de variabilidad del consumo energético sigue una distribución simétrica y próxima a la distribución normal, con la excepción de la EDAR de Miraflores que presenta un consumo por DQO eliminada anormalmente alto.

Figura 24. Representaciones estadísticas del consumo energético de las EDAR con sistema de fangos activados y digestión aerobia por m<sup>3</sup> de agua tratada (kWh/m<sup>3</sup>): **(a)** Box-Whisker **(b)** Función empírica de distribución acumulada y **(c)** Función de probabilidad normal.

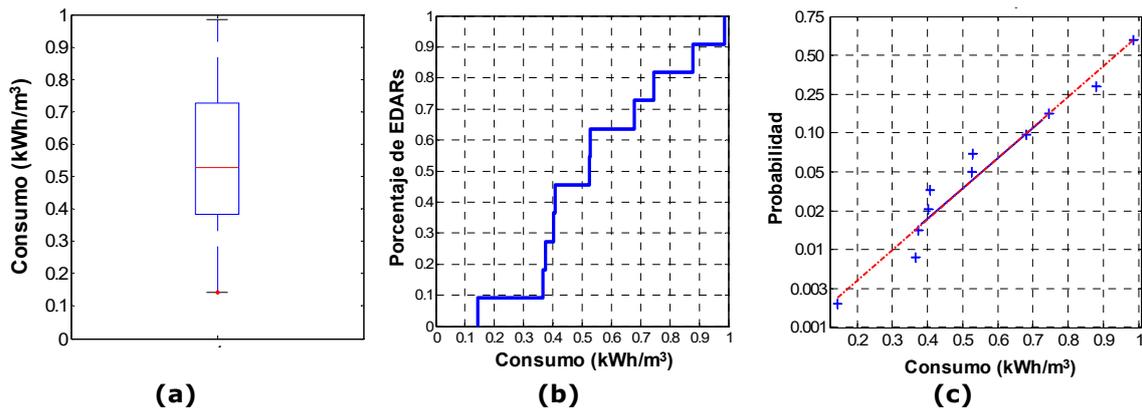
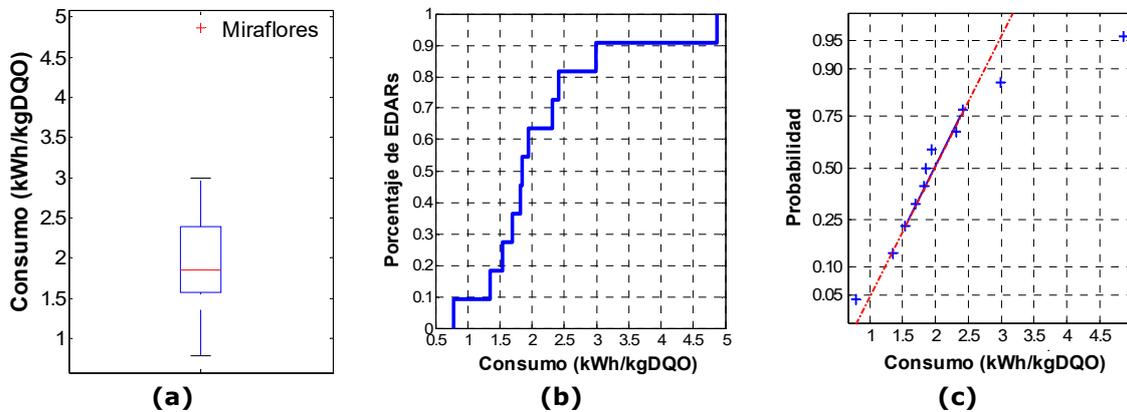




Figura 25. Representaciones estadísticas del consumo energético de las EDAR con sistema de fangos activados y digestión aerobia por Kg de DQO eliminada (kWh/kgDQO): **(a)** Box-Whisker **(b)** Función empírica de distribución acumulada y **(c)** Función de probabilidad normal.



Entre las 11 EDAR con sistema de fangos activados y digestión aerobia del fango, hay diferencias en diversos factores como el nivel de eliminación de nutrientes alcanzado o la presencia de bombeo de cabecera. Para determinar si hay diferencias estadísticamente significativas en el valor medio del consumo energético según estos factores se ha realizado un análisis de la varianza (ANOVA).

### 3.2.2.1 Efecto del bombeo de cabecera

Entre las 11 EDAR que incluyen un proceso de digestión aerobia de fangos, 6 de ellas incluyen bombeo de cabecera mientras que el resto no dispone de dicho bombeo. Al analizar los consumos energéticos de ambos grupos de EDAR se obtienen valores promedio muy similares tanto en consumo energético por metro cúbico de agua tratada ( $0.58 \text{ kWh/m}^3$  EDAR con bombeo vs  $0.51 \text{ kWh/m}^3$  EDAR sin bombeo) como por kg de DQO eliminada ( $2.08 \text{ kWh/kg DQO}$  EDAR con bombeo vs  $2.22 \text{ kWh/kg DQO}$  EDAR sin bombeo). Este resultado difiere del obtenido para el resto de grupos de EDAR donde si se observa un mayor consumo energético en aquellas EDAR que incorporan bombeo de cabecera.

En la Tabla 36 y en la Figura 26 se muestran los resultados del ANOVA, obtenidos con la aplicación StatGraphics, en la que se puede observar que no hay diferencias significativas (nivel de confianza del 95%,  $\alpha=0.05$ ) entre el consumo normalizado medio según tengan o no bombeo de entrada, al resultar el P-valor mayor de 0.05.

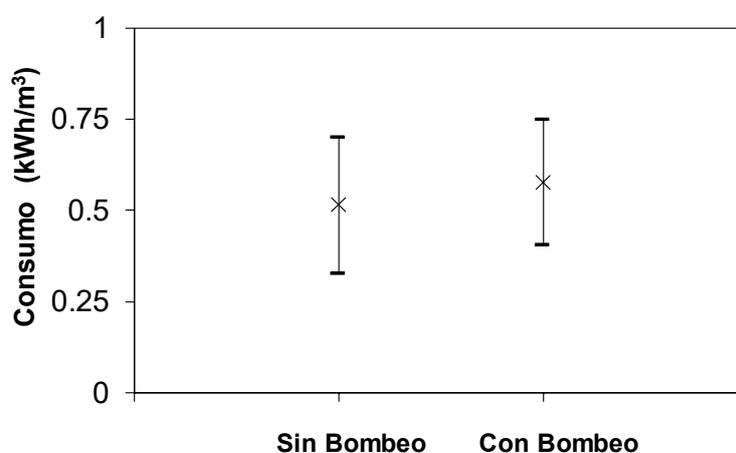


Tabla 36. Resultados del Análisis de la Varianza (ANOVA) para la media del consumo energético de las EDARs con proceso de fangos activados y digestión aerobia del fango según tengan o no bombeo de entrada.

Análisis de varianza					
Fuente	Suma de Cuadrados	gdl	Cuadrado Medio	Ratio-F	P-Valor
Entre grupos	0.0108182	1	0.0108182	0.16	0.7000
Dentro de grupos	0.615045	9	0.0683384		
<b>Total (Corr.)</b>	<b>0.625863</b>	<b>10</b>			

gdl – Grados de Libertad

Figura 26. Intervalos LSD (*Least Significance Difference*) para la media del consumo energético por metro cúbico de agua tratada (excluyendo los valores identificados como extremos en los Box-Whisker correspondientes) en las EDAR con digestión aerobia y con y sin bombeo de cabecera.



### 3.2.2.2 Efecto del sistema de aireación.

El efecto del sistema de aireación no se ha podido estudiar porque casi todas las EDAR tienen instalado un sistema de aireación por turbinas (8 EDAR). La presencia testimonial de soplantes (2 EDAR) y turbocompresores (1 EDAR) impide realizar el análisis estadístico.

### 3.2.3 EDAR con sistema de fangos activados y digestión anaerobia

En la actualidad Canal Isabel II gestiona un total de 25 EDAR que incorporan el proceso de fangos activados con digestión anaerobia de fangos. En la Tabla 37 se muestra un listado con el nombre de estas EDAR junto al año de construcción, el caudal medio diario tratado, la composición media del agua residual influente y el consumo energético medio diario. Para aquellas depuradoras que disponen de un sistema de cogeneración se ha incluido también el consumo energético neto y se ha calculado el porcentaje de recuperación de energía. El consumo energético neto corresponde a las necesidades de compra de electricidad. Cabe señalar que en todas las EDAR (independientemente de la existencia o no de un sistema de cogeneración) el proceso de digestión anaerobia tiene lugar en condiciones mesofílicas (alrededor de 35°C). La energía necesaria para mantener esta temperatura se obtiene a partir del biogás generado, por lo que este hecho no incrementa la huella energética de la EDAR.



Tabla 37. Listado de EDAR gestionadas por el Canal de Isabel II que incorporan el proceso de fangos activados con digestión anaerobia.

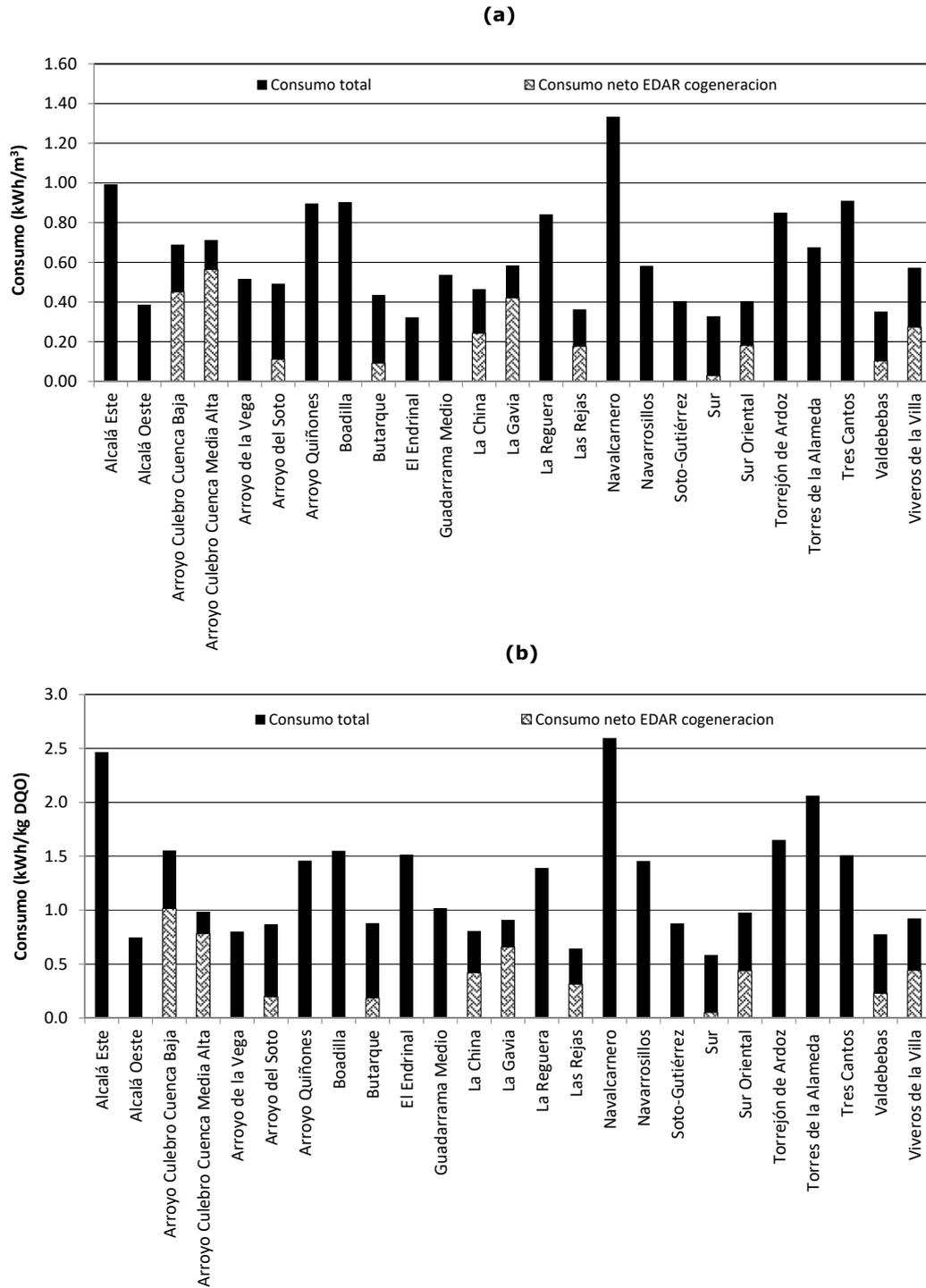
Nombre	Año	Caudal	INFLUENTE					Consumo energético	Cogeneración	Consumo energético neto	Recuperación
			DBO <sub>5</sub>	SS	DQO	N	P				
		m <sup>3</sup> / día	mgO <sub>2</sub> /l	mg /l	mgO <sub>2</sub> /l	mg N/l	mgP /l	kW·h / día	kW·h / día	(%)	
Alcalá Este	1987	5,080.8	247	181	454	54	6.51	5,051.2		5,051.2	
Alcalá Oeste	1989	42,328.3	276	274	553	59	6.95	16,357.8		16,357.8	
Arroyo Culebro Cuenca Baja*	2008	51,133.2	277	260	473	68	10.32	35,247.3	SÍ	23,053.0	34.6
Arroyo Culebro Cuenca Media Alta*	2007	52,866.6	386	357	773	62	11.27	37,679.9	SÍ	29,860.0	20.8
Arroyo de la Vega	1986	26,489.5	393	299	704	68	10.16	13,693.0		13,693.0	
Arroyo del Soto	1987	27,242.2	264	245	619	76	8.66	13,431.0	SÍ	3,057.0	77.2
Arroyo Quiñones	2012	9,427.4	340	259	646	66	8.22	8,450.2		8,450.2	
Boadilla	2002	9,659.7	287	269	607	64	12.58	8,725.8		8,725.8	
Butarque	1983	114,154.6	269	267	550	56	6.40	49,707.5	SÍ	10,421.0	79.0
El Endrinal	1987	36,356.1	110	137	241	30	3.32	11,729.7		11,729.7	
Guadarrama Medio	1993	13,385.3	311	245	563	65	9.91	7,188.0		7,188.0	
La China	1981	160,939.1	364	269	608	54	7.42	74,885.2	SÍ	39,062.0	47.8
La Gavia	2008	66,412.5	314	314	670	71	8.68	38,787.3	SÍ	27,967.0	27.9
La Reguera	2008	21,799.5	311	227	636	64	8.55	18,356.7		18,356.7	
Las Rejas	1977	56,764.0	271	265	615	64	8.40	20,586.1	SÍ	10,028.0	51.3
Navalcarnero	1993	8,305.6	305	206	543	72	10.13	11,079.7		11,079.7	
Navarrosillos	1987	12,050.2	195	200	432	42	5.35	7,014.1		7,014.1	
Soto-Gutiérrez	1991	20,597.3	421	317	512	50	6.70	8,341.3		8,341.3	
Sur	1983	203,721.6	314	282	608	62	8.84	66,876.1	SÍ	5,866.0	91.2
Sur Oriental	1983	24,284.0	271	286	460	44	6.24	9,814.3	SÍ	4,391.0	55.3
Torrejón de Ardoz	2009	25,663.0	305	222	539	53	6.86	21,834.5		21,834.5	
Torres de la Alameda	2015	5,474.3	191	187	369	38	4.90	3,702.1		3,702.1	
Tres Cantos	1988	11,418.2	303	314	635	69	9.90	10,391.3		10,391.3	
Valdebebas	1982	28,946.5	246	247	525	58	7.79	10,187.2	SÍ	3,007.0	70.5
Viveros de la Villa	1983	77,203.1	380	344	659	63	12.58	44,271.7	SÍ	21,133.0	52.3

\* se trata de un proceso biológico en 2 etapas



La Figura 27a muestra el consumo energético total por metro cúbico de agua tratada de las EDAR que incorporan el proceso de fangos activados con digestión anaerobia y la Figura 27b muestra el consumo de dichas EDAR por kg de DQO eliminada. En estas figuras se ha representado también el consumo energético neto de las EDAR que disponen de sistema de cogeneración para facilitar la comparación.

Figura 27. Consumo energético neto de las EDAR con proceso de fangos activados y digestión anaerobia (a) m<sup>3</sup> de agua tratada (kWh/m<sup>3</sup>) (b) Kg de DQO eliminada (kWh/Kg DQO).





En la Figura 27a se observa que 7 estaciones depuradoras que no disponen de sistema de cogeneración presentan un consumo energético superior a los 0.8 kWh/m<sup>3</sup>. Las EDAR en cuestión son: Alcalá Este, Arroyo Quiñones, Boadilla, La Reguera, Navalcarnero, Torrejón de Ardoz y Tres Cantos. El elevado consumo energético de estas EDAR hace recomendable el estudio de los consumos energéticos desagregados para poder proponer medidas de actuación para la reducción del consumo energético. Al analizar los datos de consumo energético por kg de DQO se observa que 3 EDAR presentan un consumo energético muy superior al resto. Estas EDAR son: Alcalá Este, Navalcarnero y Torres de la Alameda. Las dos primeras ya presentaban un consumo por metro cúbico elevado mientras que la EDAR de Torres de la Alameda presenta una carga orgánica relativamente baja en comparación con el resto de estas instalaciones y por eso presenta un mayor consumo por kg de DQO eliminada.

En la Figura 27a se observa que la mayor parte de las EDAR que disponen de un sistema de cogeneración presentan un consumo energético neto por metro cúbico comprendido entre 0.1 y 0.27 kWh/m<sup>3</sup>. Fuera de este intervalo se encuentran las EDAR de Arroyo Culebro Cuenca Baja, Arroyo Culebro Cuenca Media Alta y La Gavia que presentan consumos energéticos netos superiores a 0.4 kWh/m<sup>3</sup>. Tal y como se observa en la Tabla 37, estas EDAR son las que presentan un menor porcentaje de recuperación de energía (entorno a un 30%, frente a valores superiores al 50% que presenta el resto de instalaciones con cogeneración). Esta baja recuperación de energía podría ser debida a que estas tres EDAR son las únicas instalaciones con cogeneración que tienen bombeo de cabecera, el cual contribuye a incrementar significativamente el consumo energético por metro cúbico de agua tratada, tal y como se analizará posteriormente. A su vez, cabe destacar que los consumos de estas 3 EDAR son similares a los que se observan en EDAR con digestión aerobia (ver Figura 23a) lo que refleja la necesidad de estudiar en detalle las causas de los elevados consumos energéticos de estas EDAR. El hecho de que estas 3 EDAR trataran durante el año 2015 caudales bastante inferiores al caudal de diseño puede ser una de las causas de los elevados consumos energéticos observados. En el extremo opuesto se encuentra la EDAR de Sur que presenta un consumo energético neto por metro cúbico de 0.03 kWh/m<sup>3</sup>. Al analizar los datos de consumo energético por kg de DQO eliminada se obtienen conclusiones similares a las anteriores. Las EDAR de Arroyo Culebro Cuenca Baja, Arroyo Culebro Cuenca Media Alta y La Gavia son las que mayor consumo energético por kg de DQO eliminada presentan mientras que la EDAR de Sur es la que presenta un consumo más bajo.

En la Figura 28 y en la Figura 29 se incluyen las representaciones estadísticas (Box-Whisker, función empírica de distribución acumulada y función de probabilidad normal) del consumo energético por m<sup>3</sup> de agua tratada y por kg de DQO eliminada. En estas figuras se observa que la pauta de variabilidad del consumo energético sigue una distribución ligeramente asimétrica positiva, que no hay valores anormalmente elevados, y que el 50% de las EDARs presenta un consumo igual o inferior a 0.45 kWh/m<sup>3</sup> y 0.88 kWh/kgDQO y el 80% de las EDAR a 0.82 kWh/m<sup>3</sup> y 1.5 kWh/kgDQO, respectivamente.



Figura 28. Representaciones estadísticas del consumo energético de las EDARs con sistema de fangos activados y digestión anaerobia por  $m^3$  de agua tratada ( $kWh/m^3$ ): **(a)** Box-Whisker **(b)** Función empírica de distribución acumulada y **(c)** Función de probabilidad normal

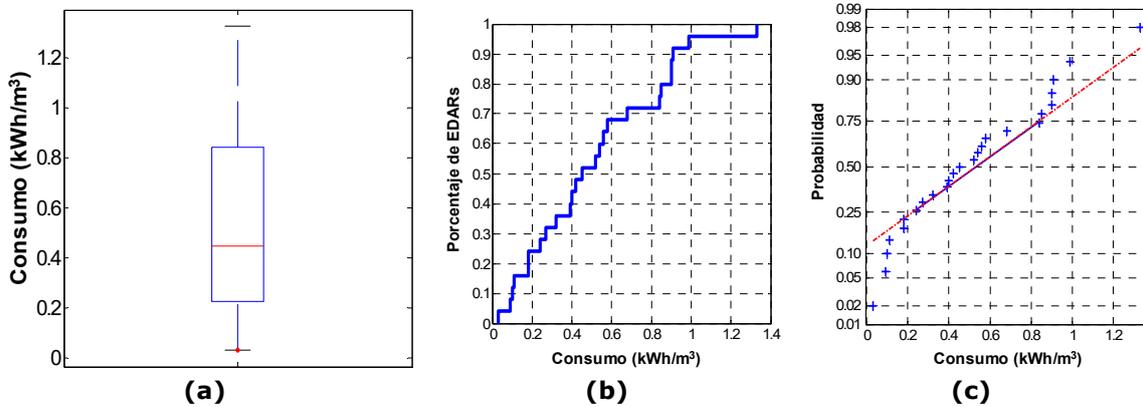
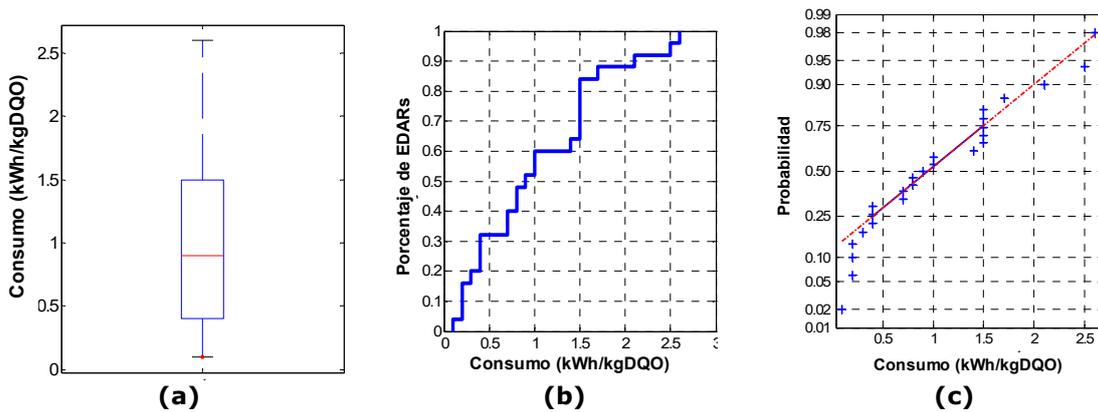


Figura 29. Representaciones estadísticas del consumo energético de las EDAR con sistema de fangos activados y digestión anaerobia por Kg de DQO eliminada ( $kWh/kgDQO$ ): **(a)** Box-Whisker **(b)** Función empírica de distribución acumulada y **(c)** Función de probabilidad normal



Para demostrar el efecto significativo que tiene el sistema de cogeneración sobre el consumo energético neto de las EDAR, se ha comparado el consumo energético neto por metro cúbico de agua tratada de los dos grupos de EDAR (el grupo de las que tienen sistema de cogeneración y el grupo de las que no lo tienen) mediante un Análisis de la Varianza (ANOVA) (ver tabla 38 y Figura 30).

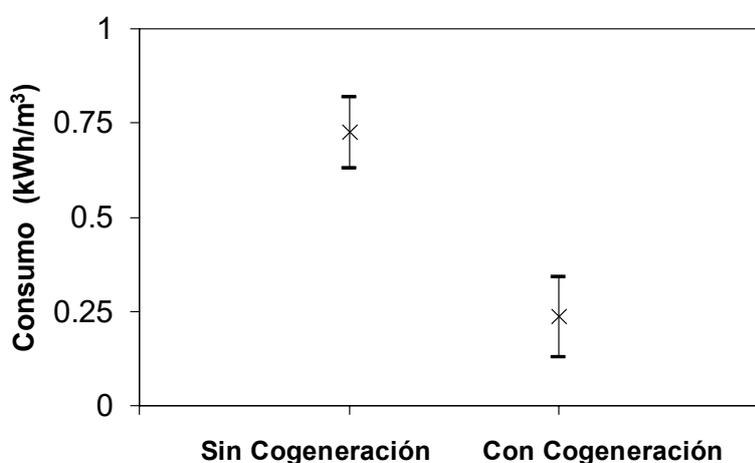


Tabla 38. Resultados del Análisis de la Varianza (ANOVA) para la media del consumo energético de las EDARs con proceso de fangos activados y digestión anaerobia del fango según tengan o no cogeneración.

Análisis de la Varianza para el consumo energético por metro cúbico (kWh/m <sup>3</sup> )					
Fuente	Suma de Cuadrados	gdl	Cuadrado Medio	Ratio-F	P-Valor
Entre grupos	1.45442	1	1.45442	25.12	0.0000
Dentro de grupos	1.33184	23	0.0579061		
<b>Total (Corr.)</b>	<b>2.78626</b>	<b>24</b>			

gdl – Grados de Libertad

Figura 30. Intervalos LSD (*Least Significance Difference*) para la media del consumo energético según tengan o no sistema de cogeneración implementado.



A modo de resumen la Tabla 39 muestra los consumos energéticos promedio por metro cúbico de agua tratada y por kg de DQO eliminada del conjunto de EDAR con digestión anaerobia y de los distintos subconjuntos. A la vista de dicha tabla, desde el punto de vista energético se recomienda instalar un sistema de cogeneración en todas aquellas EDAR que no dispongan de dicho sistema. Para la toma de esta decisión, sería necesario realizar un análisis económico completo, considerando los costes de inversión y mantenimiento por un lado, y la energía generada por otro.

Tabla 39. Valores medios del consumo energético de las EDAR con digestión anaerobia.

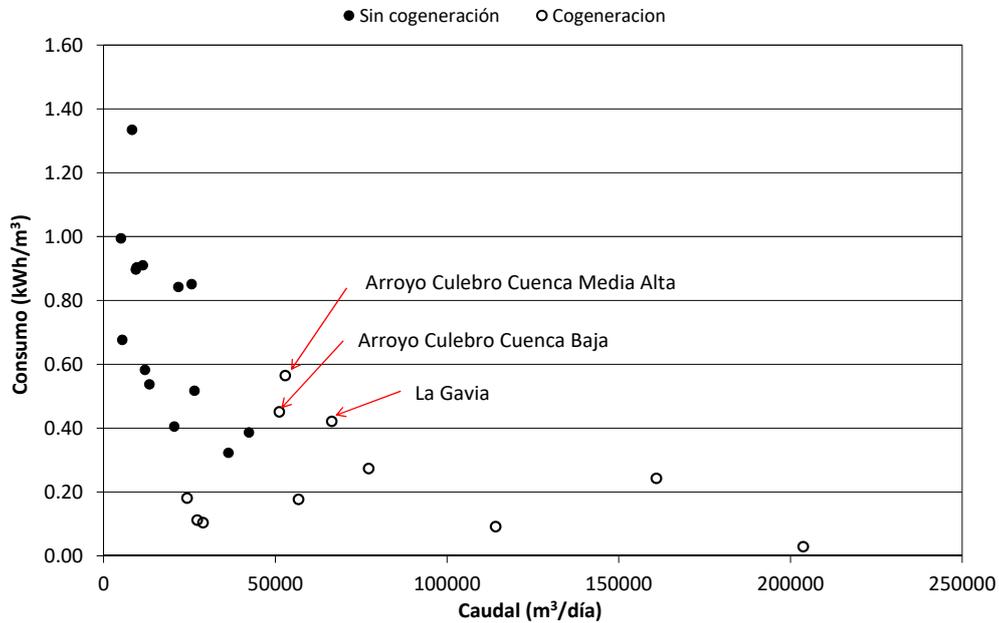
	Consumo medio (kWh/m <sup>3</sup> )	Consumo medio (kWh/Kg DQO)
EDAR con digestión anaerobia	0.51	1.03
EDAR con sistema de cogeneración	0.24	0.43
EDAR sin sistema de cogeneración	0.73	1.51

La Figura 31 muestra el consumo energético neto por metro cúbico de las distintas EDAR frente a su caudal de tratamiento. En esta figura se observa que las EDAR que no disponen de sistema de cogeneración muestran una tendencia decreciente con el caudal, disminuyendo el consumo conforme aumenta el caudal tratado. En el caso de las EDAR con



sistema de cogeneración el consumo energético neto es más bajo e independiente del caudal de tratamiento con la excepción de las 3 EDAR mencionadas anteriormente (Arroyo Culebro Cuenca Baja, Arroyo Culebro Cuenca Media Alta y La Gavia).

Figura 31. Consumo energético neto de las EDAR con digestión anaerobia frente al caudal de tratamiento.



Entre las 25 EDAR con sistema de fangos activados y digestión anaerobia, hay diferencias en diversos factores como el nivel de eliminación de nutrientes alcanzado o la presencia de bombeo de cabecera. Para determinar si hay diferencias estadísticamente significativas en el valor medio del consumo energético según estos factores se ha realizado un análisis de la varianza (ANOVA).

### 3.2.3.1 Efecto del bombeo de cabecera en el consumo energético.

En el conjunto de datos facilitado, 13 de las 25 EDAR con proceso de digestión anaerobia tienen bombeo de cabecera, mientras que las 12 EDAR restantes no lo tienen. Para poder analizar el efecto del bombeo de cabecera sobre el consumo energético se va a realizar el análisis por separado diferenciando entre las EDAR que disponen de sistema de cogeneración (11 EDAR, de las cuales sólo 3 tienen bombeo de cabecera) y las que no disponen de dicho sistema (14 EDAR, de las cuales 9 tienen bombeo de cabecera). La Tabla 40 muestra los valores promedio de consumos energéticos por metro cúbico de agua tratada y por kg de DQO eliminada para los distintos grupos de EDAR.



Tabla 40. Consumo energético neto medio de las EDAR con digestión anaerobia según tengan o no bombeo de cabecera y/o sistema de cogeneración.

	Consumo medio (kWh/m <sup>3</sup> )		Consumo medio (kWh/kg DQO)	
	Con bombeo de cabecera	Sin bombeo de cabecera	Con bombeo de cabecera	Sin bombeo de cabecera
EDAR con sistema de cogeneración	0.48	0.15	0.82	0.28
EDAR sin sistema de cogeneración	0.83	0.54	1.67	1.21

En la Figura 32 se muestran los resultados del ANOVA, obtenido con la aplicación StatGraphics, en el que se puede observar que hay diferencias significativas (nivel de confianza del 95%,  $\alpha=0.05$ ) entre el consumo normalizado medio según la existencia o no bombeo de cabecera en las EDAR con sistema de cogeneración. En el caso de las EDAR sin sistema de cogeneración (ver resultados del ANOVA en Figura 32), a pesar de que la media del consumo energético por metro cúbico es mayor para las EDAR que tienen bombeo de cabecera, la variabilidad en los datos de consumo energético hace que no llegue a ser estadísticamente significativa. Esto se observa en la Figura 32 en la que se ha representado el valor medio del consumo energético normalizado por metro cúbico para cada caso junto con los intervalos LSD (*Least Significance Difference*). En esta figura se observa que los intervalos LSD están muy alejados en las EDAR que disponen de sistema de cogeneración mientras que llegan a solaparse parcialmente en las EDAR que no disponen de dicho sistema.

Tabla 41. Resultados del Análisis de la Varianza (ANOVA) para la media del consumo energético de las EDAR con proceso de fangos activados y digestión anaerobia del fango con sistema de cogeneración según tengan o no bombeo de entrada.

Análisis de la Varianza para el consumo energético por metro cúbico (kWh/m <sup>3</sup> )					
Fuente	Suma de Cuadrados	gdl	Cuadrado Medio	Ratio-F	P-Valor
Entre grupos	0.232824	1	0.232824	36.59	0.0002
Dentro de grupos	0.0572667	9	0.00636296		
<b>Total (Corr.)</b>	<b>0.290091</b>	<b>10</b>			

gdl – Grados de Libertad

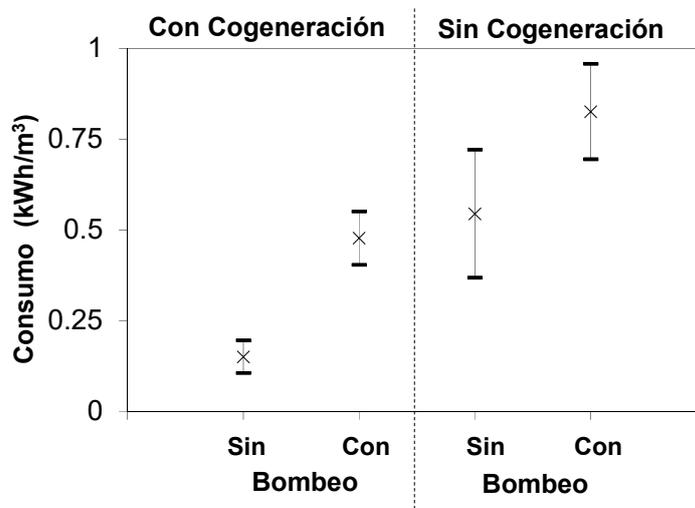
Tabla 42. Resultados del Análisis de la Varianza (ANOVA) para la media del consumo energético de las EDAR con proceso de fangos activados y digestión anaerobia del fango sin sistema de cogeneración según tengan o no bombeo de entrada.

Análisis de la Varianza para el consumo energético por metro cúbico (kWh/m <sup>3</sup> )					
Fuente	Suma de Cuadrados	gdl	Cuadrado Medio	Ratio-F	P-Valor
Entre grupos	0.254808	1	0.254808	3.89	0.0722
Dentro de grupos	0.786942	12	0.0655785		
<b>Total (Corr.)</b>	<b>1.04175</b>	<b>13</b>			

gdl – Grados de Libertad



Figura 32. Intervalos LSD (*Least Significance Difference*) para la media del consumo energético según tengan o no bombeo de cabecera, tanto para las EDAR que tienen sistema de cogeneración como para las EDAR que no tienen dicho sistema.



### 3.2.3.2 Efecto del sistema de aireación en el consumo energético.

Debido a la importancia de la existencia o no de sistema de cogeneración y bombeo de cabecera sobre el consumo energético, para analizar el efecto del sistema de aireación sobre dicho consumo se ha realizado clasificando las EDAR en función de los factores comentados. La Tabla 43 resume los valores promedio del consumo energético por metro cúbico de agua tratada para los distintos sistemas de aireación. Debido al escaso número de estaciones depuradoras existentes para cada uno de los grupos analizados no se puede realizar un análisis estadístico. De todas formas, en el grupo de sin cogeneración y con bombeo de cabecera se obtienen valores de consumo energético similares para los distintos sistemas de aireación (turbinas, soplantes y turbocompresores).

Tabla 43. Consumo energético neto de las EDAR con proceso de fangos activados y digestión anaerobia del fango para los distintos sistemas de aireación según tengan o no cogeneración y bombeo de entrada (entre paréntesis se indica el nº de instalaciones para cada caso).

		Consumo energético neto (kWh/m <sup>3</sup> )				
		Turbinas	Soplantes	Turbocompresores	Turbocompresores y soplantes	Rotores
Con Cogeneración	Con bombeo			0.48 (3)		
	Sin bombeo	0.14 (4)		0.07 (2)	0.26 (2)	
Sin cogeneración	Con bombeo	0.91 (3)	0.83 (3)	0.85 (2)		0.54 (1)
	Sin bombeo	0.58 (1)		0.53 (4)		



### 3.2.3.3 Efecto de la eliminación de nutrientes en el consumo energético.

Debido a la importancia de la existencia o no de sistema de cogeneración y bombeo de cabecera sobre el consumo energético, el análisis del efecto de la eliminación de nutrientes sobre dicho consumo se ha realizado clasificando las EDAR en función de los factores comentados. La Tabla 43 resume los valores promedio del consumo energético por metro cúbico de agua tratada para las EDAR con y sin eliminación de nutrientes. Debido al escaso número de estaciones depuradoras existentes para cada uno de los grupos analizados no se puede realizar un análisis estadístico. De todas formas, en todos los grupos se observa un menor consumo energético en aquellas EDAR que no eliminan nutrientes. Este resultado difiere del obtenido para las EDAR con un proceso de oxidación total, donde el consumo energético no se veía afectado por la eliminación de nutrientes. En el estudio del consumo energético desagregado realizado en la EDAR de Torrejón de Ardoz (ver apartado 4.2) se observó la elevada influencia en el consumo energético del sistema de aireación y de la agitación de los reactores anóxicos y anaerobios. Por ello se recomienda la instalación de sistemas de control de la aireación en estas EDAR junto con el análisis de la potencia de los agitadores utilizados para la agitación de los reactores anóxicos y anaerobios.

Tabla 44. Consumo energético neto de las EDAR con proceso de fangos activados y digestión anaerobia del fango para las EDAR con y sin eliminación de nutrientes según tengan o no cogeneración y bombeo de entrada (entre paréntesis se indica el nº de instalaciones para cada caso).

		Consumo energético neto (kWh/m <sup>3</sup> )	
		Con eliminación de nutrientes	Sin eliminación de nutrientes
Con Cogeneración	Con bombeo	0.48 (3)	
	Sin bombeo	0.27 (1)	0.13 (7)
Sin cogeneración	Con bombeo	0.89 (6)	0.69 (3)
	Sin bombeo	0.75 (2)	0.41 (3)

### 3.2.4 EDAR con sistema de soporte sólido

En la actualidad Canal Isabel II gestiona un total de 7 EDAR que incorporan un proceso de soporte sólido (biodiscos y biocilindros). En la Tabla 35 se muestra un listado con el nombre de estas EDAR junto el año de construcción, el caudal medio diario tratado, la composición media del agua residual influente y el consumo energético medio diario.



Tabla 45. Listado de EDAR gestionadas por el Canal de Isabel II que incorporan un proceso de soporte sólido.

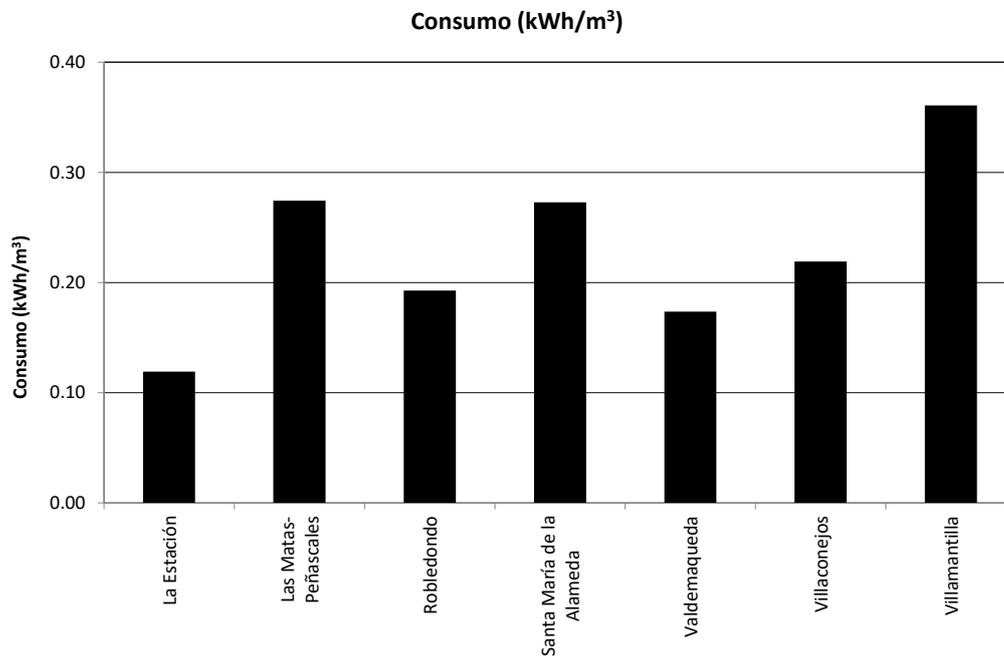
Nombre	Año	Caudal m <sup>3</sup> /día	INFLUENTE					Consumo energético kWh/día	Consumo específico kWh/m <sup>3</sup>
			DBO <sub>5</sub>	SS	DQO	N	P		
			mgO <sub>2</sub> /l	mg /l	mgO <sub>2</sub> / l	mgN /l	mgP/ l		
La Estación	1993	260.8	112	171	272	23	6.40	31.1	0.12
Las Matas- Peñascales	1993	2,908.4	190	182	383	46	7.96	797.5	0.27
Robledondo	1993	95.9	120	292	327	21	5.19	18.5	0.19
Santa María de la Alameda	1993	71.8	174	278	429	29	10.09	19.6	0.27
Valdemaqueda	1993	625.0	82	92	178	21	3.47	108.5	0.17
Villaconejos	2000	1,298.0	312	222	420	41	6.05	284.4	0.22
Villamantilla	2002	790.1	222	145	397	52	6.62	285.0	0.36

La Figura 33a muestra el consumo energético por metro cúbico de agua tratada de las EDAR que incorporan un proceso de soporte sólido (biocilindros o biodiscos). El consumo energético por metro cúbico promedio de las distintas EDAR es de 0.23 kWh/m<sup>3</sup>. Dentro de este grupo de EDAR no se observan valores muy alejados del resto. El valor más elevado corresponde a la EDAR de Villamantilla (0.36 kWh/m<sup>3</sup>). Esta EDAR es la única que incorpora un proceso de estabilización de los fangos por vía química y una de las dos que incorporan un bombeo de cabecera. Estas características podrían contribuir al mayor consumo observado en esta EDAR. Por otra parte, la EDAR de La Estación presenta el consumo energético por metro cúbico más bajo (0.12 kWh/m<sup>3</sup>). Con la información disponible no se puede detectar la causa del menor consumo energético.

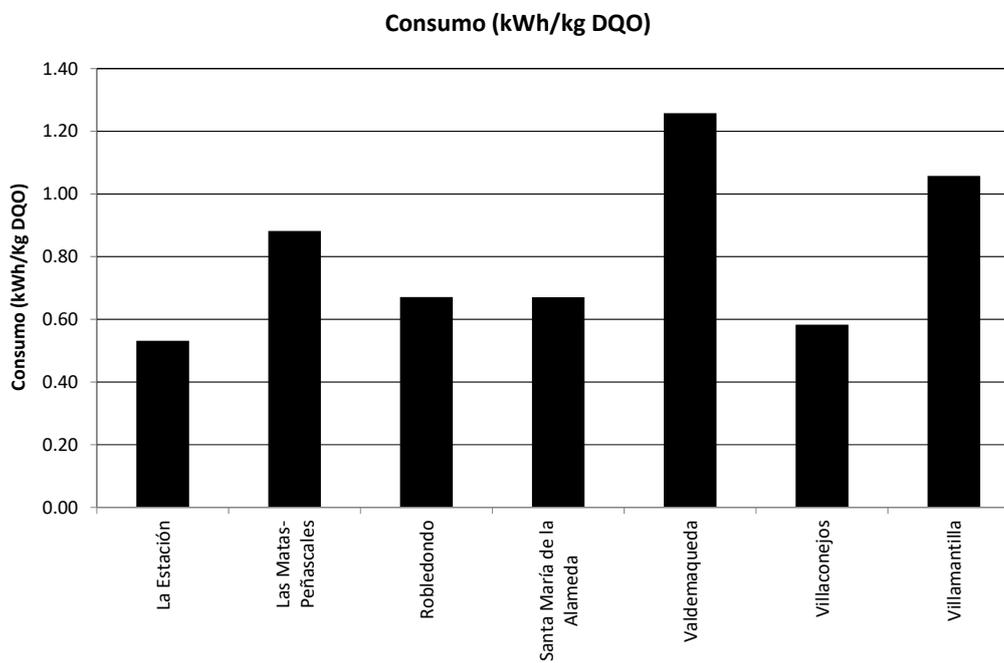
La Figura 33b muestra el consumo energético por kg de DQO eliminada de las EDAR con proceso de soporte sólido. Al analizar dicho consumo energético se obtiene un valor promedio de 0.81 kWh/kg de DQO eliminada. El valor más elevado corresponde a la EDAR de Valdemaqueda (1.26 kWh/kg de DQO) y se debe a la baja carga orgánica del agua influente (DQO = 178 mg/l frente al valor promedio de 371 mg/l en el resto de EDAR). El consumo por metro cúbico de la EDAR de Valdemaqueda está próximo al valor medio de este tipo de EDAR pero debido a la baja DQO del agua residual el consumo por Kg de DQO eliminada es muy superior al resto. Los valores más bajos se observan para las EDAR de La Estación y Villaconejos con valores inferiores a 0.6 kWh/kg de DQO.



Figura 33. Consumo energético de las EDAR con proceso de soporte sólido (a)  $\text{m}^3$  de agua tratada ( $\text{kWh}/\text{m}^3$ ) (b) Kg de DQO eliminada ( $\text{kWh}/\text{Kg DQO}$ ).



(a)



(b)



En la Figura 34 y en la Figura 35 se incluyen las representaciones estadísticas (Box-Whisker, función empírica de distribución acumulada y función de probabilidad normal) del consumo energético por  $m^3$  de agua tratada y por kg de DQO eliminada. En estas figuras se observa que la pauta de variabilidad del consumo energético sigue una distribución ligeramente asimétrica positiva, que no hay valores anormalmente elevados, y que el 50% de las EDARs presenta un consumo igual o inferior a  $0.22 \text{ kWh}/m^3$  y  $0.67 \text{ kWh}/\text{kgDQO}$ , respectivamente.

Figura 34. Representaciones estadísticas del consumo energético de las EDAR con proceso de soporte sólido por  $m^3$  de agua tratada ( $\text{kWh}/m^3$ ): **(a)** Box-Whisker **(b)** Función empírica de distribución acumulada y **(c)** Función de probabilidad normal.

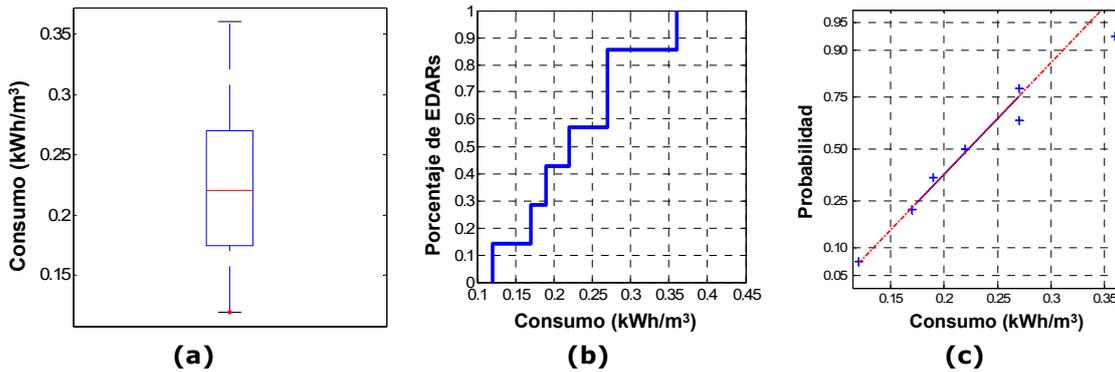
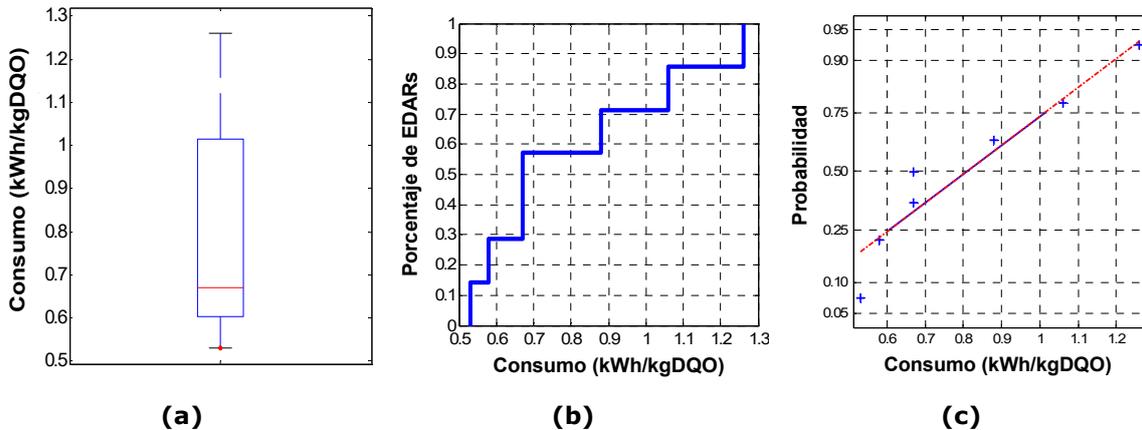


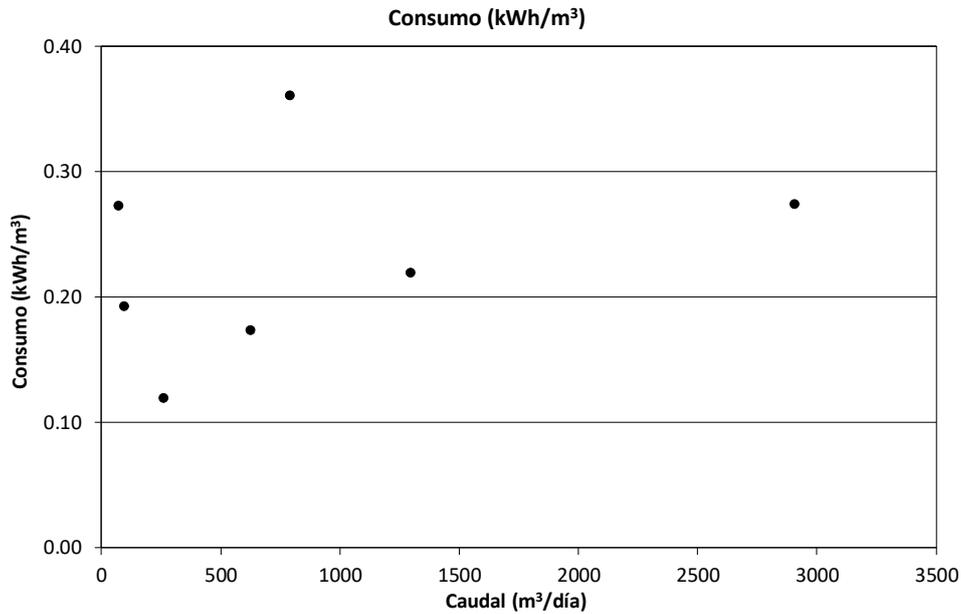
Figura 35. Representaciones estadísticas del consumo energético de las EDAR con proceso de soporte sólido por Kg de DQO eliminada ( $\text{kWh}/\text{kgDQO}$ ): **(a)** Box-Whisker **(b)** Función empírica de distribución acumulada y **(c)** Función de probabilidad normal.



La Figura 36 muestra el consumo energético de las EDAR con proceso de soporte sólido en función del caudal de tratamiento. Tal y como se observa en dicha figura, no existe ninguna relación entre el consumo energético por metro cúbico de agua tratada y el caudal de tratamiento.



Figura 36. Consumo energético de las EDAR con proceso de soporte sólido frente al caudal de tratamiento.



Debido al bajo número de EDAR con procesos de soporte sólido no se puede realizar ningún estudio estadístico acerca del efecto de las distintas características de las EDAR (existencia de bombeo de entrada, eliminación de nutrientes...). Analizando individualmente los consumos de estas EDAR se observa que las EDAR con bombeo de cabecera (Villamantilla y Las Matas-Peñascales) son las que presentan mayor consumo energético por metro cúbico de agua tratada (0.36 y 0.27 kWh/m<sup>3</sup>), aunque la EDAR de Santa María de la Alameda que no tiene bombeo de cabecera presenta el mismo consumo que la EDAR de Las Matas-Peñascales, 0.27 kWh/m<sup>3</sup>.

### 3.2.5 Otras EDAR.

Dentro del conjunto de EDAR que gestiona Canal Isabel II existe un reducido número de instalaciones que utilizan tecnologías diferentes a las analizadas anteriormente. Dichas tecnologías son: filtro verde (2 EDAR, Patones y Redueña), lecho bacteriano (2 EDAR, Cervera de Buitrago y El Berrueco), reactor ORBAL (2 EDAR, Algete y Robledo de Chavela), fangos activados con estabilización química (2 EDAR, Casaquemada y La Poveda), reactor SBR (1 EDAR, Molar Sur) y proceso BIOFOR (1 EDAR, Galapagar-Torrelodones). Debido al reducido número de EDAR que integran cada una de estas tecnologías no se han incluido en el análisis estadístico realizado.



### 3.3 Comparación de los distintos sistemas de depuración.

La Figura 37 muestra el consumo energético por metro cúbico de agua tratada para todas las EDAR analizadas frente al caudal de tratamiento distinguiendo con diferentes símbolos las distintas tecnologías. En dicha figura se puede observar que las tecnologías utilizadas para los caudales de tratamiento más bajos (inferiores a 3,000 m<sup>3</sup>/día) son los procesos de oxidación total y soporte sólido. Para caudales de tratamiento intermedios (entre 3,000 y 18,000 m<sup>3</sup>/día) las tecnologías utilizadas son los sistemas de fangos activados con digestión aerobia o anaerobia de fangos. Para caudales de tratamiento elevados (por encima de 18,000 m<sup>3</sup>/día) todas las EDAR incluyen un sistema de fangos activados con digestión anaerobia. En la Figura 37 se observa una gran disparidad en los consumos energéticos de las EDAR con proceso de oxidación total, obteniéndose valores desde 0.2 hasta 6.5 kWh/m<sup>3</sup>. Esa disparidad viene provocada por los elevados valores de consumos energéticos que presentan las EDAR que tratan caudales muy bajos. Todas las EDAR con consumos superiores a 1.5 kWh/m<sup>3</sup> tratan caudales inferiores a 700 m<sup>3</sup>/día.

En la Figura 37 no se observa el efecto de las distintas tecnologías de tratamiento sobre el consumo energético por metro cúbico de agua tratada, apreciándose un solapamiento entre los consumos que presentan las distintas EDAR. Para apreciar mejor este solapamiento entre los consumos de las diversas tecnologías la Figura 38 muestra una ampliación de la Figura 37 representando únicamente las instalaciones con consumos inferiores a 1.5 kWh/m<sup>3</sup> y caudal de tratamiento inferior a 45,000 m<sup>3</sup>/día. En la Figura 38 se puede observar claramente que con consumos energéticos por metro cúbico de agua tratada entre 0.3 y 1 kWh/m<sup>3</sup> se encuentran EDAR con proceso de oxidación total, fangos activados con digestión aerobia y fangos activados con digestión anaerobia. Los consumos energéticos más bajos se obtienen para las EDAR con procesos de soporte sólido y las EDAR con fangos activados y digestión anaerobia que incorporan un sistema de cogeneración.

Al analizar los datos de consumo energético por kilo de DQO eliminada (ver Figura 39) las conclusiones obtenidas son similares a las anteriormente comentadas. En la Figura 39 se observa que algunas de las EDAR con proceso de oxidación total presentan consumos energéticos por kg de DQO muy superiores al resto. Estos valores se corresponden con EDAR que tratan caudales muy bajos o aguas residuales con bajas concentraciones de materia orgánica. Al ampliar la zona de la gráfica donde se encuentra el mayor número de EDAR (caudales inferiores a 45,000 m<sup>3</sup>/día y consumos energéticos inferiores a 5 kW/kg de DQO) (ver Figura 40) se observa la gran variabilidad que presentan las EDAR con proceso de oxidación total, los bajos consumos energéticos que presentan las EDAR con proceso de soporte sólido y consumos energéticos algo menores en las EDAR con digestión anaerobia respecto de las que tienen digestión aerobia.



Figura 37. Consumo energético por metro cúbico de agua tratada para todas las EDAR analizadas frente al caudal de tratamiento.

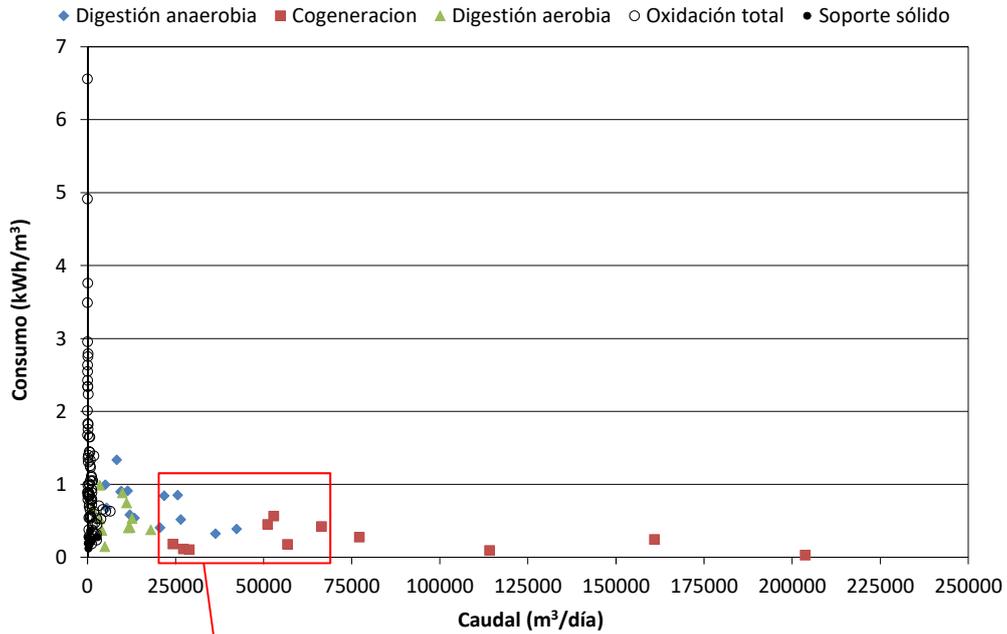


Figura 38. Ampliación de la gráfica anterior representando el consumo energético por metro cúbico de agua tratada para todas las EDAR analizadas con caudal inferior a 45,000 m<sup>3</sup>/día y consumo inferior a 1.5 kWh/m<sup>3</sup> frente al caudal de tratamiento.

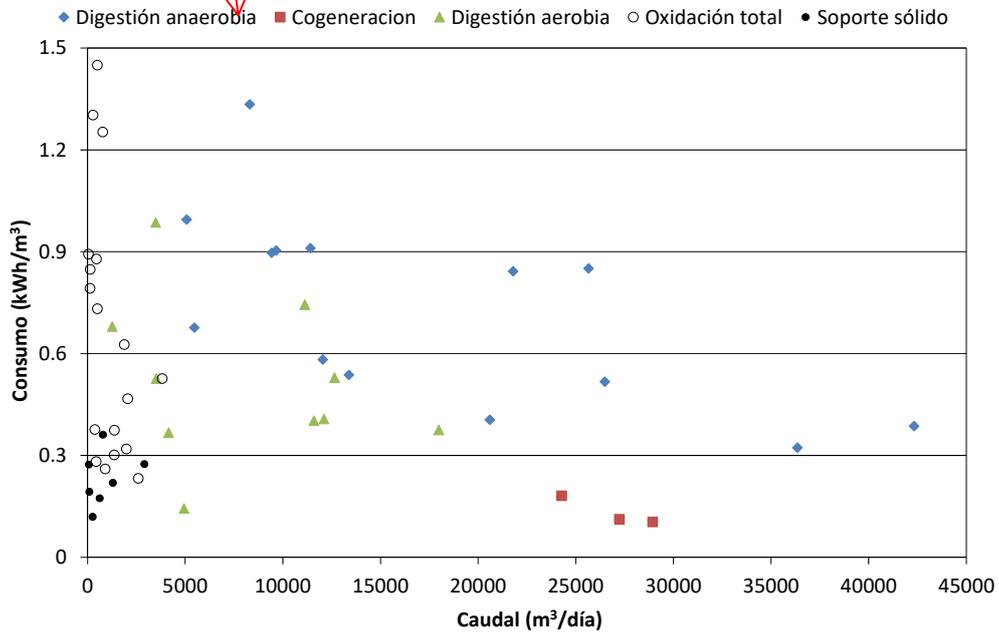




Figura 39. Consumo energético por kg de DQO eliminada para todas las EDAR analizadas frente al caudal de tratamiento.

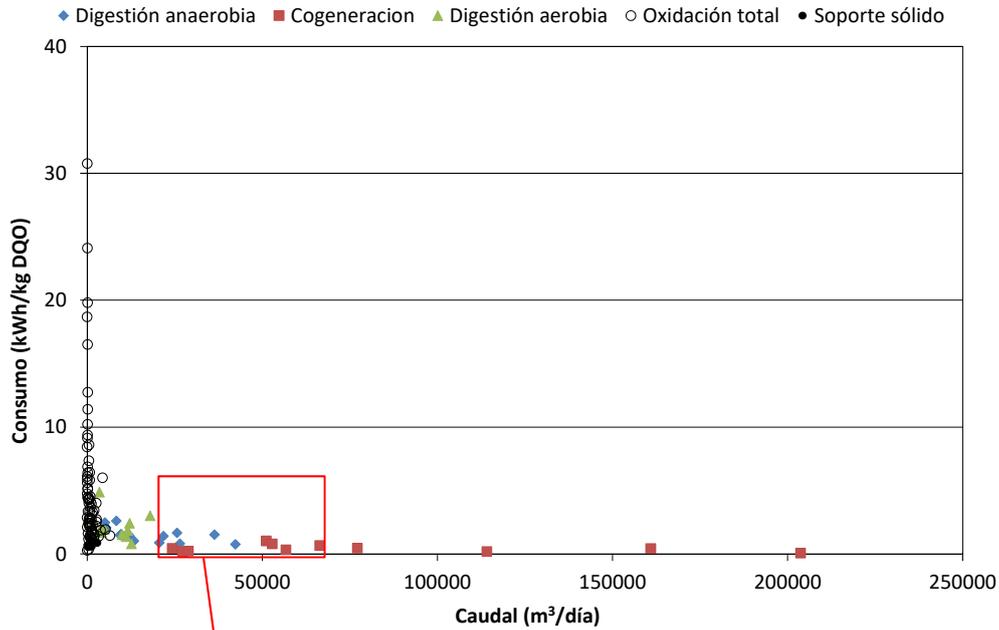
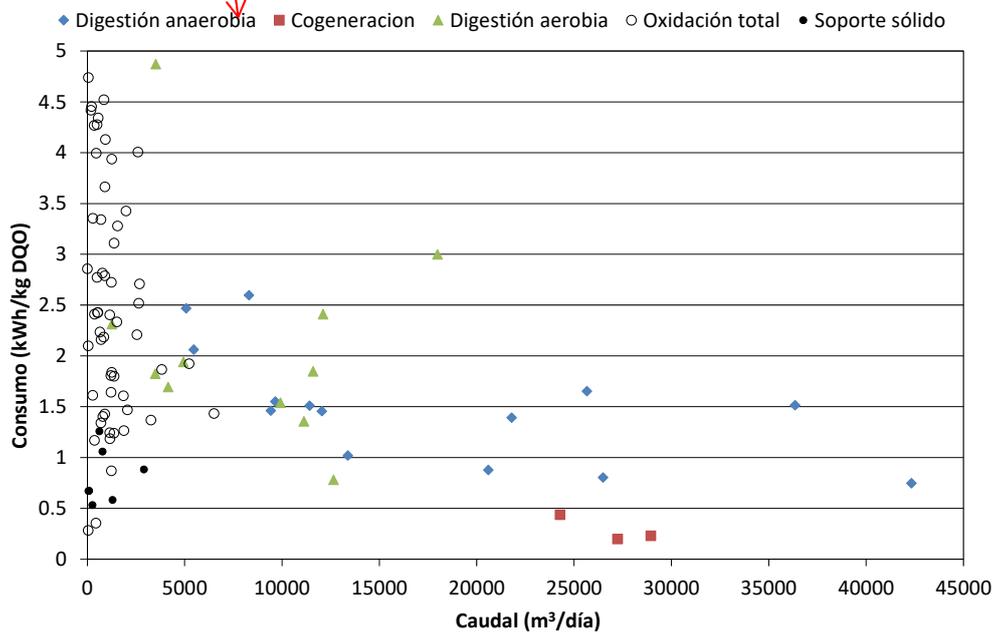


Figura 40. Ampliación de la gráfica anterior representando el consumo energético por kg de DQO eliminada para todas las EDAR analizadas con caudal inferior a 45,000 m<sup>3</sup>/día y consumo inferior a 5 kWh/ kg de DQO frente al caudal de tratamiento.



La Tabla 46 muestra los valores promedio de consumo energético por metro cúbico de agua tratada y por kg de DQO eliminada para las distintas tecnologías de tratamiento. Los valores de consumo energético (por metro cúbico y por kg de DQO eliminada) más bajos se obtienen para las EDAR de soporte sólido porque no incluyen sistema de aireación y para las EDAR que incluyen un sistema de cogeneración por la recuperación de la energía a partir del metano producido. Al analizar los datos de consumo energético por metro cúbico de agua tratada se observa que las EDAR con digestión aerobia presentan un menor consumo en comparación con las EDAR con



proceso de oxidación total o con digestión anaerobia de fangos. Sin embargo, al analizar los datos normalizados respecto a la materia orgánica eliminada se invierte la tendencia, presentando un menor consumo las EDAR con digestión anaerobia de fango. El motivo de este cambio se debe a la mayor concentración de DQO en el agua influente de las EDAR con digestión anaerobia (promedio 535 mg/l) frente a las EDAR con digestión aerobia (promedio 354 mg/l) y las de oxidación total (promedio 368 mg/l).

Tabla 46. Valores promedio de consumo energético por metro cúbico de agua tratada y por kg de DQO eliminada para las distintas tecnologías de tratamiento.

Tecnología	Consumo energético por metro cúbico de agua tratada kWh/m <sup>3</sup>	Consumo energético por kg de DQO eliminada kWh/kg DQO
Soporte sólido	0.23	0.81
Oxidación total (EDAR con caudales superiores a 700 m <sup>3</sup> /día)	0.72	2.50
Fangos activados con digestión aerobia	0.55	2.14
Fangos activados con digestión anaerobia (sin cogeneración)	0.73	1.51
Fangos activados con digestión anaerobia (con cogeneración)	0.24	0.43

### 3.4 Conclusiones del estudio energético de las EDAR

Canal de Isabel II ha facilitado al grupo de investigación CALAGUA información referida a la explotación de un total de 156 estaciones depuradoras en la Comunidad de Madrid. El análisis del consumo energético de dichas EDAR se ha realizado clasificando las instalaciones en 5 grupos en función de la tecnología de tratamiento utilizada. Estos grupos están formados por: 102 EDARs con proceso de aireación prolongada, 11 EDARs con proceso de fangos activados y digestión aerobia, 25 EDARs con proceso de fangos activados y digestión anaerobia, 7 EDARs con proceso de soporte sólido y 11 EDAR con otras tecnologías.

Tras el análisis de los consumos energéticos para cada uno de estos grupos se han obtenido las siguientes conclusiones:

#### EDAR con proceso de oxidación total

- Dentro de este grupo hay un total de 20 estaciones depuradoras cuya agua residual influente ya cumple con los requisitos de vertido de materia orgánica ( $DBO_5 < 25$  mg/l y  $DQO < 125$  mg/l) por lo que el tratamiento biológico no sería necesario. Por este motivo estas EDAR no han sido incluidas en el análisis de los consumos energéticos. Las EDAR en cuestión son: Aoslos, Berzosa de Lozoya, Cincovillas, Gandullas, Horcajo de la Sierra, La Hiruela, Madarcos, Montejo de la Sierra, Navarredonda, Navas de Buitrago, Paredes de Buitrago, Pinilla de Buitrago, Piñuecar, Riosequillo, Robledillo de la Jara, Robregordo, San Mamés, Serrada de la Fuente, Sieteiglesias, Somosierra.
- El consumo energético por metro cúbico muestra una gran variabilidad, con valores comprendidos entre 0.2 y 6.5 kWh/m<sup>3</sup>, observándose una relación entre el consumo



energético por metro cúbico y el caudal de tratamiento, aumentando el consumo conforme disminuye el caudal tratado.

- Existen 4 estaciones depuradoras presentan un consumo claramente superior al resto. Estas EDAR son: La Hoya, Las Herreras, Batres y El Atazar. Teniendo en cuenta la relación observada entre el consumo energético por metro cúbico y el caudal tratado, los bajos caudales de tratamiento en las EDAR de El Atazar, Las Herreras y La Hoya (inferiores a 16 m<sup>3</sup>/día) explican sus elevados consumos. Sin embargo, para el caudal tratado en la EDAR de Batres (110 m<sup>3</sup>/día) sería esperable un menor consumo energético, por lo que sería conveniente analizar con mayor detalle las causas de su elevado consumo energético.
- También sería conveniente analizar con mayor detalle la EDAR de Meco, que presenta un consumo energético muy superior al resto de instalaciones que tratan caudales similares (1.4 kWh/m<sup>3</sup> de la EDAR de Meco frente a valores inferiores a 0.6 kWh/m<sup>3</sup> del resto de instalaciones).
- En el consumo energético por kg de DQO eliminada existe una variabilidad aun mayor que en el consumo energético por metro cúbico debido a la variabilidad de la DQO del influente. Al igual que en el caso anterior, se observa una relación entre el consumo energético por kg de DQO eliminada y el caudal de tratamiento, aumentando el consumo conforme disminuye el caudal tratado.
- Existen 7 estaciones depuradoras (El Atazar, Las Herreras, San Martín de ValdeIglesias Noreste, San Martín de ValdeIglesias Norte, Puebla de la Sierra, Prádena del Rincón y Valdaracete) que presentan un consumo energético por kg de DQO eliminada muy superior al resto. En el caso de las dos primeras el motivo es el bajo caudal de tratamiento mientras que en las restantes EDAR el elevado consumo se atribuye a la baja DQO del agua residual influente (en todos los casos inferiores a 170 mg/l y en algunos de ellos inferiores a 100 mg/l).
- La tecnología de aireación más utilizada son las soplantes, aunque se observa un mayor consumo energético tanto por metro cúbico de agua tratada como por kilo de DQO eliminada en estas depuradoras frente a las que utilizan turbinas o rotores. Se recomienda la optimización de los sistemas de aireación mediante soplantes porque tal y como se observó en el análisis de consumos desagregados de la EDAR de Torrejón (ver apartado 4.2) la aireación supone el mayor porcentaje de consumo de energía.
- Las EDAR que incluyen bombeo de cabecera presentan un consumo energético por metro cúbico de agua tratada superior a las que no lo incluyen. Esta diferencia es más acusada en las EDAR con caudales superiores a 750 m<sup>3</sup>/día, obteniéndose valores promedio de consumo energético de 0.778 kWh/m<sup>3</sup> en las EDAR con bombeo de cabecera y 0.388 kWh/m<sup>3</sup> en las que no lo tienen. Sin embargo, al realizar la comparación del consumo energético en kWh por kilo de DQO eliminada no se observa diferencia entre el consumo de las EDAR con bombeo de cabecera respecto de las que no lo tienen debido a la gran diferencia existente en la DQO del agua residual influente en las EDAR con bombeo de cabecera (valor promedio de 431 mg/l) frente a las que no lo tienen (valor promedio de 273 mg/l). De todas formas, debido a la importancia del consumo energético del bombeo de cabecera respecto del consumo energético obtenido en la EDAR de Torrejón se recomienda optimizar el funcionamiento de los bombeos de cabecera instalando variadores de frecuencia en las bombas y sistemas de control avanzados.
- No se observan diferencias entre los consumos energéticos de las EDAR que eliminan nutrientes y las que no eliminan nutrientes.

#### **EDAR con proceso de fangos activados y digestión aerobia**

- Los valores promedio de consumo energético de las 11 EDAR que incorporan el proceso de fangos activados con digestión aerobia de fangos son 0.55 kWh/m<sup>3</sup> y 2.14 kWh/kg de DQO.



- En el consumo energético por metro cúbico los valores más elevados corresponden a las EDAR de San Agustín del Guadalix (0.99 kWh/m<sup>3</sup>) y Velilla de San Antonio (0.88 kWh/m<sup>3</sup>). Aunque la existencia de bombeo de cabecera y la relativamente elevada carga contaminante podrían ser las causas de los elevados consumos, se recomienda realizar un análisis desagregado de los consumos energéticos de estas instalaciones para poder proponer medidas concretas para la reducción de la huella energética.
- En el consumo energético por kilo de DQO eliminada el valor más elevado corresponde a la EDAR de Miraflores (4.87 kWh/kg de DQO). Aunque este valor tan elevado se debe a la baja carga orgánica del agua influente (DQO = 133 mg/l) existe un elevado potencial de reducción en el consumo energético de esta EDAR. Este potencial se pone de manifiesto al comparar este consumo energético con el de la EDAR de Pinilla, que tratando un agua residual con una DQO aún más baja, presenta un consumo energético por kg de DQO incluso inferior al valor promedio (1.94 kWh/kg de DQO).

### **EDAR con proceso de fangos activados y digestión anaerobia**

- El análisis de este grupo de 25 estaciones depuradoras se ha realizado distinguiendo entre aquellas que disponen de sistema de cogeneración (11 EDAR) y las que no disponen de dicho sistema (14 EDAR).
- El valor promedio del consumo energético por metro cúbico de agua tratada en las EDAR sin sistema de cogeneración es de 0.73 kWh/m<sup>3</sup>, existiendo 5 depuradoras con consumos superiores a 0.9 kWh/m<sup>3</sup>. Se trata de consumos muy elevados para EDAR con esta tecnología por lo que se recomienda realizar un estudio de los consumos energéticos desagregados para estas instalaciones. Las EDAR en cuestión son: Alcalá Este, Arroyo Quiñones, Boadilla, Navalcarnero y Tres Cantos.
- Al analizar los datos de consumo energético por kg de DQO en las EDAR sin sistema de cogeneración se obtiene un valor promedio de 1.51 kWh/kg de DQO y se observa que 3 EDAR presentan un consumo energético muy superior al resto. Estas EDAR son: Alcalá Este, Navalcarnero y Torres de la Alameda. Las dos primeras ya presentaban un consumo por metro cúbico elevado mientras que la EDAR de Torres de la Alameda presenta una carga orgánica relativamente baja en comparación con el resto de estas instalaciones y por eso presenta un mayor consumo por kg de DQO eliminada.
- El valor promedio del consumo energético neto por metro cúbico de agua tratada en las EDAR con sistema de cogeneración es de 0.24 kWh/m<sup>3</sup>, muy inferior al obtenido en las EDAR sin sistema de cogeneración. Por tanto, se recomienda realizar un análisis económico para la instalación de un sistema de cogeneración en todas las EDAR con digestión anaerobia de fangos. En ese análisis económico se deben considerar los costes de instalación y mantenimiento del sistema de cogeneración y la energía que se prevé obtener.
- Dentro de las instalaciones con sistema de cogeneración hay 3 que presentan un consumo superior al resto (por encima de 0.4 kWh/m<sup>3</sup>). Esas EDAR son Arroyo Culebro Cuenca Baja, Arroyo Culebro Cuenca Media Alta y La Gavia. En estas EDAR el porcentaje de recuperación de energía no alcanza el 35% mientras que en el resto dicho porcentaje supera el 50%. Se recomienda analizar el funcionamiento de estas EDAR para determinar las causas del elevado consumo energético y proponer medidas para la reducción de la huella energética. En el extremo opuesto se encuentra la EDAR de Sur que presenta un consumo energético neto por metro cúbico de 0.03 kWh/m<sup>3</sup> con un porcentaje de recuperación del 91%.
- Al analizar los datos de consumo energético por kg de DQO eliminada se obtiene un valor promedio de 0.43 kWh/kg de DQO, muy inferior al obtenido en las EDAR sin sistema de cogeneración. Al igual que en el caso anterior, las EDAR de Arroyo Culebro Cuenca Baja, Arroyo Culebro Cuenca Media Alta y La Gavia son las que mayor consumo energético por



kg de DQO eliminada presentan mientras que la EDAR de Sur es la que presenta un consumo más bajo.

- Al analizar el consumo energético por metro cúbico frente al caudal de tratamiento, se observa una disminución de dicho consumo conforme aumenta el caudal para las EDAR sin sistema de cogeneración. En las EDAR que incluyen sistema de cogeneración se observa que el consumo energético neto es independiente del caudal tratado.
- Las EDAR con bombeo de cabecera presentan un mayor consumo energético por metro cúbico y por kg de DQO eliminada que las que no tienen dicho bombeo. Esta diferencia es mucho más significativa en el conjunto de EDAR que disponen de sistema de cogeneración. Dado que las EDAR sin bombeo de cabecera consumen en torno a 0.3 kWh/m<sup>3</sup> menos que las que sí lo tienen se recomienda optimizar dichos bombeos instalando variadores de frecuencia y sistemas de control avanzados.
- Debido a la importancia en el consumo energético de los factores anteriormente analizados (existencia o no de sistema de cogeneración y bombeo de entrada), el análisis del efecto del equipo utilizado para la aireación se ha realizado por separado en cada uno de los grupos resultantes al clasificar las EDAR en función de dichos factores. A la vista de los valores promedio de consumo energético no parece haber diferencias significativas entre los distintos sistemas de aireación aunque el reducido número de EDAR perteneciente a cada uno de los grupos provoca que los resultados no sean concluyentes.
- El estudio del efecto de la inclusión de procesos de eliminación de nutrientes sobre el consumo energético se ha realizado igual que para el sistema de aireación (clasificando las EDAR según la existencia o no de sistema de cogeneración y bombeo de entrada). Aunque debido al escaso número de estaciones depuradoras existentes para cada uno de los grupos analizados no se ha realizado un análisis estadístico, en todos los grupos se observa un menor consumo energético promedio en aquellas EDAR que no eliminan nutrientes. Los principales consumos energéticos asociados a los procesos de eliminación de nutrientes corresponden a los sistemas de aireación y de agitación, por lo que se recomienda la instalación de sistemas de control de la aireación en estas EDAR junto con el análisis de la potencia de los agitadores utilizados para la agitación de los reactores anóxicos y anaerobios.

#### **EDAR con proceso de soporte sólido**

- El consumo energético por metro cúbico promedio de las 7 EDAR que incorporan un proceso de soporte sólido es de 0.23 kWh/m<sup>3</sup>. Este valor es muy inferior al obtenido en el resto de los grupos, con excepción de aquellas EDAR que disponen de sistema de cogeneración. El valor más elevado corresponde a la EDAR de Villamantilla (0.36 kWh/m<sup>3</sup>). La explicación a este mayor consumo puede venir derivada de que esta EDAR es la única que incorpora un proceso de estabilización de los fangos por vía química y una de las dos que incorporan un bombeo de cabecera.
- Al analizar el consumo energético por kg de DQO eliminada se obtiene un valor promedio de 0.81 kWh/kg de DQO. El valor más elevado corresponde a la EDAR de Valdemaqueda (1.26 kWh/kg de DQO) y se debe a la baja carga orgánica del agua influente (DQO = 178 mg/l frente al valor promedio de 371 mg/l en el resto de EDAR).
- El caudal de agua residual tratado por estas EDAR varía entre 70 y 2,900 m<sup>3</sup>/día sin que se observe ninguna relación entre el consumo energético por metro cúbico y el caudal tratado.

#### **Comparación de las distintas tecnologías**

- La Tabla 47 resume los valores promedio de consumo energético por metro cúbico y por kg de DQO eliminada para las distintas tecnologías junto con el rango de caudales de tratamiento en el que se ha utilizado. Los consumos energéticos por metro cúbico de agua tratada más bajos se obtienen para las EDAR de soporte sólido y las que disponen de sistema de cogeneración.



Cabe destacar que el consumo promedio de las EDAR con digestión aerobia es inferior al obtenido en las EDAR con digestión anaerobia sin cogeneración. En el análisis del consumo energético por kg de DQO eliminada las EDAR con sistema de cogeneración presentan el consumo más bajo mientras que las EDAR con digestión anaerobia sin cogeneración presentan un menor consumo que las que tienen digestión aerobia. El motivo de este cambio respecto al consumo por metro cúbico se debe a la mayor concentración de DQO en el agua influente de las EDAR con digestión anaerobia (promedio 535 mg/l) frente a las EDAR con digestión aerobia (promedio 354 mg/l) y las de oxidación total (promedio 368 mg/l).

Tabla 47. Valores promedio de consumo energético por metro cúbico de agua tratada y por kg de DQO eliminada para las distintas tecnologías de tratamiento.

Tecnología	Rango de caudales tratados en las EDAR con cada tecnología m <sup>3</sup> /día	Consumo energético por metro cúbico de agua tratada kWh/m <sup>3</sup>	Consumo energético por kg de DQO eliminada kWh/kg DQO
Soporte sólido	70 - 2,900	0.23	0.81
Oxidación total (EDAR con caudales superiores a 700 m <sup>3</sup> /día)	6 - 6,500	0.72	2.50
Fangos activados con digestión aerobia	1,250 - 18,000	0.55	2.14
Fangos activados con digestión anaerobia (sin cogeneración)	5,000 - 42,000	0.73	1.51
Fangos activados con digestión anaerobia (con cogeneración)	24,000 - 205,000	0.24	0.43

#### Resumen de medidas propuestas para la disminución de la huella energética.

- Las principales medidas que se proponen para reducir el consumo energético en las EDAR son:
  - Instalación de un sistema de cogeneración en las EDAR con digestión anaerobia: Con esta medida el porcentaje de ahorro estimado se encuentra entre un 30% y 60% del consumo total de la EDAR.
  - Instalación de un sistema de control avanzado para el sistema de aireación: Con esta medida el porcentaje de ahorro estimado se encuentra entre un 20% y 30% del consumo del sistema de aireación. Este porcentaje dependerá del sistema de control existente actualmente.
  - Instalación de un sistema de control avanzado para el bombeo de cabecera: Con esta medida el porcentaje de ahorro estimado se encuentra entre un 10% y 15% del consumo del sistema de bombeo.

La Tabla 48 muestra un resumen de las EDAR que tal y como se ha comentado a lo largo del informe presentan consumos energéticos superiores al promedio obtenido para las instalaciones con su misma tecnología. Dicha tabla también recoge en la mayoría de los casos algunas de las posibles causas que originan los elevados consumos energéticos.



Tabla 48. Listado de EDAR con consumos energéticos superiores al resto.

Tecnología	EDAR	Problema detectado	Posible causa
Oxidación total	Batres	Elevado consumo energético por metro cúbico de agua tratada en comparación con el resto de EDAR con esta misma tecnología.	Para su determinación sería necesaria una recopilación de datos de consumos energéticos desagregados y un análisis más profundo de los mismos.
	El Atazar, Las Herreras	Elevado consumo energético por metro cúbico de agua tratada y por kg de DQO eliminada en comparación con el resto de EDAR con esta misma tecnología.	Bajo caudal de tratamiento.
	La Hoya	Elevado consumo energético por metro cúbico de agua tratada en comparación con el resto de EDAR con esta misma tecnología.	Bajo caudal de tratamiento.
	Meco	Elevado consumo energético por metro cúbico de agua tratada en comparación con EDAR con esta misma tecnología que tratan caudales similares.	Esta EDAR incluye tratamiento terciario.
	San Martín de ValdeIglesias Noreste, San Martín de ValdeIglesias Norte, Puebla de la Sierra, Prádena del Rincón y Valdaracete	Elevado consumo energético por kg de DQO eliminada en comparación con el resto de EDAR con esta misma tecnología.	Baja DQO del agua residual influente.
	Perales de Tajuña y Tielmes	Elevado consumo energético por metro cúbico de agua tratada en comparación con EDAR con esta misma tecnología que tratan caudales similares.	Baja DQO del agua residual influente por problemas de intrusión de aguas limpias.
Fangos activados con digestión aerobia	San Agustín de Guadalix	Elevado consumo energético por metro cúbico de agua tratada en comparación con el resto de EDAR con esta misma tecnología.	Esta EDAR incluye bombeo de cabecera y elevada carga contaminante.
	Velilla de San Antonio	Elevado consumo energético por metro cúbico de agua tratada en comparación con el resto de EDAR con esta misma tecnología.	Se trata de un proceso biológico en 2 etapas con bombeo de cabecera y elevada carga contaminante.
	Miraflores	Elevado consumo energético por kg de DQO eliminada en comparación con el resto de EDAR con esta misma tecnología.	Baja DQO del agua residual influente.
Fangos activados con digestión anaerobia con cogeneración	Arroyo Culebro Cuenca Baja, Arroyo Culebro Cuenca Media Alta y La Gavia	Elevado consumo energético por metro cúbico de agua tratada y por kilo de DQO eliminada en comparación con el resto de EDAR con esta misma tecnología.	Caudal tratado inferior al caudal de diseño.
Fangos activados con digestión anaerobia sin cogeneración	Alcalá Este, Arroyo Quiñones, Boadilla, La Reguera, Navalcarnero, Torrejón de Ardoz y Tres Cantos	Elevado consumo energético por metro cúbico de agua tratada en comparación con el resto de EDAR con esta misma tecnología.	Para su determinación sería necesaria una recopilación de datos de consumos energéticos desagregados y un análisis más profundo de los mismos.
	Torres de la Alameda	Elevado consumo energético por kg de DQO eliminada en comparación con el resto de EDAR con esta misma tecnología.	DQO del agua residual influente inferior a la media de instalaciones.



## 4 ESTUDIO DE LOS CONSUMOS DESAGREGADOS EN LAS EDAR DE TORREJÓN DE ARDOZ Y LA EDAR DE VALDEMORILLO.

El objetivo de este apartado consiste en la monitorización de dos estaciones depuradoras tipo y el análisis de datos desagregados de consumo energético en dichas instalaciones de depuración. La Fundación Canal eligió como instalaciones tipo a monitorizar las EDAR de Torrejón de Ardoz y Valdemorillo. Se trata de dos instalaciones con características diferenciadas en cuanto a caudal de tratamiento y tecnologías de depuración utilizadas. La EDAR de Torrejón de Ardoz es una planta grande con el esquema típico de dichas instalaciones (decantación primaria, proceso de fangos activados con eliminación de nutrientes, decantación secundaria y digestión anaerobia de fangos) mientras que la EDAR de Valdemorillo es una planta pequeña con un proceso de aireación prolongada mediante un canal de oxidación. Dada la gran diferencia entre los procesos de depuración utilizados en ambas plantas, las conclusiones que se extraigan del análisis de los consumos energéticos de la EDAR de Torrejón podrán ser extrapolables a las plantas grandes de la Comunidad de Madrid, mientras que las que se extraigan del análisis de la EDAR de Valdemorillo podrán ser extrapolables a las EDAR de la Comunidad de Madrid que incluyan un proceso de aireación prolongada.

### 4.1 Descripción de la EDAR de Torrejón de Ardoz

La EDAR de Torrejón de Ardoz fue diseñada para tratar un caudal medio diario de 75,000 m<sup>3</sup>/día correspondientes a una población de 450,000 habitantes equivalentes. El diseño incluye la eliminación de materia orgánica, nitrógeno y fósforo de las aguas residuales.

#### 4.1.1 Línea de aguas

La línea de aguas de la EDAR de Torrejón consta de:

- Intercepción al colector existente
- Medida de caudal de agua bruta en tubería (1 ud)
- Obra de llegada y aliviadero del agua bruta
- Pozo de gruesos
- Desbaste de muy gruesos (3 ud)
- Desbaste de gruesos (3 ud)
- Bombeo del agua bruta (5 ud)
- Tamizado de finos (4 ud)
- Desarenador-desengrasador en canal aireado (3 ud)



- Medida de caudal de agua pretratada en tubería de tipo electromagnético (2 ud)
- Reparto de agua pretratada a decantación primaria (3 ud)
- Decantación primaria (3 ud)
- Bombeo de agua decantada (4 ud)
- Reparto de agua decantada a tratamiento biológico (3 ud)
- Medida de caudal a tratamiento biológico (3 ud)
- Reactor biológico (3 ud)
- Recirculación del licor mezcla de la zona óxica a la anóxica (3 ud)
- Recirculación del licor mezcla de la zona anóxica a la anaerobia (3 ud)
- Recirculación de fangos secundarios a la zona anóxica del reactor biológico (4 ud)
- Decantación secundaria (3 ud)
- Medida de caudal de agua tratada en tubería de tipo electromagnético (1 ud)
- Depósito de agua tratada
- Derivación a tratamiento terciario
- Vertido del efluente al emisario que va a parar al río Jarama

#### 4.1.2 Línea de fangos

La línea de fangos de la EDAR de Torrejón consta de:

- Extracción de los fangos en exceso a flotación (4 ud)
- Extracción de los fangos de los decantadores primarios a tamizado (4 ud)
- Tamizado de los fangos primarios (2 ud)
- Espesamiento por gravedad de los fangos primarios (2 ud)
- Extracción de los fangos espesados (2 ud)
- Flotación de los fangos en exceso (2 ud)
- Extracción de los fangos flotados (2 ud)
- Cámara de mezcla (1 ud)
- Bombeo de fangos mezclados a digestión anaerobia (3 ud)
- Digestión primaria anaerobia (2 ud)
- Calefacción de fangos
- Agitación de fangos de los digestores primarios
- Depósito tampón de los fangos digeridos (1 ud)
- Deshidratación mecánica mediante centrífugas (2 ud)
- Bombeo de los fangos deshidratados (2 ud)

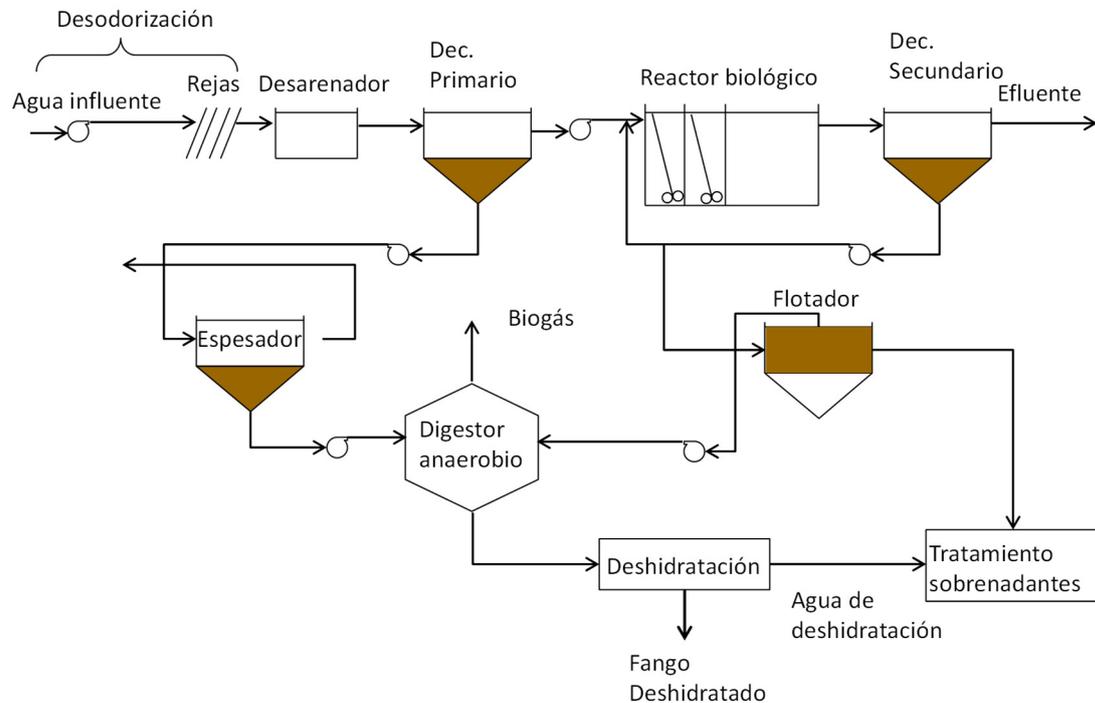


- Almacenamiento de los fangos deshidratados (4 ud)

#### 4.1.3 Esquema de la EDAR

La Figura 41 muestra un diagrama del esquema de tratamiento de la EDAR de Torrejón de Ardoz.

Figura 41. Esquema de tratamiento de la EDAR de Torrejón de Ardoz



#### 4.1.4 Análisis de los sistemas de medición de consumos energéticos instalados actualmente en la EDAR

La EDAR de Torrejón cuenta con 11 CCMs (CCM1A, CCM1B, CCM1C, CCM2, CCM3A, CCM3B, CCM3C, CCM4A, CCM4B, CCM5, CCM6). Cada uno de estos CCMs incluye un medidor de la energía consumida por los distintos equipos a los que dan servicio estos CCMs. La Tabla 49 muestra los distintos equipos conectados al CCM1A con la potencia instalada por equipo.



Tabla 49. Listado de equipos con sus potencias que dependen del CCM1A

CCM 1A	POTENCIA (kW)
TAMIZ BY-PASS GNAL	0.66
COMPUERTA ENTRADA	0.75
P. GRUA	7.50
C. ENTRADA D. GRUESOS A	0.37
C. ENTRADA D. GRUESOS B	0.37
C. ENTRADA D. GRUESOS C	0.37
REJA GRUESOS A	1.50
REJA GRUESOS B	1.50
REJA GRUESOS C	1.50
TORN. REVERS. GRUESOS	3.00
TORN. ELEVADOR GRS A	7.50
TORN. ELEVADOR GRS B	7.50
TORN. INYECTOR GRS	1.50
T. DESCARGA GRS C	1.50
T. DESCARGA GRS D	1.50
COMP. SALIDA GRSOS A	0.37
COMP. SALIDA GRSOS B	0.37
COMP. SALIDA GRSOS C	0.37
BOMBA ELEV. AGUA BRUTA A	132.00
BOMBA ELEV. AGUA BRUTA B	132.00
BOMBA ELEV. AGUA BRUTA C	132.00
BOMBA ELEV. AGUA BRUTA D	132.00
BOMBA ELEV. AGUA BRUTA	132.00
TOMAMUESTRAS AUT	0.55
POL.+CUCHA. ANFIBIA	7.50

A la vista de la información mostrada en la Tabla 49 se puede observar que el 93% de la potencia instalada en el CCM1A corresponde a las bombas de elevación del agua bruta (5 x 132 kW). Para el análisis del consumo energético desagregado de los distintos equipos de la EDAR, se asumirá que el consumo energético de las bombas de elevación corresponde con los consumos registrados en el CCM1A. No se considera necesaria la desagregación de consumos de equipos dentro del CCM1A debido a la baja potencia del resto de equipos.

La Tabla 50 muestra los distintos equipos a los que da servicio el CCM1B con la potencia instalada por equipo.



Tabla 50. Listado de equipos con sus potencias que dependen del CCM1B

CCM 1B	POTENCIA (kW)
COMP. ENTRADA D. FINO A	0.75
COMP. ENTRADA D. FINO B	0.75
COMP. ENTRADA D. FINO C	0.75
COMP. ENTRADA D. FINO D	0.75
TAMIZ FINOS A	0.25
TAMIZ FINOS B	0.25
TAMIZ FINOS C	0.25
TAMIZ FINOS D	0.25
SIST. LIMPIEZ TAMIZ A	0.12
SIST. LIMPIEZ TAMIZ B	0.12
SIST. LIMPIEZ TAMIZ C	0.12
SIST. LIMPIEZ TAMIZ D	0.12
TORNILLO TAMICES	3.00
COMP. SALIDA D. FINO A	0.75
COMP. SALIDA D. FINO B	0.75
COMP. SALIDA D. FINO C	0.75
COMP. SALIDA D. FINO D	0.75
C. ENTRA. DESAREN. A	0.75
C. ENTRA. DESAREN. B	0.75
C. ENTRA. DESAREN. C	0.75
DESARENADOR A	3.00
DESARENADOR B	3.00
DESARENADOR C	3.00
SOPLANTE PREAERACIÓN A	5.50
SOPLANTE PREAERACIÓN B	5.50
SOPLANTE PREAERACIÓN C	5.50
SOPLANTE PREAERACIÓN D	5.50
VENTILADOR SOPLANTE A	0.12
VENTILADOR SOPLANTE B	0.12
VENTILADOR SOPLANTE C	0.12
VENTILADOR SOPLANTE D	0.12
AIREADOR FLOTANTES A	1.94
AIREADOR FLOTANTES B	1.94
AIREADOR FLOTANTES C	1.94
AIREADOR FLOTANTES D	1.94
AIREADOR FLOTANTES E	1.94
AIREADOR FLOTANTES F	1.94
AIREADOR FLOTANTES G	1.94
AIREADOR FLOTANTES H	1.94
AIREADOR FLOTANTES I	1.94
AIREADOR FLOTANTES J	1.94



CCM 1B	POTENCIA (kW)
AIREADOR FLOTANTES K	1.94
AIREADOR FLOTANTES L	1.94
AIREADOR FLOTANTES M	1.94
AIREADOR FLOTANTES N	1.94
AIREADOR FLOTANTES O	1.94
C. SALIDA DESARENADOR A	1.50
C. SALIDA DESARENADOR B	1.50
CLASF. ARENAS A	1.10
CLASF. ARENAS B	1.10
CONCENTR. FLOTANTES A	0.18
CONCENTR. FLOTANTES B	0.18
VENTIL. SALA SOP. A	0.20
VENTIL. SALA SOP. B	0.20
VALV. AIRE DESAREN. A	0.75
VALV. AIRE DESAREN. B	0.75
VALV. AIRE DESAREN. C	0.75

Como se puede observar en la Tabla 50, los equipos instalados en el CCM1B tienen una potencia instalada casi despreciable en comparación con la de otros equipos de la EDAR. La potencia total instalada en estos equipos representa únicamente el 2% de la potencia total instalada en la EDAR. Por este motivo no se considera necesaria la instalación de ningún medidor de energía para estos equipos. Los datos de consumo energético de este CCM1B serán englobados dentro del consumo energético correspondiente a la etapa de pretratamiento.

La Tabla 51 muestra los distintos equipos a los que da servicio el CCM1C con la potencia instalada por equipo.

Tabla 51. Listado de equipos con sus potencias que dependen del CCM1C

CCM 1C	POTENCIA (kW)
COMPRESOR SERV. A	4.00
COMPRESOR SERV. B	4.00
SECADOR FRIGO	1.10
COMP. ENTR. DECAN 1º A	1.50
COMP. ENTR. DECAN 1º B	1.50
COMP. ENTR. DECAN 1º C	1.50
DECANTADOR PRIMARIO A	0.25
DECANTADOR PRIMARIO B	0.25
DECANTADOR PRIMARIO C	0.25
BOMBA FLOT.DECANT. 1º A	2.00
BOMBA FLOT.DECANT. 1º B	2.00
BOMBA FLOT.DECANT. 1º C	2.00
BOMBA FLOT.DECANT. 1º D	2.00
BOMBA FANGO PRIMAR. A	5.50
BOMBA FANGO PRIMAR. B	5.50



CCM 1C	POTENCIA (kW)
BOMBA FANGO PRIMAR. C	5.50
BOMBA FANGO PRIMAR. D	5.50
BOMBA ELEV. INTERMEDIA A	55.00
BOMBA ELEV. INTERMEDIA B	55.00
BOMBA ELEV. INTERMEDIA C	55.00
BOMBA ELEV. INTERMEDIA D	55.00
POL. BOMBA INTERMEDIO	2.18
C. ENTRADA BIOLOGICO A	1.50
C. ENTRADA BIOLOGICO B	1.50
C. ENTRADA BIOLOGICO C	1.50
B. LIMP. VERT. DECT-1º A	1.25
B. LIMP. VERT. DECT-1º B	1.25
B. LIMP. VERT. DECT-1º C	1.25
T.M. AGUA PRIMARIA	0.55
VENTILADOR Nº 1	90.00
VENTILADOR Nº 2	90.00
BOMBA Nº1 RECIRCULAC. A	30.00
BOMBA Nº1 RECIRCULAC. B	30.00
BOMBA Nº1 RECIRCULAC. C	30.00
BOMBA Nº1 DOSIFICA. H2SO4	0.12
BOMBA Nº2 DOSIFICA.H2SO4	0.12
BOMBA Nº3 DOSIFICA. NaClO	0.12
BOMBA Nº4 DOSIFICA. NaClO	0.12
BOMBA Nº5 DOSIFICA.NaOH	0.12
BOMBA Nº6 DOSIFICA. NaOH	0.12
AGITADOR. DEP. SOSA	4.50

A la vista de la información mostrada en la Tabla 51, se observa que el 90% de la potencia instalada en el CCM1C corresponde a 3 equipos (bombeo de elevación intermedia, 40%, ventiladores del sistema de desodorización, 33%, y las bombas de recirculación de las torres de desodorización, 16,5%). Para el estudio del consumo energético desagregado de los diferentes equipos de la EDAR no sería suficiente con conocer el consumo energético de este CCM1C. Sin embargo, la EDAR de Torrejón de Ardoz dispone de medidores de consumo energético específicos para cada una de las bombas de elevación, para cada uno de los ventiladores y para cada una de las bombas de recirculación. Esta información es suficiente para disponer del consumo desagregado de los equipos que están integrados en el CCM1C.

La Tabla 52 muestra los distintos equipos a los que da servicio el CCM2 con la potencia instalada por equipo.



Tabla 52. Listado de equipos con sus potencias que dependen del CCM2

CCM 2	POTENCIA (kW)
DECANTADOR SECUND. A	0.37
DECANTADOR SECUND. B	0.37
DECANTADOR SECUND. C	0.37
SOPL. CEBADO DECT. 2º A	1.10
SOPL. CEBADO DECT. 2º B	1.10
SOPL. CEBADO DECT. 2º C	1.10
BOMBA FLOT. DECANT. 2º A	2.20
BOMBA FLOT. DECANT. 2º B	2.20
BOMBA FLOT. DECANT. 2º C	2.20
BOMBA FLOT. DECANT. 2º D	2.20
T. MUESTRA AGUA	0.55
BOMBA RECIRC. FANGOS A	30.00
BOMBA RECIRC. FANGOS B	30.00
BOMBA RECIRC. FANGOS C	30.00
BOMBA RECIRC. FANGOS D	30.00
BOMBA FANGO EN EXCESO A	3.00
BOMBA FANGO EN EXCESO B	3.00
BOMBA FANGO EN EXCESO C	3.00
BOMBA FANGO EN EXCESO D	3.00
VENT. SALA ELECTRIC.	1.50
BOMBA LIMP. VERT. DECT -2 A	1.25
BOMBA LIMP. VERT. DECT -2 B	1.25
BOMBA LIMP. VERT. DECT -2 C	1.25
V. EDIFICIO TRAF0	0.37

Analizando la información referida en la Tabla 52, se observa que el 79% de la potencia instalada corresponde al bombeo de recirculación de fangos. Dado que el segundo equipo con mayor potencia instalada (bombeo de purga de fangos) representa menos del 8% de la potencia instalada total, para el análisis del consumo energético desagregado se asumirá que los datos de consumo registrados en el CCM2 corresponden al bombeo de recirculación. En consecuencia, no se considera necesaria la instalación de ningún medidor de energía adicional.

La Tabla 53 muestra los distintos equipos a los que da servicio el CCM3A con la potencia instalada por equipo.



Tabla 53. Listado de equipos con sus potencias que dependen del CCM3A

CCM 3A	POTENCIA (kW)
AGIT. ZONA ANAEROBIA A	5.50
AGIT. ZONA ANAEROBIA B	5.50
AGIT. ZONA ANAEROBIA C	5.50
AGIT. ZONA ANAEROBIA D	5.50
AGIT. ZONA ANAEROBIA E	5.50
AGIT. ZONA ANAEROBIA F	5.50
AGIT. ZONA ANÓXICA A	5.50
AGIT. ZONA ANÓXICA B	5.50
AGIT. ZONA ANÓXICA C	5.50
AGIT. ZONA ANÓXICA D	5.50
AGIT. ZONA ANÓXICA E	5.50
AGIT. ZONA ANÓXICA F	5.50
AGIT. ZONA ANÓXICA G	5.50
AGIT. ZONA ANÓXICA H	5.50
AGIT. ZONA ANÓXICA I	5.50
AGIT. ZONA FACULTATIVA A	5.50
AGIT. ZONA FACULTATIVA B	5.50
AGIT. ZONA FACULTATIVA C	5.50
AGIT. ZONA FACULTATIVA D	5.50
AGIT. ZONA FACULTATIVA E	5.50
AGIT. ZONA FACULTATIVA F	5.50
AGIT. ZONA FACULTATIVA G	5.50
AGIT. ZONA FACULTATIVA H	5.50
AGIT. ZONA FACULTATIVA I	5.50
AGIT. ZONA ÓXICA A	5.50
AGIT. ZONA ÓXICA B	5.50
AGIT. ZONA ÓXICA C	5.50
AGIT. ZONA ÓXICA D	5.50
AGIT. ZONA ÓXICA E	5.50
AGIT. ZONA ÓXICA F	5.50
VALV REG AIRE BIOLOG A	0.75
VALV REG AIRE BIOLOG B	0.75
VALV REG AIRE BIOLOG C	0.75

En la Tabla 53 se muestra que prácticamente el 100% de la potencia instalada en el CCM3A corresponde a los agitadores de las distintas zonas de los reactores biológicos. En el análisis a realizar de consumos energéticos desagregados se analizará el sistema de agitación en su conjunto sin que sea necesaria la instalación de ningún medidor de consumo energético adicional.

La Tabla 54 muestra los distintos equipos a los que da servicio el CCM3B con la potencia instalada por equipo.



Tabla 54. Listado de equipos con sus potencias que dependen del CCM3B

CCM 3B	POTENCIA (kW)
BOMBA REC. LICOR Z.ANOX. A	10.00
BOMBA REC. LICOR Z.ANOX. B	10.00
BOMBA REC. LICOR Z.ANOX. C	10.00
BOMBA REC. LICOR Z.ANAEROBIA. A	5.50
BOMBA REC. LICOR Z.ANAEROBIA. B	5.50
BOMBA REC. LICOR Z.ANAEROBIA. C	5.50
C. SAL. A DECANT 2º A	3.00
C. SAL. A DECANT 2º B	3.00
C. SAL. A DECANT 2º C	3.00
C. AISL. SALIDA. BIOL A	0.37
C. AISL. SALIDA. BIOL B	0.37
BOMBA DOSIF. CL3FE BIOL. A	0.37
BOMBA DOSIF. CL3FE BIOL. B	0.37
BOMBA DOSIF. CL3FE BIOL. C	0.37
BOMBA DOSIF. CL3FE BIOL. D	0.37
BOMBA DOSIF. CL3FE CÁMARA MEZCLA A	0.55
BOMBA DOSIF. CL3FE CÁMARA MEZCLA B	0.55
BOMBA DOSIF. CL3FE SNADAN A	0.37
BOMBA DOSIF. CL3FE SNADAN B	0.37
VENT. EDIF. TURBOCOMPRESORES A	0.75
VENT. EDIF. TURBOCOMPRESORES B	0.75
VENT. EDIF. TURBOCOMPRESORES C	0.75
VENT. EDIF. TURBOCOMPRESORES D	0.75
VENT. EDIF. CCM TURBOCES	0.40

Como se puede observar en la Tabla 54, los equipos a los que da servicio el CCM3B tienen una potencia instalada casi despreciable en comparación con la de otros equipos de la EDAR. La potencia total instalada en estos equipos representa únicamente el 1% de la potencia total instalada en la EDAR, correspondiendo la mayor parte de dicha potencia (74%) a los bombeos de recirculación interna de los reactores biológicos. Para el análisis del consumo energético desagregado se asumirá que los datos de consumo registrados en el CCM3B corresponden al bombeo de recirculación interna sin que se considere necesaria la instalación de ningún medidor de energía adicional.

La Tabla 55 muestra los distintos equipos a los que da servicio el CCM3C con la potencia instalada por equipo.



Tabla 55. Listado de equipos con sus potencias que dependen del CCM3C

CCM 3C	POTENCIA (kW)
TURBOCOMPRESOR A	425.00
TURBOCOMPRESOR B	425.00
TURBOCOMPRESOR C	425.00
TURBOCOMPRESOR D	425.00
P.CTROL TURBOCOMP. A	18.50
P.CTROL TURBOCOMP. B	18.50
P.CTROL TURBOCOMP. C	18.50
P.CTROL TURBOCOMP. D	18.50
P.CTROL TURBOCOMP. MASTER. A	18.50

El CCM3C da servicio únicamente al grupo de turbocompresores por lo que en el análisis de consumos energéticos desagregados el consumo energético registrado en este CCM3C será asignado al sistema de aireación.

La Tabla 56 muestra los distintos equipos a los que da servicio el CCM4A con la potencia instalada por equipo.

Tabla 56. Listado de equipos con sus potencias que dependen del CCM4A

CCM 4A	POTENCIA (kW)
BOMBA DOSIF. POLI SNADAN. A	0.37
BOMBA DOSIF. POLI SNADAN. B	0.37
AGIT. C. MEZCLA	1.50
AGIT. C. FLOCULACIÓN	0.37
BOMBA SNANDANT A TRAT. A	3.10
BOMBA SNANDANT A TRAT. B	3.10
DECANT. SOBRENTES	0.25
BOMBA LIMP. VERT. DECANT.	1.50
BOMBA FLOT. DEC. SNTES. A	2.00
BOMBA FLOT. DEC. SNTES. B	2.00
BOMBA FANGO DEC. SNTES A	3.10
BOMBA FANGO DEC. SNTES B	3.10
ALIM. TAMIZ FANGO 1º A	3.00
ALIM. TAMIZ FANGO 1º B	3.00
TORNILLO ROTOTAMIZ	1.10
ESPEADOR A	0.37
ESPEADOR B	0.37
AGIT. CAMARA MEZCLA	5.50
BOMBA FANGO A DIGESTION A	5.50
BOMBA FANGO A DIGESTION B	5.50
BOMBA FANGO A DIGESTION C	5.50
FLOTADOR A	0.75
FLOTADOR B	0.75



CCM 4A	POTENCIA (kW)
COMPRESOR FLOT. A	4.00
COMPRESOR FLOT. B	4.00
COMPRESOR FLOT. C	4.00
BOMBA RECIRC. FLOTACIÓN A	55.00
BOMBA RECIRC. FLOTACIÓN B	55.00
BOMBA RECIRC. FLOTACIÓN C	55.00
BOMBA F FLOTADO A CAMARA MEZCLA A	7.50
BOMBA F FLOTADO A CAMARA MEZCLA B	7.50
PREPARACIÓN POLIE SOBRENDATE	3.00

Como se puede observar en la Tabla 56, la mayor parte de la potencia instalada (78%) corresponde a la flotación de fangos. En el análisis de consumos energéticos desagregados el consumo energético registrado en este CCM4A será asignado a dicho proceso de flotación sin ser necesaria la instalación de ningún medidor de consumo energético adicional.

La Tabla 57 muestra los distintos equipos a los que da servicio el CCM4B con la potencia instalada por equipo.

Tabla 57. Listado de equipos con sus potencias que dependen del CCM4B

CCM 4B	POTENCIA (kW)
AGITADOR DEP. TAMPÓN A	5.50
AGITADOR DEP. TAMPÓN B	5.50
EQ. "POLI" CENTRIF	3.00
BOMBA DOSIF. "POLI" CENTR. C	0.55
BOMBA DOSIF. "POLI" CENTR. B	0.55
BOMBA DOSIF. "POLI" CENTR. A	0.55
BOMBA FANGO A CENTRIF C	5.50
BOMBA FANGO A CENTRIF B	5.50
BOMBA FANGO A CENTRIF A	5.50
ALIMT. CENTRIFUGAS A	90.00
ALIMT. CENTRIFUGAS B	90.00
BOMBA FANGO A SILO A	11.00
BOMBA FANGO A SILO B	11.00
COMP. DESC.SILO A	1.50
COMP. DESC.SILO B	1.50
COMP. DESC.SILO C	1.50
COMP. DESC.SILO D	1.50

Como se puede observar en la Tabla 57, la mayor parte de la potencia instalada (84%) corresponde a las centrífugas utilizadas para la deshidratación del fango digerido. En el análisis de consumos energéticos desagregados el consumo energético registrado en este CCM4B será asignado al proceso de deshidratación sin ser necesaria la instalación de ningún medidor de consumo energético adicional.



La Tabla 58 muestra los distintos equipos a los que da servicio el CCM5 con la potencia instalada por equipo.

Tabla 58. Listado de equipos con sus potencias que dependen del CCM5

CCM 5	POTENCIA kW
BOMBA SIEMBRA-VACIADO A	15
BOMBA SIEMBRA-VACIADO B	15
BOMBA FANGO INTERCAM. A	5.5
BOMBA FANGO INTERCAM. B	5.5
BOMBA FANGO INTERCAM. C	5.5
BOMBA R. AGUA CALIENTE A	4
BOMBA R. AGUA CALIENTE B	4
BOMBA R. AGUA CALIENTE C	4
BOMBA ACELERAD. CALDERA A	2.2
BOMBA ACELERAD. CALDERA B	2.2
CALDERA QUEMADOR A	2.2
CALDERA QUEMADOR B	2.2
VENT. EDIF. CALDERA A	0.66
VENT. EDIF. CALDERA B	0.66
VENT. EDIF. CALDERA C	0.66
VENT. EDIF. CALDERA D	0.66
COMPRESOR GAS A	55
COMPRESOR GAS B	55
COMPRESOR GAS C	55
SOPLANTE GAS CALDERA A	3.00
SOPLANTE GAS CALDERA B	3.00
SOPLANTE GAS CALDERA C	3.00
SOPL. GASOMETRO A	1.10
SOPL. GASOMETRO B	1.10
VENT. SALA.COMPRES. A	0.66
VENT. SALA.COMPRES. B	0.66
ANTORCHA	0.12

Como se puede observar en la Tabla 58, la mayor parte de la potencia instalada (76%) corresponde a los compresores utilizados para la agitación del digestor anaerobio. En el cálculo de este porcentaje no se ha tenido en cuenta la potencia instalada correspondiente a las bombas de siembra y vaciado por su escasa puesta en marcha. En el análisis de consumos energéticos desagregados el consumo energético registrado en este CCM5 será asignado al proceso de agitación de los digestores anaerobios no siendo necesaria la instalación de medidores de consumo energético adicionales.

La Tabla 59 muestra los distintos equipos a los que da servicio el CCM6 con la potencia instalada por equipo.



Tabla 59. Listado de equipos con sus potencias que dependen del CCM6.

CCM 6	POTENCIA (kW)
BOMBA AGUA A TERCIARIO-1	7.5
BOMBA AGUA A TERCIARIO-2	7.5
BOMBA AGUA A TERCIARIO-3	7.5
ALIM. EQUIPO FILTRACIÓN	0.25
ALIM. DESINFECCIÓN UV-1	9
ALIM. DESINFECCIÓN UV-2	9
ALIM. EQ. POLI ANIONICO	1.33
BOMBA DOSIF. POLI ANION-1	0.37
BOMBA DOSIF. POLI ANION-2	0.37
BOMBA DOSIF. NaClO PREVIA-1	0.25
BOMBA DOSIF. NaClO PREVIA-2	0.25
BOMBA DOSIF. NaClO FINAL-1	0.25
BOMBA DOSIF. NaClO FINAL-2	0.25
BOMBA DOSIF. SULFATO AL-1	0.25
BOMBA DOSIF. SULFATO AL-2	0.25
COMPRESOR AIRE SERV-1	11
COMPRESOR AIRE SERV-2	11
ALIM. SECADOR FRIGO	0.44
VENTILADOR TERCIARIO-1	0.20
VENTILADOR TERCIARIO-2	0.20
ALIM. POLIPASTO	2.20
ALIM. GRUPO AGUA IND.	33.00
ALIM. FILTRO AGUA IND.	0.37
ALIM GRUPO INCENDIOS	45.00
PUENTE GRÚA	7.50
VENTILADOR SALA COMPRESORES	0.15

Como se puede observar en la Tabla 59, la mayor parte de la potencia instalada corresponde a equipos que no están relacionados con los procesos de depuración, como son el grupo de incendios y el grupo de bombas de agua industrial. Por este motivo no se analizará el consumo energético registrado en este CCM.

La Tabla 60 muestra el resumen de las potencias instaladas de los diferentes equipos agrupados por CCM junto con el proceso de mayor importancia asociado a cada uno de los CCM.



Tabla 60. Resumen de las potencias instaladas en cada CCM y de los equipos a los que se asignará su consumo energético.

CCM	Potencia (kW)	Potencia (% respecto al total)	Proceso al que se asignará el consumo registrado
CCM1A	706	16	Elevación de agua bruta
CCM1B	82	1.9	*
CCM1C	551	12.5	**
CCM2	151	3.4	Bombeo de recirculación de fangos
CCM3A	167	3.8	Agitación reactor biológico
CCM3B	63	1.4	Bombes de recirculación interna
CCM3C	1793	40.7	Aireación
CCM4A	247	5.6	Flotación
CCM4B	240	5.5	Deshidratación
CCM5	248	5.6	Agitación digestor anaerobio
CCM6	155	3.5	*

\* No se va a considerar el consumo energético de este CCM

\*\* En el consumo de este CCM se incluyen las bombas de elevación intermedia, las bombas de recirculación de las torres de desodorización y los ventiladores de desodorización que disponen de medidores de consumo de energía independientes.

La Figura 42 muestra una foto aérea de la EDAR en la que se indican las zonas de consumo energético según los CCMs.

Figura 42. Vista aérea de la EDAR de Torrejón de Ardoz con indicación de las zonas de los distintos consumos energéticos analizados (CCMs).





Tras el análisis de los equipos de medición de consumo energético existentes se llegó a la conclusión de que no era necesaria la instalación de ningún medidor de energía en la EDAR de Torrejón y que el análisis de los consumos energéticos desagregados en dicha EDAR se realizaría teniendo en cuenta los siguientes equipos: bombeo de elevación de agua bruta, desodorización, bombeo de elevación intermedia, agitación del reactor biológico, aireación del reactor biológico, bombeo de recirculación de fangos, bombeo de recirculación interna, flotación de fangos, agitación del digestor anaerobio y deshidratación de fangos.

## 4.2 Análisis del consumo energético de la EDAR de Torrejón de Ardoz

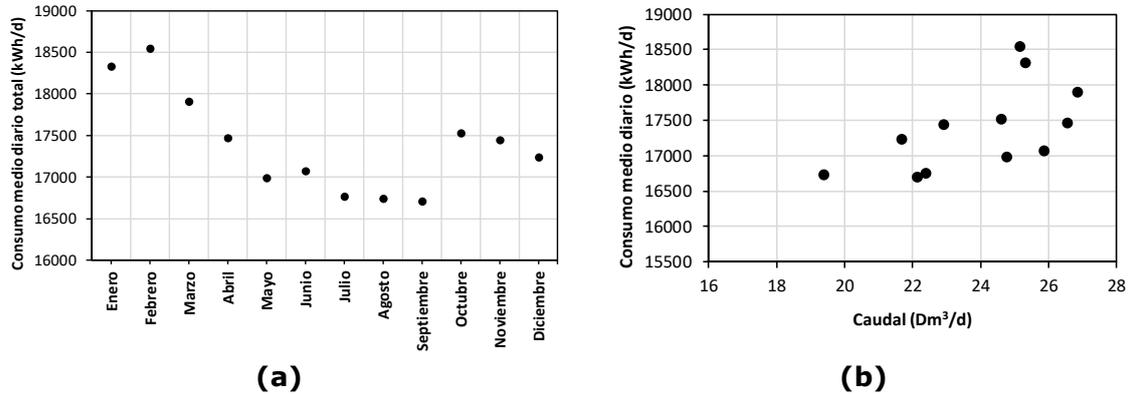
Durante el año 2015 la EDAR de Torrejón de Ardoz trató un caudal medio de 23,950 m<sup>3</sup>/día con un consumo energético de 18,017 kWh/día, lo que supone un consumo por metro cúbico de 0.75 kWh/m<sup>3</sup>. Se trata de un valor relativamente elevado para una EDAR con digestión anaerobia de fangos, lo que sugiere la existencia de posibles mejoras a implantar para reducir la huella energética de esta EDAR. Para el análisis de los consumos energéticos desagregados se dispone de los datos de caudal tratado y consumo energético horario de cada uno de los CCM existentes en la planta. El análisis se realizará en tres escalas temporales. En un primer análisis se estudiarán las variaciones mensuales del consumo medio total y del consumo de cada uno de los CCM. Posteriormente se analizarán los consumos medios diarios de cada uno de los CCM, se estudiará la importancia relativa de cada uno de ellos y su relación con el caudal medio tratado. De esta forma se identificarán aquellos procesos que suponen un mayor porcentaje del consumo energético total de la EDAR y se avanzarán posibles modificaciones en la operación de estos procesos para reducir su huella energética. El planteamiento de esas posibles modificaciones se llevará a cabo tras el tercer análisis de los datos. Este tercer análisis consistirá en estudiar el consumo energético de cada uno de los procesos a escala horaria para determinar si su consumo energético varía acorde al caudal influente y si se podrían modificar las pautas horarias de funcionamiento de dichos procesos.

### 4.2.1 Análisis del consumo energético mensual de la EDAR de Torrejón de Ardoz.

La Figura 43a muestra la evolución del consumo medio diario total de cada mes. Tal y como se puede observar, se aprecia un ligero descenso en el consumo energético en los meses de verano. Este descenso puede ser debido a las variaciones del caudal medio diario, puesto que tal y como se observa en la Figura 43b, existe una correlación entre ambas variables a escala mensual.

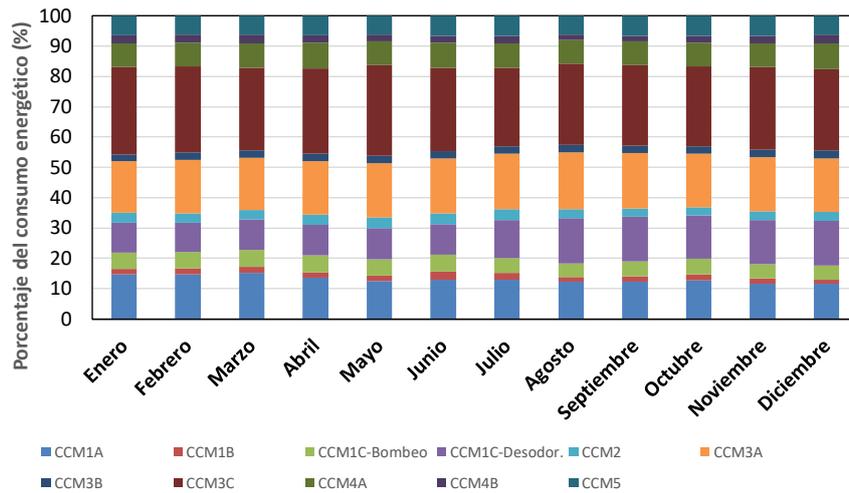


Figura 43. **(a)** Consumo medio diario total (suma de todos los CCM) en cada mes y **(b)** Consumo medio diario total (suma de todos los CCM) frente al caudal medio tratado en cada mes en la EDAR de Torrejón de Ardoz en el año 2015.



La Figura 44 muestra que la distribución porcentual del consumo energético de los distintos CCM se mantiene en valores similares a lo largo del año.

Figura 44. Distribución porcentual del consumo energético de los distintos CCM en la EDAR de Torrejón de Ardoz en el año 2015.



#### 4.2.2 Análisis del consumo energético diario de la EDAR de Torrejón de Ardoz.

La Tabla 61 muestra los consumos medios diarios registrados a lo largo del año 2015 en los distintos CCM junto con la desviación estándar correspondiente. Para una mejor comparación de los datos mostrados en dicha tabla, la Figura 45 muestra la distribución porcentual de los consumos de los distintos CCM. Aunque el consumo energético está distribuido en 11 CCM, esta distribución no es uniforme, produciéndose los mayores consumos en el CCM3C (corresponde con el sistema de aireación y representa el 26% del consumo medio diario total), el CCM1C (corresponde con el bombeo de elevación intermedia y el sistema de desodorización y representa el 20% del consumo medio diario total), el CCM3A (corresponde con los agitadores del reactor biológico y representa el 17% del consumo medio diario total) y el CCM1A (corresponde con el bombeo de elevación de agua bruta y representa el 13% del

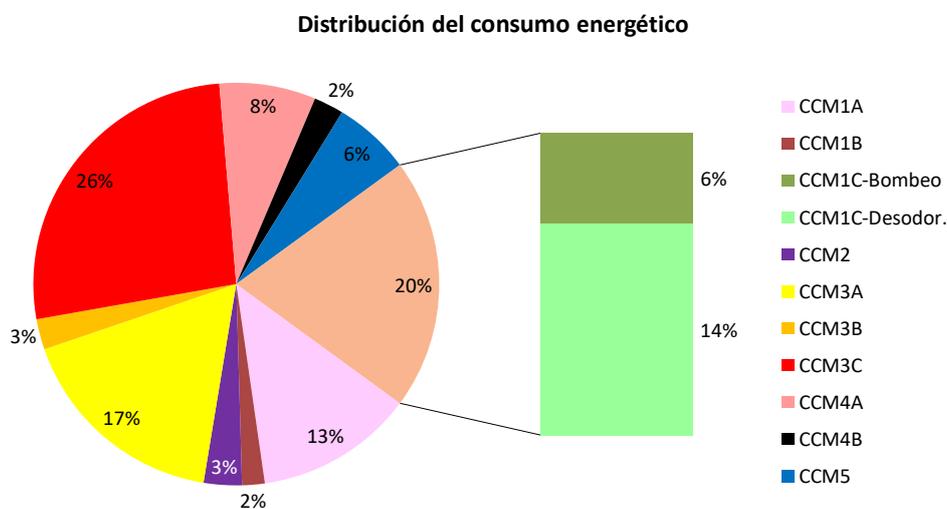


consumo medio diario total). Estos 4 CCM representan el 76% del consumo total. Con respecto a la desviación estándar se puede observar que las mayores desviaciones en porcentaje respecto del valor medio se producen para el CCM4B (corresponde con la deshidratación de fangos y la desviación representa el 39% del valor medio) y el CCM1A (corresponde con el bombeo de agua bruta y la desviación representa el 32% del valor medio).

Tabla 61. Consumo medio diario de cada uno de los CCM de la EDAR de Torrejón de Ardoz durante el año 2015.

CCM	Consumo medio diario (kWh/día)	Desviación estándar (kWh/día) (%)	
CCM1A	2,281.01	726.98	31.87
CCM1B	324.72	70.37	21.67
CCM1C	3,633.56	276.71	7.62
CCM2	547.19	75.58	13.81
CCM3A	3,091.66	201.62	6.52
CCM3B	443.75	63.71	14.36
CCM3C	4,764.72	446.38	9.37
CCM4A	1,387.49	145.50	10.49
CCM4B	427.63	166.34	38.90
CCM5	1,114.92	133.77	12.00

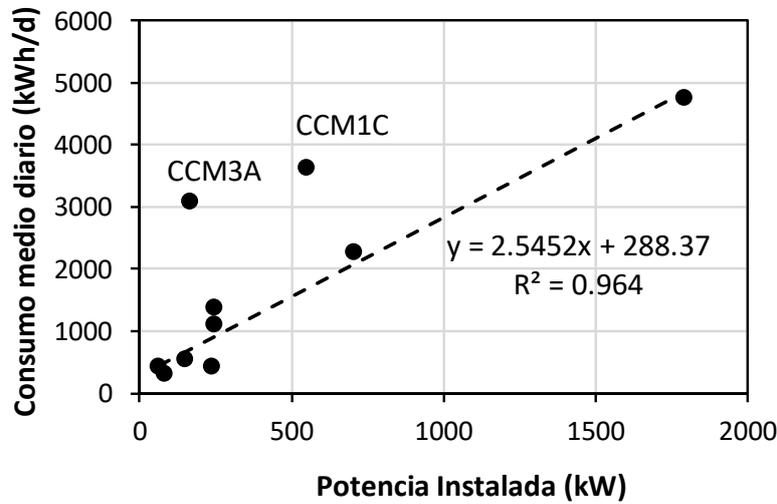
Figura 45. Distribución porcentual del consumo energético de los distintos CCM en la EDAR de Torrejón de Ardoz.



Al comparar el consumo energético por CCM (Figura 45) con la potencia instalada para estos mismos CCM (Tabla 60), se observa que en general los CCM con mayor potencia instalada se corresponden con los CCM con mayor consumo energético (ver Figura 46), excepto para el caso del CCM1C (desodorización y bombeo intermedio) y CCM3A (agitación de los reactores biológicos). En este último caso con tan solo un 3.8% de la potencia instalada en la EDAR su consumo representa un 17% del total. Dado que el CCM1C engloba al bombeo de elevación intermedio y al sistema de desodorización (bombas de recirculación y ventiladores) se han analizado los datos de consumo desagregados para este CCM. Del 20% del consumo total correspondiente al CCM1C, el 14% corresponde al sistema de desodorización y el 6% restante al bombeo de elevación intermedio.



Figura 46. Consumo medio diario de cada CCM frente a la potencia instalada en dicho CCM. En el ajuste lineal realizado no se han incluido los CCM 1C y 3A, que presentan un comportamiento claramente distinto al resto de CCM.



En cada uno de los apartados posteriores se analiza el consumo energético de cada uno de los procesos mencionados en la Tabla 60.

#### 4.2.2.1 Bombeo de elevación de agua bruta (CCM1A).

La Figura 47a muestra el consumo energético diario del bombeo de elevación de agua bruta registrado a lo largo del año 2015 y la Figura 47b muestra la distribución acumulada de consumos. En la Figura 47b se puede observar que el consumo energético está por debajo de 3,000 kWh/día el 90% del tiempo, y que la mayoría de los valores se encuentran dentro del rango 1,600–2,600 kWh/día, existiendo muy pocos valores por debajo de dicho intervalo y un número más elevado de valores por encima (ver Figura 47a). La mayor parte de estos valores elevados se deben al mayor caudal tratado durante esos días tal y como se observa en la Figura 48a. En dicha figura se representa el consumo energético diario frente al caudal tratado. Aunque si bien se observa una relación entre ambas variables, al centrar el análisis en el rango de consumos en el que se encuentran la mayor parte de los datos (1,600–2,600 kWh/día) dicha relación desaparece (ver Figura 48b). En la Figura 48b se pueden observar variaciones del consumo energético de más de un 50% (desde 1,700 hasta 2,500 kWh/día) que no pueden ser explicadas por la variación en el caudal de tratamiento.



Figura 47. Consumo energético diario del bombeo de elevación: **(a)** evolución a lo largo del año y **(b)** gráfico de distribución acumulada.

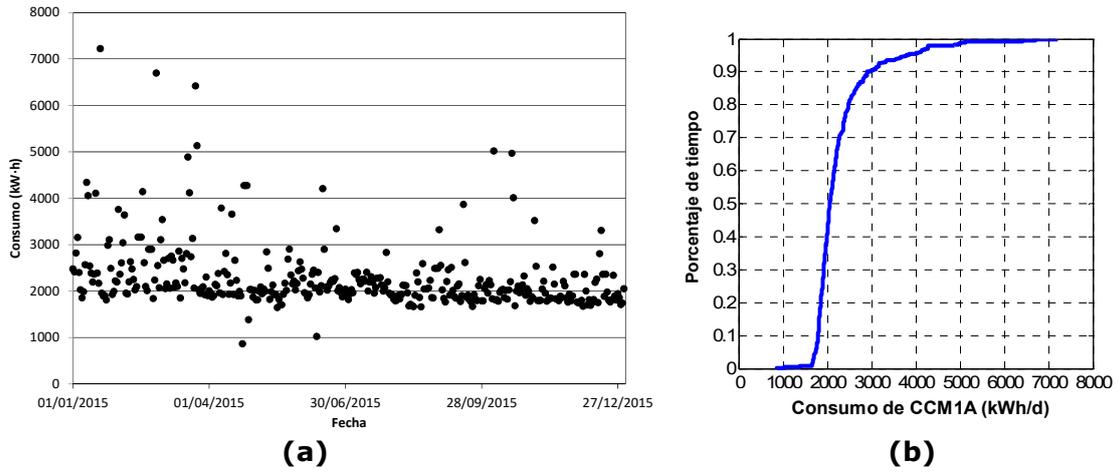
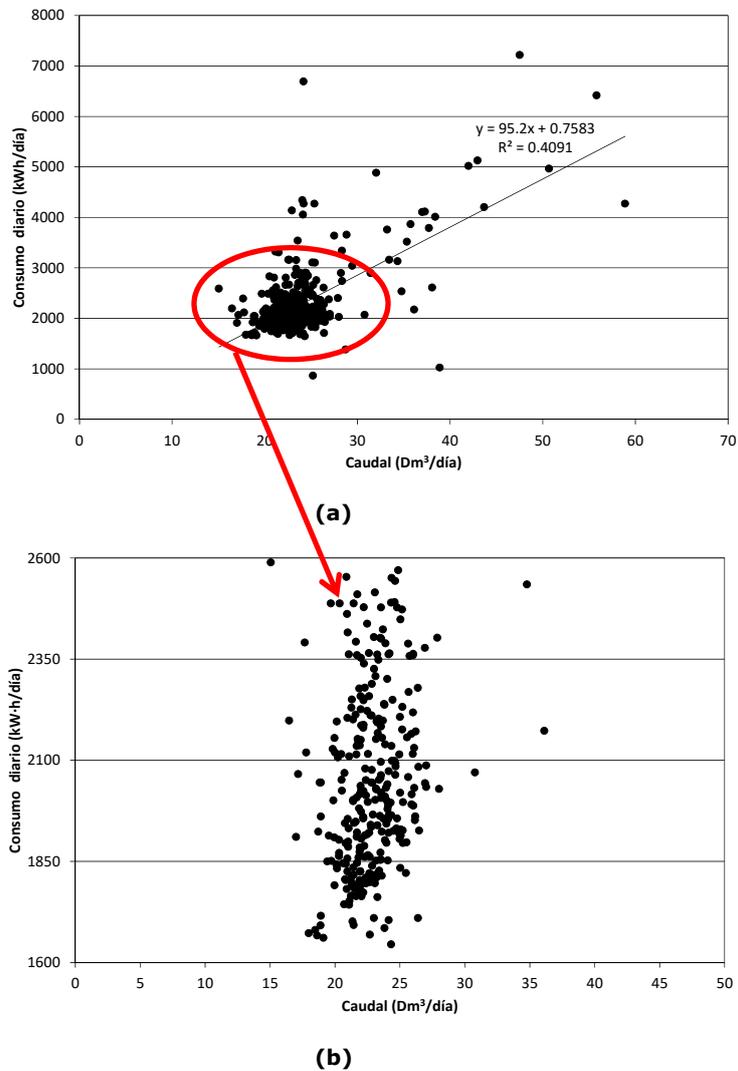


Figura 48. a) Relación entre el consumo energético del bombeo de elevación de agua bruta y el caudal elevado. b) Ampliación de la zona marcada en la figura anterior.

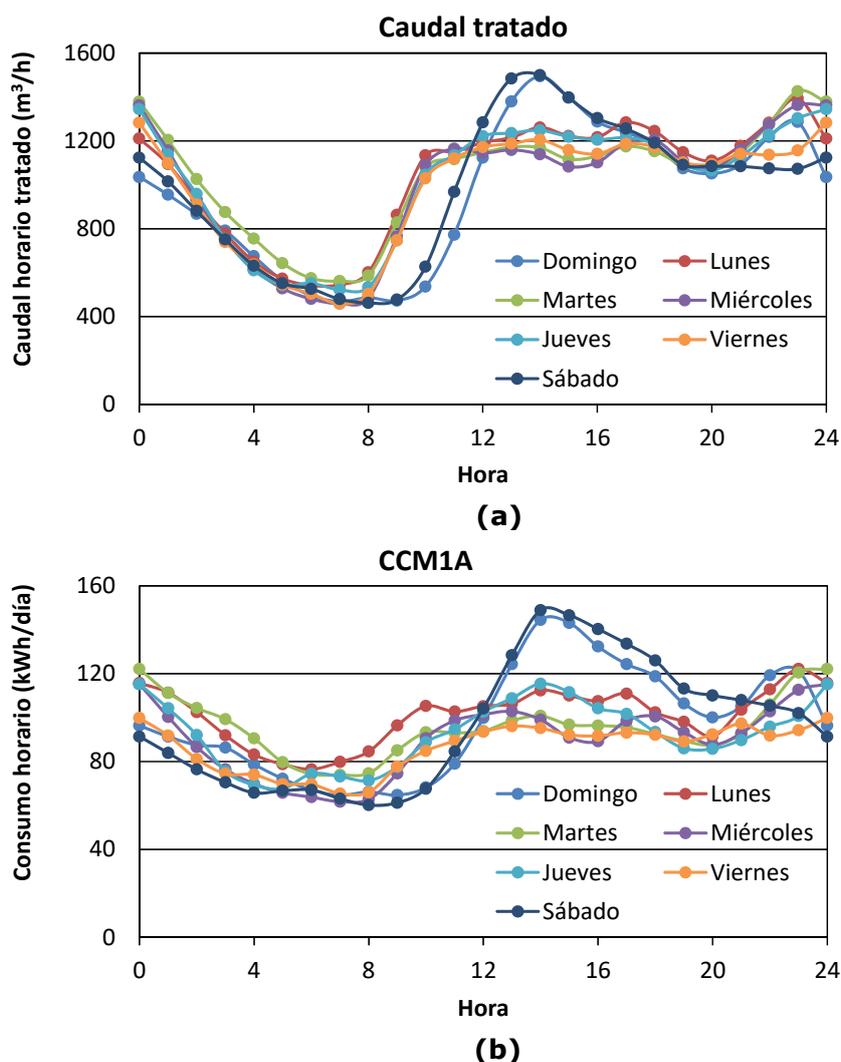




Para determinar las posibles causas de la variación tan importante en el consumo energético del bombeo de elevación de agua bruta en días con caudales similares, se ha realizado para varios días con consumos energéticos muy diferentes un análisis a escala horaria del caudal bombeado y del consumo energético asociado.

Para el análisis a escala horaria se ha calculado la curva típica horaria de caudal y la evolución del consumo energético del CCM1A. Para ello se han calculado, para cada día de la semana, los valores medios para cada una de las horas del día tanto de caudal como de consumo energético. La Figura 49a y la Figura 49b muestran la evolución del caudal y del consumo energético horario a lo largo de cada día de la semana. A la vista de la Figura 49 se observa que durante las horas de la noche disminuye el caudal tratado alcanzándose el mínimo entre las 7 y las 8 de la mañana (este mínimo se desplaza un par de horas los fines de semana). A partir de ese valor mínimo comienza a aumentar el caudal tratado alcanzándose el máximo sobre las 13 horas (el caudal máximo es ligeramente superior durante los fines de semana). El caudal de tratamiento se mantiene en valores elevados durante el resto del día. Tal y como cabía esperar, la evolución del consumo energético del bombeo de elevación es análoga a la del caudal tratado. Al aumentar el caudal aumenta el consumo energético y viceversa.

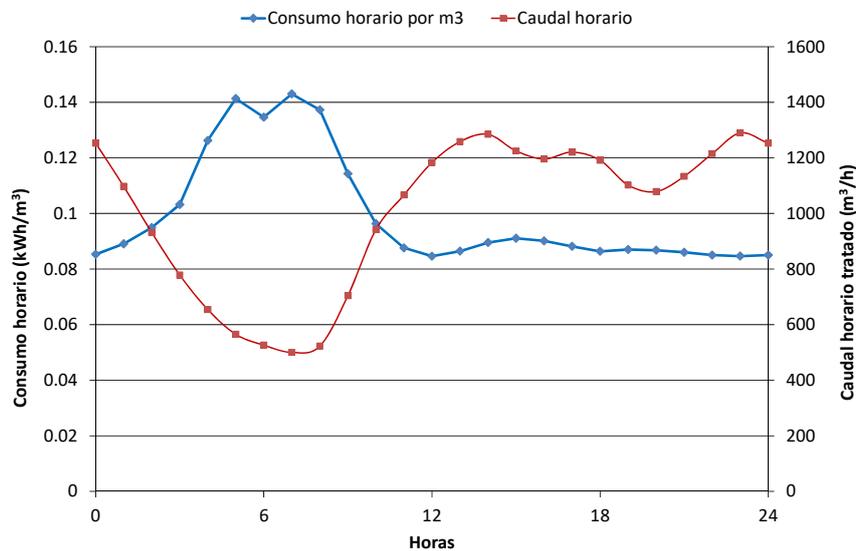
Figura 49. Evolución a lo largo del día de: **(a)** la media del caudal tratado horario y **(b)** el consumo horario del CCM1A.





Dada la analogía entre el caudal de tratamiento y el consumo energético para los distintos días de la semana se ha calculado el consumo medio por metro cúbico de agua tratada sin distinguir los distintos días de la semana. La Figura 50 muestra la evolución media a lo largo del día del caudal tratado y del consumo por metro cúbico tratado. A la vista de esta figura se observa que para caudales horarios tratados superiores a 1,000 m<sup>3</sup>/hora el consumo energético por metro cúbico tratado está alrededor de 0.09 kWh/m<sup>3</sup>. Sin embargo, para caudales inferiores a 1,000 m<sup>3</sup>/hora el consumo energético por metro cúbico tratado aumenta considerablemente alcanzando valores superiores a 0.14 kWh/m<sup>3</sup> en las horas de menor caudal tratado. Teniendo en cuenta que la elevación del agua bruta se realiza mediante 4+1 bombas centrífugas sumergibles en cámara seca, de caudal unitario 2,350 m<sup>3</sup>/h a una altura manométrica de 13 m.c.a., los resultados observados sugieren que las bombas son demasiado grandes para impulsar el reducido caudal que se trata durante las horas de la noche. Esto provoca que las bombas trabajen en un punto de funcionamiento alejado de su óptimo energético. Por este motivo se recomienda la instalación de una bomba de menor caudal dotada de variador de frecuencia para que funcione durante las horas de la noche con menores necesidades de bombeo.

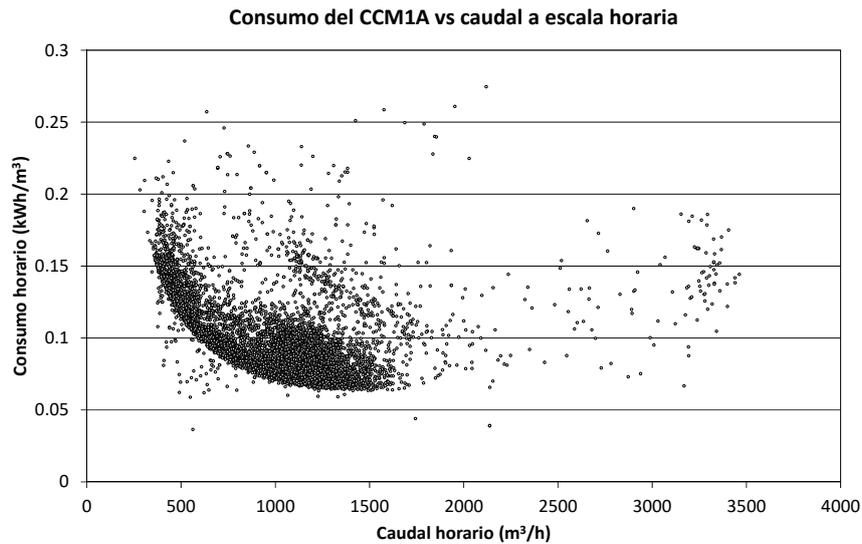
Figura 50. Evolución a lo largo del día de la media del caudal y consumo por metro cúbico tratado del CCM1A.



La Figura 51 muestra todos los datos correspondientes al año 2015 de consumo horario del bombeo de elevación por metro cúbico frente al caudal horario tratado. Tal y como se puede observar en la Figura 51 existe una línea base que marca el mínimo consumo energético para cada caudal de tratamiento. En esta línea base se confirma el análisis realizado con los valores medios: para caudales inferiores a 1,000 m<sup>3</sup>/h el consumo energético por metro cúbico de agua tratada crece exponencialmente. También se observa que por encima de esta línea base existe una importante dispersión en los consumos horarios para un mismo caudal de tratamiento. Esta dispersión se hace más significativa en el intervalo de caudales comprendido entre 1,000 y 1,500 m<sup>3</sup>/h. Reduciendo esta dispersión de forma que todos los puntos se acercaran más a la línea base se podría conseguir una importante reducción del consumo energético del bombeo de elevación de agua bruta.



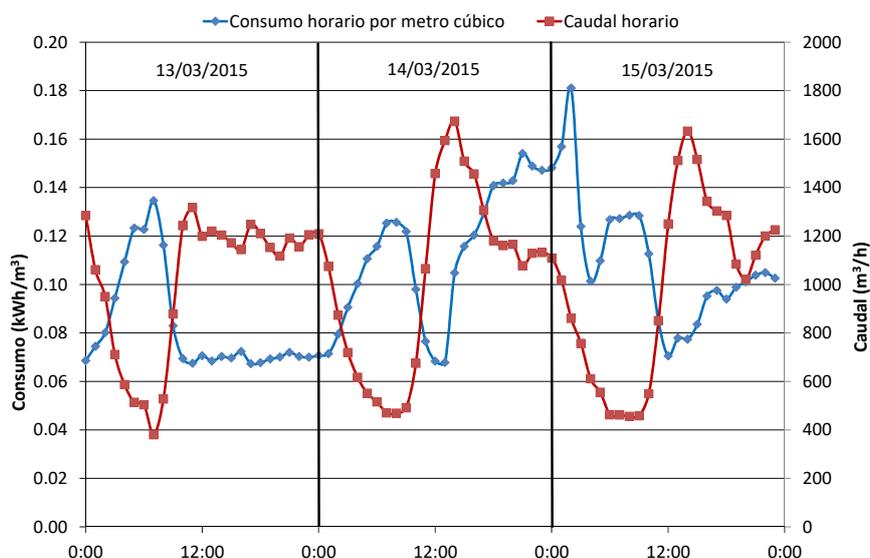
Figura 51. Consumo horario por metro cúbico frente a caudal horario tratado.



Para analizar con mayor profundidad esta dispersión se representan el caudal y consumo horario por metro cúbico durante varios días consecutivos en los que el consumo energético fue muy diferente. La Figura 52 muestra la evolución del caudal y consumo horario por metro cúbico durante los días 13, 14 y 15 de marzo de 2015. Durante el primero de los días se observa el patrón típico de comportamiento anteriormente comentado (ver Figura 50). Durante las horas de la noche el caudal se reduce incrementándose el consumo por metro cúbico. A partir de las 7 de la mañana el caudal empieza a aumentar hasta las 12 horas en las que se alcanza el máximo manteniéndose en valores similares el resto del día. El aumento de caudal se traduce en una disminución del consumo energético por metro cúbico que también permanece estable el resto del día. Durante la noche del día 14 de marzo se repite el patrón típico de bajada de caudal y aumento de consumo energético. Al aumentar el caudal de tratamiento se reduce el consumo hasta valores similares a los registrados el día anterior pero rápidamente el consumo energético se dispara hasta valores muy superiores a los típicos del periodo nocturno. La única diferencia que podría explicar este aumento significativo del consumo energético durante el día 14 consiste en que se alcanzan valores de caudales horarios más elevados que los del día anterior. De todas formas, a partir de las 20 horas se reduce el caudal hasta valores similares a los del día anterior sin que se observe una reducción en el consumo energético por lo que aparentemente el caudal no es la causa del incremento en el consumo energético. Al analizar el día 15 de marzo se observa que durante las horas nocturnas se alcanzan valores de caudal y consumos por metro cúbico similares a los días anteriores. Al producirse el aumento de caudal disminuye el consumo hasta el mismo valor que los días precedentes. Al igual que el día anterior se alcanzan valores más elevados de caudal tratado y el consumo energético no se mantiene en valores reducidos sino que aumenta aunque no tan significativamente como el día anterior.



Figura 52. Evolución del consumo horario por metro cúbico y del caudal tratado entre los días 13-15 marzo.



La Figura 53 muestra otros periodos de días consecutivos (11-13 de septiembre de 2015 en la Figura 53a; 25-27 de septiembre de 2015 en la Figura 53b) en las que se observa un comportamiento similar al descrito anteriormente. Una posible explicación a estas variaciones del consumo energético es que dichas variaciones estén asociadas a arranques y paradas de las distintas bombas. Teniendo en cuenta que sólo una de las bombas dispone de variador de frecuencia se recomienda la instalación de al menos otro variador de frecuencia y de un sistema de control que regule la altura de agua en el pozo minimizando las bombas en funcionamiento y su consumo energético.

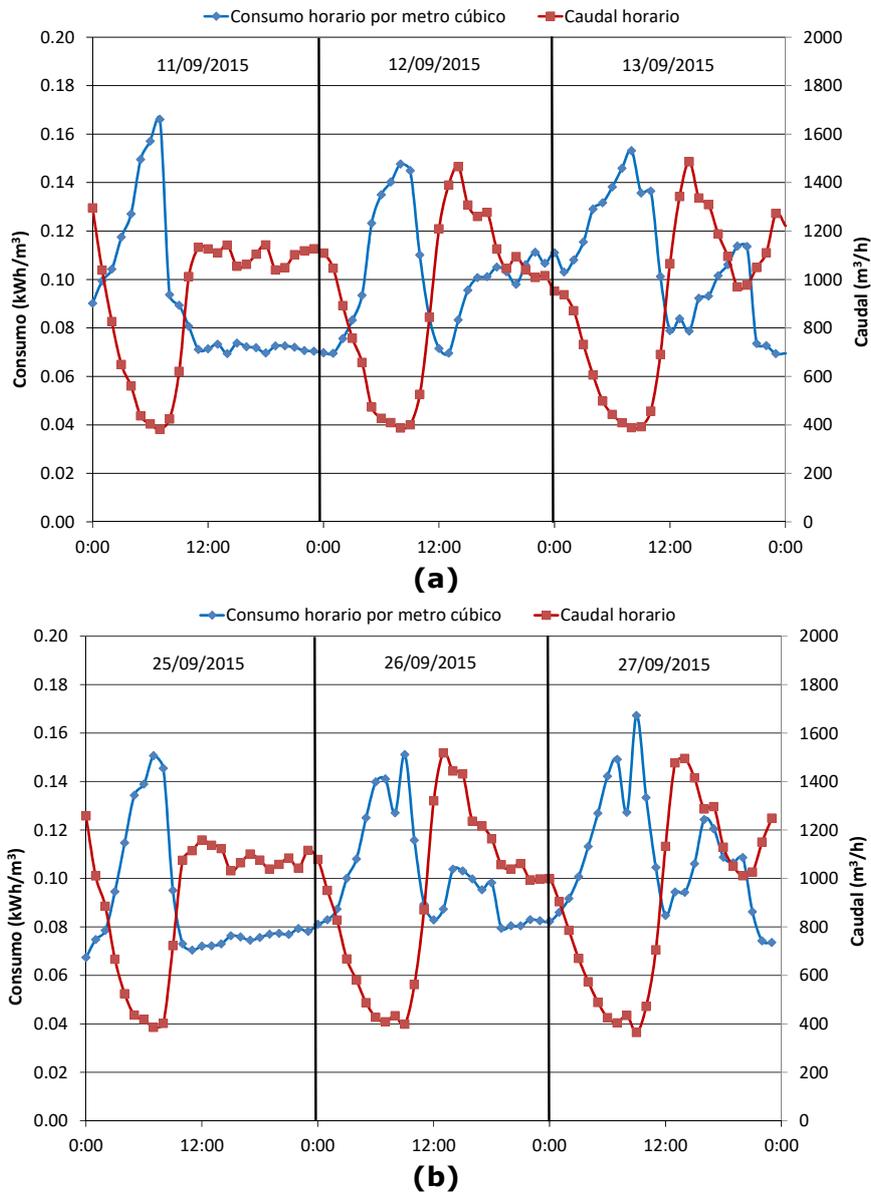
Para llevar a cabo las modificaciones propuestas (instalación de una bomba de menor caudal con variador de frecuencia, instalación de otro variador de frecuencia y la implementación de un sistema de control) sería necesario la:

- Adquisición de una bomba y dos variadores de frecuencia.
- Adquisición de dos sondas de nivel.
- Instalación de los equipos y comunicación de los mismos con el SCADA.
- Programación del sistema de control.

El objetivo de estas modificaciones sería mantener el consumo energético específico en valores en torno a 0.08 kWh/m<sup>3</sup>. Teniendo en cuenta que el consumo promedio actual es 0.10 kWh/m<sup>3</sup>, sería esperable una reducción del orden del 20% de la energía consumida en el bombeo de cabecera.



Figura 53. Evolución del consumo horario por metro cúbico y del caudal tratado entre los días (a) 11-13 septiembre y (b) 25-27 septiembre.

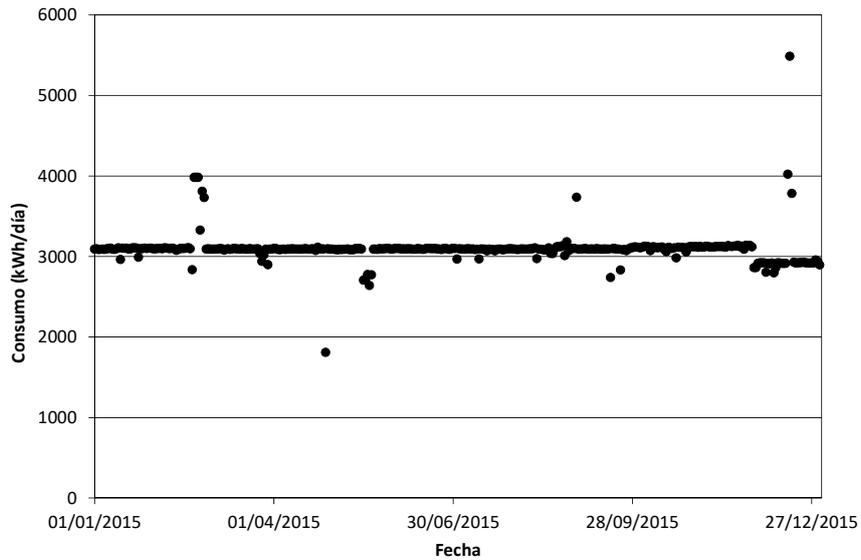


#### 4.2.2.2 Agitación del reactor biológico (CCM3A).

La EDAR de Torrejón de Ardoz cuenta con 3 reactores biológicos que incluyen cada uno de ellos, una zona anaerobia, una zona anóxica y una zona facultativa equipadas con agitadores para evitar la sedimentación del fango. El número total de agitadores instalados es de 24, distribuidos de la siguiente forma: 8 por línea (2 en la zona anaerobia, 3 en la zona anóxica y 3 en la zona facultativa). La potencia de cada uno de los agitadores es de 5.5 kW. La Figura 54 muestra el consumo energético diario del sistema de agitación del reactor biológico registrado a lo largo del año 2015.

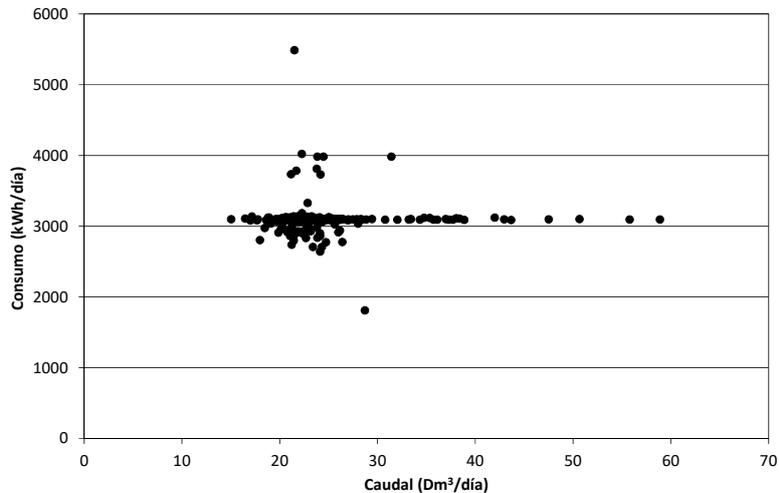


Figura 54. Evolución del consumo energético diario del sistema de agitación.



Tal y como se observa en la Figura 54 el consumo de los agitadores es constante a lo largo del tiempo e independiente de cualquier parámetro de operación como el caudal tratado (ver Figura 55), la carga contaminante, etc.

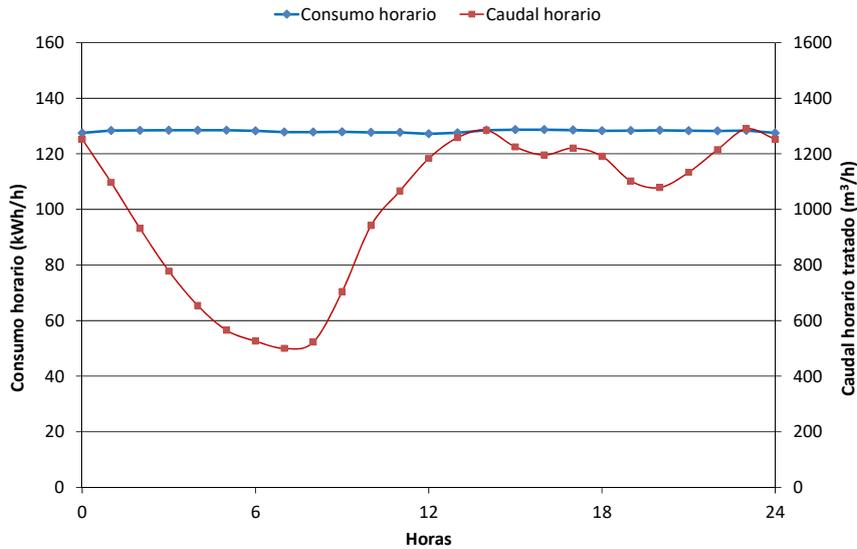
Figura 55. Evolución del consumo energético diario del sistema de agitación frente al caudal diario de tratamiento.



La Figura 56 muestra la evolución a lo largo del día del caudal medio de tratamiento y el consumo medio a escala horaria del sistema de agitación. Este consumo energético es independiente de las variaciones de caudal de tratamiento que tienen lugar a lo largo del día. Este resultado era previsible puesto que el consumo de estos equipos está asociado al volumen que se debe agitar, que es independiente de las variaciones horarias del caudal de tratamiento.



Figura 56. Evolución a lo largo del día de la media del caudal y consumo del sistema de agitación (CCM3A) horarios.



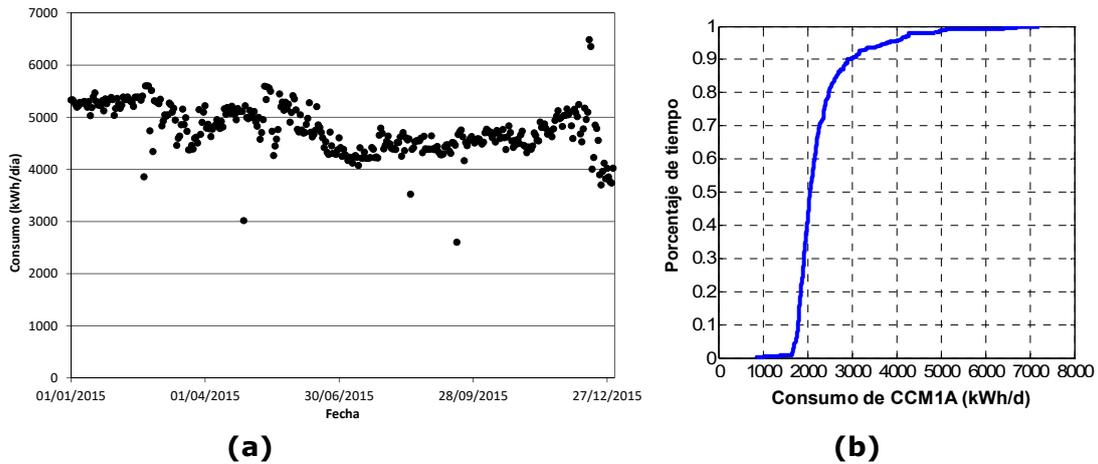
La zona anaerobia de cada una de las líneas tiene un volumen de 1750 m<sup>3</sup> y cuenta con 2 agitadores de 5.5 kW. Esto supone una potencia de agitación de 6.3 W/m<sup>3</sup>. La zona anóxica y la zona facultativa de cada una de las líneas tienen un volumen de 3075 m<sup>3</sup> cada una y cuentan con 3 agitadores de 5.5 kW. Esto supone una potencia de agitación de 5.4 W/m<sup>3</sup>. La potencia de agitación utilizada es claramente inferior al rango 13-26 W/m<sup>3</sup> (Metcalf & Eddy 2003, Ferrer y Seco, 2012) que se recomienda para mantener el contenido de estas zonas perfectamente homogeneizado. Dado el importante porcentaje de consumo energético que representa el sistema de agitación se podría analizar la implementación de un sistema de control para temporizar la agitación. Este sistema de control pondría en marcha y apagaría los agitadores de forma periódica y debería tener en cuenta la velocidad de sedimentación del fango para evitar que durante el periodo de paro de los agitadores sedimentara en exceso dicho fango. La instalación de este sistema de control únicamente exige programar desde el SCADA o PLC la temporización de los agitadores. El porcentaje de ahorro en el consumo energético esperable con esta medida es de entre un 10% y un 20%, siendo proporcional al porcentaje del tiempo que se puedan mantener parados los agitadores sin afectar al buen funcionamiento del proceso.

#### 4.2.2.3 Aireación del reactor biológico (CCM3C).

El aporte de aire a las zonas facultativas y óxicas de los reactores biológicos se efectúa mediante cuatro turbocompresores de caudal unitario 17,500 Nm<sup>3</sup>/h a 5.75 m.c.a. Sobre la solera de las zonas óxicas se disponen diversas parrillas con un total de 6,780 difusores de membrana (2,260 unidades por reactor). La Figura 57a muestra la evolución a lo largo del año del consumo energético diario del sistema de aireación y la Figura 57b muestra la distribución acumulada de dicho consumo. Esta gráfica muestra un consumo elevado durante todo el año aunque algo más elevado en los primeros meses que en el resto del año.

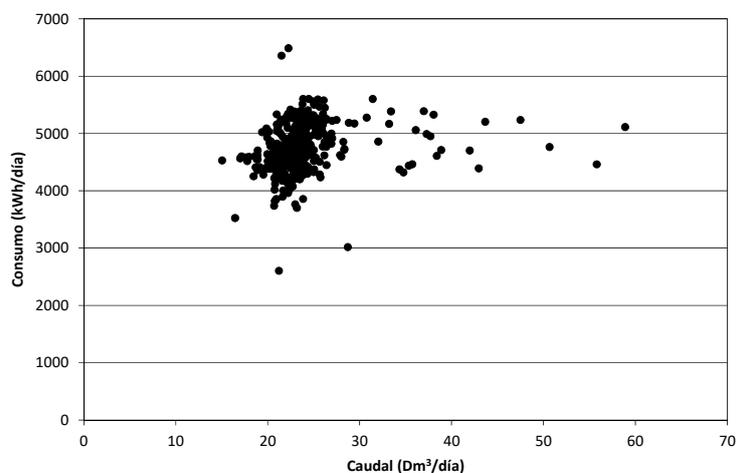


Figura 57. Evolución del consumo energético diario del sistema de aireación: **(a)** evolución temporal y **(b)** distribución acumulada.



Para poder sacar conclusiones de esta información se ha representado dicho consumo energético frente al caudal tratado (ver Figura 58). En esta figura se observa que no existe una correlación entre el consumo energético y el caudal tratado. La mayor parte de los puntos de esta gráfica forma una nube de puntos en el intervalo de caudales 18-28  $\text{Dm}^3/\text{día}$  y en el intervalo de consumos energéticos de 3,800-5,600 kWh. El consumo energético del sistema de aireación está relacionado con las necesidades de oxígeno del reactor biológico. Estas necesidades dependen de varios factores como son: el caudal de tratamiento, la carga contaminante y los parámetros de operación del proceso (tiempo de retención celular, temperatura, etc). La existencia de consumos energéticos muy diferentes en días con caudales de tratamiento muy similares puede deberse a diferencias en los otros factores como podría ser la carga contaminante. En caso de disponer de los datos de la composición del agua residual se podría analizar la relación entre el consumo energético y la DQO del agua influente (el consumo energético debe aumentar conforme lo haga la DQO del agua residual). En ese caso, también sería interesante analizar la evolución del consumo energético específico por kg de DQO eliminada.

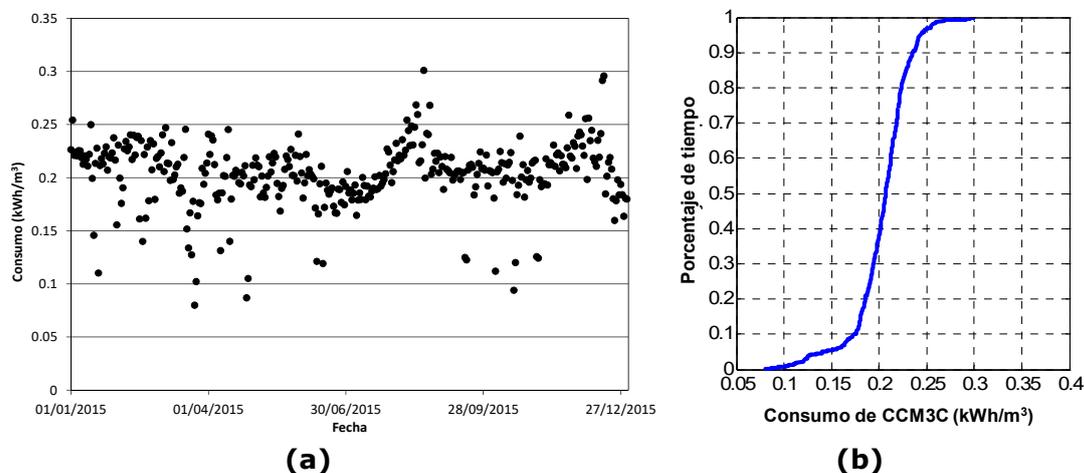
Figura 58. Relación entre el consumo energético del sistema de aireación y el caudal tratado en escala diaria.





La Figura 59a muestra la evolución a lo largo del año del consumo energético diario del sistema de aireación por metro cúbico de agua tratada y la Figura 59b muestra la distribución acumulada de dicho consumo. En esta figura se observa que dicho consumo energético oscila entre 0.16 y 0.25 kWh/m<sup>3</sup>.

Figura 59. Evolución del consumo energético medio diario del sistema de aireación por metro cúbico de agua tratada **(a)** evolución temporal y **(b)** distribución acumulada.



Para tratar de averiguar las causas de la variabilidad de los consumos energéticos observados para un mismo caudal de tratamiento se ha realizado un análisis a escala horaria. La Figura 60 muestra el consumo medio horario del sistema de aireación junto con el caudal medio horario. En esta figura se observa que a pesar de que se produce una gran variación del caudal horario el consumo energético del sistema de aireación se mantiene más o menos constante durante todas las horas del día. Esto provoca que el consumo energético del sistema de aireación por metro cúbico de agua tratada muestre valores muy elevados durante las horas de bajo caudal de tratamiento (ver Figura 61). Una posible explicación a este hecho podría ser que los turbocompresores sean demasiado grandes para las necesidades de oxígeno de esta EDAR, especialmente durante las horas de bajo caudal de tratamiento. En estas horas con los actuales turbocompresores se aporta más oxígeno del necesario y por eso el consumo energético por metro cúbico de agua tratada aumenta considerablemente. Se recomienda la sustitución de al menos uno de los turbocompresores por uno de menor potencia especialmente para el aporte de oxígeno durante las horas de bajo caudal de tratamiento y la implantación de un sistema de control que optimice el aporte de oxígeno en todo momento. Para la instalación del sistema de control de oxígeno sería necesario la:

- Adquisición de un turbocompresor de menor potencia.
- Adquisición de un medidor de oxígeno y una válvula automática por cada parrilla de difusores.
- Adquisición de una sonda de presión.
- Instalación de los equipos y comunicación de los mismos con el SCADA.
- Programación del sistema de control.

Con estas medidas sería esperable mantener durante todo el día un consumo horario sostenido en torno a 0.17 kWh/m<sup>3</sup>. Teniendo en cuenta que el consumo medio actual es de 0.24 kWh/m<sup>3</sup> sería esperable una reducción del orden del 30% de la energía consumida en el sistema de aireación.



Figura 60. Evolución a lo largo del día de la media del caudal y consumo (CCM3C) horario del sistema de aireación.

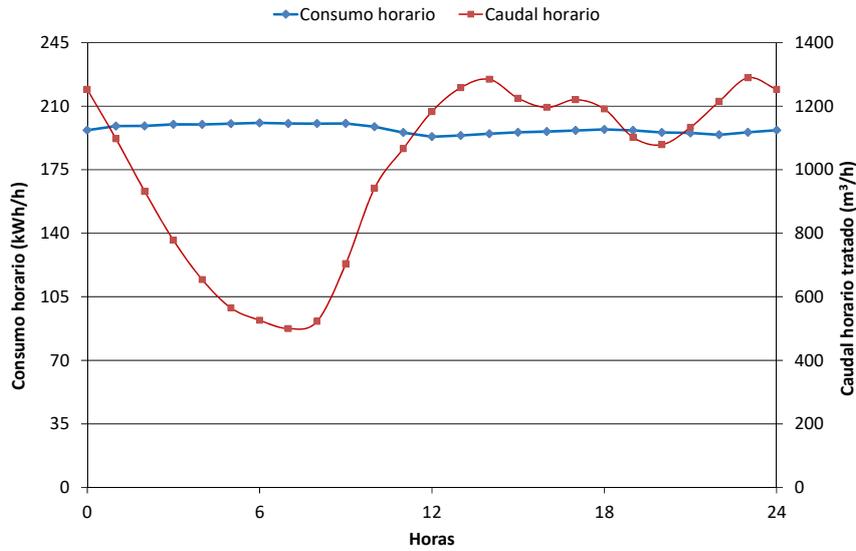
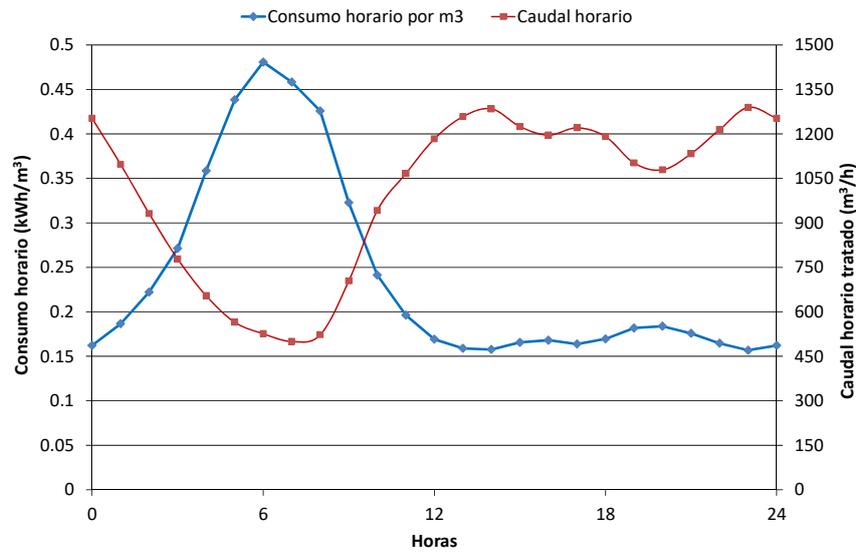


Figura 61. Evolución a lo largo del día de la media del caudal y consumo por metro cúbico tratado del CCM3C.



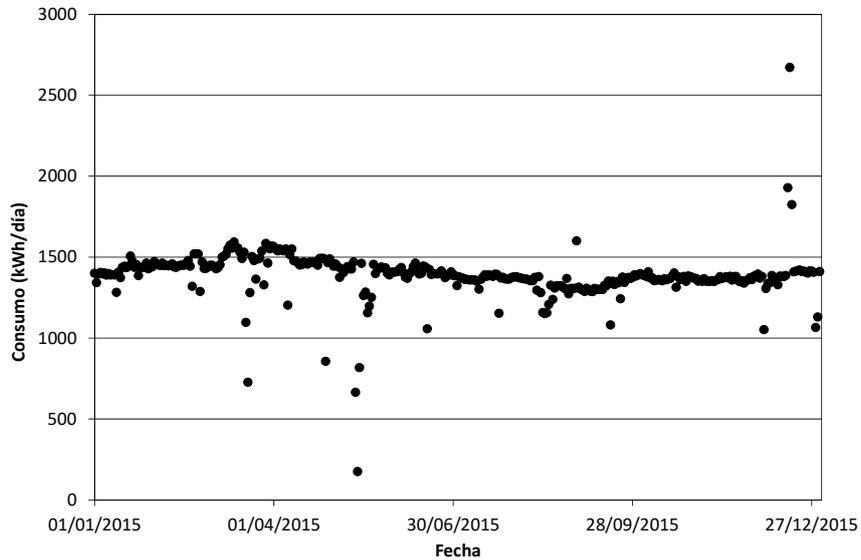
#### 4.2.2.4 Flotación de fangos (CCM4A).

Para el espesamiento de los fangos en exceso se dispone de dos flotadores de 13 metros de diámetro y 2.50 m de altura útil. El sistema de presurización necesario se compone de tres (una en reserva) bombas centrífugas horizontales de caudal unitario 120 m³/h a 51 m.c.a., tres (uno en reserva) compresores rotativos de caudal unitario 30 Nm³/h a 7 Kg/cm² y dos depósitos a presión. Los fangos flotados se vierten directamente por gravedad a una cámara de mezcla dotada de electroagitador sumergible de 5.50 KW de potencia, donde se realiza la homogeneización de los fangos espesados primarios y los biológicos flotados. Los fangos ya mezclados son impulsados al proceso de digestión mediante tres (una en reserva) bombas de tornillo helicoidal de caudal unitario 10-30 m³/h a 30 m.c.a. La Figura 62 muestra la



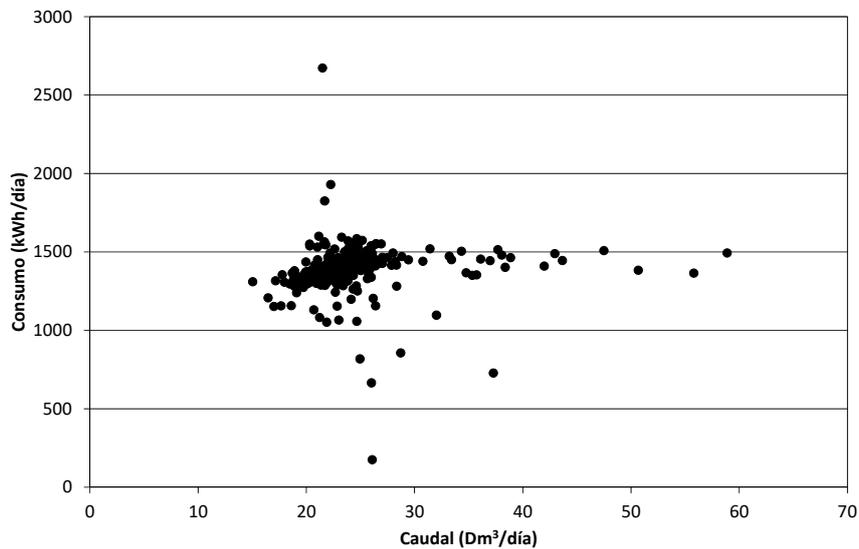
evolución a lo largo del año del consumo energético diario de los equipos asociados a la flotación del fango. Como se puede ver en esta figura el consumo energético se mantiene en niveles muy estables durante todo el año.

Figura 62. Evolución del consumo energético de la flotación de fangos



Al representar el consumo energético diario frente al caudal de tratamiento (ver Figura 63) se observa que no existe ninguna relación entre ambas variables.

Figura 63. Relación entre el consumo energético del sistema de flotación de fangos y el caudal tratado en escala diaria.

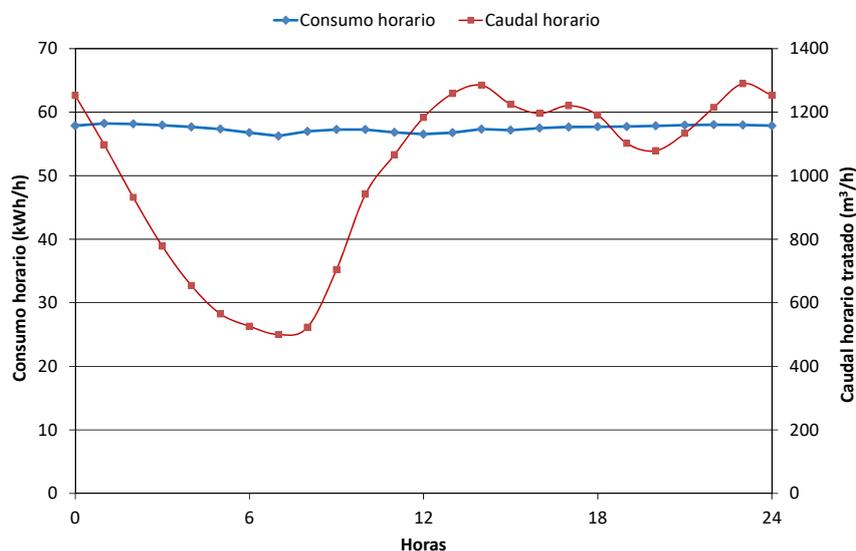


La Figura 64 muestra la evolución a lo largo del día del caudal medio de tratamiento y el consumo medio a escala horaria. El consumo energético del sistema de flotación de fangos es independiente de las variaciones de caudal de tratamiento que tienen lugar a lo largo del



día. Este resultado era previsible puesto que el consumo de estos equipos debe estar asociado al caudal de purga, que suele ser independiente de las variaciones horarias del caudal de tratamiento.

Figura 64. Evolución a lo largo del día de la media del caudal y consumo por metro cúbico tratado del CCM4A.



Para reducir este consumo se recomienda optimizar el principal parámetro de funcionamiento de un flotador (kg de aire perdidos en la despresurización/kg de sólidos influente). Una vez optimizado se debería ajustar el caudal de efluente recirculado a la cantidad de sólidos presente en el influente, para lo que sería necesario medir el caudal de purga de fango secundario y la concentración de sólidos en dicho fango.

#### 4.2.2.5 Deshidratación de fangos (CCM4B).

La deshidratación de fangos se realiza mediante dos centrífugas convencionales con un caudal máximo de 40 m³/h. Estas centrífugas son alimentadas mediante tres (una en reserva) bombas de tornillo helicoidal de caudal unitario 15-40 m³/h a 10 m.c.a., con variador de frecuencia electrónico. Para el transporte de fangos deshidratados se dispone de dos bombas con variador de frecuencia electrónico, de caudal unitario 2-7 m³/h, capaces de vencer una altura geométrica de 120 m.

La Figura 65 muestra la evolución a lo largo del año del consumo energético diario de los equipos asociados a la deshidratación del fango. Como se puede ver en esta figura el consumo energético diario muestra una gran variación entre los 200 y los 800 kWh/día. Durante los meses de agosto y septiembre se produce una ligera disminución del consumo energético, que se observa más claramente en el gráfico de los consumos medios mensuales (ver Figura 66).



Figura 65. Evolución del consumo energético de la deshidratación de fangos

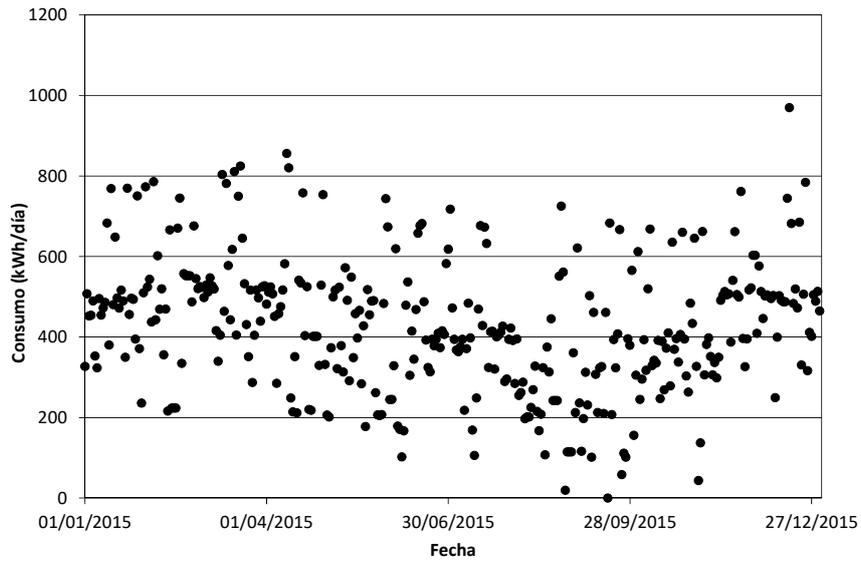
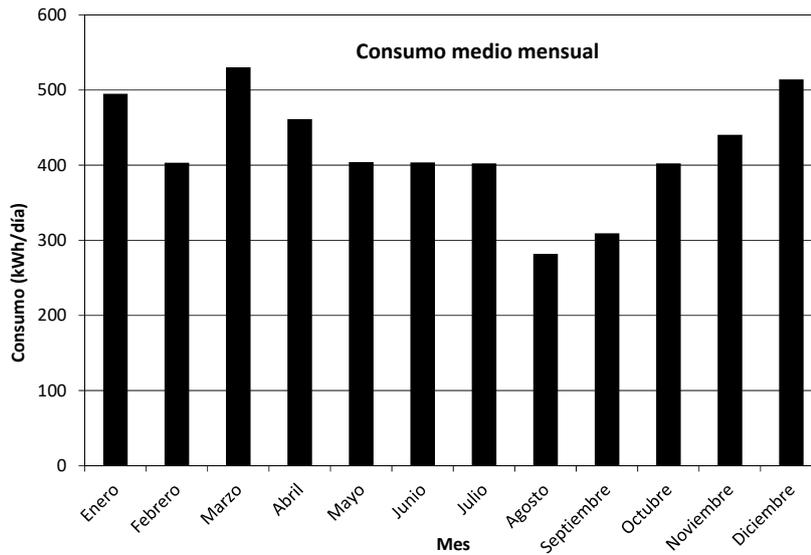


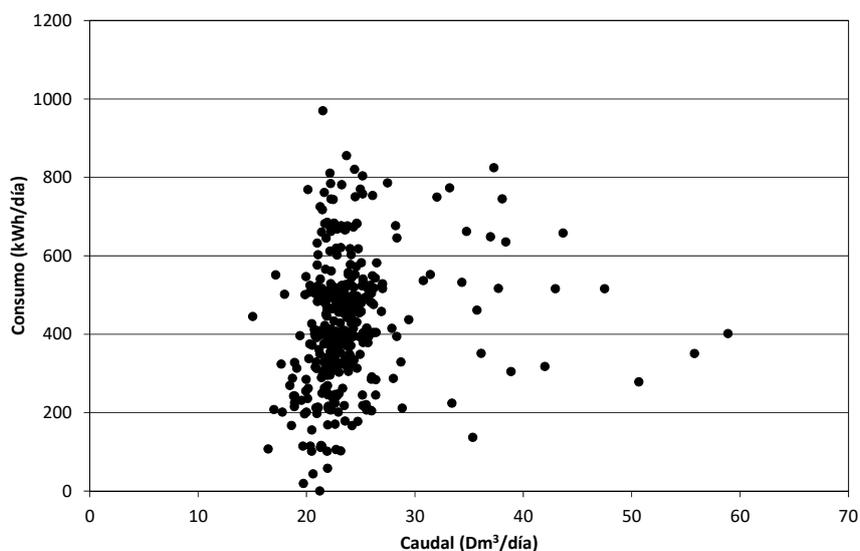
Figura 66. Consumo medio mensual de los equipos utilizados en la deshidratación de fangos



Al representar el consumo energético diario frente al caudal de tratamiento (ver Figura 67) se observa que no existe ninguna relación entre ambas variables. Este resultado era previsible, al igual que en el caso del consumo energético del sistema de flotación (CCM4A), puesto que el consumo de estos equipos debe estar asociado al caudal de purga, que suele ser independiente de las variaciones horarias del caudal de tratamiento.

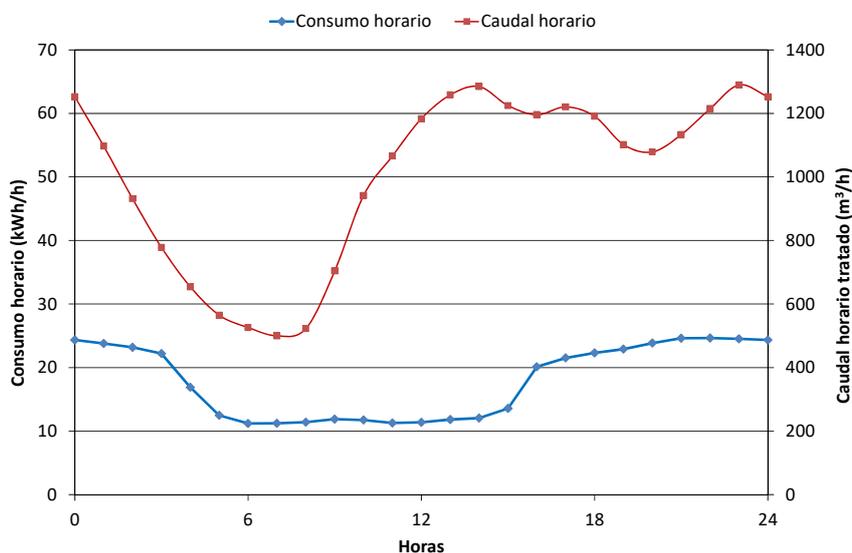


Figura 67. Relación entre el consumo energético del sistema de deshidratación de fangos y el caudal tratado en escala diaria.



La Figura 68 muestra la evolución a lo largo del día del caudal medio de tratamiento y el consumo medio a escala horaria. En esta figura se observa una línea base de consumo energético en torno a 11 kWh/h y que desde las 16 horas hasta las 4 horas del día siguiente se produce un incremento hasta los 25 kWh/h. Este incremento es debido a la puesta en marcha de las centrífugas que funcionan por término medio unas 12 horas al día.

Figura 68. Evolución a lo largo del día de la media horaria del caudal y consumo energético del CCM4B.



Para observar con detalle el funcionamiento del sistema de deshidratación de fangos la Figura 69 representa la evolución del consumo energético horario durante todos los días del año a las 8 horas y a las 20 horas. Como se observa en la Figura 69a la deshidratación de fangos a las 8 de la mañana no suele estar en funcionamiento, observándose una línea base



de consumo energético asociada a otros elementos que cuelgan de este CCM. Se observa un consumo estable en torno a 8 kWh/h de enero a mayo y de noviembre a diciembre. Este consumo se reduce a unos 4 kWh/h durante los meses de junio a octubre. Los pocos días que la deshidratación está funcionando a las 8 de la mañana se observan consumos en torno a 30 kWh/h. Al observar lo que sucede a las 20 horas (Figura 69b), se comprueba que la mayor parte de los días la deshidratación está funcionando alcanzando consumos en torno a 30 kWh/h. Los pocos días que no está en funcionamiento se observan consumos estables en torno a 8 ó 4 kWh/h en función de la época del año al igual que en el caso anterior. A la vista de los resultados obtenidos y teniendo en cuenta la distribución de periodos tarifarios que se muestra en la Figura 70, se recomienda analizar la gestión del proceso de deshidratación para realizar en la medida de lo posible el proceso aprovechando el periodo más económico que abarca todos los días desde las 24h hasta las 8h. En este análisis se debe considerar el ahorro que supone realizar el proceso de deshidratación durante los periodos de tarificación más económicos y las implicaciones que tiene el desplazamiento horario del proceso en el funcionamiento global de la EDAR (disponibilidad y coste de personal, almacenamiento y evacuación del fango...).

Figura 69. Evolución del consumo energético horario del sistema de deshidratación de fangos **(a)** a las 8 horas y **(b)** a las 20 horas

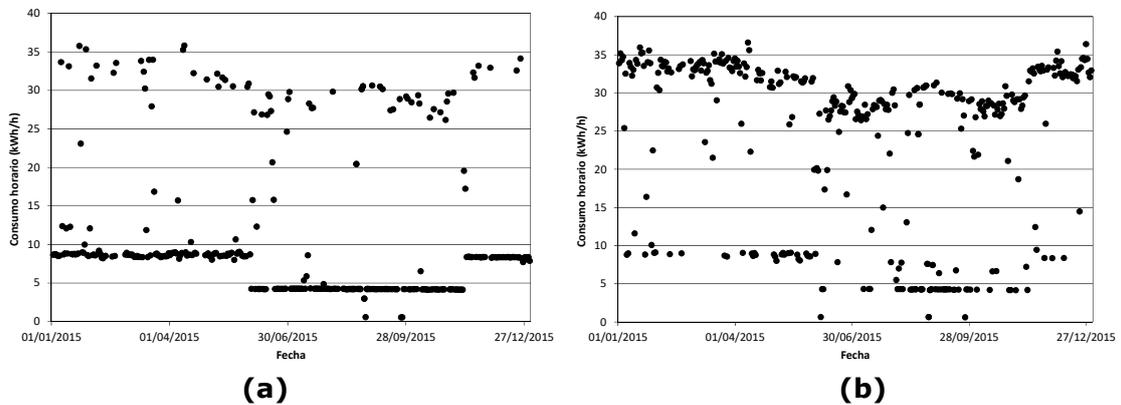
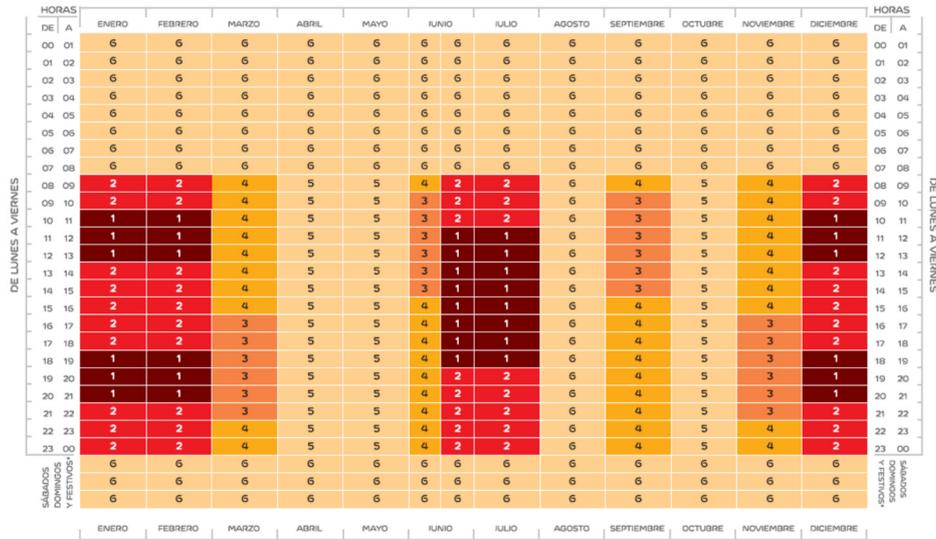




Figura 70. Periodos tarifarios de energía eléctrica (modelo 6 periodos).



4.2.2.6 Recirculación interna (CCM3B).

La configuración del reactor biológico corresponde a un proceso UCT modificado, con lo que cada una de las líneas dispone de dos corrientes de recirculación interna:

- La recirculación del licor mezcla desde la zona óxica a la anóxica nº 1 se efectúa mediante tres bombas sumergibles de flujo axial de caudal unitario 2,250 m<sup>3</sup>/h a 0.9 m.c.a., capaces de recircular el 216% del caudal medio sin reserva, todas ellas con variador de frecuencia electrónico.
- La recirculación del licor mezcla desde la zona anóxica nº 1 a la zona anaerobia se efectúa mediante tres bombas sumergibles de flujo axial de caudal unitario 1,125 m<sup>3</sup>/h a 0.50 m.c.a., capaces de recircular el 108% del caudal medio sin reserva.

La Figura 71 muestra la evolución a lo largo del año del consumo energético diario de las bombas de recirculación interna. Tal y como se puede observar en esta figura, el consumo energético medio diario de las bombas se mantiene muy estable en torno a los 440 kWh/día. Al representar el consumo energético diario frente al caudal de tratamiento (ver Figura 72) se observa que no existe ninguna relación entre ambas variables.



Figura 71. Evolución del consumo energético de la recirculación interna.

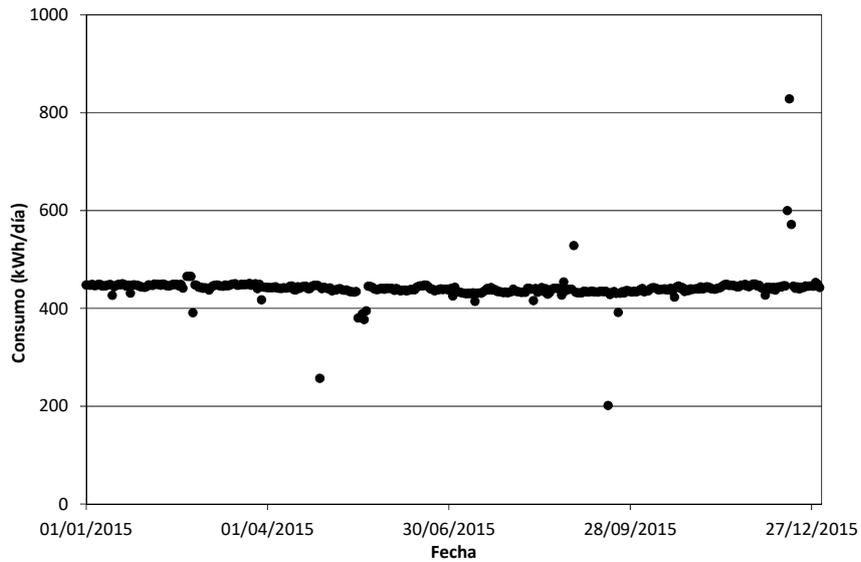
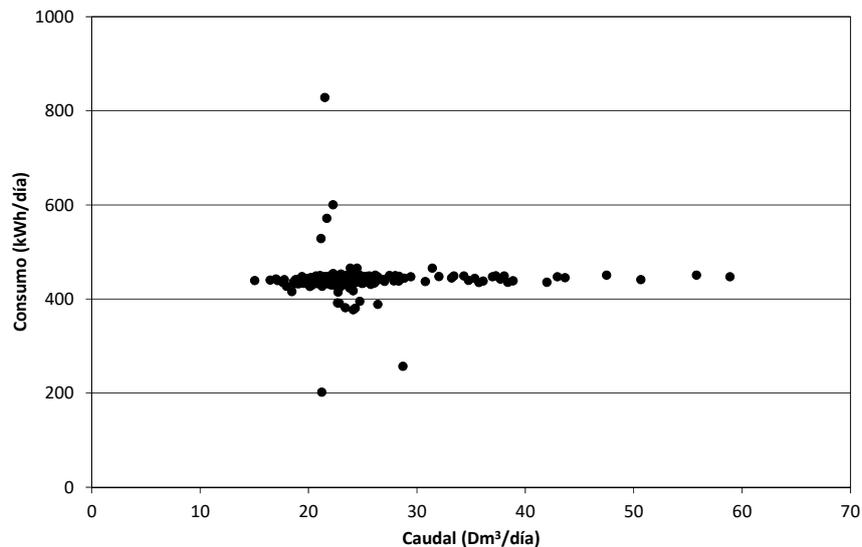


Figura 72. Relación entre el consumo energético de la recirculación interna y el caudal tratado en escala diaria.



En la Figura 73 se muestra la evolución del consumo energético medio y del caudal tratado a escala horaria. Se puede observar que a pesar de las variaciones importantes en el caudal de tratamiento el consumo de las bombas de recirculación permanece constante a lo largo del día, lo que se traduce en un incremento del consumo energético por metro cúbico de agua tratada durante las horas de bajo caudal (ver Figura 74). Para reducir el consumo energético se podría ajustar los caudales de recirculación interna al caudal de tratamiento. Para ello sería necesaria la instalación de un sistema de control que modificara los caudales de recirculación interna en función del caudal de entrada a la planta o ajustara dichos caudales en función de las necesidades de desnitrificación existentes.

Para la instalación del sistema de control para modificar los caudales de recirculación interna de acuerdo al caudal de entrada sería necesaria la instalación de caudalímetros en las



recirculaciones (en caso de que no existan ya), la instalación de variadores de frecuencia en las bombas que no dispongan de ellos y la programación del sistema de control.

Para la instalación del sistema de control para modificar los caudales de recirculación interna de acuerdo a las necesidades de desnitrificación existentes sería necesaria la instalación de 2 sondas de pH por línea de tratamiento, 2 sondas de potencial redox por línea de tratamiento, variadores de frecuencia en las bombas que no dispongan de ellos y la programación del sistema de control.

Con la instalación del sistema de control sería esperable mantener de forma estable un consumo energético de 0.016 kWh/m<sup>3</sup>. Teniendo en cuenta que el consumo medio actual es de 0.022 kWh/m<sup>3</sup>, sería esperable una reducción del orden del 25% en el consumo energético de las bombas de recirculación interna. De todas formas, conviene señalar que el porcentaje de reducción de consumo energético respecto del total de la EDAR que se podría conseguir con este sistema de control sería bastante bajo, teniendo en cuenta que el consumo energético de las bombas de recirculación interna representa únicamente el 3% del consumo energético total de la EDAR.

Figura 73. Evolución del caudal tratado y del consumo energético de las bombas de recirculación interna a escala horaria.

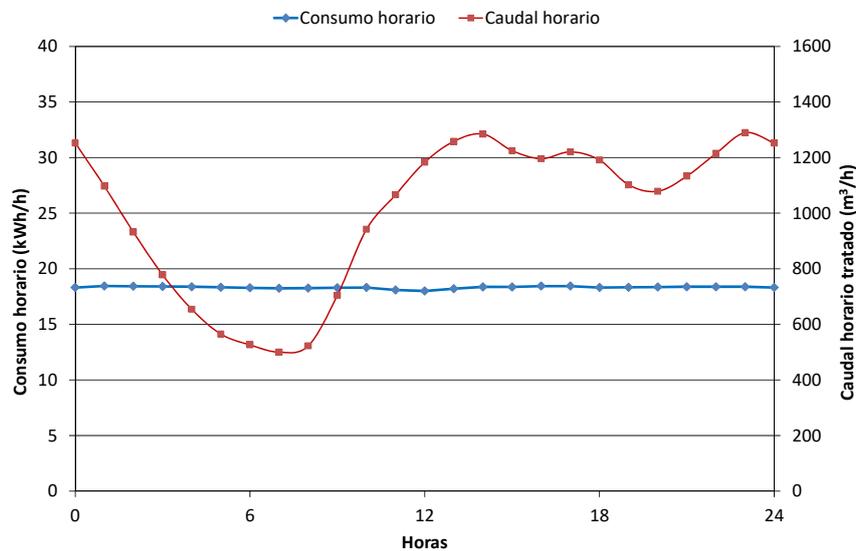
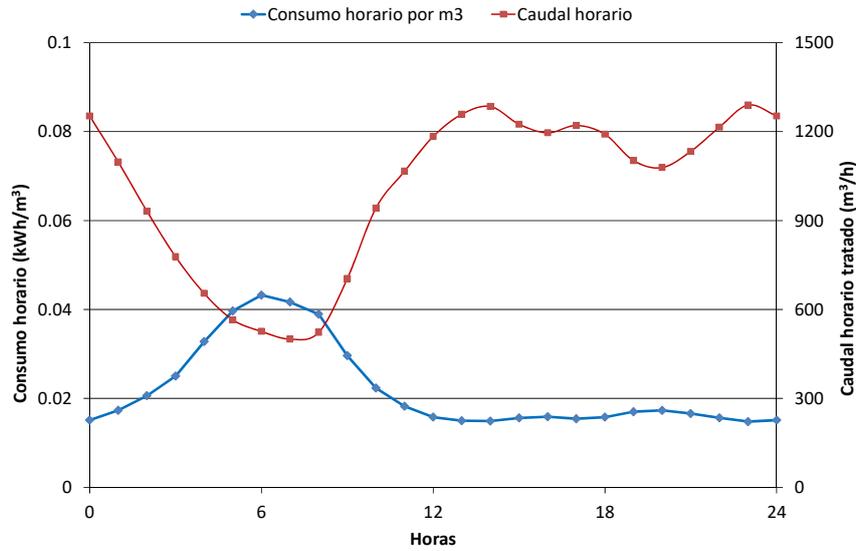




Figura 74. Evolución del caudal tratado y del consumo energético por metro cúbico de agua tratada de las bombas de recirculación interna a escala horaria.



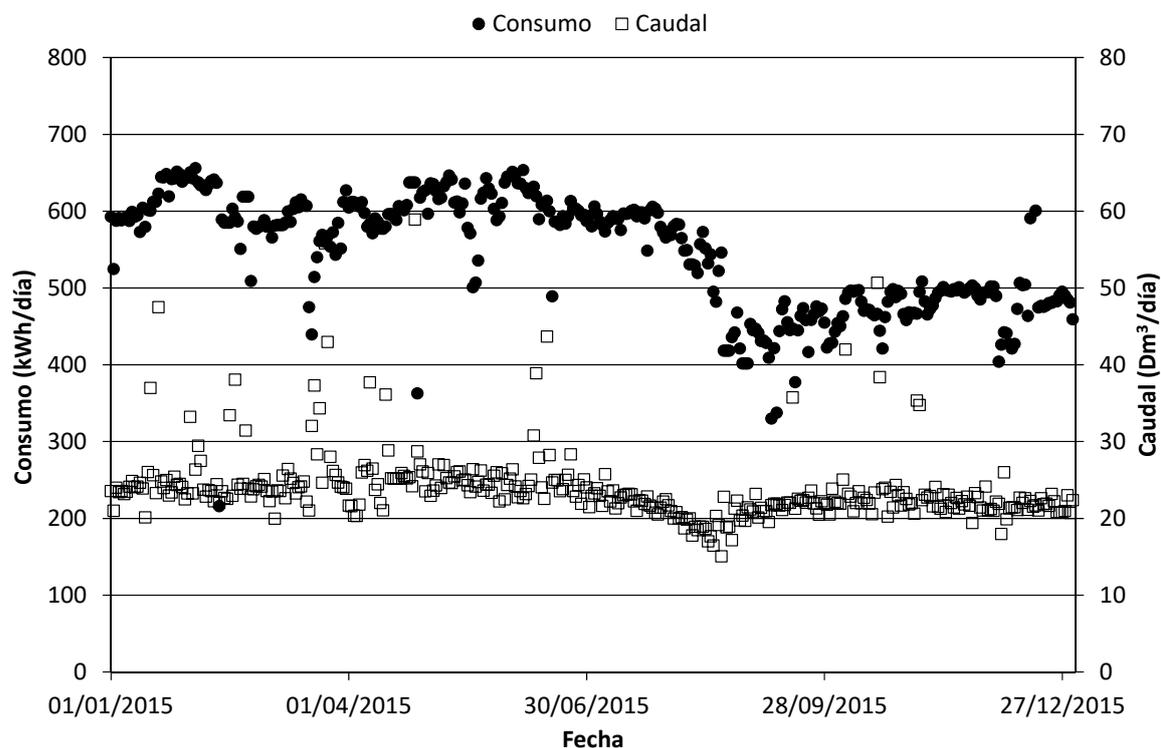
#### 4.2.2.7 Recirculación de fangos (CCM2).

Para la recirculación externa de fangos se dispone de cuatro (1 en reserva) bombas centrífugas horizontales de caudal unitario 1,565 m<sup>3</sup>/h a 3 m.c.a. que permiten recircular el 200 % del caudal medio en condiciones punta, sin reserva. La regulación del caudal a impulsar se realiza mediante variadores de frecuencia electrónicos. Los fangos son recirculados a la zona anóxica nº 1.

La Figura 75 muestra la evolución a lo largo del año del consumo energético diario de las bombas de recirculación de fangos y del caudal de tratamiento. En esta figura se distinguen dos periodos claramente diferenciados en los que el consumo energético se mantiene más o menos estable. De enero a julio el consumo oscila alrededor de los 600 kWh/día mientras que el resto del año el consumo medio diario se mantiene entre 400 y 500 kWh/día. El descenso en el consumo energético que se produce en el mes de agosto guarda relación con el descenso observado en el caudal de tratamiento. Tras este mes se incrementó el caudal de tratamiento hasta valores ligeramente inferiores a los de los primeros meses del año. El consumo energético de las bombas de recirculación externa también se incrementó pero se mantuvo bastante por debajo del observado durante los primeros meses del año.



Figura 75. Evolución del consumo energético de la recirculación de fangos y del caudal de tratamiento.



En la Figura 76 se muestra la evolución del consumo energético medio de las bombas de recirculación de fangos y del caudal tratado a escala horaria. Se puede observar que a pesar de las variaciones importantes en el caudal de tratamiento el consumo de las bombas de recirculación permanece constante a lo largo del día (en torno a 22 kWh/h). Aunque este es el valor medio anual, si se calculan por separado los consumos medios horarios de los dos periodos antes comentados se observa que en ambos periodos el consumo es constante a lo largo del día pero presenta valores diferentes (en torno a 25 kWh/h y 19 kWh/h, respectivamente). El hecho de que el consumo energético se mantenga constante a lo largo del día se traduce en un incremento del consumo energético por metro cúbico de agua tratada durante las horas de bajo caudal (ver Figura 77). Al igual que en el caso de la recirculación interna (CCM3B), para reducir el consumo energético de estas bombas se podría ajustar el caudal de recirculación de fangos al caudal de tratamiento. Para ello sería necesaria la instalación de un sistema de control que modificara el caudal de recirculación de fangos en función del caudal de entrada a la planta. Dada la existencia de variadores de frecuencia en las bombas de recirculación de fangos no sería necesaria la instalación de ningún equipo, únicamente la programación del sistema de control.

De esta forma sería esperable mantener de forma estable un consumo energético de 0.019 kWh/m<sup>3</sup>. Teniendo en cuenta que el consumo medio actual es de 0.027 kWh/m<sup>3</sup>, sería esperable una reducción del orden del 30% en el consumo energético de las bombas de recirculación interna. De todas formas, conviene señalar que el porcentaje de reducción de consumo energético respecto del total de la EDAR que se podría conseguir con este sistema de control sería bastante bajo, teniendo en cuenta que el consumo energético de las bombas de recirculación de fangos representa únicamente el 3% del consumo energético total de la EDAR.



Figura 76. Evolución del caudal tratado y del consumo energético de las bombas de recirculación de fangos a escala horaria.

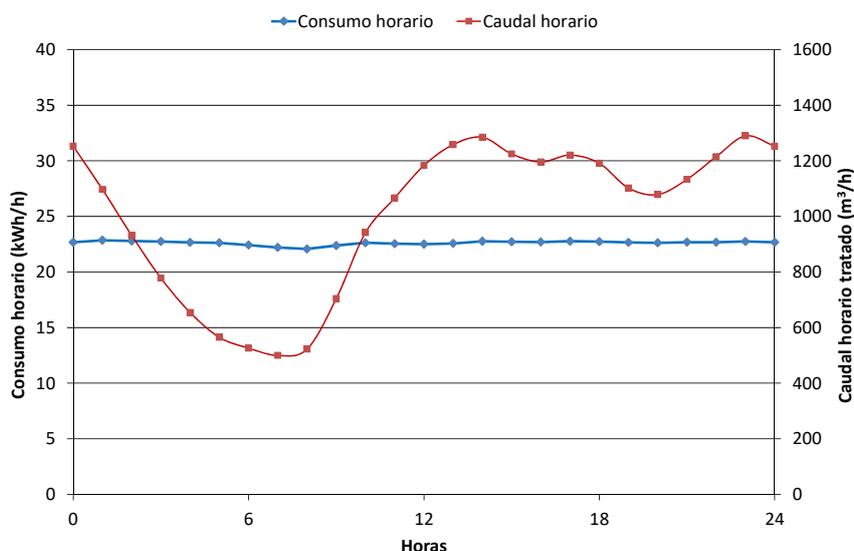
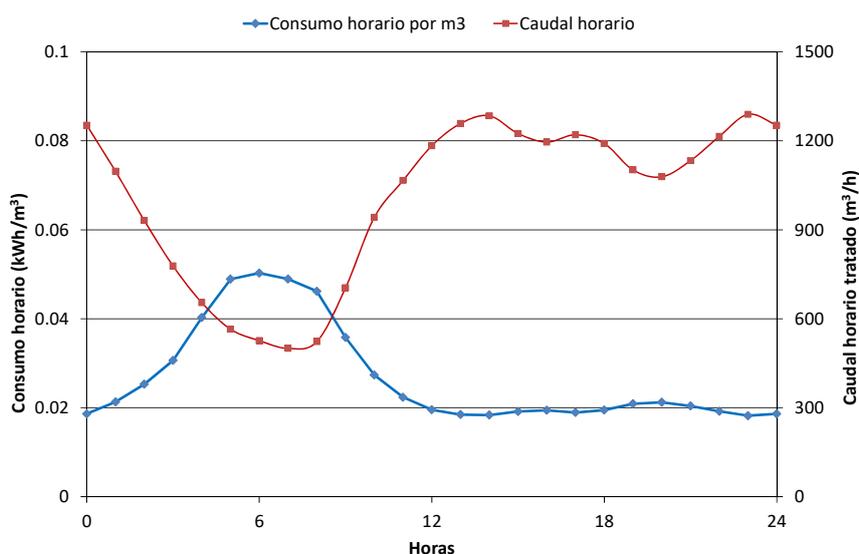


Figura 77. Evolución del caudal tratado y del consumo energético por metro cúbico de agua tratada de las bombas de recirculación de fangos a escala horaria.



#### 4.2.2.8 Agitación del digestor anaerobio (CCM5).

La agitación de los digestores se realiza mediante la compresión del propio gas de digestión en tres compresores (1 en reserva) de caudal unitario 650 Nm<sup>3</sup>/h a 25 m.c.a., con una potencia unitaria de 55 kW. La Figura 78 muestra la evolución del consumo energético asociado a la agitación del digestor anaerobio durante el año 2015. En esta figura se puede observar que aunque con cierta dispersión el consumo energético diario se mantiene bastante estable en valores próximos a los 1200 kWh/d. Únicamente durante los meses de verano el consumo energético es ligeramente inferior al resto del año. Al representar el consumo energético frente al caudal de tratamiento (ver Figura 79) se observa que no existe ninguna relación entre ambas variables.



Figura 78. Evolución del consumo energético de la agitación del digestor anaerobio durante el año 2015.

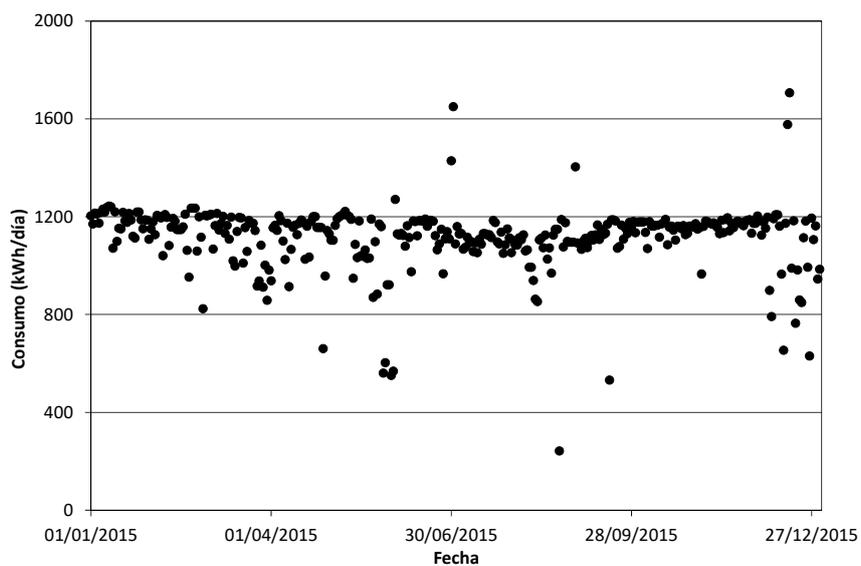
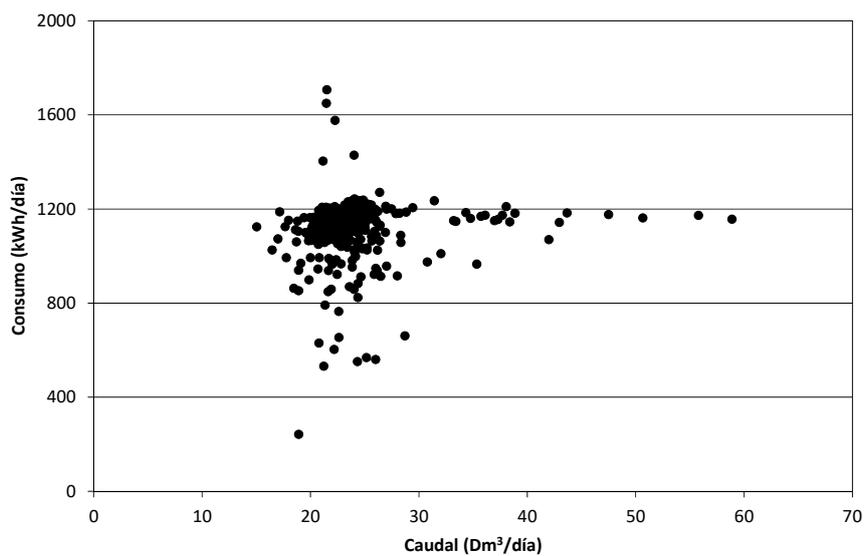


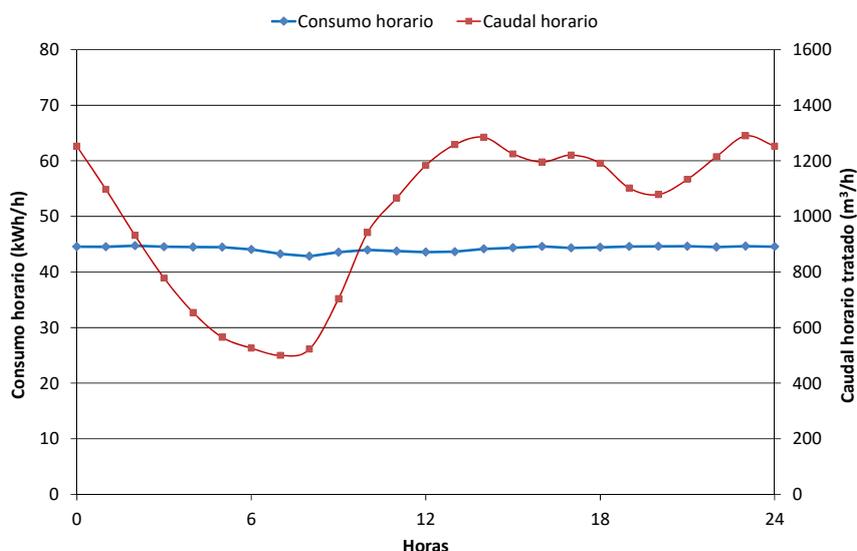
Figura 79. Relación entre el consumo energético de la agitación del digestor anaerobio y el caudal tratado.



La Figura 80 muestra que el consumo energético es constante durante todo el día y no existe ninguna relación con las variaciones de caudal de entrada a la EDAR.



Figura 80. Consumo medio de la agitación del digestor anaerobio y caudal medio tratado a escala horaria.



La EDAR de Torrejón de Ardoz cuenta con dos digestores de volumen unitario de 7,427 m<sup>3</sup>. Dado que el consumo energético medio horario del sistema de agitación es de 45 kWh/h, la potencia de agitación empleada es de 3 W/m<sup>3</sup>. En la bibliografía (Grady et al., 2011) se recomienda un valor de entre 5 y 8 W/m<sup>3</sup> para garantizar la agitación del digestor por lo que no se dispone de margen para reducir el consumo energético de este sistema.

#### 4.2.2.9 Desodorización y Bombeo intermedio (CCM1C).

Tal y como se ha comentado anteriormente el CCM1C engloba los consumos energéticos del sistema de desodorización y del bombeo intermedio. Como ambos consumos suponen un porcentaje importante respecto del consumo total de la EDAR en primer lugar se mostrarán los datos conjuntos del CCM1C para posteriormente analizar por separado los consumos energéticos de los distintos equipos. La Figura 81 muestra la evolución del consumo energético asociado al CCM1C durante el año 2015. Tal y como se observa en la figura el consumo energético permanece bastante constante entre 3,400 y 3,900 kWh/día siendo ligeramente superior durante la primera mitad del año. Al representar el consumo energético frente al caudal de tratamiento (ver Figura 82) se observa que una ligera correlación entre ambas variables. Esta correlación se debe a que parte de ese consumo energético del CCM1C (en torno al 25%) está asociado al bombeo intermedio cuyo consumo sí depende del caudal de tratamiento.



Figura 81. Evolución del consumo energético del CCM1C durante el año 2015.

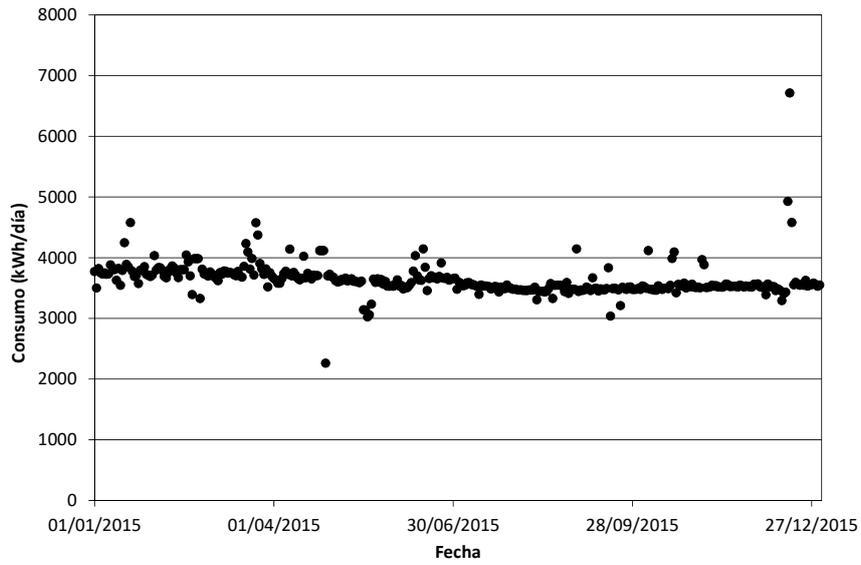
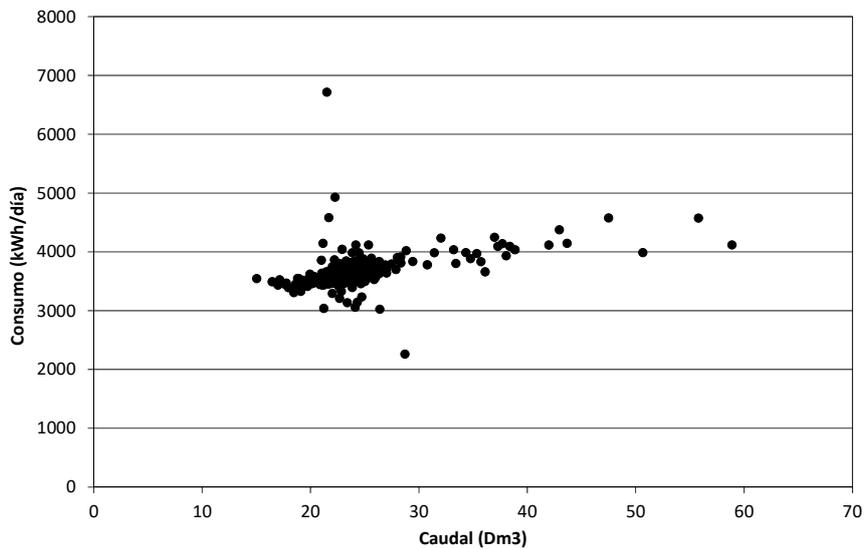


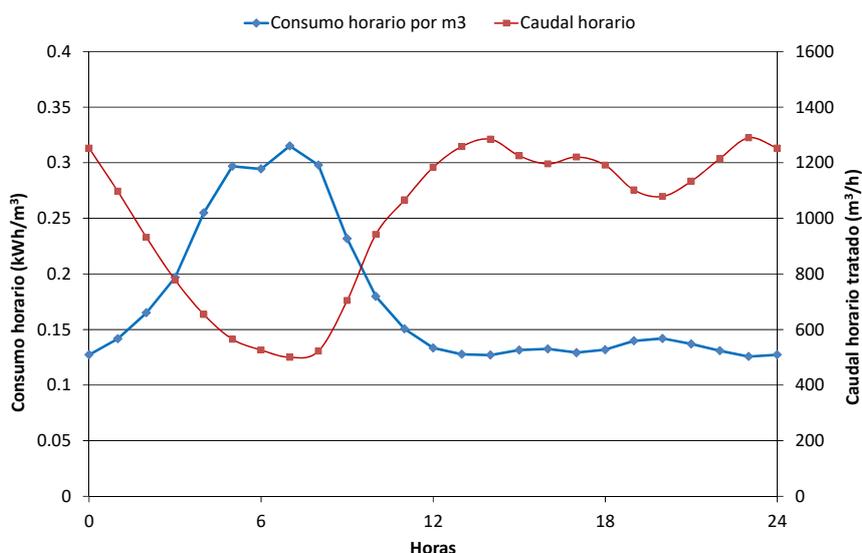
Figura 82. Relación entre el consumo energético del CCM1C y el caudal tratado en escala diaria.



La Figura 83 muestra que a lo largo del día el consumo energético por metro cúbico de agua tratada varía de forma inversa al caudal de tratamiento. Durante las horas de elevado caudal de tratamiento (de 12 de la mañana a 12 de la noche) el consumo se mantiene en valores próximos a  $0.13 \text{ kWh/m}^3$  mientras que durante el resto del día el consumo por metro cúbico de agua tratada se incrementa significativamente alcanzando valores superiores a  $0.31 \text{ kWh/m}^3$ .



Figura 83. Consumo medio del CCM1C y caudal medio tratado a escala horaria.



#### 4.2.2.9.1 Desodorización.

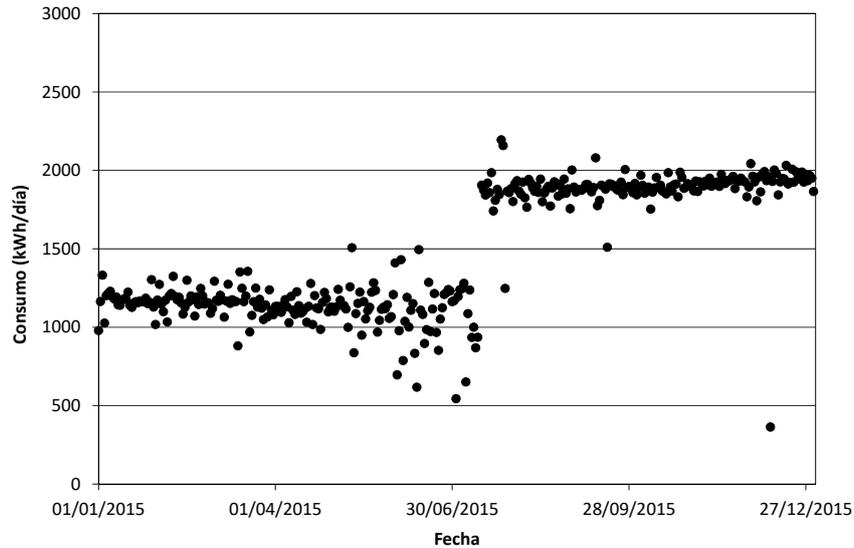
El sistema de desodorización está compuesto por dos torres de absorción por vía química con tres reactivos distintos: ácido sulfúrico, hipoclorito sódico e hidróxido sódico, para un caudal total de tratamiento de 120,567 m<sup>3</sup>/h. Los elementos de donde se extrae el aire para su renovación son los siguientes: Edificio de pretratamiento y deshidratación (111,516 m<sup>3</sup>/h), edificio de espesamiento (3,643 m<sup>3</sup>/h) y espesadores de gravedad, flotadores y depósito tampón (5,410 m<sup>3</sup>/h).

La instalación se compone de dos ventiladores con 60,281 m<sup>3</sup>/h de capacidad, dos torres scrubber, tres bombas de recirculación de 250 m<sup>3</sup>/h, un depósito de almacenamiento de hidróxido sódico de 6,000 l de capacidad en poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV), un depósito de almacenamiento de hipoclorito sódico de 12,000 l de capacidad en PRFV, un depósito de almacenamiento de ácido sulfúrico de 2,000 l de capacidad y seis bombas dosificadoras de los reactivos de capacidad 9-90 l/h. El principal consumo del sistema de desodorización se debe a los ventiladores y las bombas de recirculación.

La Figura 84 muestra la evolución del consumo energético de los ventiladores durante el año 2015. Tal y como se observa en la figura se observan dos periodos de consumo energético relativamente estables y un marcado incremento del consumo energético entre ellos. El motivo de esa variación se debe a que se detectó que la medida del consumo energético no era correcta y se ajustó el error sistemático que se estaba generando. Este hecho pone de manifiesto la gran importancia que tiene la calibración de todos los equipos de medida para poder disponer de información fiable. Se recomienda incluir en el protocolo de mantenimiento la calibración periódica de los equipos, ajustando la frecuencia de dicha calibración en base a los resultados obtenidos.

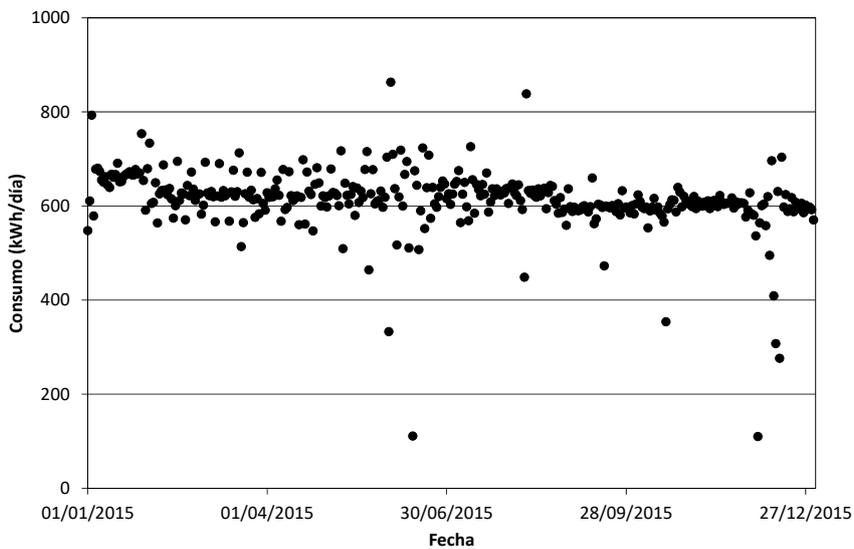


Figura 84. Evolución del consumo energético de los ventiladores del sistema de desodorización durante el año 2015.



La Figura 85 muestra la evolución del consumo energético de las bombas del sistema de desodorización durante el año 2015. Tal y como se observa en la figura el consumo energético es bastante estable en torno a 600 kWh/día.

Figura 85. Evolución del consumo energético de las bombas del sistema de desodorización durante el año 2015.



Para reducir el consumo energético se podría ajustar el caudal de extracción de aire a las necesidades de desodorización. Para ello se deberían colocar medidores de ácido sulfhídrico y en función de las mediciones obtenidas modificar el caudal de aire tratado. Además, dada la mayor densidad del sulfhídrico respecto del aire se puede reducir el caudal de aire extraído, y con ello el consumo energético, realizando la extracción del aire de los edificios de pretratamiento y deshidratación y espesamiento por la parte inferior. Implantando estas medidas se podría conseguir una reducción del consumo energético de entre un 30% y un 40%.



4.2.2.9.2 Bombeo de elevación intermedio.

Dadas las características topográficas de la EDAR existe un bombeo de elevación del agua recogida de los decantadores primarios hasta el tratamiento biológico. Para ello se dispone de cuatro (una en reserva) bombas centrífugas horizontales en cámara seca de caudal unitario 1,667 m<sup>3</sup>/h a 7.50 m.c.a., que permiten impulsar el caudal máximo de tratamiento (5,000 m<sup>3</sup>/h). El destino del agua bombeada desde el depósito de agua decantada es la arqueta de reparto a tratamiento biológico. La Figura 86 muestra la evolución del consumo energético de las bombas de elevación intermedia de decantación primaria al reactor biológico junto con el caudal de tratamiento durante el año 2015. En esta figura se observa que el consumo y el caudal siguen comportamientos análogos observándose en ambas curvas un descenso durante el mes de agosto y una posterior recuperación. Durante los primeros 6 meses del año se observa una mayor dispersión de los datos de consumo energético que no puede ser asociada a la dispersión de los caudales. Esta dispersión se observa en la Figura 87 en la que se muestra la relación entre el consumo energético y el caudal de tratamiento. Aunque el consumo energético de este bombeo así como su dispersión sea muy inferior al del bombeo de elevación de agua bruta se recomienda la instalación de un sistema de control que optimice el funcionamiento de las bombas minimizando su consumo energético. Además, aunque no se dispone de datos a escala horaria de consumos energéticos, teniendo en cuenta la capacidad de las bombas (1,667m<sup>3</sup>/h) y los caudales horarios bombeados durante la noche (inferiores a 600 m<sup>3</sup>/h, ver Figura 83) se recomienda, al igual que en el bombeo de elevación de agua bruta, la instalación de una bomba de menor caudal dotada de variador de frecuencia. El ahorro energético estimado con la implantación de estas medidas es de entre un 10% y un 20%.

Figura 86. Evolución del consumo energético de las bombas de elevación del agua decantada durante el año 2015.

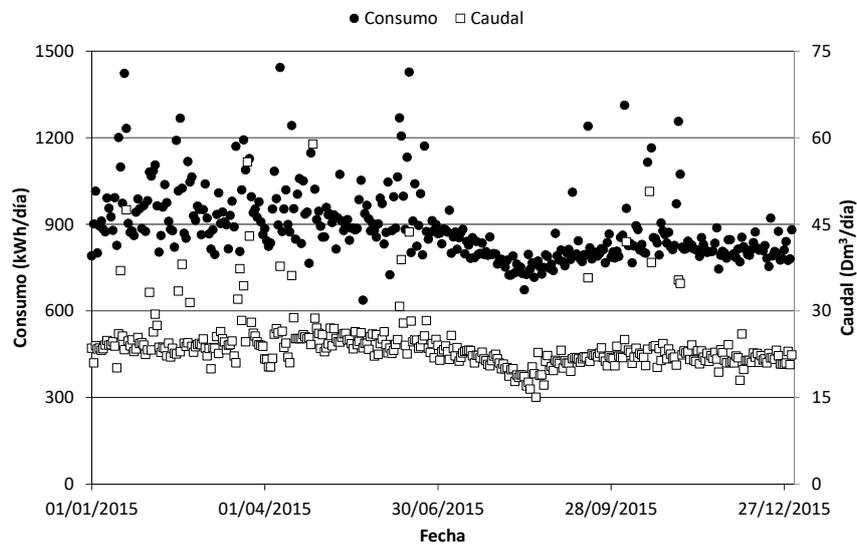
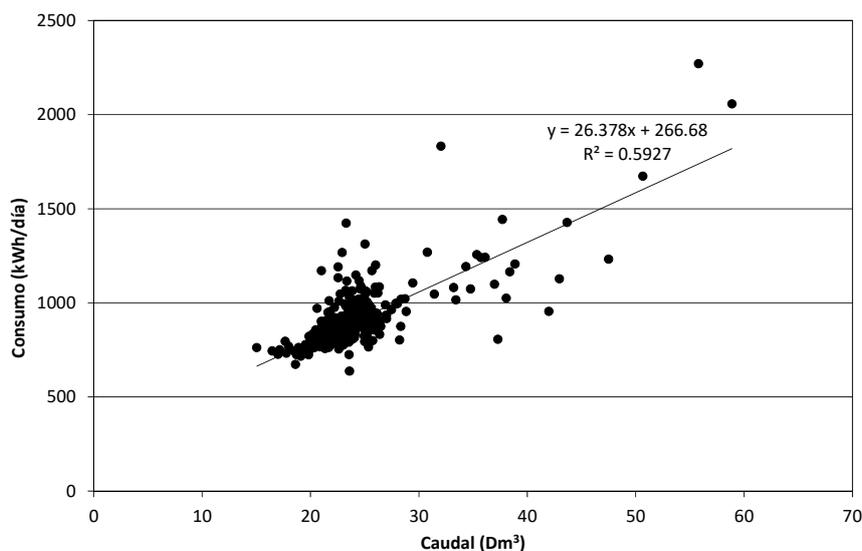




Figura 87. Relación entre el consumo energético de las bombas de elevación intermedia y el caudal de tratamiento



### 4.3 Conclusiones del análisis desagregado en la EDAR de Torrejón de Ardoz

El proceso biológico de la EDAR de Torrejón de Ardoz consiste en un sistema de fangos activados con eliminación biológica de nitrógeno y fósforo con estabilización de los fangos generados mediante digestión anaerobia. Durante el año 2015 la EDAR de Torrejón de Ardoz trató un caudal medio de 23,950 m<sup>3</sup>/día con un consumo energético promedio de 18,017 kWh/día, lo que supone un consumo por metro cúbico de 0.75 kWh/m<sup>3</sup>. Se trata de un valor relativamente elevado para una EDAR con digestión anaerobia de fangos, lo que sugiere la existencia de posibles mejoras a implantar para reducir la huella energética de esta EDAR. Una de estas mejoras consistiría en la instalación de un sistema de cogeneración para el aprovechamiento del biogás que se genera en la digestión anaerobia y que actualmente se quema en la antorcha. Teniendo en cuenta los porcentajes de reducción de consumo energético observados en las EDAR con cogeneración, el porcentaje de ahorro que se podría conseguir con la implementación de un sistema de cogeneración se estima entre un 30% y un 60% del consumo total de la EDAR.

Tras el análisis de los consumos desagregados de la EDAR de Torrejón de Ardoz se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La distribución porcentual de los consumos energéticos asociados a los distintos CCM existentes en la EDAR de Torrejón durante el año 2015 es:
  - CCM3C (Sistema de aireación): 26%
  - CCM3A (Agitación de los reactores anóxicos y anaerobios): 17%
  - CCM1C (Desodorización): 14%
  - CCM1A (Elevación de agua bruta): 13%
  - CCM4A (Flotación de fangos): 8%



- CCM5 (Agitación del digestor anaerobio): 6%
- CCM1C (Bombeo de elevación intermedio): 6%
- CCM2 (Bombeo de recirculación de fangos): 3%
- CCM3B (Bombeo de recirculación interna): 3%
- CCM4B (Deshidratación de fangos): 2%
- CCM1B (Pretratamiento): 2%

- Tal y como se observa en la distribución porcentual los procesos con mayor consumo energético son el sistema de aireación, los agitadores, el sistema de desodorización y la elevación de agua bruta. A continuación se resumen las principales conclusiones obtenidas del análisis individualizado de los CCM ordenadas en función del porcentaje de consumo energético.
- El análisis del **sistema de aireación** muestra que el consumo de dicho sistema por metro cúbico de agua tratada se mantiene en valores razonables (entre 0.15-0.2 kWh/m<sup>3</sup>) durante las horas del día en las que se trata un caudal elevado. Sin embargo, durante las horas nocturnas en las que el caudal disminuye, el consumo por metro cúbico aumenta hasta alcanzar valores próximos 0.5 kWh/m<sup>3</sup>. Para reducir el consumo energético se recomienda la sustitución de al menos uno de los turbocompresores por uno de menor potencia especialmente para el aporte de oxígeno durante las horas de bajo caudal de tratamiento y la implantación de un sistema de control que optimice el aporte de oxígeno en todo momento. Con estas medidas sería esperable mantener durante todo el día un consumo horario sostenido en torno a 0.17 kWh/m<sup>3</sup>. Teniendo en cuenta que el consumo medio actual es de 0.24 kWh/m<sup>3</sup> sería esperable una reducción del orden del 30% de la energía consumida en el sistema de aireación.
- El análisis del consumo energético de los **sistemas de agitación de reactores anóxicos y anaerobios** muestra que dicho consumo se mantiene constante durante todo el tiempo, independientemente del caudal de tratamiento. La potencia de agitación está en torno a 6 W/m<sup>3</sup> y es claramente inferior a los 13-26 W/m<sup>3</sup> recomendados en bibliografía para mantener el contenido de los reactores no aireados perfectamente homogeneizados. Para reducir el importante porcentaje de consumo energético que representa el sistema de agitación se podría estudiar la implementación de un sistema de control para temporizar la agitación. El porcentaje de ahorro esperable con esta medida es de entre un 10% y un 20% del consumo energético del sistema de agitación, siendo proporcional al porcentaje del tiempo que se puedan mantener parados los agitadores sin afectar al buen funcionamiento del proceso.
- El análisis del consumo energético del **sistema de desodorización** muestra que dicho consumo se mantiene constante durante todo el tiempo, independientemente del caudal de tratamiento. Para reducir el consumo energético se podría ajustar el caudal de extracción de aire a las necesidades de desodorización. Para ello se deberían colocar medidores de ácido sulfhídrico y en función de las mediciones obtenidas modificar el caudal de aire tratado. Además, se podría reducir el caudal extraído realizando la extracción del aire de los edificios de pretratamiento y deshidratación y espesamiento por la parte inferior. Implantando estas medidas se podría conseguir una reducción del consumo energético del sistema de desodorización de entre un 30% y un 40%.
- El análisis del **bombeo de elevación** de agua bruta muestra que para caudales de tratamiento inferiores a 1,000 m<sup>3</sup>/hora el consumo energético por metro cúbico tratado aumenta considerablemente. Para reducir el consumo energético durante las horas de bajo caudal se recomienda la instalación de una bomba de menor caudal dotada de variador de frecuencia para que funcione durante las horas de la noche. Además, se observa una gran dispersión en los datos de consumo energético, obteniéndose para un mismo valor del caudal impulsado diferencias en el consumo energético asociado de más



del 50%. Teniendo en cuenta que solo una de las bombas dispone de variador de frecuencia se recomienda la instalación de al menos otro variador de frecuencia y de un sistema de control que regule la altura de agua en el pozo minimizando las bombas en funcionamiento y su consumo energético. Con estas modificaciones sería esperable una reducción del orden del 20% de la energía consumida en el bombeo de agua bruta.

- El análisis del consumo energético asociado al proceso de **flotación de fangos** muestra que se trata de un consumo relativamente estable en el tiempo sin variaciones a escala horaria y con ligeras variaciones a escala diaria. Para reducir este consumo se recomienda optimizar el principal parámetro de funcionamiento de un flotador (kg de aire perdidos en la despresurización/kg de sólidos influente). Una vez optimizado se debería ajustar el caudal recirculado a la cantidad de sólidos presente en el influente, para lo que sería necesario medir el caudal de purga de fango secundario y la concentración de sólidos en dicho fango.
- El análisis del consumo energético asociado a la **agitación de la digestión anaerobia** muestra que se trata de un consumo estable en el tiempo e independiente del caudal de tratamiento. La potencia de agitación empleada es de 3 W/m<sup>3</sup> inferior a los 5 W/m<sup>3</sup> recomendados para garantizar la agitación del digestor por lo que no se dispone de margen para reducir el consumo energético de este sistema.
- El análisis del consumo energético asociado al **bombeo de elevación intermedio** muestra que dicho consumo sigue a escala diaria el mismo patrón que el caudal de tratamiento aunque con una dispersión importante en los valores de consumo energético. Para reducir este consumo se recomienda instalar un sistema de control que mantenga la altura en el pozo de bombeo y optimice las bombas en funcionamiento. Además se propone la instalación de una bomba de menor caudal para optimizar el consumo energético durante las horas de la noche. El ahorro energético estimado con la implantación de estas medidas es de entre un 10% y un 20% del consumo energético del bombeo de elevación intermedio.
- El análisis del consumo energético asociado al **bombeo de recirculación interna** muestra que se trata de un consumo estable en el tiempo e independiente del caudal de tratamiento. Para reducir este consumo se recomienda ajustar los caudales de recirculación interna al caudal de tratamiento. Para ello sería necesaria la instalación de un sistema de control que modificara los caudales de recirculación interna en función del caudal de entrada a la planta o ajustara dichos caudales en función de las necesidades de desnitrificación existentes. De esta forma sería esperable una reducción del orden del 25% en el consumo energético de las bombas de recirculación interna.
- El análisis del consumo energético asociado al **bombeo de recirculación de fangos** muestra que se trata de un consumo estable en el tiempo e independiente del caudal de tratamiento. Para reducir este consumo se recomienda ajustar el caudal de recirculación de fangos al caudal de tratamiento. De esta forma se podría reducir el consumo energético especialmente durante las horas de bajo caudal, siendo esperable una reducción del orden del 30% en el consumo energético de las bombas de recirculación de fangos.
- El análisis del consumo energético asociado a la **deshidratación de fangos** muestra una gran variación en el consumo diario con valores desde los 100 kWh/día hasta los 800 kWh/día. De hecho es el CCM que presenta una mayor desviación estándar (representa el 39% del valor medio). La variabilidad se debe al diferente número de horas que está en funcionamiento el sistema de deshidratación en función del día. El análisis a escala horaria muestra que el patrón típico de comportamiento es con la deshidratación funcionando desde las 4 horas de la tarde hasta las 4 horas de la madrugada aunque con una gran variación en el funcionamiento. Para reducir el gasto energético se recomienda analizar la gestión de los fangos enviados a deshidratación para realizar en la medida de lo posible el proceso aprovechando el periodo más económico que abarca todos los días desde las 24h hasta las 8h.



## 4.4 Descripción de la EDAR de Valdemorillo

La EDAR de Valdemorillo fue diseñada para tratar un caudal medio diario de 2,665 m<sup>3</sup>/día correspondientes a una población de 13,000 habitantes equivalentes. El diseño incluye un canal de oxidación para la eliminación de materia orgánica, nitrógeno y fósforo (este último por vía química) así como para la estabilización del fango.

### 4.4.1 Línea de aguas

La línea de aguas de la EDAR de Valdemorillo consta de:

- Desbaste de aliviados
- Pozo de gruesos
- Bombeo del agua bruta (3 ud)
- Desbaste de finos (3 ud)
- Desarenador-desengrasador en canal aireado (2 ud)
- Tratamiento físico químico Densadeg
- Canal de oxidación (2 ud)
- Decantación secundaria (2 ud)
- Recirculación de fangos (3 ud)

### 4.4.2 Línea de fangos

La línea de fangos de la EDAR de Valdemorillo consta de:

- Extracción de los fangos en exceso (3 ud)
- Espesamiento por gravedad de fangos (1 ud)
- Bombeo de fangos espesados a centrífuga (3 ud)
- Deshidratación mecánica mediante centrífugas (2 ud)
- Bombeo de los fangos deshidratados (1 ud)
- Almacenamiento de los fangos deshidratados (1 ud)

### 4.4.3 Esquema de la EDAR

La Figura 88 muestra un diagrama del esquema de tratamiento de la EDAR de Valdemorillo y la Figura 89 muestra una foto aérea de la EDAR.



Figura 88. Esquema de tratamiento de la EDAR de Valdemorillo. \*El sobrenadante del espesador y el agua de deshidratación se recirculan a cabeza de planta.

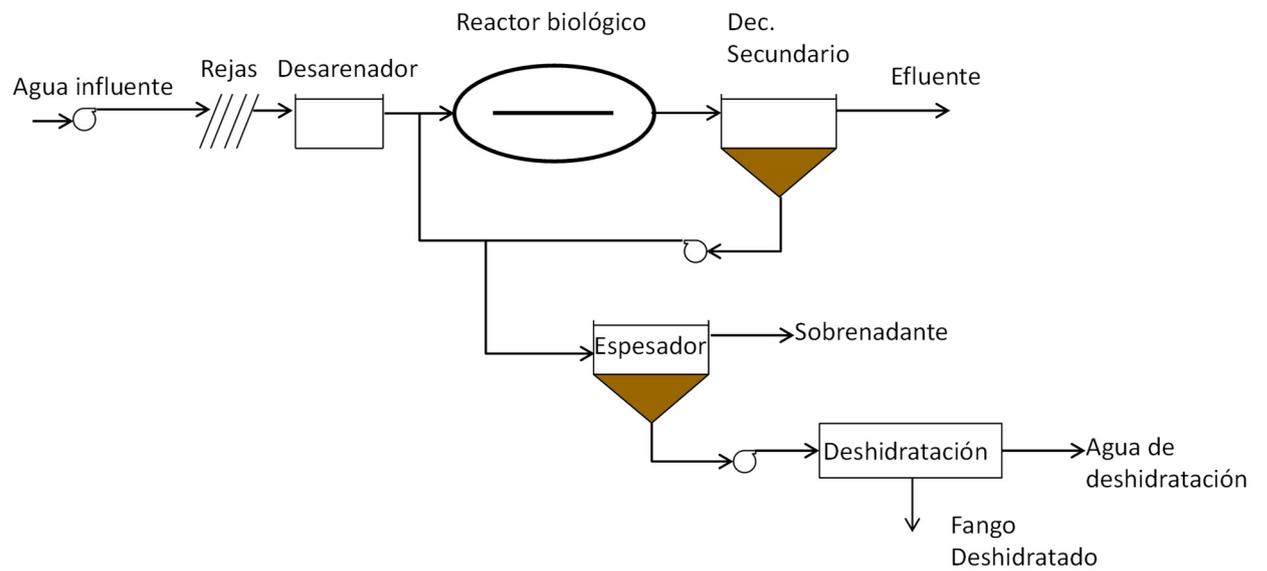


Figura 89. Vista aérea de la EDAR de Valdemorillo.





#### 4.4.4 Análisis de los sistemas de medición de consumos energéticos instalados actualmente en la EDAR

La EDAR de Valdemorillo cuenta con un único CCM que da servicio a todos los equipos de la EDAR. La Tabla 62 muestra el listado de dichos equipos con sus respectivas potencias.

Tabla 62. Listado de equipos con sus potencias de la EDAR de Valdemorillo.

EQUIPO	POTENCIA (kW)
ACELERADOR DE CORRIENTE Nº1 BALSA 1	2,3
ACELERADOR DE CORRIENTE Nº1 BALSA 2	2,3
ACELERADOR DE CORRIENTE Nº2 BALSA 1	2,3
ACELERADOR DE CORRIENTE Nº2 BALSA 2	2,3
AERADOR SUMERGIBLE DESARENADO AEROFLOT A	0,65
AERADOR SUMERGIBLE DESARENADO AEROFLOT B	0,65
AGITADOR CÁMARA DE MEZCLA DENSADEG	1,10
AGITADOR DE POLI A DENSADEG	0,18
AGITADOR EQUIPO PREPARACIÓN DE POLI A	0,37
AGITADOR EQUIPO PREPARACIÓN DE POLI B	0,37
AGITADOR-FLOCULADOR POLI	1,10
BOMBA CENTRIFUGA SUMERGIBLE AGUA BRUTA Nº1	3,10
BOMBA CENTRIFUGA SUMERGIBLE AGUA BRUTA Nº2	3,10
BOMBA CENTRIFUGA SUMERGIBLE AGUA BRUTA Nº3	3,10
BOMBA DE AGUA INDUSTRIAL A	5,50
BOMBA DE AGUA INDUSTRIAL B	5,50
BOMBA DE ALIMENTACIÓN A CENTRIFUGADORA A	2,20
BOMBA DE ALIMENTACIÓN A CENTRIFUGADORA B	2,20
BOMBA DE ALIMENTACIÓN A CENTRIFUGADORA C	2,20
BOMBA DE DOSIFICACIÓN DE CLORURO A	0,42
BOMBA DE DOSIFICACIÓN DE CLORURO B	0,42
BOMBA DE FANGO EN EXCESO A	2,20
BOMBA DE FANGO EN EXCESO B	2,20
BOMBA DE FANGO EN EXCESO C	2,20
BOMBA DE FANGOS A DENSADEG A	2,20
BOMBA DE FANGOS A DENSADEG B	2,20
BOMBA DE FANGOS A DENSADEG C	2,20
BOMBA DE FLOTANTES DECANTADORES A ARQUETA DE GRASAS	1,2
BOMBA DE LIMPIEZA DECANTADOR A	1,3
BOMBA DE LIMPIEZA DECANTADOR B	1,3
BOMBA DE RECIRCULACIÓN A	3
BOMBA DE RECIRCULACIÓN B	3
BOMBA DE RECIRCULACIÓN C	3
BOMBA DE TRASIEGO DE FANGO A TOLVA	4
BOMBA DOSIFICADORA DE POLI A	0,55



EQUIPO	POTENCIA (kW)
BOMBA DOSIFICADORA DE POLI B	0,55
BOMBA DOSIFICADORA DE POLI C	0,55
BOMBA DOSIFICADORA DE POLIELECTROLITO A DENSADEG A	0,25
BOMBA DOSIFICADORA DE POLIELECTROLITO A DENSADEG B	0,25
BOMBA SUMERGIBLE ARQUETA DE VACIADOS A	2
BOMBA SUMERGIBLE ARQUETA DE VACIADOS B	2
BOMBA SUMERGIBLE DE ACHIQUE	0,55
BOMBA SUMERGIBLE DE FLOTANTES A SEPARADOR DE GRASAS	1,20
CLASIFICADOR DE ARENAS	0,55
COMPRESOR	0,74
COMPRESOR DESARENADOR A	2,2
COMPRESOR DESARENADOR B	2,2
CONCENTRADOR DE GRASAS	0,25
CUCHARA BIVALVA	3
DOSIFICADOR DE POLIELECTROLITO	0,25
MOTOR CENTRIFUGADORA A	22 PPAL. / 7,5
MOTOR CENTRIFUGADORA A	22 PPAL. / 7,5
MOTOR DE APERTURA DE TOLVA	
MOTORREDUCTOR DECANTACIÓN SECUNDARIA A	
MOTORREDUCTOR DECANTACIÓN SECUNDARIA B	
MOTORREDUCTOR DENSADEG	0,55
MOTORREDUCTOR DESARENADOR-DESENGRASADOR A	0,18
MOTORREDUCTOR DESARENADOR-DESENGRASADOR B	0,18
MOTORREDUCTOR ESPESADOR DE FANGOS	
POLIPASTO ELECTRICO MOTOR DE ELEVACIÓN	3
POLIPASTO ELECTRICO MOTOR DE TRASLACIÓN	0,5
REJA DE LIMPIEZA AUTÓMATICA	0,37
SECADOR REFRIGERADOR	0,16
SOPLANTE DE AIRE A TRATAMIENTO BIOLÓGICO A	30
SOPLANTE DE AIRE A TRATAMIENTO BIOLÓGICO B	30
SOPLANTE DE AIRE A TRATAMIENTO BIOLÓGICO C	30
TAMICES AUTOMÁTICO DE DESBASTE A	0,37
TAMICES AUTOMÁTICO DE DESBASTE B	0,37
TAMIZ DE FANGO A ESPESADOR	0,75
TAMIZ EN VERTEDERO	1,10
TORNILLO TRANSPORTADOR DE FANGO DESHIDRATADO	1,10
TORNILLO TRANSPORTADOR DE RESIDUOS	0,75
VENTILADOR	1,60 x 2 uds
VENTILADOR DESODORIZACIÓN	

Como se puede observar en la tabla anterior existe una gran disparidad en los valores de las potencias instaladas de los diferentes equipos. Para el análisis de los consumos energéticos



desagregados únicamente se considerarán los equipos con mayor potencia instalada. Estos equipos se muestran en la Tabla 63. En esta tabla se indican únicamente aquellos equipos con una potencia instalada superior al 2% del total.

Tabla 63. Listado de los equipos con mayor potencia instalada en la EDAR de Valdemorillo.

EQUIPO	Potencia instalada (kW)	% Potencia instalada
ACELERADORES DE CORRIENTE (4 Ud)	9.2	3.7
BOMBEO ELEVACIÓN AGUA BRUTA (3 Ud)	9.3	3.7
BOMBEO DE AGUA INDUSTRIAL (2 Ud)	11	4.4
BOMBEO DE ALIMENTACIÓN A CENTRIFUGADORA (3 Ud)	6.6	2.6
BOMBEO DE FANGO EN EXCESO (3 Ud)	6.6	2.6
BOMBEO DE FANGOS A DENSADeg (3 Ud)	6.6	2.6
BOMBA DE RECIRCULACIÓN (3 Ud)	9	3.6
MOTORES CENTRIFUGADORAS (2 Ud)	59	23.6
SOPLANTES (3 Ud)	90	36

A la vista de la tabla anterior se recomienda la instalación de medidores de energía en los siguientes equipos:

- Aceleradores de corriente (1 medidor para los 4 aceleradores)
- Bombas de alimentación a centrífuga (1 medidor para las 3 bombas)
- Bombas de agua bruta (1 medidor para las 3 bombas)
- Bombas de fango en exceso (1 medidor para las 3 bombas)
- Bombas de recirculación (1 medidor para las 3 bombas)
- Motor centrifugadora (1 medidor para los 2 motores)
- Soplangtes (1 medidor para las 3 soplangtes)

En este listado no se incluyen ni el bombeo de agua industrial, porque no está relacionado con los procesos de depuración, ni el bombeo de fangos a Densadeg, porque el tratamiento físico químico no está en funcionamiento.

Los equipos cuyo consumo se registró en cada uno de los 7 medidores finalmente instalados se muestran en la Tabla 64.



Tabla 64. Resumen de los equipos cuyo consumo energético se mide con cada uno de los medidores de consumo energético instalados en la EDAR de Valdemorillo.

Analizador	Equipos	Potencia eléctrica (kW)	Potencia (% respecto al total)
A1	Bombas de elevación de agua bruta	9.3	3.7
A2*	Bomba B de elevación de agua bruta	3.1	1.2
A3**	Soplante de biológico B	30	12
A4	Soplantes de biológico	90	36
A5	Bombas de fangos en exceso	6.6	2.6
A6	Bombas de recirculación	9	3.6
A7	Centrífugas	59	23.6

\* El consumo registrado por este medidor se incluye también dentro del analizador A1.

\*\* El consumo registrado por este medidor se incluye también dentro del analizador A4.

## 4.5 Análisis del consumo energético de la EDAR de Valdemorillo

Durante el año 2015 la EDAR de Valdemorillo trató un caudal medio de 1,524 m<sup>3</sup>/día con un consumo energético promedio de 1,605 kWh/día, lo que supone un consumo por metro cúbico de 1.05 kWh/m<sup>3</sup>. Durante el periodo de marzo a junio de 2016 para el que se han analizado los consumos desagregados la EDAR trató un caudal medio de 2,100 m<sup>3</sup>/día, aunque tal y como muestra la Figura 90 se produjeron importantes variaciones en el caudal de tratamiento (desde valores por debajo de 1,300 m<sup>3</sup>/d hasta valores por encima de 3,300 m<sup>3</sup>/d). Ante la diferencia existente entre los caudales tratados durante el año 2015 y el periodo objeto de estudio se analizaron las precipitaciones ocurridas durante este último periodo. La Figura 91 muestra la evolución de las precipitaciones registradas en la estación meteorológica de Pozuelo de Alarcón durante los meses de marzo a junio de 2016. Al cruzar la información de la Figura 90 (caudal de tratamiento) con la de la Figura 91 (precipitaciones) se observa que los incrementos bruscos de caudal que se observan en la Figura 90 coinciden con episodios de lluvias (19- 22 de marzo, 4 de abril, 10-13 de abril, 19- 21 de abril y 6-11 de mayo). Conviene señalar que tras los incrementos de caudal producidos por los episodios de lluvias, el caudal no se reduce hasta su valor habitual hasta bastantes días después de acabadas las precipitaciones. En consecuencia, de los poco más de 80 días para los cuales se dispone de datos de consumos energéticos el caudal de tratamiento se ha visto afectado por aportaciones de agua de lluvia durante más de 50 días.



Figura 90. Caudal tratado diario en la EDAR de Valdemorillo durante el periodo objeto de estudio.

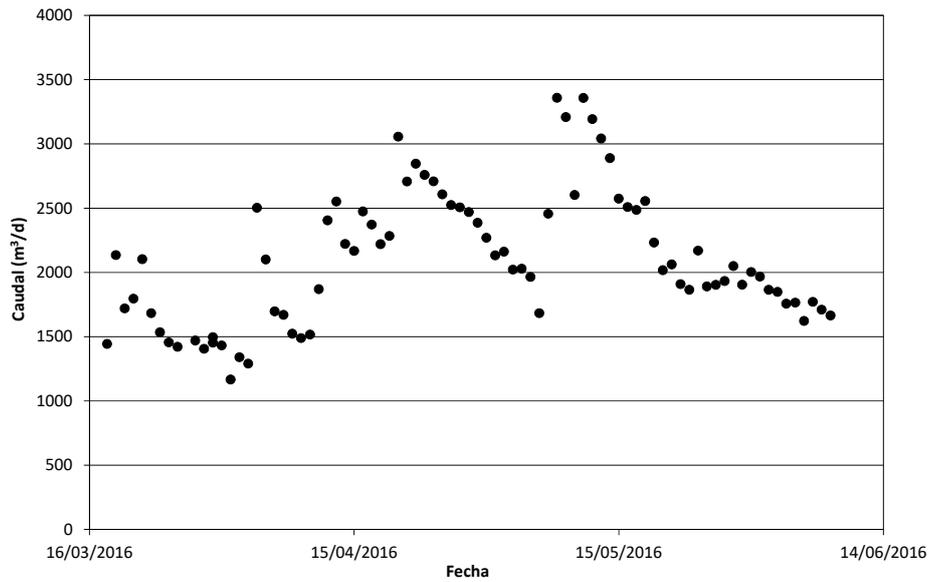
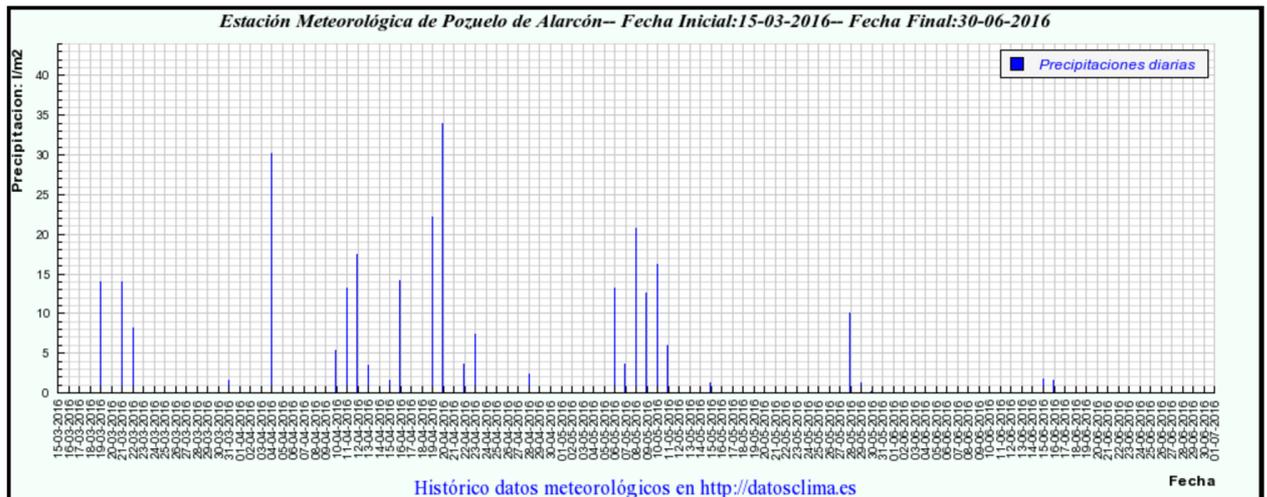


Figura 91. Evolución de las precipitaciones registradas en la estación meteorológica de Pozuelo de Alarcón durante el periodo objeto de estudio.



Al comparar los datos del periodo objeto de estudio con los correspondientes al año 2015 (ver Figura 92, caudal de tratamiento, y Figura 93, evolución de las precipitaciones) se observa que el efecto de las precipitaciones es mucho más marcado (en intensidad y en influencia temporal respecto a los caudales de tratamiento) durante los meses de marzo a junio de 2016 que durante el año 2015.



Figura 92. Evolución del caudal de tratamiento diario en la EDAR de Valdemorillo durante el año 2015.

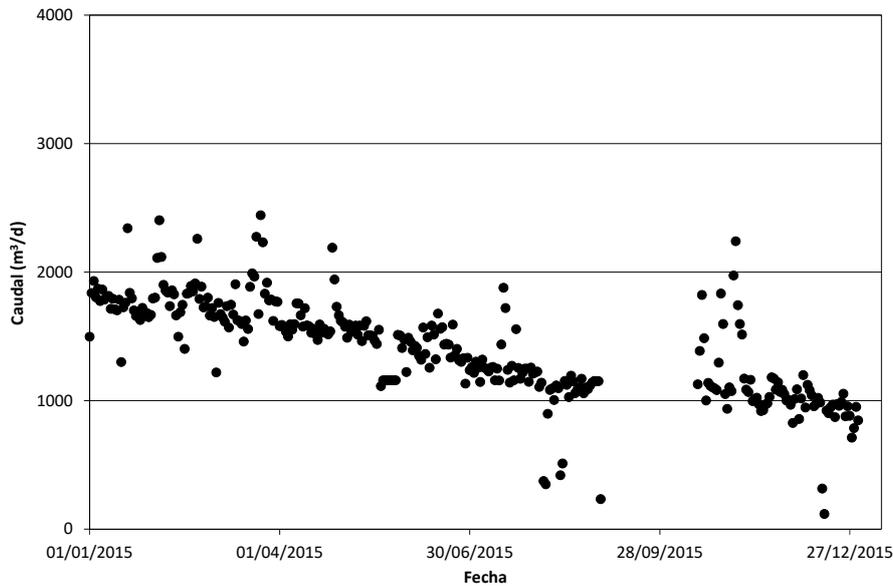
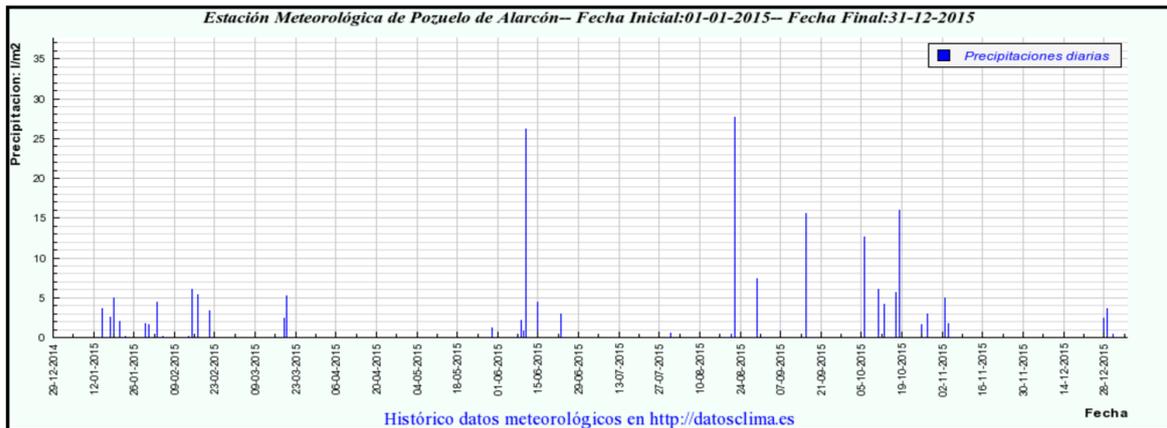


Figura 93. Evolución de las precipitaciones registradas en la estación meteorológica de Pozuelo de Alarcón durante el año 2015.



El consumo energético medio diario durante el periodo objeto de estudio fue de 1,555 kWh/d con variaciones también muy importantes que no guardan ninguna relación con el caudal de tratamiento (ver Figura 94). En esta figura se puede observar que los consumos energéticos diarios se encuentran entre 1,000 y 2,000 kWh/d independientemente del caudal tratado. Por el contrario, sí se observa una clara correlación al representar el consumo energético por metro cúbico de agua tratada frente al caudal de tratamiento (ver Figura 95). En esta figura se puede observar como el consumo por metro cúbico de agua tratada disminuye linealmente conforme el caudal aumenta dentro del intervalo comprendido entre 1,500 y 2,600 m<sup>3</sup>/d. Para caudales superiores a 2,600 m<sup>3</sup>/d el consumo energético específico se mantiene estable en valores entre 0.4 y 0.6 kWh/m<sup>3</sup>.



Figura 94. Consumo energético diario en la EDAR de Valdemorillo frente al caudal de tratamiento durante el periodo objeto de estudio.

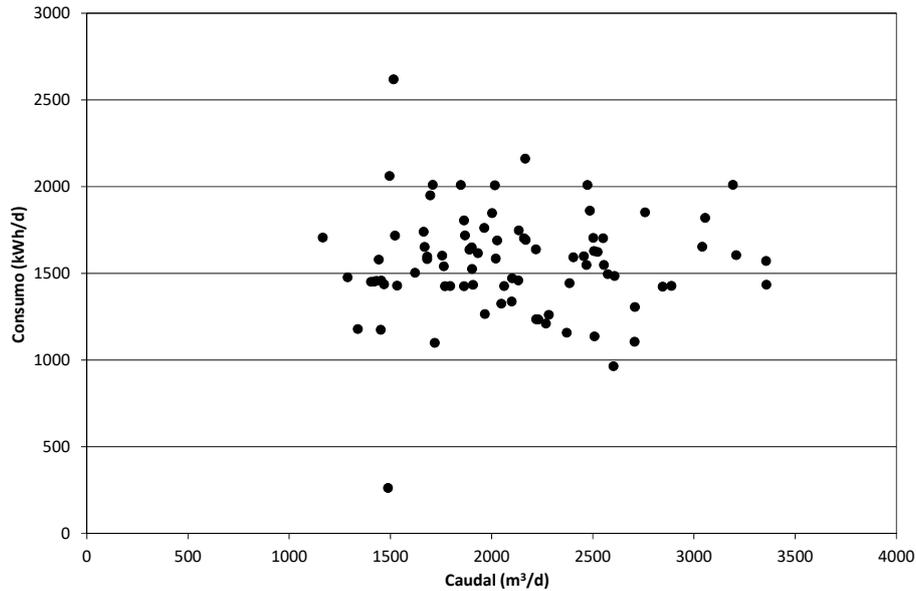
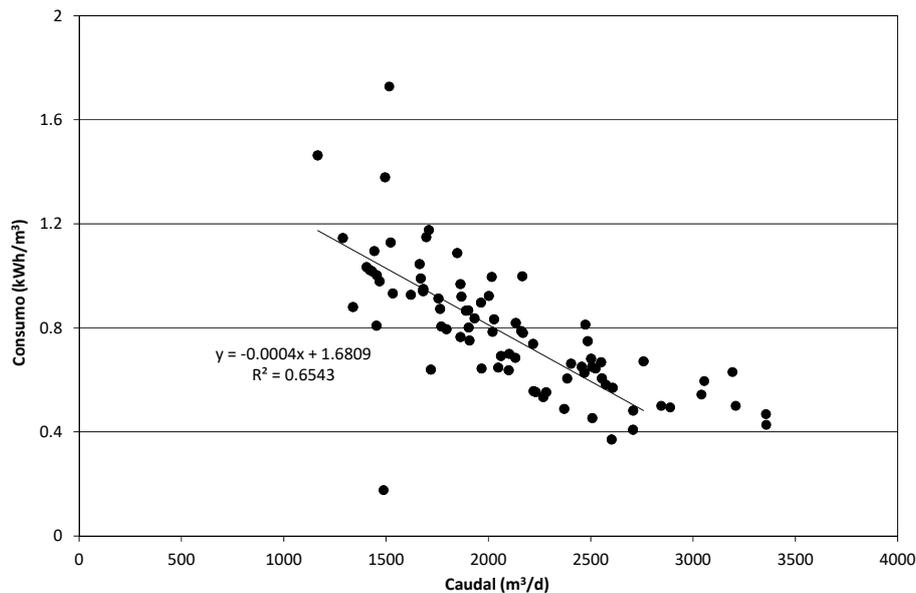


Figura 95. Consumo energético por metro cúbico de agua tratada en la EDAR de Valdemorillo frente al caudal de tratamiento durante el periodo objeto de estudio.



Una vez comentados los datos globales de consumo energético, a continuación se analizan los datos desagregados de consumo energético de la EDAR de Valdemorillo correspondientes al periodo marzo-junio de 2016 con el fin de proponer posibles actuaciones encaminadas a reducir el consumo energético. Para este análisis se dispone de los datos de caudal tratado y consumo energético horario de cada uno de los medidores de consumo de energía instalados. El análisis se ha realizado en dos escalas temporales. En un primer análisis se han estudiado las variaciones diarias del consumo energético total y del consumo registrado en cada uno de los medidores, analizando la importancia relativa de cada uno de ellos y su relación con el caudal medio tratado. De esta forma se han identificado aquellos procesos



que suponen un mayor porcentaje del consumo energético total de la EDAR. El segundo análisis ha consistido en estudiar los distintos consumos energéticos registrados a escala horaria para determinar si varían acorde al caudal influente y si se podrían modificar las pautas horarias de funcionamiento de los procesos asociados. Tras este segundo análisis se han establecido propuestas de modificaciones en el funcionamiento de la EDAR junto con una estimación de la disminución en el consumo energético que se obtendría.

#### 4.5.1 Análisis del consumo energético desagregado de la EDAR de Valdemorillo.

La Tabla 65 muestra los consumos medios diarios registrados a lo largo del periodo objeto de estudio en los distintos analizadores con la desviación estándar correspondiente. Para una mejor comparación de los datos mostrados en dicha tabla, la Figura 96 muestra la distribución porcentual de los consumos de los distintos analizadores. De la Figura 96 cabe destacar el elevado porcentaje de consumo energético asociado al sistema de aireación (46%) frente a los consumos asociados a los distintos bombes: elevación (7%), purga (2%) y recirculación (4%). Como se puede observar en la Figura 96 una parte importante del consumo energético (41%) está asociado al resto de equipos. Según los datos de potencia instalada comentados previamente, este consumo no desagregado será debido fundamentalmente a las centrífugas (representan un 23.6% de la potencia instalada) cuyo medidor de energía no ha registrado correctamente el consumo, los aceleradores de corriente (representan un 3.7% de la potencia instalada) y las bombas de alimentación a centrífuga (representan un 2.6% de la potencia instalada). Con respecto a la desviación estándar mostrada en la Tabla 65, se puede observar que las mayores desviaciones en porcentaje respecto del valor medio se producen para las bombas de agua bruta y las soplantes del reactor biológico.

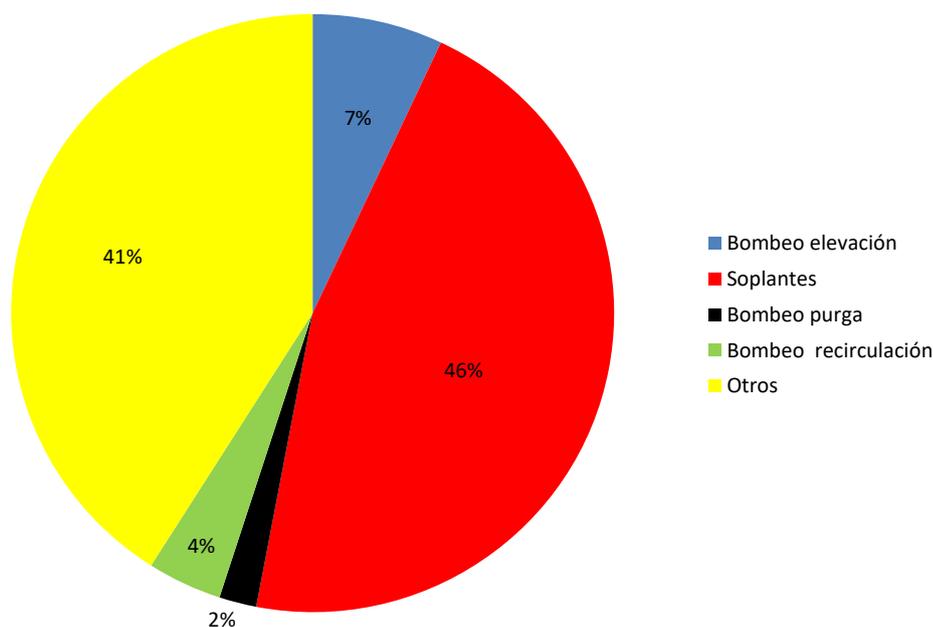
Tabla 65. Consumo medio diario de cada uno de los medidores de consumo energético de la EDAR de Valdemorillo durante el periodo objeto de estudio.

Medidor de consumo	Consumo medio diario (kWh/día)	Desviación estándar (kWh/día) (%)	
Bombas agua bruta	110.81	22.9	20.6
Soplantes de biológico	656.49	100.6	15.3
Bombas de purga	26.01	2.2	8.6
Bombas de recirculación	55.75	2.9	5.1
Centrífugas	0*	0*	0*

\* El medidor de consumo energético de las centrífugas no registró correctamente los datos de consumo.



Figura 96. Distribución porcentual del consumo energético de los distintos medidores instalados en la EDAR de Valdemorillo.

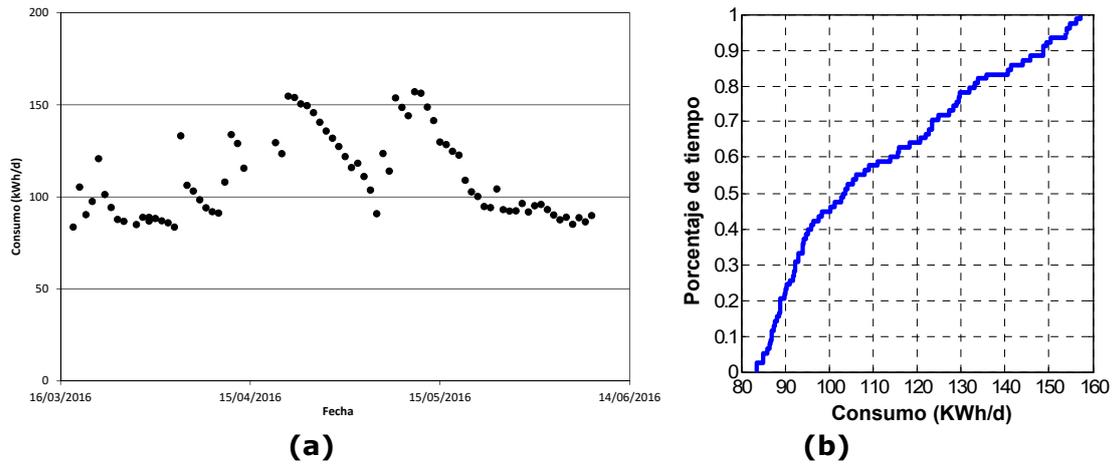


#### 4.5.1.1 *Bombeo de elevación de agua bruta.*

La Figura 97a muestra la evolución del consumo energético diario del bombeo de elevación de agua bruta registrado a lo largo del periodo objeto de estudio y la Figura 97b muestra la distribución acumulada de consumos. En la Figura 97a se puede observar que durante determinados periodos de tiempo (cuando el caudal de tratamiento no está afectado por el aporte de agua de lluvia) el consumo energético del bombeo de elevación se mantiene estable en valores por debajo de 95 kWh/d. En la gráfica de distribución acumulada (Figura 97b) se puede observar que estos valores inferiores a 95 kWh/d suponen únicamente el 40% del total. Durante los días en los que el caudal de tratamiento se ve afectado por el aporte de agua de lluvia se observa una gran variabilidad en los datos de consumo energético, llegando a alcanzar valores superiores a 150 kWh/d. Estos valores se distribuyen de forma bastante uniforme en el intervalo 95-155 kWh/d, apreciándose una tendencia lineal en el gráfico de distribución acumulada.



Figura 97. Consumo energético diario del bombeo de elevación: **(a)** evolución a lo largo del año y **(b)** gráfico de distribución acumulada.



En la Figura 98 se muestra la relación existente entre el consumo energético del bombeo de elevación de agua bruta y el caudal tratado. Como se puede observar en dicha figura se trata de una relación lineal de forma que a mayor caudal impulsado mayor consumo energético. Si analizamos los datos de consumo energético por metro cúbico de agua tratada (ver Figura 99) frente al caudal tratado se observa que para caudales superiores a 1,800 m<sup>3</sup>/d el consumo energético específico oscila entre 0.046 y 0.057 kWh/m<sup>3</sup> independientemente del caudal de tratamiento mientras que para caudales inferiores a los 1,800 m<sup>3</sup>/d se observa un incremento del consumo energético específico.



Figura 98. Relación entre el consumo energético específico del bombeo de elevación de agua bruta y el caudal elevado.

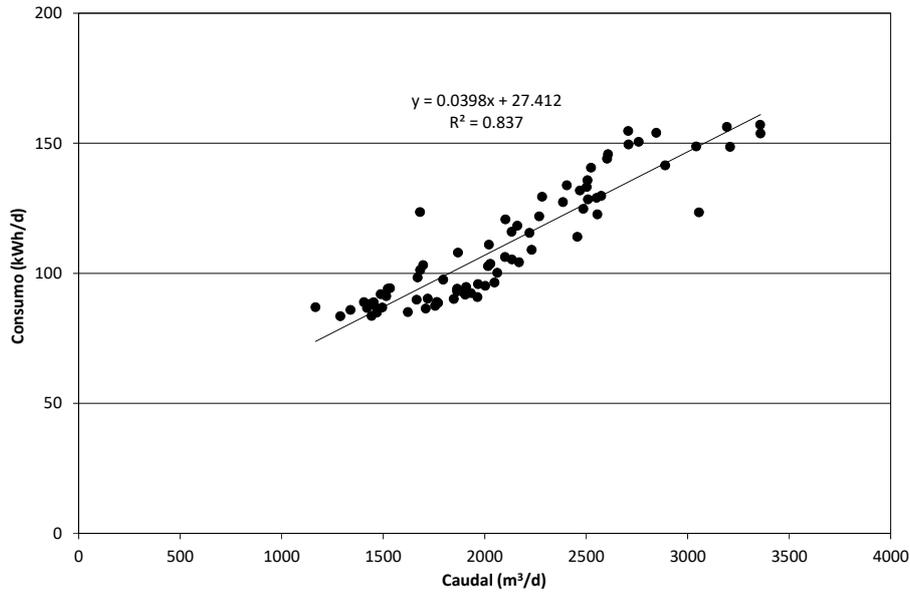
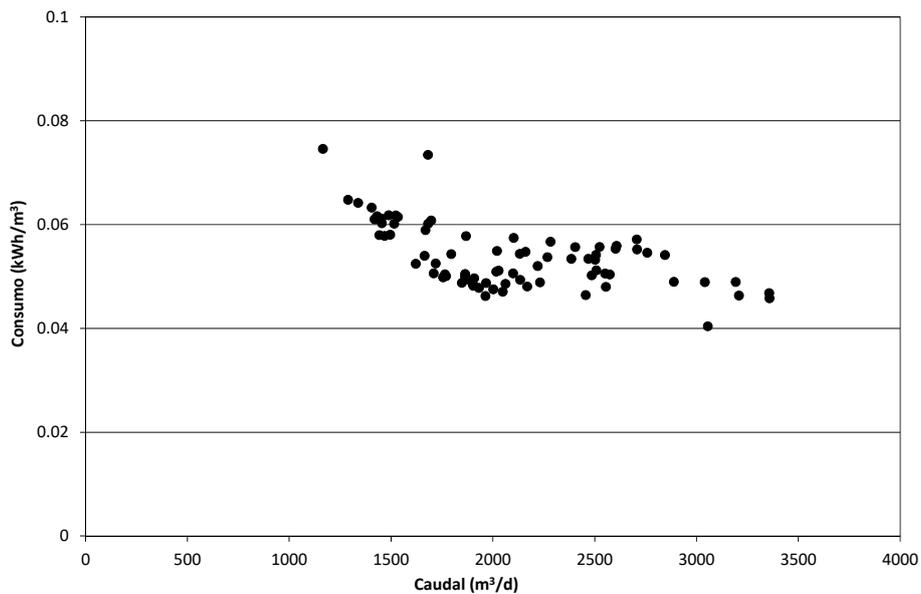


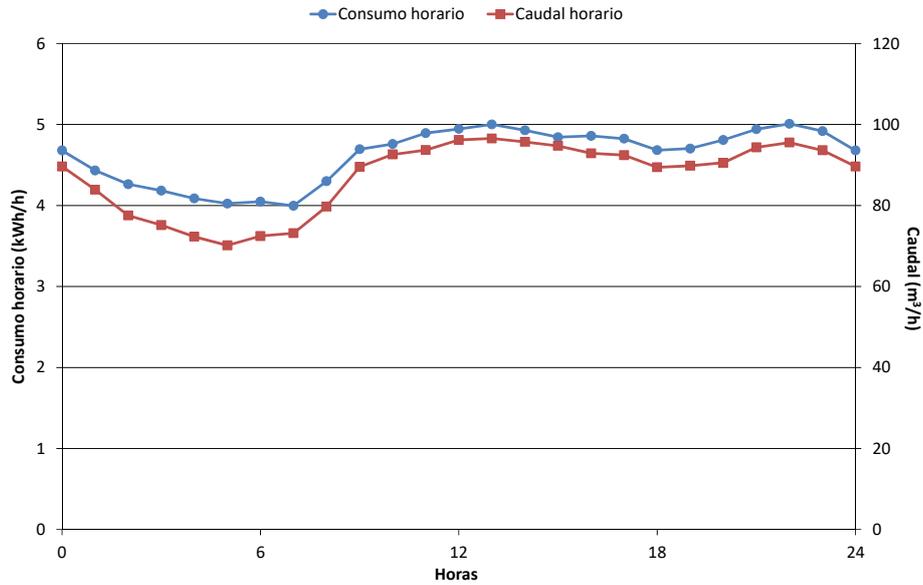
Figura 99. Relación entre el consumo energético del bombeo de elevación de agua bruta por metro cúbico de agua tratada y el caudal elevado.



La Figura 100 muestra la evolución media a lo largo del día del caudal tratado y del consumo energético del bombeo de elevación. Tal y como se puede observar en esta figura, el caudal de tratamiento se mantiene relativamente estable desde las 9 h hasta las 24 h, observándose una disminución del caudal tratado durante las horas de la noche. El consumo horario sigue la misma tendencia que el caudal de tratamiento por lo que a escala horaria se mantiene la relación observada a escala diaria entre el caudal de tratamiento y el consumo energético.

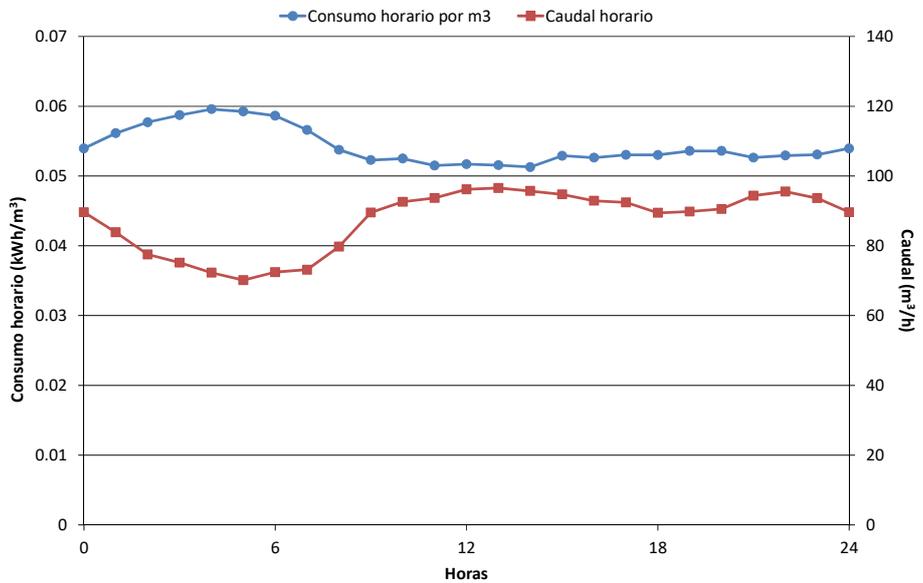


Figura 100. Evolución a lo largo del día de la media del caudal y consumo energético del bombeo de elevación de agua bruta.



La Figura 101 muestra la evolución media a lo largo del día del caudal tratado y del consumo energético por metro cúbico del bombeo de elevación. El consumo energético por metro cúbico se mantiene relativamente estable desde las 9 h de la mañana hasta las 12 h de la noche en valores alrededor de 0.053 kWh/m<sup>3</sup>, observándose ligeros incrementos (en torno al 10%) durante las horas nocturnas en las que se reduce el caudal de tratamiento.

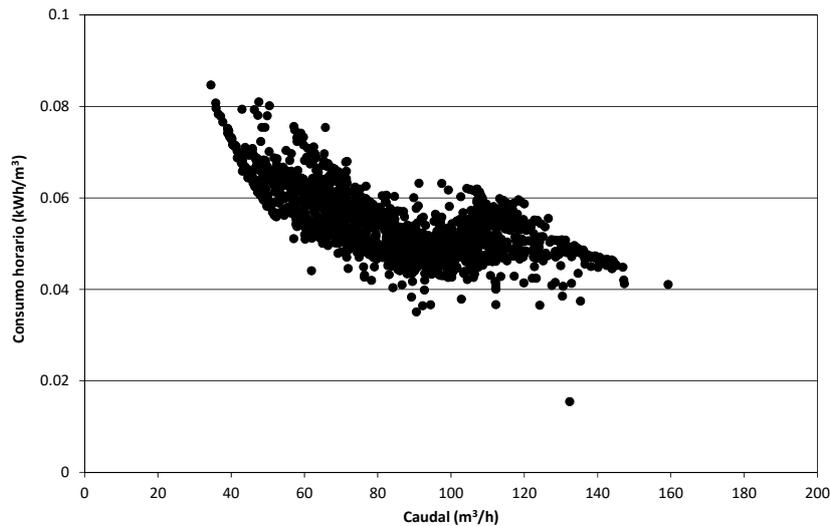
Figura 101. Evolución a lo largo del día de la media del caudal y consumo por metro cúbico tratado del bombeo de elevación de agua bruta.





La Figura 102 muestra todos los datos correspondientes al periodo objeto de estudio de consumo horario del bombeo de elevación por metro cúbico frente al caudal horario tratado. En esta figura se puede observar que para caudales superiores a 80-85 m<sup>3</sup>/h el consumo energético se mantiene relativamente estable. Estos resultados concuerdan con los observados en la Figura 101 donde se representaban los valores medios horarios de caudal y consumo energético por metro cúbico. En la Figura 102 también se observa que para caudales inferiores a 80-85 m<sup>3</sup>/h el consumo energético por metro cúbico se incrementa conforme se reduce el caudal, siendo este incremento más acusado para caudales inferiores a 60 m<sup>3</sup>/h. Este incremento tan acusado no se observaba en la representación de los valores medios (ver Figura 101) porque el caudal medio horario más bajo era 70 m<sup>3</sup>/h.

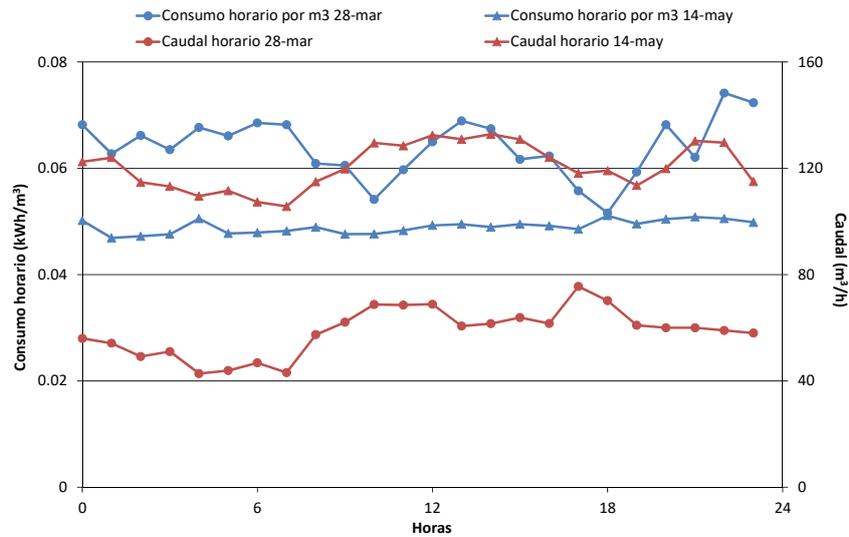
Figura 102. Consumo horario por metro cúbico frente a caudal horario tratado.



Dado que en el caudal de tratamiento diario se observan variaciones muy significativas se ha representado en la Figura 103 la evolución de los consumos horarios específicos en dos días con caudales de tratamiento muy diferentes (28 de marzo con un caudal de 1,468 m<sup>3</sup>/d y 14 de mayo con un caudal de 2,889 m<sup>3</sup>/d). Los resultados muestran que el consumo horario por metro cúbico del día con caudal elevado se mantiene constante independientemente de las variaciones de caudal. Esto concuerda con los resultados comentados anteriormente en los que se mostraba que para caudales superiores a 80 m<sup>3</sup>/h el consumo era independiente del caudal. Por el contrario, el consumo horario por metro cúbico del día con caudal reducido es más elevado que el otro y se ve muy afectado por el caudal horario. Únicamente las horas del día en las que el caudal se aproxima a 80 m<sup>3</sup>/h se obtienen consumos energéticos específicos similares a los obtenidos el día de caudal elevado.



Figura 103. Consumo horario por metro cúbico frente a caudal horario tratado para los días 28 de marzo (día con caudal de tratamiento bajo) y 14 de mayo (día con caudal de tratamiento elevado).



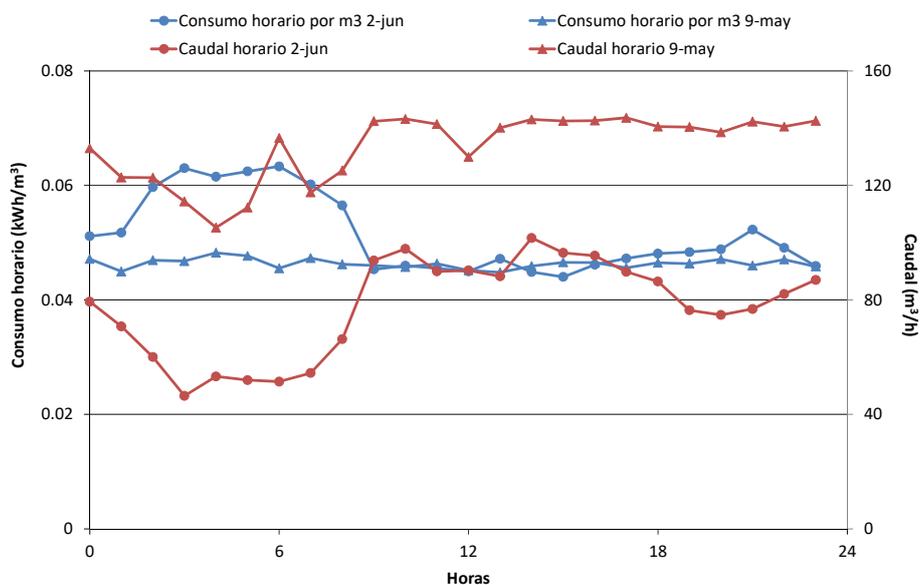
Resultados similares a los ya comentados se observan en la Figura 104 en la que se comparan los días 9 de mayo y 2 de junio con caudales tratados de 3,208 m<sup>3</sup>/d y 1,847 m<sup>3</sup>/d, respectivamente. El día 9 de mayo el consumo horario por metro cúbico se mantiene estable a pesar de las variaciones de caudal observadas (desde 105 a 143 m<sup>3</sup>/h). El día 2 de junio presenta valores de consumo horario por metro cúbico similares a los del día 9 de mayo (en torno a 0.046 kWh/m<sup>3</sup>) desde las 9 de la mañana hasta las 11 de la noche (horas en las que el caudal oscila entre 75 y 101 m<sup>3</sup>/h) y valores de consumo claramente superiores durante las restantes horas del día (horas en las que el caudal oscila entre 46 y 70 m<sup>3</sup>/h).

A tenor de estos resultados se propone la instalación de una bomba de menor caudal que permita reducir el consumo energético por metro cúbico para caudales horarios inferiores a 80 m<sup>3</sup>/h y un sistema de control para optimizar el bombeo de elevación minimizando los arranques y paradas de las bombas.

Tal y como se puede observar en la Figura 104 existe una línea base que marca el mínimo consumo energético para cada caudal de tratamiento. También se observa que por encima de esta línea base existe una cierta dispersión en los consumos horarios para un mismo caudal de tratamiento. Reduciendo esta dispersión, de forma que todos los puntos se acercaran más a la línea base se podría conseguir una importante reducción del consumo energético del bombeo de elevación de agua bruta. La reducción de la dispersión se podría conseguir con la instalación del sistema de control comentado previamente.



Figura 104. Consumo horario por metro cúbico frente a caudal horario tratado para los días 2 de junio (día con caudal de tratamiento bajo) y 9 de mayo (día con caudal de tratamiento elevado).



Para llevar a cabo las modificaciones propuestas (instalación de una bomba de menor caudal con variador de frecuencia y la implementación de un sistema de control) sería necesario la:

- Adquisición de una bomba y un variador de frecuencia.
- Adquisición de dos sondas de nivel.
- Instalación de los equipos y comunicación de los mismos con el SCADA.
- Programación del sistema de control.

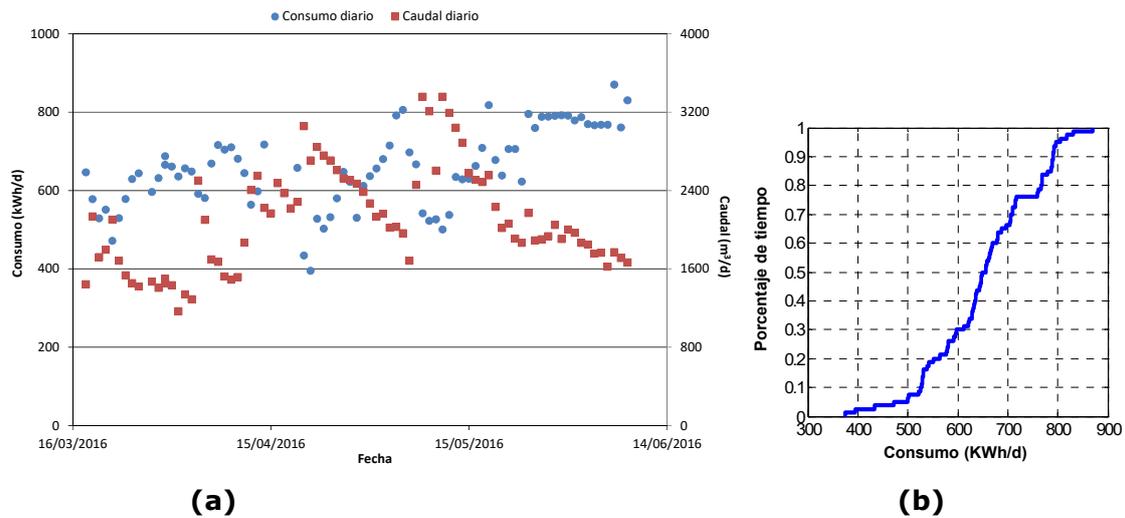
El objetivo de estas modificaciones sería mantener el consumo energético específico en valores por debajo de 0.05 kWh/m<sup>3</sup>. Teniendo en cuenta que el consumo promedio del periodo objeto de estudio es 0.053 kWh/m<sup>3</sup>, sería esperable una reducción del orden del 10% de la energía consumida en el bombeo de cabecera. De todas formas, conviene señalar que la reducción del consumo energético dependerá del caudal de tratamiento. El caudal medio diario durante el periodo objeto de estudio fue 2,100 m<sup>3</sup>/d. Sin embargo, analizando los caudales tratados durante el año 2015 (ver Figura 92) se observa que este caudal fue casi siempre inferior a 2,000 m<sup>3</sup>/d y durante gran parte del año inferior a 1,500 m<sup>3</sup>/d, por lo que se obtendrá un mayor porcentaje de ahorro energético si el caudal tratado se mantiene en valores similares a los del año 2015.

#### 4.5.1.2 Aireación del reactor biológico.

El aporte de aire a los reactores biológicos se efectúa mediante tres soplantes (2+1) de 30 kW. La Figura 105a muestra la evolución a lo largo del periodo objeto de estudio del consumo energético diario del sistema de aireación junto con el caudal de tratamiento y la Figura 105b muestra la distribución acumulada de dicho consumo. En estas figuras se observa que existe una gran variabilidad en los consumos registrados, encontrándose el 90% de dichos valores en el intervalo comprendido entre 500 kWh/d y 800 kWh/d.



Figura 105. Evolución del consumo energético diario del sistema de aireación: **(a)** evolución temporal y **(b)** distribución acumulada.



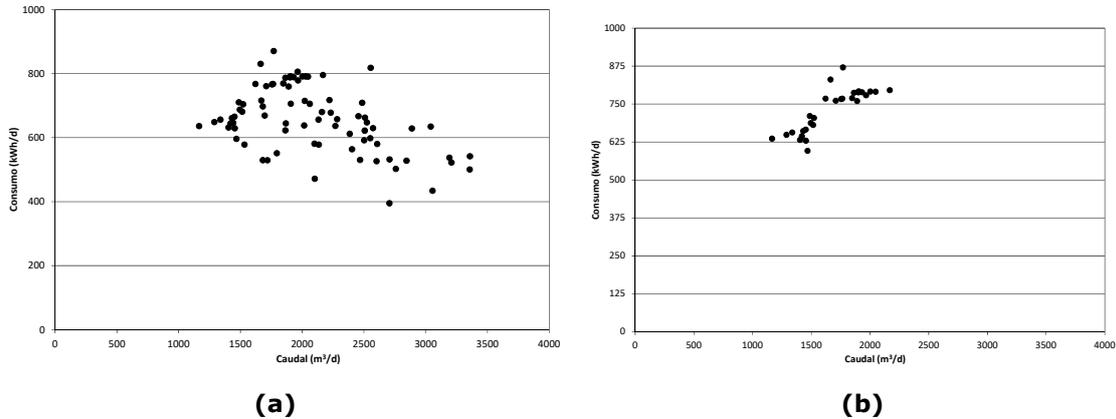
La Figura 105a muestra un consumo que varía de forma inversa a como lo hace el caudal. Esta variación queda más patente a partir de mitad de abril. Desde el 20 de abril, fecha en la que el caudal tratado fue 3,055 m<sup>3</sup>/d hasta el 6 de mayo en el que el caudal tratado fue 1,681 m<sup>3</sup>/d, el consumo energético del sistema de aireación sigue una tendencia creciente desde los 433 kWh/d hasta los 805 kWh/d. Esa misma tendencia se observa en el periodo comprendido entre el 11 y el 26 de mayo. Durante este periodo el caudal se reduce desde valores superiores a 3,300 m<sup>3</sup>/d hasta valores inferiores a 1,900 m<sup>3</sup>/d mientras que el consumo energético se incrementa desde valores próximos a 500 kWh/d hasta valores próximos a 800 kWh/d.

El consumo energético del sistema de aireación está relacionado con las necesidades de oxígeno del reactor biológico. Estas necesidades dependen de varios factores como son: el caudal de tratamiento, la carga contaminante y los parámetros de operación del proceso (tiempo de retención celular, temperatura, etc). Sería esperable que en los días con mayores caudales de tratamiento se produjeran mayores consumos energéticos en el sistema de aireación. Sin embargo los caudales elevados se deben a las aportaciones de agua de lluvia, tal y como se señaló anteriormente (ver Figura 90 y Figura 91), lo que se traduce en una disminución significativa de la carga contaminante y en consecuencia una reducción de las necesidades de oxígeno. En caso de disponer de los datos de la composición del agua residual se podría analizar la relación entre el consumo energético y la carga orgánica del agua influente (el consumo energético debe aumentar conforme lo haga la carga orgánica del agua residual). En ese caso, también sería interesante analizar la evolución del consumo energético específico por kg de DQO eliminada.

La Figura 106a muestra el consumo energético del sistema de aireación frente al caudal tratado durante el periodo objeto de estudio y la Figura 106b muestra la misma información para los periodos no afectados por aporte de agua de lluvia (25-marzo 3-abril, 8-10 abril, 24-mayo 8-junio). En la Figura 106a se observa que aunque hay una gran dispersión de los valores, el consumo diario disminuye conforme aumenta el caudal. Sin embargo, en la Figura 106b se observa de forma más clara (con una menor dispersión de valores) la tendencia esperada, consistente en un aumento del consumo energético conforme aumenta el caudal de tratamiento.



Figura 106. Relación entre el consumo energético del sistema de aireación y el caudal tratado en escala diaria a) para el periodo objeto de estudio y b) para el periodo no afectado por las precipitaciones.



La Figura 107a muestra la evolución a lo largo del periodo objeto de estudio del consumo energético diario del sistema de aireación por metro cúbico de agua tratada y la Figura 107b muestra la distribución acumulada de dicho consumo. En esta figura se observa que dicho consumo energético específico oscila entre 0.15 y 0.5 kWh/m<sup>3</sup>. La distribución de valores en dicho intervalo es bastante uniforme, apreciándose una tendencia lineal en el gráfico de distribución acumulada. Las variaciones observadas en los consumos energéticos se deben a las variaciones en el caudal de tratamiento, tal y como se puede observar en la Figura 108, en la que se representa el consumo diario por metro cúbico frente al caudal de tratamiento. Valores de consumo energético por debajo de 0.2 kWh/m<sup>3</sup> suelen ser indicativos de baja carga, lo que concuerda con que los caudales elevados se producen por aportaciones de agua de lluvia. Valores por encima de 0.35 kWh/m<sup>3</sup> se pueden considerar elevados para aguas residuales urbanas, lo que refleja un importante potencial de ahorro energético en periodo de tiempo seco, porque en dicho periodo los valores registrados han sido superiores a 0.4 kWh/m<sup>3</sup>

Figura 107. Evolución del consumo energético medio diario del sistema de aireación por metro cúbico de agua tratada (a) evolución temporal y (b) distribución acumulada.

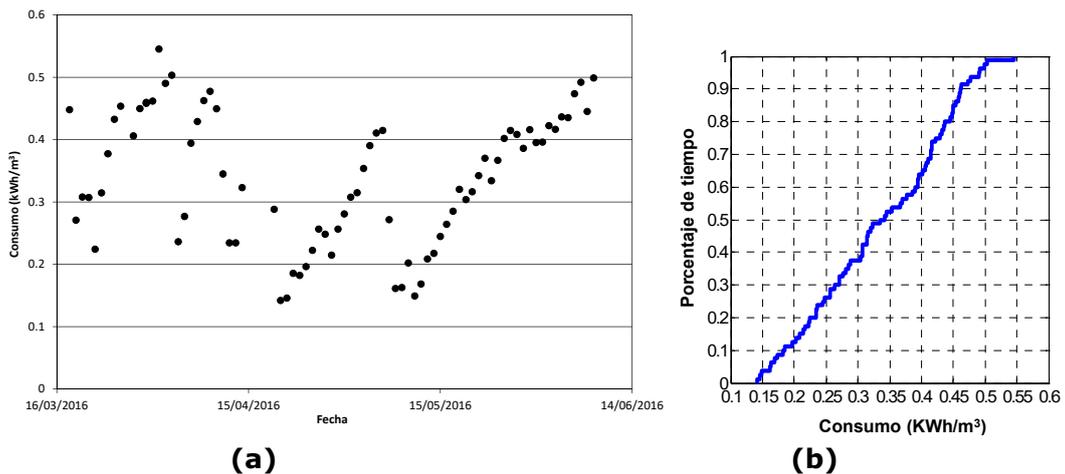
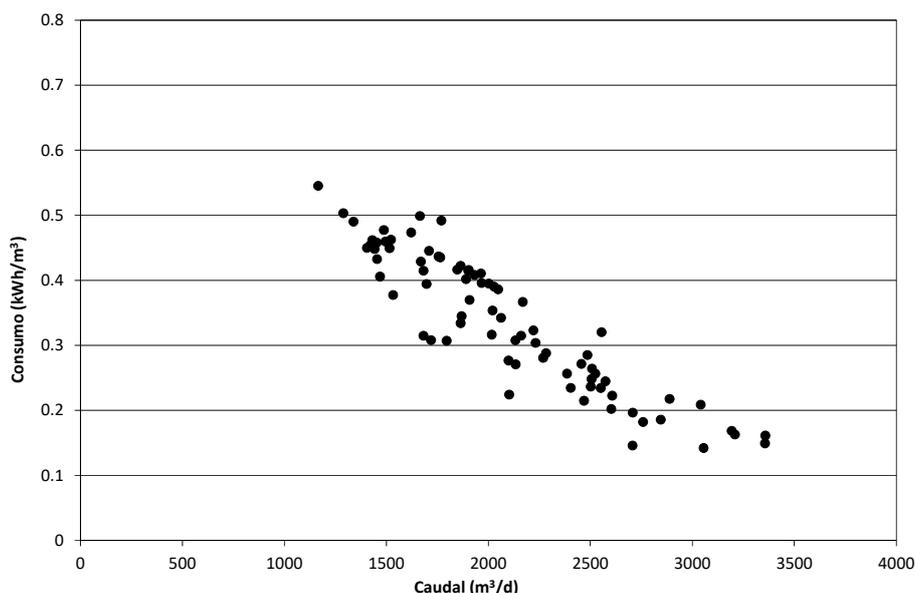




Figura 108. Consumo energético medio diario del sistema de aireación por metro cúbico de agua tratada frente al caudal de tratamiento.



Para profundizar en el conocimiento de los consumos energéticos del sistema de aireación se ha realizado un análisis a escala horaria. La Figura 109 muestra la evolución del consumo horario del sistema de aireación durante todo el periodo objeto de estudio. En esta figura se observa una oscilación en los consumos energéticos entre 0 y 55 kW. Esta oscilación se debe al modo de operar el sistema de aireación consistente en alternar periodos de marcha y paro de las soplantes. La línea superior de 55 kW corresponde a las 2 soplantes funcionando simultáneamente. Al representar el consumo energético frente al caudal de tratamiento (ver Figura 110) se observa una disminución del consumo energético conforme aumenta el caudal tratado. Debido al modo de operación del sistema de aireación no se observa la relación lineal observada a escala diaria.

Con la instalación de variadores de frecuencia en las soplantes existentes y un sistema de control de oxígeno sería posible reducir el consumo energético, fundamentalmente en los periodos de bajo caudal (tiempo seco). En base a la experiencia del grupo de investigación CALAGUA en la implementación de sistemas de control de la aireación, en periodos de tiempo seco se podrían obtener valores de consumo energético por metro cúbico en el intervalo 0.25-0.3 kWh/m<sup>3</sup>. Considerando que el consumo promedio de los días con caudal de tratamiento inferior a 1,900 m<sup>3</sup>/d es de 0.43 kWh/m<sup>3</sup>, se podrían alcanzar reducciones del consumo energético del sistema de aireación entre el 30 y 40%.

Para la instalación del sistema de control de oxígeno sería necesario la:

- Adquisición de dos variadores de frecuencia.
- Adquisición de un medidor de oxígeno y una válvula automática por cada parrilla de difusores.
- Adquisición de una sonda de presión.
- Instalación de los equipos y comunicación de los mismos con el SCADA.
- Programación del sistema de control.



Figura 109. Evolución del consumo horario del sistema de aireación durante el periodo objeto de estudio.

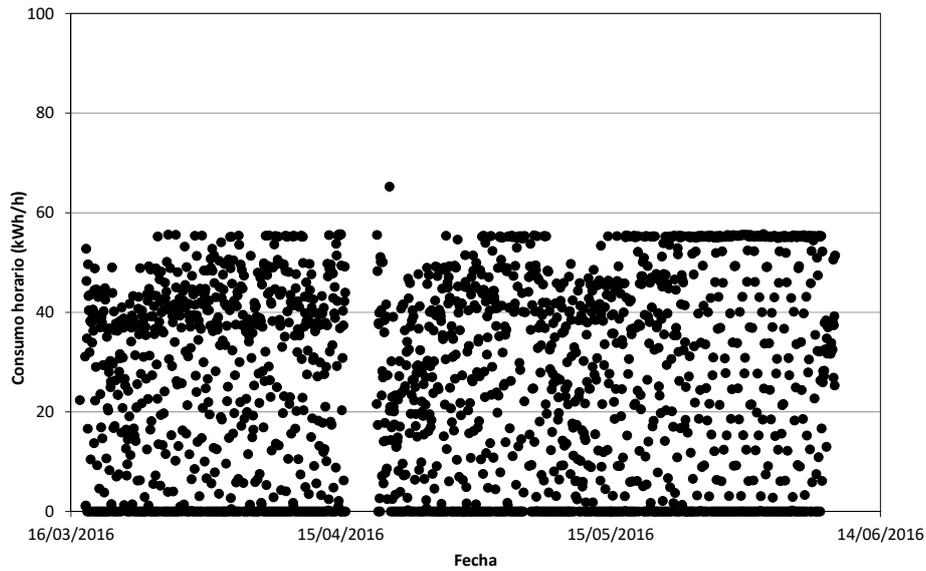
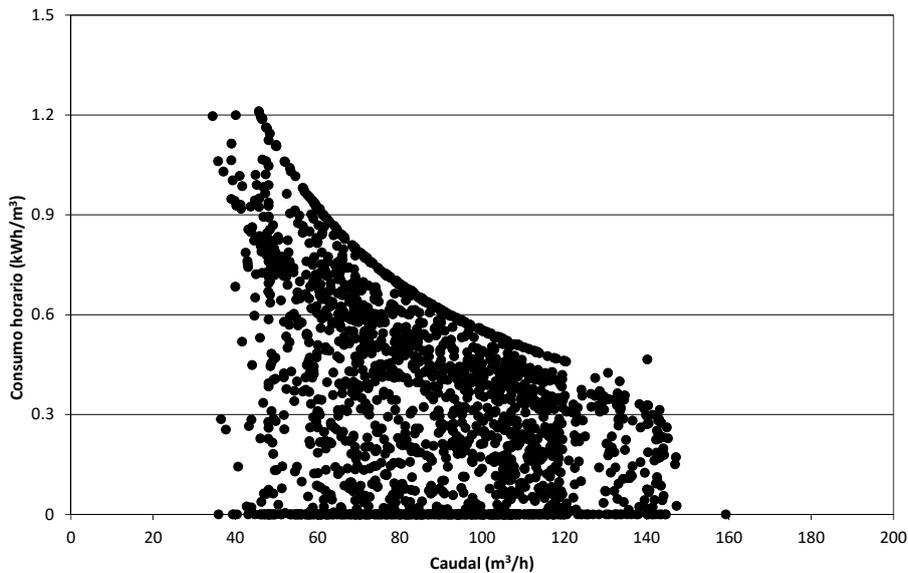


Figura 110. Consumo por metro cúbico tratado del sistema de aireación frente al caudal de tratamiento.



#### 4.5.1.3 Deshidratación de fangos.

La deshidratación de fangos se realiza mediante dos centrífugas convencionales con un caudal máximo de 7 m<sup>3</sup>/h. Estas centrífugas son alimentadas mediante tres (una en reserva) bombas de tornillo que proporcionan un caudal unitario de 10 m<sup>3</sup>/h. Para el transporte de fangos deshidratados se dispone de una bomba de tornillo helicoidal con caudal unitario 2 m<sup>3</sup>/h.



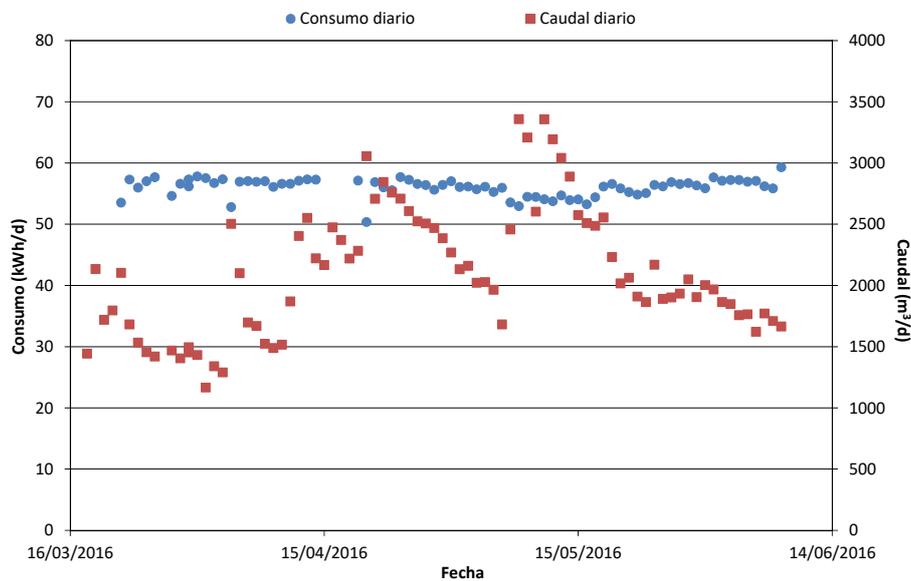
Los datos registrados por el medidor de consumo energético de las centrífugas parecen erróneos, puesto que el consumo acumulado a lo largo del periodo objeto de estudio es inferior a 0.001 kWh, por lo que no se ha podido realizar el análisis de dichos datos.

#### 4.5.1.4 Recirculación de fangos.

Para la recirculación externa de fangos se dispone de tres (1 en reserva) bombas centrífugas horizontales de caudal unitario 50 m<sup>3</sup>/h que permiten recircular más de un 200% del caudal medio diario, sin reserva.

La Figura 111 muestra la evolución a lo largo del periodo objeto de estudio del consumo energético diario de las bombas de recirculación de fangos y del caudal de tratamiento. En esta figura se observa que el consumo energético se mantiene estable en torno a 55 kWh/d independientemente del caudal de tratamiento.

Figura 111. Evolución del consumo energético de la recirculación de fangos y del caudal de tratamiento.



En la Figura 112 se muestra la evolución del consumo energético medio de las bombas de recirculación de fangos y del caudal tratado a escala horaria. Se puede observar que a pesar de las variaciones en el caudal de tratamiento el consumo de las bombas de recirculación permanece constante a lo largo del día (en torno a 2.3 kWh/h). El hecho de que el consumo energético se mantenga constante a lo largo del día se traduce en un incremento del consumo energético por metro cúbico de agua tratada durante las horas de bajo caudal (ver Figura 113). Para reducir el consumo energético específico de estas bombas se podría ajustar el caudal de recirculación de fangos al caudal de tratamiento. Para ello sería necesaria la instalación de un sistema de control que modificara el caudal de recirculación de fangos en función del caudal de entrada a la planta. Este sistema de control requeriría la instalación de variadores de frecuencia en las bombas de recirculación de fangos y su programación.



De esta forma sería esperable mantener de forma estable un consumo energético por metro cúbico de 0.025 kWh/m<sup>3</sup>. Teniendo en cuenta que el consumo medio actual es de 0.030 kWh/m<sup>3</sup>, sería esperable una reducción del orden del 15% en el consumo energético de las bombas de recirculación de fangos. De todas formas, conviene señalar que el porcentaje de reducción de consumo energético respecto del total de la EDAR que se podría conseguir con este sistema de control sería bastante bajo, teniendo en cuenta que el consumo energético de las bombas de recirculación de fangos representa únicamente el 4% del consumo energético total de la EDAR.

Figura 112. Evolución del caudal tratado y del consumo energético de las bombas de recirculación de fangos a escala horaria.

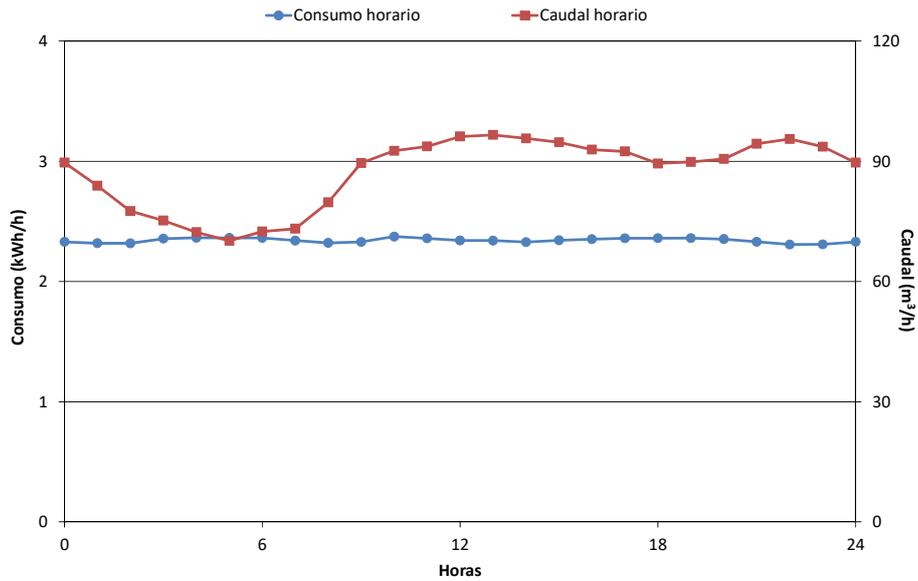
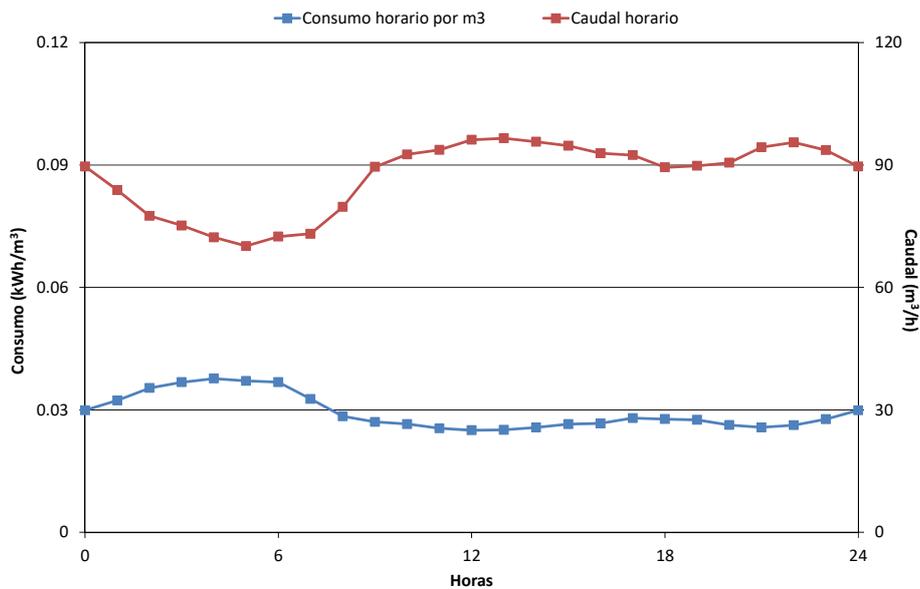


Figura 113. Evolución del caudal tratado y del consumo energético por metro cúbico de agua tratada de las bombas de recirculación de fangos a escala horaria.



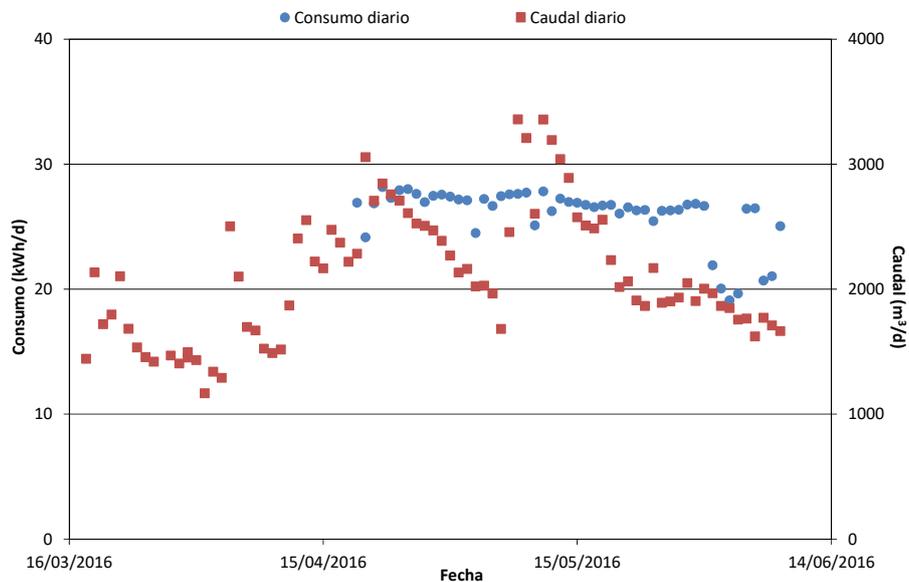


#### 4.5.1.5 Purga de fangos en exceso.

Para la purga de fangos en exceso se dispone de tres (1 en reserva) bombas tipo tornillo de caudal unitario 10 m<sup>3</sup>/h y 2.2 kW de potencia.

Para el análisis del consumo energético del bombeo de fangos en exceso se dispone únicamente de datos a partir del 20 de abril de 2016. La Figura 114 muestra la evolución del consumo energético diario de las bombas de purga de fangos y del caudal de tratamiento. En esta figura se observa que el consumo energético se mantiene estable en torno a 27 kWh/d independientemente del caudal de tratamiento. No obstante, durante los últimos días del periodo analizado se observa una disminución en el consumo energético hasta los 20 kWh/d.

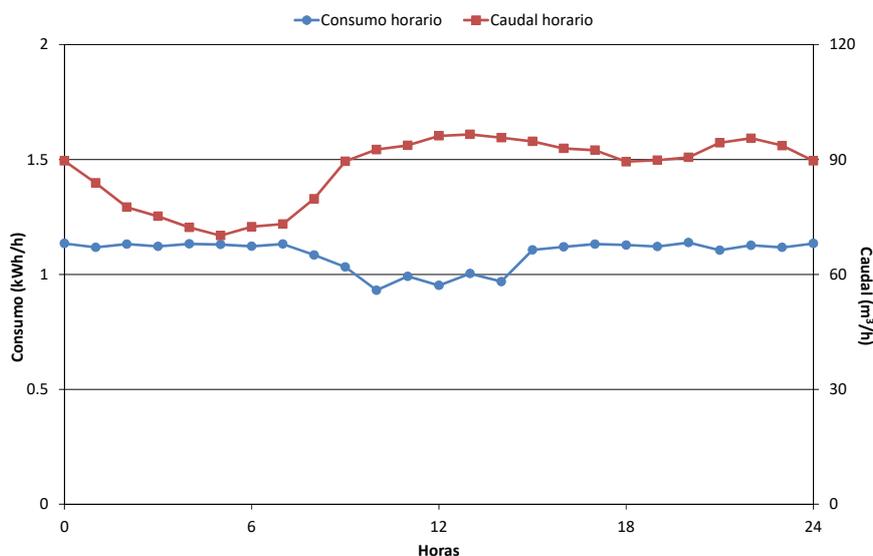
Figura 114. Evolución del consumo energético de la purga de fangos en exceso y del caudal de tratamiento.



En la Figura 115 se muestra la evolución del consumo energético medio de las bombas de purga de fangos y del caudal tratado a escala horaria. Se puede observar que el consumo de las bombas de purga permanece relativamente constante aunque presenta un ligero descenso durante las horas de la mañana. Este consumo constante a lo largo del día indica que el caudal de purga se mantiene constante a lo largo del día, lo que aumenta la estabilidad del posterior proceso de espesado. El funcionamiento de este bombeo es adecuado por lo que no se considera necesario implementar ninguna medida para reducir su consumo energético.



Figura 115. Evolución del caudal tratado y del consumo energético de las bombas de purga a escala horaria.



## 4.6 Conclusiones del análisis desagregado en la EDAR de Valdemorillo

El proceso biológico de la EDAR de Valdemorillo consiste en un canal de oxidación diseñado para la eliminación biológica de nitrógeno y la estabilización del fango. Durante el año 2015 la EDAR de Valdemorillo trató un caudal medio de 1,524 m<sup>3</sup>/día con un consumo energético promedio de 1,605 kWh/día, lo que supone un consumo por metro cúbico de 1.05 kWh/m<sup>3</sup>. Durante el año 2015 el consumo específico promedio de las EDAR con proceso de oxidación total y caudal de tratamiento superior a 700 m<sup>3</sup>/d gestionadas por el Canal de Isabel II fue de 0.72 kWh/m<sup>3</sup>. Por lo tanto, se puede considerar que el consumo de la EDAR de Valdemorillo es relativamente elevado para una EDAR con sistema de oxidación total, lo que sugiere la existencia de posibles mejoras a implantar para reducir su huella energética.

Tras el análisis de los consumos desagregados de la EDAR de Valdemorillo se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La distribución porcentual de los consumos energéticos asociados a los distintos equipos durante el periodo objeto de estudio (marzo-junio 2016) es:
  - Sistema de aireación: 46%
  - Elevación de agua bruta: 7%
  - Bombeo de recirculación de fangos: 4%
  - Bombeo de purga: 2%
  - Otros: 41%
- Tal y como se observa en la distribución porcentual el proceso con mayor consumo energético es el sistema de aireación. Cabe destacar el elevado porcentaje de consumo energético no analizado. Según los datos de potencia instalada que se analizaron en un informe previo, este consumo no desagregado será debido fundamentalmente a las centrífugas (representan un 23.6% de la potencia total instalada en la EDAR) cuyo medidor de energía no ha registrado correctamente el consumo. Otros equipos que contribuyen en menor medida a ese consumo no desagregado son los aceleradores de corriente (representan un 3.7% de la potencia instalada) y las bombas de alimentación a centrífugas (representan un 2.6% de la potencia instalada). A continuación se resumen



las principales conclusiones obtenidas del análisis individualizado de los datos registrados por los medidores de consumo energético ordenados en función del porcentaje de consumo energético.

- El análisis del consumo energético del **sistema de aireación** está fuertemente condicionado por los importantes episodios de lluvias que tuvieron lugar durante el periodo objeto de estudio. El consumo diario del sistema aireación presentó una gran variabilidad (90% de los valores comprendidos entre 500 – 800 kWh/d). El consumo de energía absoluto varía de forma inversa con el caudal, de forma que cuando el caudal aumenta el consumo energético disminuye. Esta relación se debe a que los días con caudales elevados se deben a las aportaciones de agua de lluvia con una disminución de la carga contaminante. Analizando únicamente el periodo de tiempo seco se observa que el consumo energético aumenta conforme lo hace el caudal de tratamiento.
- Al analizar los valores de consumo energético del sistema de aireación por metro cúbico de agua tratada también se observó una gran variabilidad (0.15-0.5 kWh/m<sup>3</sup>). En este caso se observa una relación lineal inversa entre el consumo energético y el caudal tanto en periodo de lluvias como en periodo de tiempo seco. Los valores obtenidos durante el periodo de tiempo seco se mantuvieron entre 0.4 y 0.5 kWh/m<sup>3</sup>.
- Para reducir el consumo energético del sistema de aireación se propone la instalación de un sistema de control avanzado. El equipamiento que sería necesario para dicha instalación consiste en dos variadores de frecuencia en las soplantes, 1 medidor de oxígeno y 1 válvula de regulación automática para cada parrilla de difusores, 1 sonda de presión y el sistema de comunicación necesario para transmitir la información al SCADA. Se estima un porcentaje de ahorro con la instalación del sistema de control del orden del 30-40% del consumo energético del sistema de aireación.
- El análisis del **bombeo de elevación** de agua bruta muestra que el consumo energético a escala diaria varía linealmente con el caudal de tratamiento. Durante el periodo de tiempo seco (aproximadamente el 40% del periodo objeto de estudio) el caudal se mantiene relativamente estable y el consumo energético oscila entre 85 y 95 kWh/d. Durante el periodo de lluvias el caudal presenta una gran variabilidad observándose consumos energéticos diarios entre 95 y 155 kWh/d.
- Al analizar los datos de consumo energético por metro cúbico de agua tratada frente al caudal tratado se observa que para caudales superiores a 1,800 m<sup>3</sup>/d el consumo energético oscila entre 0.046 y 0.057 kWh/m<sup>3</sup> independientemente del caudal de tratamiento mientras que para caudales inferiores a los 1,800 m<sup>3</sup>/d se observa un incremento del consumo energético.
- El análisis del consumo energético por metro cúbico de agua tratada a escala horaria frente al caudal tratado muestra que para caudales superiores a 80-85 m<sup>3</sup>/h el consumo energético se mantiene relativamente estable mientras que para caudales inferiores a 80-85 m<sup>3</sup>/h el consumo energético por metro cúbico se incrementa conforme se reduce el caudal, siendo este incremento más acusado para caudales inferiores a 60 m<sup>3</sup>/h.
- Para reducir el consumo energético por metro cúbico para caudales horarios inferiores a 80 m<sup>3</sup>/h se propone la instalación de una bomba de menor caudal y un sistema de control para optimizar el bombeo de elevación minimizando los arranques y paradas de las bombas. Para ello, sería necesario la adquisición de una bomba, un variador de frecuencia y dos sondas de nivel, la instalación de los equipos, su comunicación con el SCADA y la programación del sistema de control.
- Con estas modificaciones sería esperable una reducción del orden del 10% de la energía consumida en el bombeo de cabecera. Este porcentaje de ahorro podría incrementarse hasta el 20% durante periodos de tiempo seco.
- El análisis del consumo energético asociado al **bombeo de recirculación de fangos** muestra que el consumo energético diario se mantiene estable en torno a 55 kWh/d



independientemente del caudal de tratamiento. A escala horaria, el consumo de las bombas de recirculación permanece constante a lo largo del día (en torno a 2.3 kWh/h) a pesar de las variaciones en el caudal de tratamiento. Esto se traduce en un incremento del consumo energético por metro cúbico de agua tratada durante las horas de bajo caudal. Para reducir el consumo energético de estas bombas se propone la instalación de un sistema de control que modifique el caudal de recirculación de fangos en función del caudal de entrada a la planta. Este sistema de control requiere la instalación de variadores de frecuencia en las bombas de recirculación de fangos y su programación. Con este sistema de control sería esperable una reducción del orden del 15% en el consumo energético de las bombas de recirculación de fangos.

- El análisis del consumo energético asociado al **bombeo de fangos en exceso** muestra que dicho consumo se mantiene estable en torno a 27 kWh/d independientemente del caudal de tratamiento. A escala horaria, el consumo de las bombas de purga permanece relativamente constante a lo largo del día siendo indicativo de un caudal de purga constante, lo que aumenta la estabilidad del posterior proceso de espesado. El funcionamiento de este bombeo es adecuado por lo que no se considera necesario implementar ninguna medida para reducir su consumo energético.
- No se ha podido realizar el análisis del consumo energético asociado a la **deshidratación de fangos** muestra porque los datos registrados muestran un consumo acumulado a lo largo del periodo objeto de estudio inferior a 0.001 kWh. Dado que durante este periodo se ha llevado a cabo la deshidratación de fangos, se considera que ha habido algún problema con el registro de los datos de consumo energético.
- La implantación de todas las medidas propuestas produciría un ahorro energético estimado de entre el 15 y el 20% del consumo total de la EDAR. Este porcentaje supone la disminución en el consumo energético de entre 240-320 kWh/d.



## 5 CARACTERIZACIÓN DE LA HUELLA ENERGÉTICA EN EL RESTO DE INSTALACIONES DEL CICLO INTEGRAL DEL AGUA GESTIONADAS POR CANAL DE ISABEL II.

El objetivo de este apartado es analizar los consumos energéticos de las instalaciones de aducción, distribución, potabilización, alcantarillado y regeneración, detectando aquellas que presenten consumos energéticos superiores a la media de instalaciones y en la medida de lo posible proponer actuaciones encaminadas a la reducción de su huella energética. En este estudio se han realizado los mismos tipos de análisis estadísticos y representaciones gráficas utilizados para el análisis de los consumos energéticos en las EDAR y que fueron explicados previamente (ver apartado 3.1, página 33).

### 5.1 Análisis energético de las instalaciones de las instalaciones de alcantarillado

En la actualidad Canal Isabel II gestiona un total de 89 instalaciones en el sistema de alcantarillado, clasificándose en: 71 estaciones de bombeo para impulsar el agua residual a las EDAR, 17 tanques de tormenta para laminar el caudal en episodios de lluvia y 1 aliviadero para limitar el caudal que circula. En la Tabla 66 se muestra un listado de las 47 instalaciones para las que se dispone de la información necesaria para el análisis del consumo energético (caudal medio diario tratado, altura bombeada, número de bombas, existencia de variadores de frecuencia y consumo energético medio diario).

Tabla 66. Listado de instalaciones de alcantarillado gestionadas por el Canal de Isabel II para las que se dispone de la información necesaria para el análisis del consumo energético.

Nombre	Altura bombeada	Caudal	Nº de Bombas	Variador de frecuencia	Consumo energético
	(mca)	(m <sup>3</sup> /día)		(S/N)	(kW·h /día)
BOMBEO VALDEMANCO	26.4	50.06	2	S	112.26
EBAR VENTURADA NORTE	17.7	111.78	3	N	80.97
EBAR VENTURADA TOLLELEGUE	51.5	17.00	2	N	53.66
EBAR OTERUELO	14.6	1,689.57	7	S	133.34
BOMBEO LOZOYA	3.9	334.06	2	N	123.34
EBAR PATONES DE ARRIBA	2.7	58.11	3	N	7.55
EBAR ROBREGORDO	31.7	14.50	2	N	7.20



Nombre	Altura bombeada	Caudal	Nº de Bombas	Variador de frecuencia	Consumo energético
	(mca)	(m <sup>3</sup> /día)		(S/N)	(kW·h /día)
EBAR PATONES RESIDENCIA	7.9	25.19	2	N	16.58
EBAR ARROYO QUIÑONES	24	1,069.14	5	S	37.59
BOMBEO CIEMPOZUELOS	15	22,000	5	S	1,571.94
BOMBEO RASO DE LA ESTRELLA	6	10,000	2	N	524.10
BOMBEO LOS CORONELES	6	10,000	2	N	313.32
EBAR SAN MARTÍN ARPEGIO	10	4,000	3	S	390.49
EBAR ARROYOMOLINOS	5	5,500	3	S	248.02
EBAR CASARRUBUELOS	20	250	2	N	268.15
EBAR LOS CARRIZOS	26	300	3	S	175.37
BOMBEO PARQUE COIMBRA	14	1,000	4	S	114.58
EBAR EL ALAMO	30	250	4	N	144.01
EBAR Nº 2 SEVILLA LA NUEVA	35.98	1,085	3	N	125.84
BOMBEO VILLAVICIOSA DE ODÓN	23.8	2,627	5	S	595.25
EBAR SEVILLA LA NUEVA Nº 1	29.06	234	3	N	136.47
BOMBEO BOADILLA DEL MONTE	34.18	8,134	3	S	461.58
EBAR VIÑAS VIEJAS	20.9	239	2	S	55.98
BOMBEO MANZANARES	22	17,902.1	4	S	920.85
BOMBEO SOTO DEL REAL	20	7,926.24	4	N	581.77
EBAR Soto del Real Urb Peña Real	7	56.16	2	N	72.45
EBAR AMBITE 2	22	405	3	N	120.20
EBAR TALAMANCA	18.3	775.00	3	S	94.56
EBAR MECO ACUEDUCTO	16.4	820.00	2	S	77.83
EBAR PARACUELLOS	16	1,800.00	2	N	161.82
BOMBEO MORALZARZAL 2	25	1705	3	S	230.56
BOMBEO URB. LOS ARROLLOS	78	1,428.97	3	N	758.99
EBAR LA NAVATA	47.9	718.8	2	N	243.06
EBAR TORRELODONES	34	4,352.08	4	S	727.71
EBAR EL GASCO	80	90.2	3	N	137.58
EBAR LAS MARIAS	40	2,934.42	4	S	518.60
EBAR GALAPAGAR ESTACIÓN	20	20.51	3	N	24.95
EBAR GALAPAGAR-TORRELODONES	12	6,436.18	4	S	607.54



Nombre	Altura bombeada	Caudal	Nº de Bombas	Variador de frecuencia	Consumo energético
	(mca)	(m <sup>3</sup> /día)		(S/N)	(kW·h /día)
BOMBEO CUENCA MEDIA DE GUADARRAMA	25	25,027.48	6	N	668.12
BOMBEO MONTE ENCINAR	41	78.1	4	N	23.12
TANQUE VALDEMARÍN	9.6	498.21	6	S	131.57
TANQUE DE TORMENTAS 1 ADELINA PATTI	5.5	142.28	5	S	68.04
TANQUE DE TORMENTAS 2 MATADERO	22	760.04	5	S	163.76
TANQUE DE TORMENTAS 3 PLAYA DE MADRID	15	1,018.14	4	S	119.52
TANQUE DE TORMENTAS 4 CLUB PUERTA DE HIERRO	13	986.04	5	S	130.43
TANQUE TORMENTAS ARROYOFRESNO	13.2	3,140	15	N	629.64
TANQUE DE BUTARQUE	12.2	6,392	24	N	820.03

Para el análisis de los consumos energéticos se asume que el principal consumo de estas instalaciones se debe a la energía consumida para la elevación del agua residual y por tanto, su consumo energético está directamente relacionado con el caudal y la altura bombeada a través de la expresión:

$$P(W) = \frac{Q \left( \frac{m^3}{s} \right) \cdot h(mca) \cdot \gamma \left( \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{m}{s^2} \right)}{\eta_{bomba-motor}} \quad Ec. (4)$$

donde P(W) es la potencia consumida por la bomba,  $Q \left( \frac{m^3}{s} \right)$  el caudal impulsado,  $h(mca)$  es la altura de elevación,  $\gamma \left( \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{m}{s^2} \right)$  es el peso específico del agua y  $\eta_{bomba-motor}$  es el rendimiento del conjunto bomba-motor. Este rendimiento representa el cociente entre la energía suministrada por la bomba y la energía consumida de la red. A partir de esta expresión se calculará el rendimiento del sistema de bombeo, siendo este rendimiento el parámetro que se empleará para el análisis del funcionamiento de las distintas instalaciones de alcantarillado.

La Figura 116 muestra el rendimiento del conjunto bomba-motor obtenido para las instalaciones de alcantarillado. Como se puede ver en la Figura 116, hay una serie de instalaciones que presentan un rendimiento energético anómalo (superior a la unidad). Esas instalaciones son: EBAR Arroyo Quiñones, Bombeo Boadilla Del Monte, Bombeo Manzanares y Bombeo Cuenca Media de Guadarrama. Estos valores anómalos se deben a inexactitudes en los datos facilitados. Por este motivo, estos datos no serán tenidos en cuenta para el posterior análisis estadístico.

El valor medio del rendimiento de todas las instalaciones es 0.3. Para visualizar la pauta de variabilidad del rendimiento en todas estas instalaciones, se presenta en la Figura 117a el gráfico Box-Whisker correspondiente a su distribución. Este gráfico Box-Whisker muestra que la distribución es ligeramente asimétrica positiva y que no hay valores considerados extremos. Para poder conocer qué porcentaje de instalaciones (en tanto por uno) tiene un rendimiento menor o igual que uno dado, se presenta en la Figura 117b la función de probabilidad



acumulada determinada directamente a partir de los datos. En esta figura se observa que el 50% de estas instalaciones tiene un rendimiento inferior a 0.28 y que el 75% de las instalaciones presenta un rendimiento inferior a 0.4.

La Figura 117c muestra la representación probabilística normal del rendimiento de las instalaciones de bombeo, en la que se aprecia claramente que por debajo de 0.05, los valores se alejan de la recta roja, que sería la correspondiente a la distribución normal.

Figura 116. Rendimiento de las bombas en las instalaciones de alcantarillado.

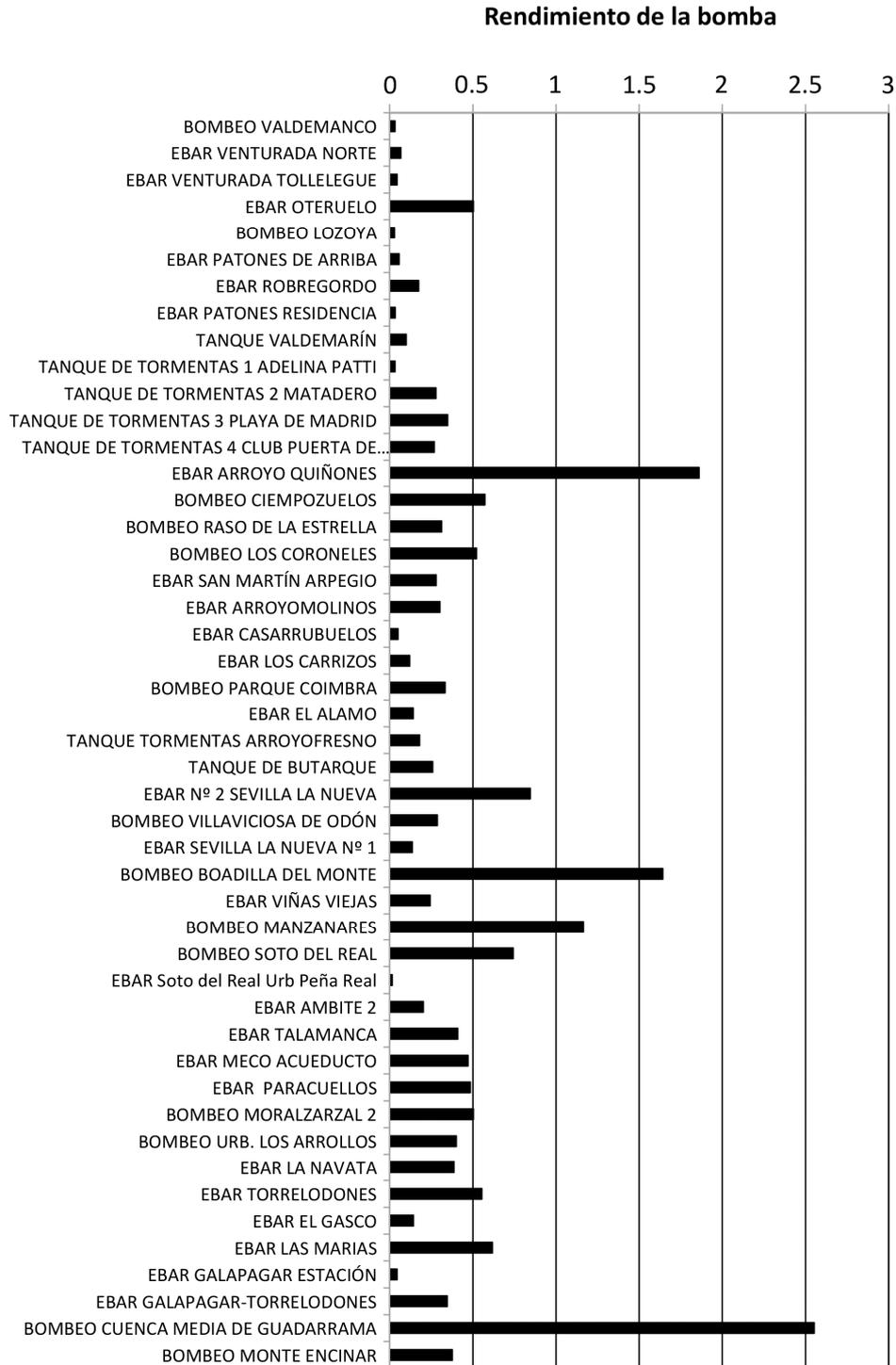
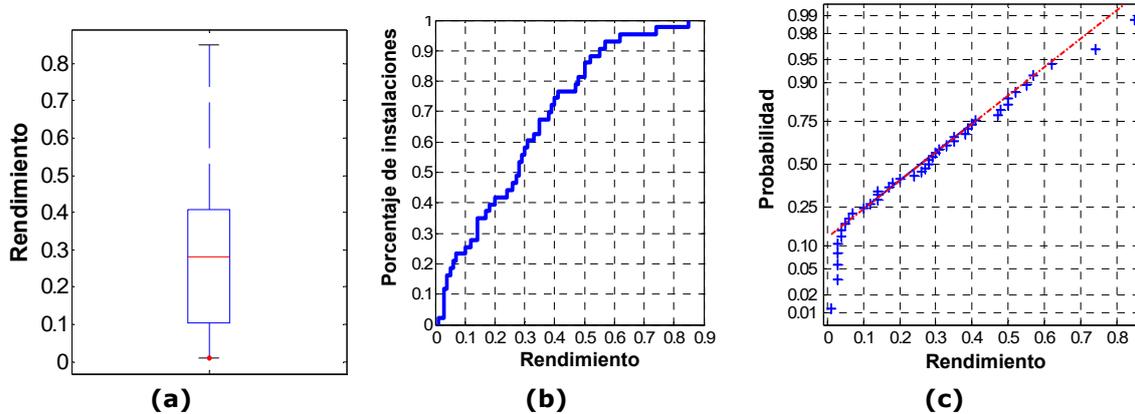


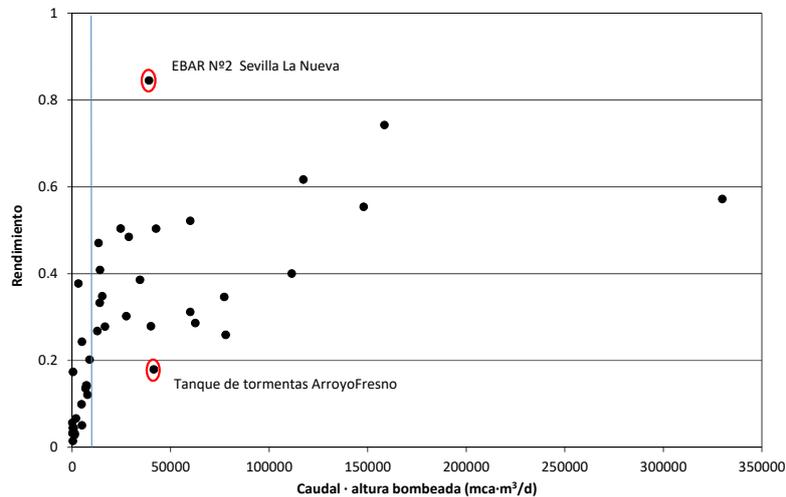


Figura 117. Representaciones estadísticas del rendimiento de las bombas en las instalaciones de alcantarillado: **(a)** Box-Whisker **(b)** Función empírica de distribución acumulada y **(c)** Función de probabilidad normal.



La Figura 118 muestra el rendimiento de los sistemas de bombeo de alcantarillado frente al producto caudal impulsado por altura de elevación. A la vista de la Figura 118 se observa que el rendimiento es tanto mayor cuanto mayor es el producto caudal por altura. Para productos de caudal por altura elevados el rendimiento se estabiliza en torno a 0.6. En la Figura 118 también se observa que todas las instalaciones con rendimientos inferiores a 0.2 presentan un producto caudal por altura bombeada inferior a 10000 mca·m<sup>3</sup>/d, salvo el Tanque de Tormentas ArroyoFresno que presenta un rendimiento de 0.18 y un producto caudal por altura bombeada superior a 41000 mca·m<sup>3</sup>/d. Se debería analizar el motivo por el que esta instalación presenta un rendimiento más bajo de lo que cabría esperar. También cabe destacar el elevado rendimiento de la EBAR N<sup>o</sup> 2 Sevilla La Nueva.

Figura 118. Rendimiento de los bombeos de las instalaciones de alcantarillado frente al producto caudal impulsado por altura de elevación.

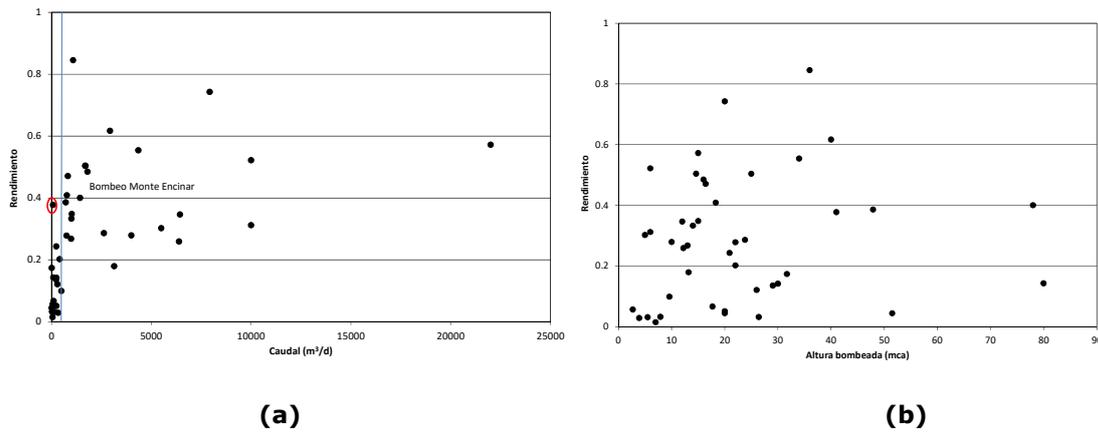


La Figura 119 muestra el rendimiento de los bombeos de las instalaciones de alcantarillado frente al caudal impulsado (Figura 119a) y frente a la altura de elevación (Figura 119b). Como se puede observar en la Figura 119a, el rendimiento de las bombas depende del caudal tratado, obteniéndose muy bajos rendimientos para caudales inferiores a 500 m<sup>3</sup>/d. El valor promedio del rendimiento de las instalaciones que impulsan caudales inferiores a 500 m<sup>3</sup>/d es de 0.11, siendo 0.43 el valor promedio de las instalaciones que impulsan caudales



superiores. En la Figura 119b se observa que el rendimiento de las bombas no depende de la altura de elevación. Estos resultados parecen indicar que las bombas de las instalaciones que impulsan caudales inferiores a  $500 \text{ m}^3/\text{d}$  están trabajando alejadas de su punto óptimo de funcionamiento. Una posible causa de estos bajos rendimientos puede ser la inadecuada selección de las bombas motivada por elevadas diferencias entre el caudal punta (para el cuál se seleccionan las bombas) y los caudales habituales de operación. Únicamente el Bombeo Monte Encinar presenta un rendimiento aceptable (0.38) tratando un caudal bajo ( $78.1 \text{ m}^3/\text{d}$ ). Dentro de las instalaciones que impulsan caudales superiores a los  $500 \text{ m}^3/\text{d}$  se puede distinguir que los tanques de tormenta presentan un rendimiento promedio inferior (0.27) al de las estaciones de bombeo (0.47).

Figura 119. Rendimiento de los bombeos de las instalaciones de alcantarillado frente a) al caudal impulsado b) la altura elevada.



### 5.1.1 Efecto del número de bombas.

En este apartado se analiza la posible relación entre el rendimiento de los sistemas de bombeo y el número de bombas en dichos sistemas. Para este análisis se han clasificado las instalaciones en 3 grupos según el número de bombas: 13 instalaciones con 2 bombas, 13 instalaciones con 3 bombas y 17 instalaciones con 4 ó más bombas. Debido a la importancia que tiene el caudal impulsado sobre el rendimiento, dentro de cada uno de estos grupos se ha analizado por separado el rendimiento de las bombas que impulsan caudales inferiores y superiores a  $500 \text{ m}^3/\text{d}$ . La Tabla 67 muestra el rendimiento de las distintas instalaciones en función del número de bombas y del caudal de tratamiento impulsado. En esta tabla se puede observar que el número de bombas no tiene efecto significativo en el rendimiento de las instalaciones con caudales superiores a  $500 \text{ m}^3/\text{d}$ , observándose valores medios similares en los distintos grupos. Para las instalaciones con caudales inferiores a  $500 \text{ m}^3/\text{d}$  se observa un incremento en el rendimiento promedio conforme aumenta el número de bombas, presentando las instalaciones con 4 ó más bombas el doble de rendimiento que las instalaciones con 2 bombas. No obstante, este incremento en el rendimiento de las bombas conforme aumenta el número de las mismas no puede considerarse estadísticamente significativo tal y como muestra la Tabla 68 y la Figura 120.



Tabla 67. Rendimiento de las instalaciones de alcantarillado en función del número de bombas y del caudal impulsado. Entre paréntesis se muestra el número de instalaciones.

Nº Bombas	Rendimiento	
	Q < 500 m <sup>3</sup> /d	Q > 500 m <sup>3</sup> /d
2	0.08 (8)	0.44 (5)
3	0.11 (7)	0.46 (6)
≥ 4	0.16 (4)	0.49 (8 EBAR), 0.27 (5 Tanques)

En la tabla 68 se muestran los resultados del ANOVA, obtenido con la aplicación StatGraphics, en el que se puede observar que no hay diferencias significativas (nivel de confianza del 95%,  $\alpha=0.05$ ) en el rendimiento según el número de bombas de las instalaciones. En este análisis se descompone la varianza total de los datos de rendimiento en dos componentes, la existente dentro de cada grupo y la varianza entre grupos, y posteriormente el ratio se compara con un test estadístico F de Fisher para determinar si es o no significativo el efecto del factor estudiado.

Figura 120. Intervalos LSD (*Least Significance Difference*) para la media del rendimiento según el número de bombas para las instalaciones que bombean caudales inferiores a 500 m<sup>3</sup>/d.

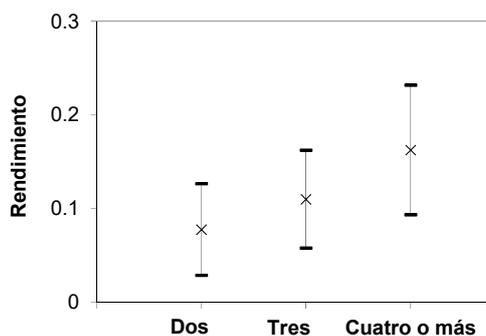


Tabla 68. Resultados del Análisis de la Varianza (ANOVA) para la media del rendimiento de las instalaciones de alcantarillado con caudal impulsado inferior a 500 m<sup>3</sup>/d según el número de bombas.

Análisis de la varianza					
Fuente	Suma de Cuadrados	gdl	Cuadrado Medio	Ratio-F	P-Valor
Entre grupos	0.0192732	2	0.00963659	1.13	0.3465
Dentro de grupos	0.136071	16	0.00850444		
<b>Total (Corr.)</b>	<b>0.155344</b>	<b>18</b>			

gdl – Grados de Libertad

### 5.1.2 Efecto de la existencia de variadores de frecuencia.

En el conjunto de datos facilitado, 20 de las 43 instalaciones de alcantarillado para las cuales se ha realizado el análisis estadístico, mientras que las 23 instalaciones restantes no lo tienen. Los variadores de frecuencia permiten modificar la curva característica de la bomba, reduciendo el caudal impulsado y la altura de elevación para ajustarlos a las necesidades del



sistema, disminuyendo también el consumo energético. Para determinar si la existencia o no de variadores de frecuencia tiene un efecto significativo sobre el consumo energético de los sistemas de bombeo, se ha comparado el rendimiento de los dos grupos de instalaciones (el grupo de las que tienen variadores de frecuencia y el grupo de las que no los tienen) en función del caudal impulsado. La Tabla 69 muestra el rendimiento de las distintas instalaciones en función de la existencia o no de variadores de frecuencia y del caudal impulsado. En esta tabla se puede observar que la presencia de variadores de frecuencia no tiene efecto significativo en el rendimiento de las instalaciones independientemente del caudal impulsado. Para los distintos rangos de caudales analizados las instalaciones equipadas con variadores de frecuencia presentan rendimientos medios similares a las instalaciones que no disponen de variadores. Dado que los variadores de frecuencia permiten ajustar el caudal impulsado a las necesidades existentes en cada momento era previsible que las instalaciones equipadas con variadores de frecuencia presentaran un mayor rendimiento. Los resultados obtenidos sugieren la necesidad de estudiar los sistemas de control de las instalaciones equipadas con variadores de frecuencia.

Tabla 69. Rendimiento de las instalaciones de alcantarillado en función de la presencia de variadores de frecuencia y del caudal impulsado. Entre paréntesis se muestra el número de instalaciones.

Variador de frecuencia	Rendimiento	
	Q < 500 m <sup>3</sup> /d	Q > 500 m <sup>3</sup> /d
SI	0.11 (5)	0.43 (12 EBAR) , 0.3 (3 Tanques)
NO	0.11 (14)	0.46 (9)

## 5.2 Instalaciones de regeneración

En la actualidad Canal Isabel II gestiona un total de 45 instalaciones de regeneración, 42 de las cuales incluyen un sistema de bombeo. En la Tabla 70 se muestra un listado con las 21 instalaciones con bombeo para las cuales se dispone de la información necesaria para el análisis del consumo energético el caudal medio diario tratado, la altura bombeada, el número de bombas, la existencia de variadores de frecuencia y el consumo energético medio diario.



Tabla 70. Listado de instalaciones de agua regenerada gestionadas por el Canal de Isabel II para las que se dispone de la información necesaria para el análisis del consumo energético.

Nombre	Altura bombeada	Caudal	Nº de Bombas	Variador de frecuencia	Consumo energético
	(mca)	(m <sup>3</sup> /día)		(S/N)	(kW·h /día)
E. B. AGUA REGENERADA DÁRSENA 7 SANCHINARRO I	54	456	8	S	130.57
E. B. AGUA REGENERADA EL FERIAL DÁRSENA 3	40.6	497	9	S	1265.61
E. B. AGUA REGENERADA DÁRSENA 6 SANCHINARRO II	35	70	3	S	73.37
BOMBEO VALDEBEBAS	84	1470	5	S	82.00
BOMBEO AGUA REGENERADA MOSTOLES	125	1000	5	S	1376.85
BOMBEO AGUA REG. FUENLABRADA ESTE	68	400	4	S	120.82
BOMBEO AGUA REG. FUENLABRADA OESTE	68	200	3	S	157.31
BOMBEO AGUA REGENERADA SAN MARTIN DE LA VEGA	70	360	3	S	173.79
DEPÓSITO Y BOMBEO DE AGUA REGENERADA HUMANES	40	126	3	S	18.17
E. B. AGUA REGENERADA PARQUE DEL OESTE	80	1554	8	S	869.14
EB AGUA REGENERADA CUÑA VERDE	80	504	6	S	364.91
E. B. AGUA REGENERADA PARQUE SUR	97.5	3649	8	S	2350.85
E. B. AGUA REGENERADA TIERNO GALVÁN	135	2804	8	S	3189.53
BOMBEO AGUA REGENERADA ALCORCON	50	676	3	S	351.06
EB AGUA REGENERADA DÁRSENA CUÑA VERDE I	33	49	4	S	35.62
E. B. AGUA REGENERADA DÁRSENA DE CRUCES	33	197	4	S	55.38
E. B. AGUA REGENERADA DÁRSENA PARQUE DE ATENAS	33	157	4	S	54.66



Nombre	Altura bombeada	Caudal	Nº de Bombas	Variador de frecuencia	Consumo energético
	(mca)	(m <sup>3</sup> /día)		(S/N)	(kW·h / día)
BOMBEO AGUA REGENERADA DE MAJADAHONDA	55	469	5	S	141.35
DEPÓSITO Y BOMBEO DE AGUA REGENERADA VILLAVICIOSA DE ODÓN	35	278	2	S	168.12
BOMBEO AGUA REGENERADA COLMENAR VIEJO	50	24.33	5	S	72.75
ARGANDA Agua Regenerada	53	130	3	S	31.61

En la Tabla 70 se puede observar que todas las instalaciones de bombeo disponen de variadores de frecuencia por lo que no se puede estudiar el efecto de este parámetro.

Al igual que para las instalaciones de alcantarillado, el análisis de los consumos energéticos se ha realizado asumiendo que el principal consumo de estas instalaciones se debe a la energía consumida para la elevación del agua regenerada y calculando el rendimiento a través de la ecuación 4.

La Figura 121 muestra el rendimiento del conjunto bomba-motor obtenido para las distintas instalaciones. Como se puede ver en la Figura 121, hay una única instalación que presenta un rendimiento energético anómalo (superior a la unidad). Esa instalación es: Bombeo Valdebebas. Este valor anómalo se debe a inexactitudes en los datos facilitados. Estos datos no serán tenidos en cuenta para el posterior análisis estadístico.

El valor medio del rendimiento de todas las instalaciones es 0.33. Para visualizar la pauta de variabilidad del rendimiento en todas estas instalaciones, se incluyen en la Figura 122 las representaciones estadísticas (Box-Whisker, función empírica de distribución acumulada y función de probabilidad normal) del rendimiento de las bombas en las instalaciones de agua regenerada. En estas figuras se observa que la pauta de variabilidad del rendimiento sigue una distribución próxima a la normal, que no hay valores anormalmente elevados, y que el 50% de las instalaciones presenta un rendimiento inferior a 0.31 y que el 80% de las instalaciones presenta un rendimiento inferior a 0.5.



Figura 121. Rendimiento de las bombas en las instalaciones de agua regenerada.

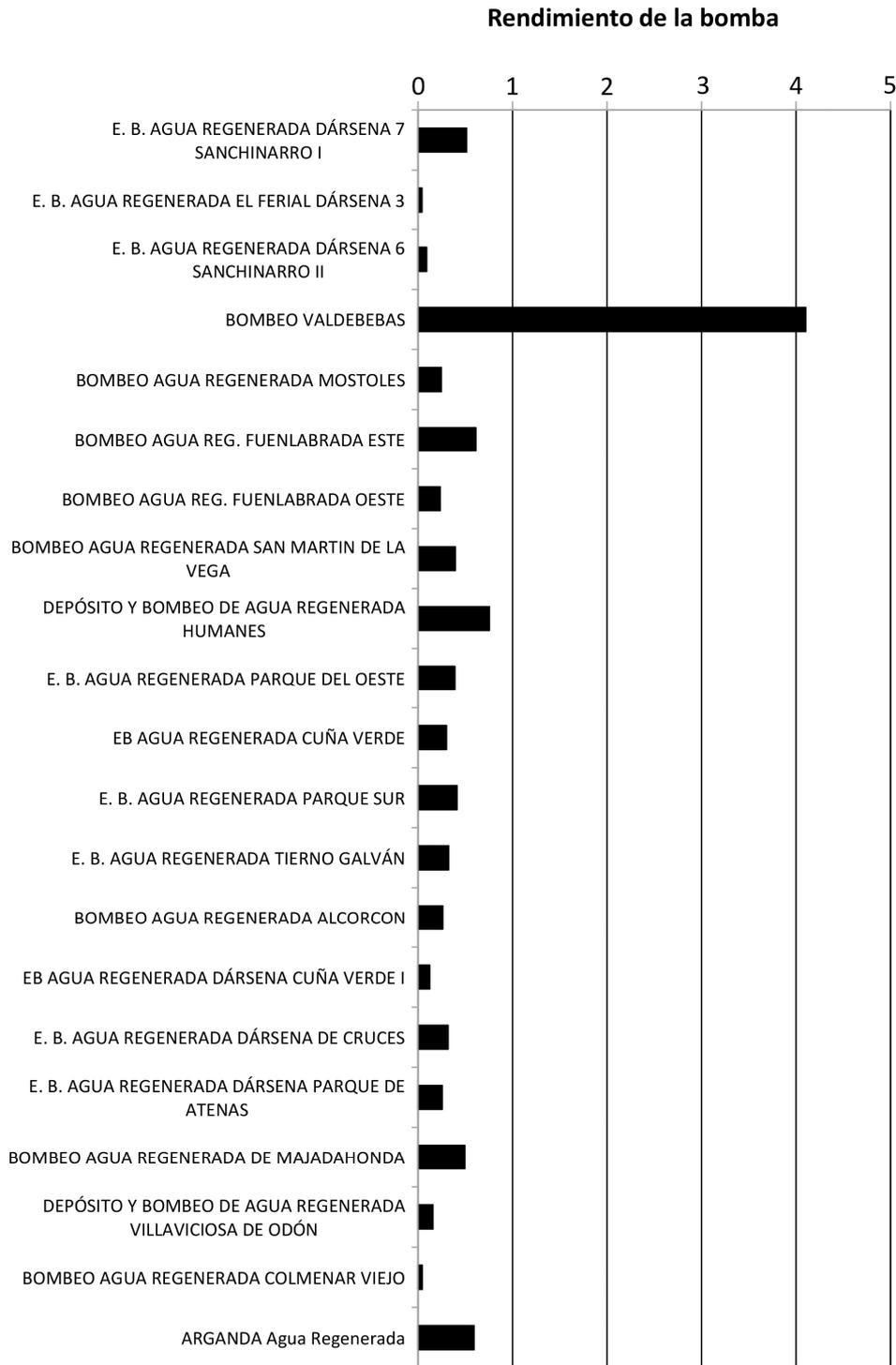
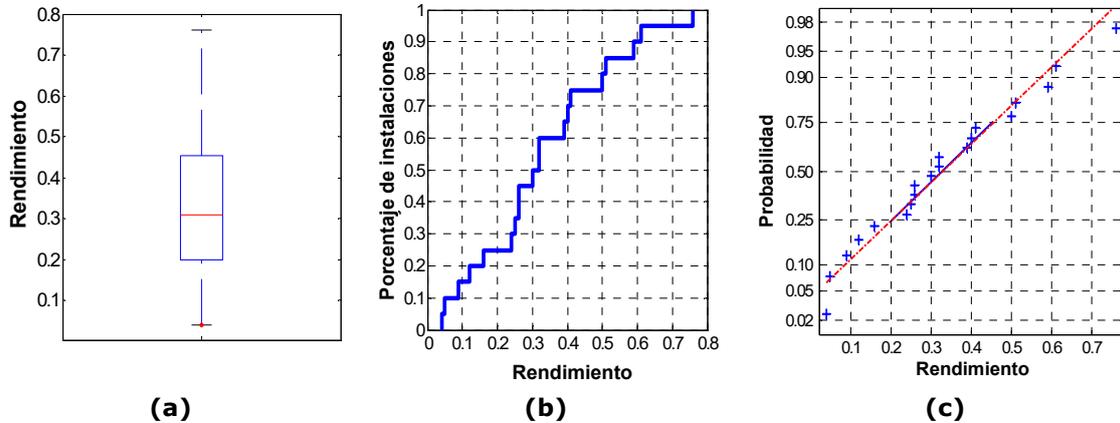


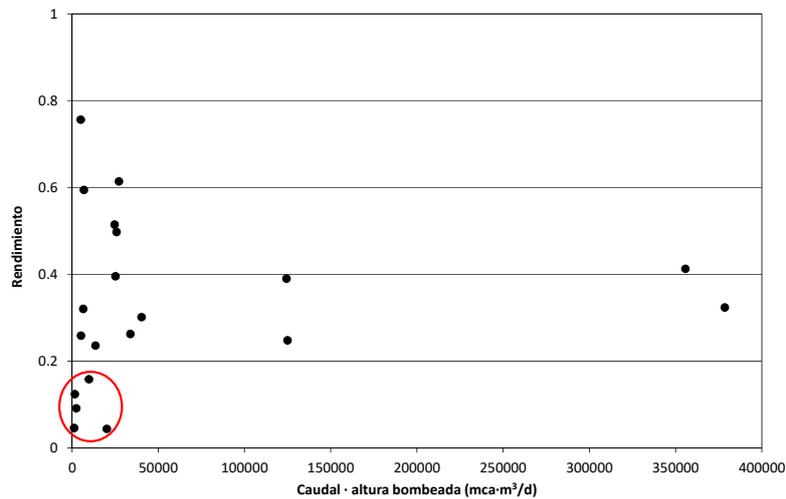


Figura 122. Representaciones estadísticas del rendimiento de las bombas en las instalaciones de agua regenerada: **(a)** Box-Whisker **(b)** Función empírica de distribución acumulada y **(c)** Función de probabilidad normal.



La Figura 123 muestra el rendimiento de los sistemas de bombeo de agua regenerada frente al producto caudal impulsado por altura de elevación. A la vista de la Figura 123 se observa que el rendimiento no muestra ninguna relación con el producto caudal por altura, existiendo una gran dispersión de valores desde 0.1 hasta 0.8. En esta figura también se observa que hay 5 instalaciones con rendimientos inferiores a 0.2. Estas instalaciones son: E. B. agua regenerada Dársena 6 Sanchinarro II, bombeo agua regenerada Colmenar Viejo, E. B. agua regenerada El Ferial Dársena 3, E. B. agua regenerada Dársena Cuña Verde I y depósito y bombeo de agua regenerada Villaviciosa de Odón. Convendría analizar el funcionamiento de estas instalaciones en detalle (régimen de puesta en marcha y parada de las bombas y sistema de control existente) para averiguar las causas de los bajos rendimientos obtenidos.

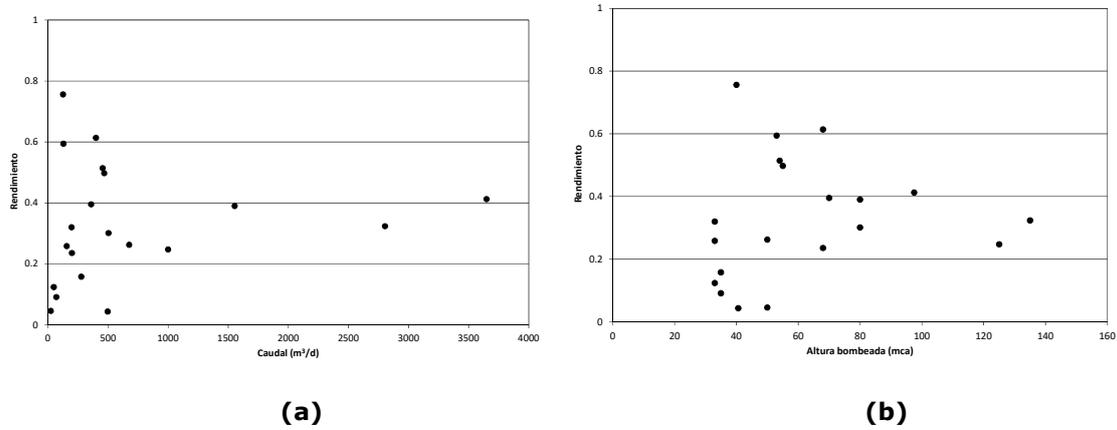
Figura 123. Rendimiento de los bombeos de las instalaciones de regeneración frente al producto caudal impulsado por altura de elevación.



La Figura 124 muestra el rendimiento de los bombeos de las instalaciones de agua regenerada frente al caudal impulsado (Figura 124a) y frente a la altura de elevación (Figura 124b). Como se puede observar en la Figura 124, el rendimiento de las bombas no depende del caudal impulsado, ni de la altura de elevación.



Figura 124. Rendimiento de los bombes de las instalaciones de agua regenerada frente a) al caudal impulsado b) la altura elevada



### 5.2.1 Efecto del número de bombas.

En este apartado se analiza la posible relación entre el rendimiento de los sistemas de bombeo de las instalaciones de regeneración y el número de bombas en dichos sistemas. Para este análisis se han clasificado las instalaciones en 3 grupos según el número de bombas: 7 instalaciones con 2 ó 3 bombas, 7 instalaciones con 4 ó 5 bombas y 6 instalaciones con 6 ó más bombas. La Tabla 71 muestra el rendimiento promedio de las distintas instalaciones y la desviación estándar en función del número de bombas. En esta tabla se puede observar que el número de bombas no tiene efecto significativo en el rendimiento de las instalaciones observándose valores medios similares en los distintos grupos. En todos estos grupos se observa una gran dispersión en los valores de los rendimientos, lo cual se traduce en valores elevados de la desviación típica.

Tabla 71. Rendimiento de las instalaciones de agua regenerada en función del número de bombas. Entre paréntesis se muestra el número de instalaciones.

Nº Bombas	Rendimiento
2- 3	0.36 ± 0.24 (7)
4-5	0.3 ± 0.2 (7)
≥ 6	0.33 ± 0.16 (6)

## 5.3 Estaciones de Tratamiento de Agua Potable (ETAP)

En la actualidad Canal Isabel II gestiona un total de 14 ETAP, aunque 3 de ellas no han estado en funcionamiento durante el año 2015. En la Tabla 72 se muestra un listado con el nombre de estas instalaciones junto con el caudal medio diario tratado, la existencia de bombeo de entrada y/o salida, las alturas de elevación de dichos bombes y el consumo energético medio diario.



Tabla 72. Listado de ETAPs gestionadas por el Canal de Isabel II.

Nombre	Caudal	Bombeo de entrada	Altura bombeada	Bombeo de salida	Altura bombeada	Consumo energético
	(m <sup>3</sup> /día)	(S/N)	(mca)	(S/N)	(mca)	(kW-h /m <sup>3</sup> )
E.T.A.P. LA ACEÑA	6,379.00	N		N		0.235
E.T.A.P. LA JAROSA	45,870.07	N		N		0.023
E.T.A.P VALMAYOR	166,124.93	N		S	6	0.134
ETAP SANTILLANA	150,180.87	S	8	N		0.073
ETAP TORRELAGUNA	102,179.01	N		N		0.028
ETAP COLMENAR	679,019.97	N		N		0.012
ETAP PINILLA	8799.57	N		S	250	1.522
ETAP EL BODONAL	64,362.11	N		S	10	0.055
ETAP DE GRIÑÓN	20,037.33	N		N		0.140
ETAP DE ROZAS DE PUERTO REAL	2,360.31	N		N		0.005
ETAP MAJADAHONDA (Antiguo COMPRAS Y ALMACENES)	79,495.85	S	4.36	N		0.175

La Figura 125 muestra el consumo energético por metro cúbico de las distintas instalaciones de tratamiento de aguas potables. En esta gráfica se puede observar que la ETAP de Pinilla presenta un consumo energético de 1.522 kWh/m<sup>3</sup> muy por encima del resto (0.089 kWh/m<sup>3</sup> es el consumo energético promedio del resto de instalaciones). Este consumo tan elevado se debe a la existencia de un bombeo de salida con una altura de elevación de 250 m. El consumo energético necesario (ver ecuación 4) para elevar el caudal tratado (8799.57 m<sup>3</sup>/d) a una altura de 250 m asumiendo un rendimiento de la bomba de 0.7 es de 0.97 kWh/m<sup>3</sup>.

Para visualizar la pauta de variabilidad en el consumo específico en todas estas instalaciones, se presenta en la Figura 126a el gráfico Box-Whisker correspondiente a su distribución. Este gráfico Box-Whisker muestra que el único valor considerado extremo corresponde a la ETAP de Pinilla.

Para poder conocer qué porcentaje de instalaciones (en tanto por uno) tiene un consumo específico menor o igual que uno dado, se presenta en la Figura 126b la función de probabilidad acumulada determinada directamente a partir de los datos. En esta figura se observa que el 50% de estas instalaciones tiene un consumo específico inferior a 0.07 kWh/m<sup>3</sup> y que el 75% de las instalaciones presenta un consumo específico inferior a 0.15 kWh/m<sup>3</sup>.

La Figura 126c muestra la representación probabilística normal del rendimiento de las instalaciones de bombeo, en la que se aprecia claramente que la distribución de los valores se asemeja a una distribución normal excepto el valor correspondiente a la ETAP de Pinilla.

Figura 125. Consumo específico en las instalaciones de tratamiento de agua potable.

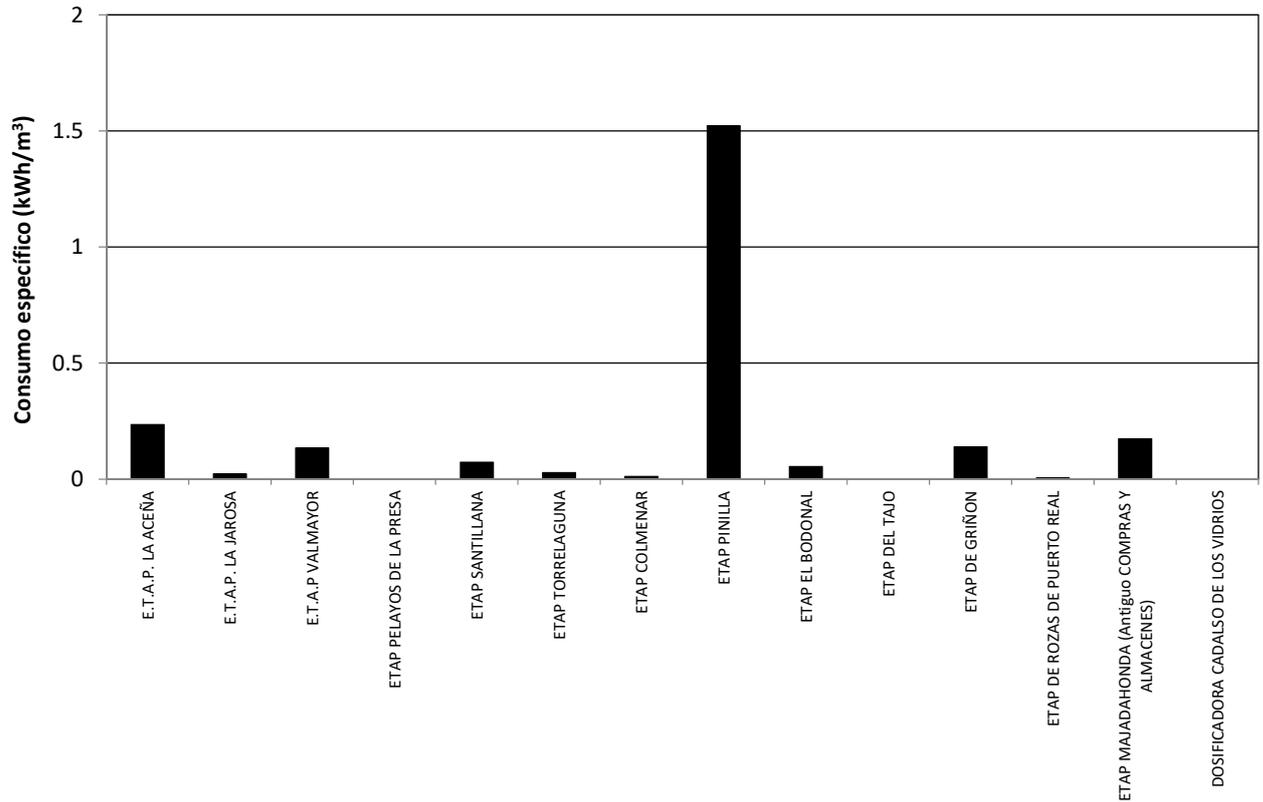
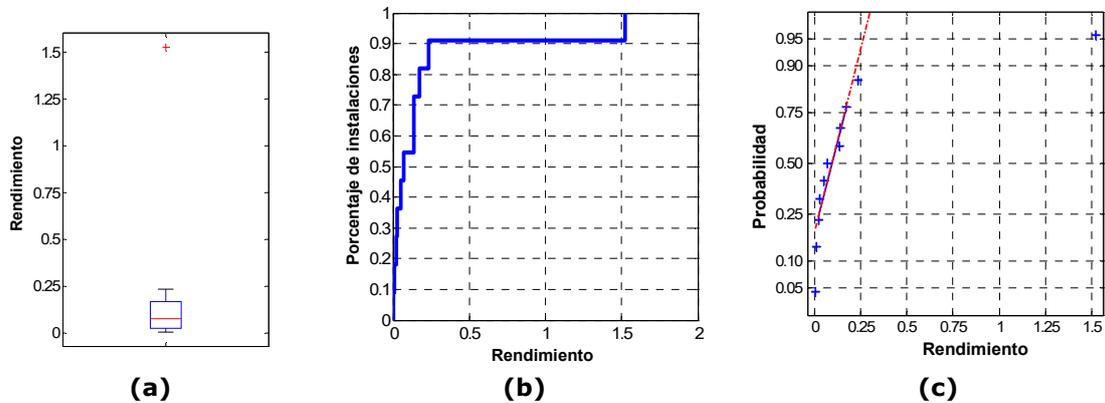


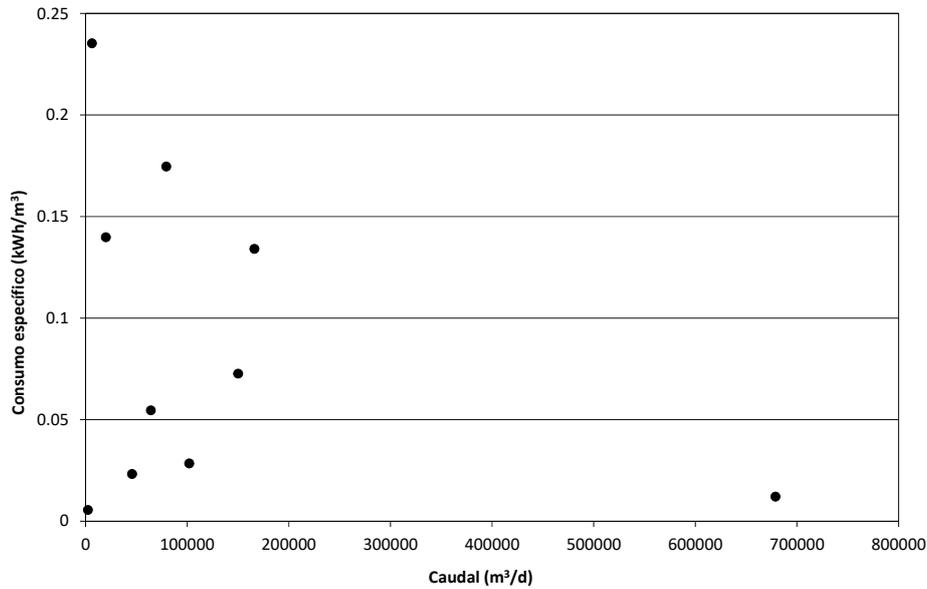
Figura 126. Representaciones estadísticas del consumo energético de las ETAP por m<sup>3</sup> de agua tratada (kWh/m<sup>3</sup>): **(a)** Box-Whisker **(b)** Función empírica de distribución acumulada y **(c)** Función de probabilidad normal.



La Figura 127 muestra el consumo por metro cúbico de agua tratada en las distintas ETAP. En esta figura se puede observar que no existe ninguna relación entre el consumo energético específico y el caudal tratado. Se ha analizado por separado las ETAP que tienen bombeo de entrada o bombeo de salida y las que no lo tienen. El consumo energético por metro cúbico de las 4 ETAP que tienen bombeo varía entre 0.055 y 0.175 kWh/m<sup>3</sup> obteniéndose un valor promedio de 0.109 kWh/m<sup>3</sup>. En el caso de las ETAP que no tienen bombeo hay 4 instalaciones que presentan consumos energéticos muy bajos (inferiores a 0.03 kWh/m<sup>3</sup>) y 2 instalaciones que presentan consumos más elevados. Esas 2 instalaciones son la ETAP de La Aceña y la ETAP de Griñón con consumos energéticos por metro cúbico de 0.235 y 0.140 kWh/m<sup>3</sup>, respectivamente. Sería interesante analizar en profundidad los consumos de dichas instalaciones.



Figura 127. Consumo específico en las instalaciones de tratamiento de agua potable en función del caudal tratado.



## 5.4 Instalaciones de distribución

En la actualidad Canal Isabel II gestiona un total de 25 instalaciones de distribución, 21 de las cuales incluyen un sistema de bombeo. En la Tabla 73 se muestra un listado con las 10 instalaciones con bombeo para las cuales se dispone de la información necesaria para el análisis del consumo energético (el caudal medio diario tratado, la altura bombeada, el número de bombas, la existencia de variadores de frecuencia y el consumo energético medio diario).

Al igual que para las instalaciones de alcantarillado y regeneración, el análisis de los consumos energéticos se ha realizado asumiendo que el principal consumo de estas instalaciones se debe a la energía consumida por los sistemas de bombeo y calculando el rendimiento a través de la ecuación 4.



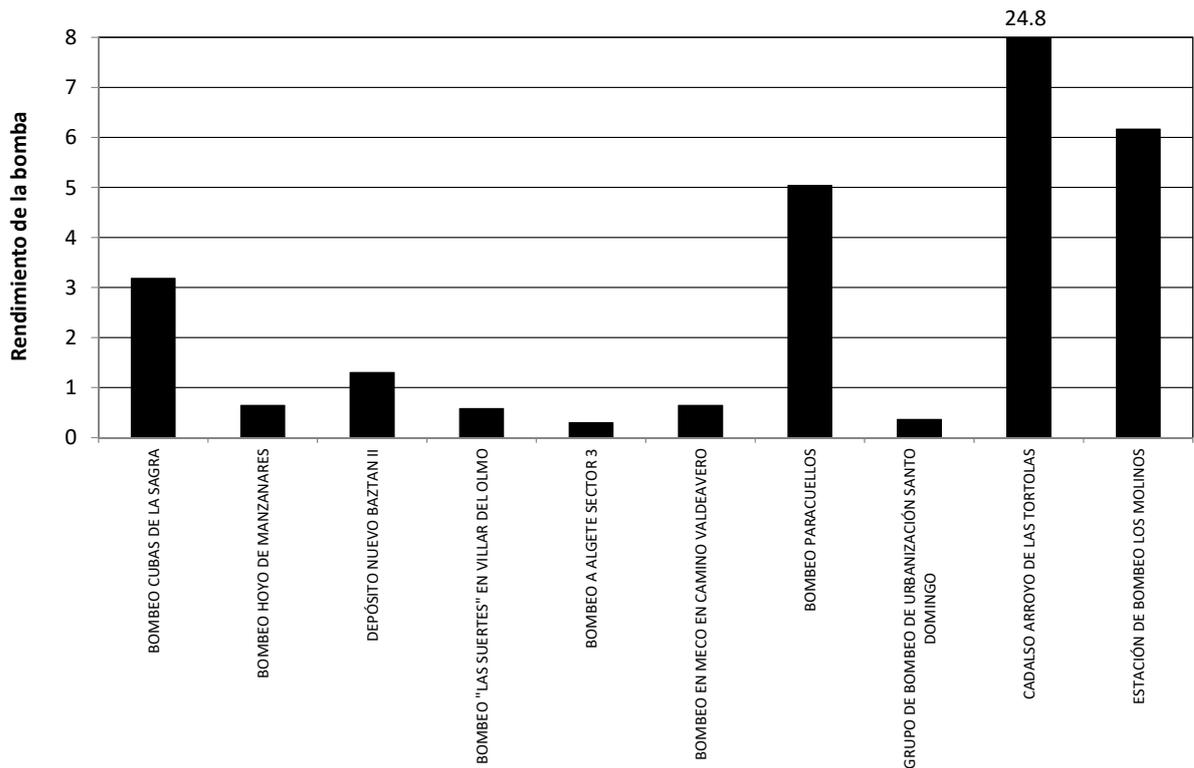
Tabla 73. Listado de instalaciones de distribución gestionadas por el Canal de Isabel II.

Nombre	Altura bombeada	Caudal	Nº de Bombas	Variador de frecuencia	Consumo energético
	(mca)	(m <sup>3</sup> /día)		(S/N)	(kW·h/día)
BOMBEO CUBAS DE LA SAGRA	40	7000	4	S	87,598
BOMBEO HOYO DE MANZANARES	40	233	6	S	14,438
DEPÓSITO NUEVO BAZTAN II	60	7620	3	S	350,132
BOMBEO "LAS SUERTES" EN VILLAR DEL OLMO	94	73	2	N	11,822
BOMBEO A ALGETE SECTOR 3	40	193.71	4	S	25,821
BOMBEO EN MECO EN CAMINO VALDEAVERO	38	217.35	4	S	12,822
BOMBEO PARACUELLOS	40	899.74	3	N	7,104
GRUPO DE BOMBEO DE URBANIZACIÓN SANTO DOMINGO	45	29.29	4	S	3,636
CADALSO ARROYO DE LAS TORTOLAS	160	1,600.0	1	N	10,262
ESTACIÓN DE BOMBEO LOS MOLINOS	140	2966.77	3	N	67,040

La Figura 128 muestra el rendimiento del conjunto bomba-motor obtenido para las distintas instalaciones. Como se puede ver en dicha figura, hay cinco instalaciones que presentan un rendimiento energético anómalo (superior a la unidad). Esas instalaciones son: Bombeo Cubas de la Sagra, Depósito Nuevo Baztán II, Bombeo Paracuellos, Cadalso Arroyo de las Tórtolas y Estación de Bombeo Los Molinos. Estos valores anómalos se deben a inexactitudes en los datos facilitados. Estos datos no serán tenidos en cuenta para el posterior análisis estadístico.



Figura 128. Rendimiento de las bombas en las instalaciones de distribución.



El valor promedio del rendimiento de las bombas es 0.50 estando los valores comprendidos entre 0.30 y 0.64. La Figura 129 muestra el rendimiento de las bombas en las instalaciones de distribución en función del producto caudal impulsado por altura de elevación. A pesar de los pocos datos existentes se puede apreciar una tendencia similar a la observada en los bombeos de alcantarillado en los que el rendimiento aumentaba conforme lo hacía el producto caudal por altura y se obtenían valores en torno a 0.6 para elevados valores de este producto. La única instalación que no sigue la tendencia es el Bombeo a Algete Sector 3.

La Figura 130a muestra el rendimiento de las bombas en las instalaciones de distribución en función del caudal impulsado y la Figura 130b muestra el mismo rendimiento en función de la altura. A pesar de los pocos datos existentes, en estas figuras se observa que el rendimiento depende principalmente del caudal impulsado y no guarda ninguna relación con la altura de elevación. Estos resultados son similares a los obtenidos en las instalaciones de alcantarillado. Convendría analizar el Bombeo a Algete Sector 3 por presentar un rendimiento más bajo de lo que cabría esperar en función del caudal impulsado.



Figura 129. Rendimiento de los bombes de las instalaciones de distribución frente al producto caudal impulsado por altura de elevación.

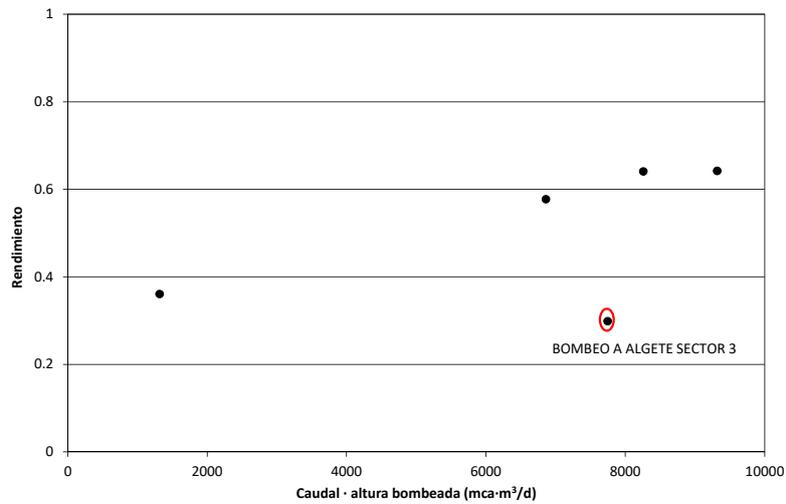
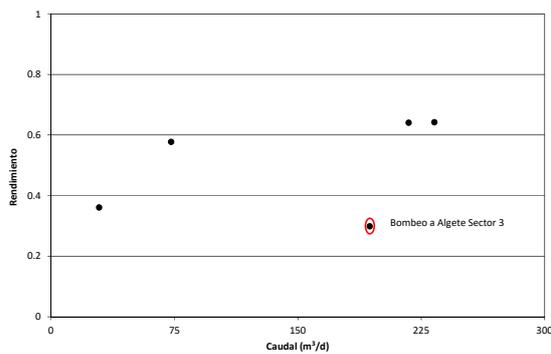
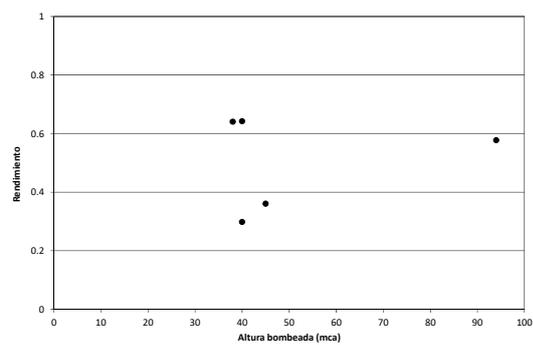


Figura 130. Rendimiento de los bombes de las instalaciones de distribución frente a) al caudal impulsado b) la altura elevada.



(a)



(b)

## 5.5 Instalaciones de aducción

En la actualidad Canal Isabel II gestiona múltiples instalaciones de aducción, incluyendo 78 pozos de captación, 36 depósitos reguladores, 291 depósitos menores, 22 grandes plantas elevadoras, 14 embalses y 182 Estaciones de Vigilancia Automática. El análisis de los consumos energéticos se centra en los puntos de suministro de las instalaciones que disponen de un sistema de bombeo (pozos, grupos de bombeo y elevadoras). Por este motivo, en la Tabla 74 se muestra un listado de todas las instalaciones con sistema de bombeo para las que se dispone de toda la información necesaria para el análisis (caudal impulsado, altura bombeada y consumo energético).



Tabla 74. Listado de instalaciones de aducción gestionadas por el Canal de Isabel II.

Nombre	Altura bombeada	Caudal	Nº de Bombas	Variador de frecuencia	Consumo energético
	(mca)	(m <sup>3</sup> /día)		(S/N)	(kW·h /día)
POZO CB-14	137.8	677.8	1	S	282.85
CAMPO POZOS FUENCARRAL	173.1	1,217.3	14	S/N	1964.30
POZO PM-1 PLANTIO-MAJADAHONDA	238.3	724.0	1	N	878.16
POZO PM-2 PLANTIO-MAJADAHONDA	250.5	733.6	3	S/N	1203.22
POZO MONTEALINA 6	223.8	268.1	1	S	255.49
POZO MONTEALINA 7	243.5	327.0	1	S	363.24
POZO CANAL OESTE 3	274.8	637.9	1	N	846.26
POZO RETAMARES 1	87.4	1,331.3	2	S/N	998.65
POZO BATRES 4	93.9	3,318.9	3	N	1485.12
POZO BATRES 2 BIS	262.5	520.0	1	S	675.16
POZO GU-2	290	914.8	1	S	1199.74
CAMPO DE POZOS DEL GUADARRAMA.TOMA DE NAVALCARNERO	282.7	1,790.1	14	S	1679.83
ELEVADORA TRES CANTOS	95	5,740.00	8	S	9,226.93
ELEVADORA DE CANILLAS PRINCIPAL	50	19,016.00	5	S	1,242.26
BOMBEO CALLE DALIAS EN EL ALAMO	25	250	5	S	117.45
ELEVADORA RETAMARES	50	1780	5	N	6,567.78
ELEVADORA DE VELILLA	60	36,461.96	7	S	4,059.51
ELEVADORA TORRES I Y II	130	5,253.18	9	N	4,137.25
ELEVADORA DE MIRAFLORES	188	3,265.92	3	N	2,222.31
ELEVADORA DE SOTO DEL REAL	105	3,502.24	3	N	1,345.72
ELEVADORA MANZANARES/ SOTO DESDE ETAP SANTILLANA	122	4,492.80	5	S	2,600.82
ELEVADORA CERCEDA	43	1,080.00	3	N	228.50
ELEVADORA DE TIELMES	113	15,636.31	4	S	4,676.64
ELEVADORA PERALES DE TAJUÑA	90	2,777.00	3	S	488.14
BOMBEO SAN JUAN-PELAYOS	21.5	125.5	3	S	2.71
ELEVADORA DE PICADAS I	213	90,154.81	4	S	45,016.49



Nombre	Altura bombeada	Caudal	Nº de Bombas	Variador de frecuencia	Consumo energético
	(mca)	(m <sup>3</sup> /día)		(S/N)	(kW·h /día)
ELEVADORA DE PICADAS II	52	90,154.81	4	S	39,019.82
ELEVADORA DE SAN JUAN II	130	43,845.11	5	S	19,895.50
AYT. STA. MARIA (ELEV. AGUA 2)	276	4,157.03	4	S	166.42
ELEVADORA DE VILLALBA	165	12,921.22	4	N	7,778.14
ELEVADORA DE SAN JUAN I	200	43,845.11	5	N	28,191.78
BOMBEO NAVACERRADA	395	8,108.52	8	N	4,587.16
BOMBEO FRESNEDILLAS	70	576.73	2	N	281.62
BOMBEO MORALZARZAL 1	90	6,598.90	3	N	255.43
BOMBEO VALMAYOR	150	5,974.87	4	N	4,522.46
BOMBEO SANTILLANA	138	26,172.74	10	N	15,071.17
BOMBEO LAS SALINERAS	4	19,318.16	1	S	8.99

El análisis del consumo energético de las instalaciones de aducción con sistema de bombeo se ha realizado calculando el rendimiento a través de la ecuación 4. La Figura 131 muestra el rendimiento del conjunto bomba-motor obtenido para las distintas instalaciones. Como se puede ver en la Figura 131, hay 10 instalaciones que presentan un rendimiento energético anómalo (superior a la unidad). Esas instalaciones son: elevadora de Canillas principal, elevadora de Velilla, elevadora de Tielmes, elevadora Perales de Tajuña, bombeo San Juan-Pelayos, elevadora de Picadas I, Ayt. Sta. Maria (elev. agua 2), bombeo Navacerrada, bombeo Moralzarzal 1 y bombeo las Salineras. Estos valores anómalos se deben a inexactitudes en los datos facilitados. Estos datos no serán tenidos en cuenta para el posterior análisis estadístico.

El valor promedio del rendimiento de las instalaciones de aducción es 0.51. No existe diferencia entre el rendimiento promedio de los pozos (0.58±0.17) y el de los bombeos y elevadoras (0.48±0.23). Para visualizar la pauta de variabilidad en el consumo específico en todas estas instalaciones, se presenta en la Figura 132a el gráfico Box-Whisker correspondiente a su distribución. Este gráfico Box-Whisker muestra una ligera asimetría negativa, que no ningún valor que se pueda considerar extremo y una gran variabilidad de rendimientos (desde 0.04 hasta 0.90).

Para poder conocer qué porcentaje de instalaciones (en tanto por uno) tiene un consumo específico menor o igual que uno dado, se presenta en la Figura 132b la función de probabilidad acumulada determinada directamente a partir de los datos. En esta figura se observa que el 50% de estas instalaciones tiene un rendimiento inferior a 0.56 y que el 75% de las instalaciones presenta un rendimiento inferior a 0.71.

La Figura 132c muestra la representación probabilística normal del rendimiento de las instalaciones de bombeo, en la que se aprecia que la distribución de los valores se asemeja a una distribución normal con ligera asimetría negativa.



Figura 131. Rendimiento de las bombas de las instalaciones de aducción.

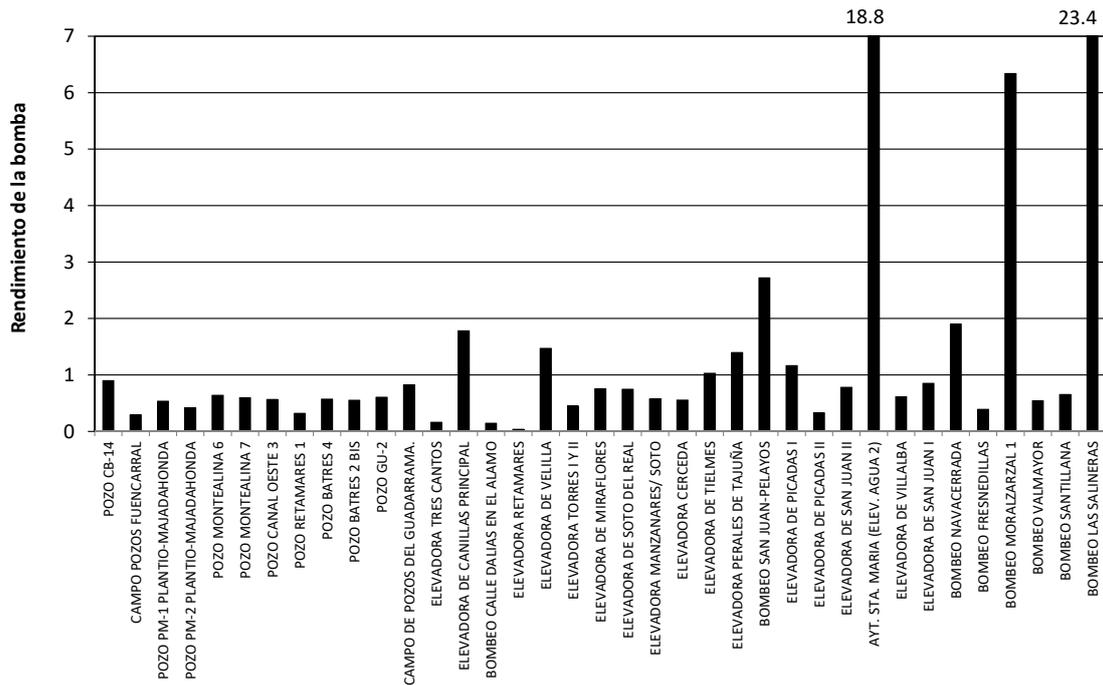
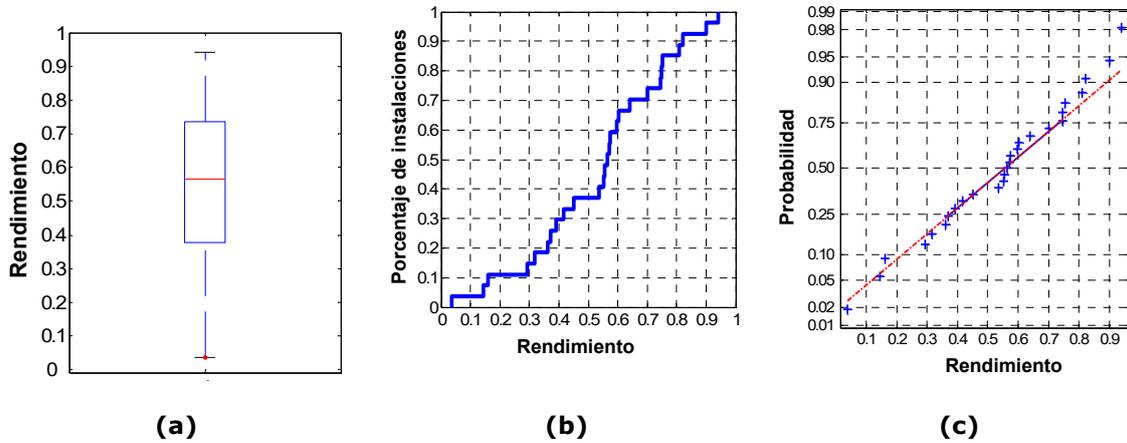


Figura 132. Representaciones estadísticas del rendimiento de las instalaciones de aducción: (a) Box-Whisker (b) Función empírica de distribución acumulada y (c) Función de probabilidad normal.



La Figura 133 muestra el rendimiento de las distintas instalaciones en función del producto caudal impulsado por altura de elevación. En esta figura se observa que no existe ninguna relación entre el rendimiento de los sistemas de bombeo y el producto caudal por altura. No obstante, cabe destacar la existencia de 3 instalaciones con rendimientos inferiores a 0.2. Esas instalaciones son: Bombeo calle Dalias en el Álamo, Elevadora Retamares y Elevadora Tres Cantos. Convendría analizar el funcionamiento de estas instalaciones en detalle (régimen de puesta en marcha y parada de las bombas y sistema de control existente) para averiguar las causas de los bajos rendimientos obtenidos. También convendría analizar el funcionamiento de la elevadora de Picadas II porque, aunque su rendimiento no es tan bajo como las instalaciones citadas anteriormente (0.33) su optimización supondría un ahorro más importante por el elevado producto caudal por altura que impulsa.



La Figura 134a muestra el rendimiento de los sistemas de bombeo en función del caudal impulsado y la Figura 134b muestra el mismo rendimiento en función de la altura de elevación. A la vista de estas gráficas se puede concluir que no existe ninguna relación entre el rendimiento de las bombas y el caudal impulsado y, aunque hay una importante dispersión de valores, se aprecia una tendencia entre el rendimiento y la altura de elevación, de forma que el rendimiento de las bombas aumenta conforme lo hace la altura de elevación hasta 200 mca, valor a partir del cual no se aprecian variaciones significativas en el rendimiento.

Figura 133. Rendimiento de las bombas de las instalaciones de aducción en función del producto caudal por altura.

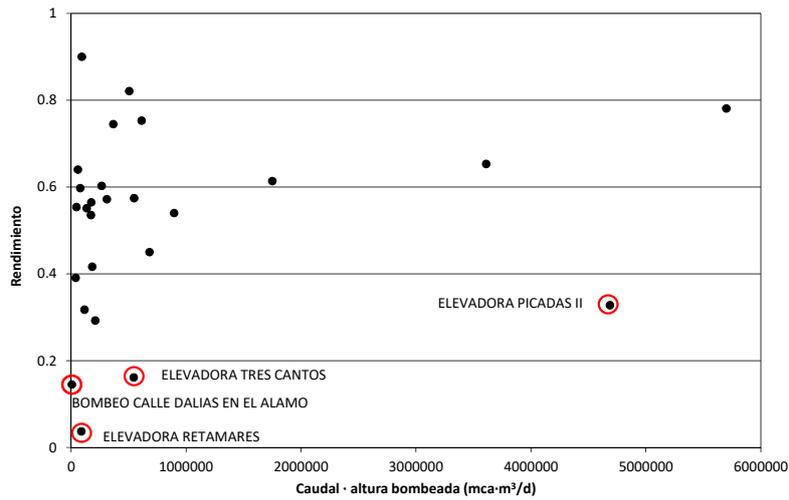
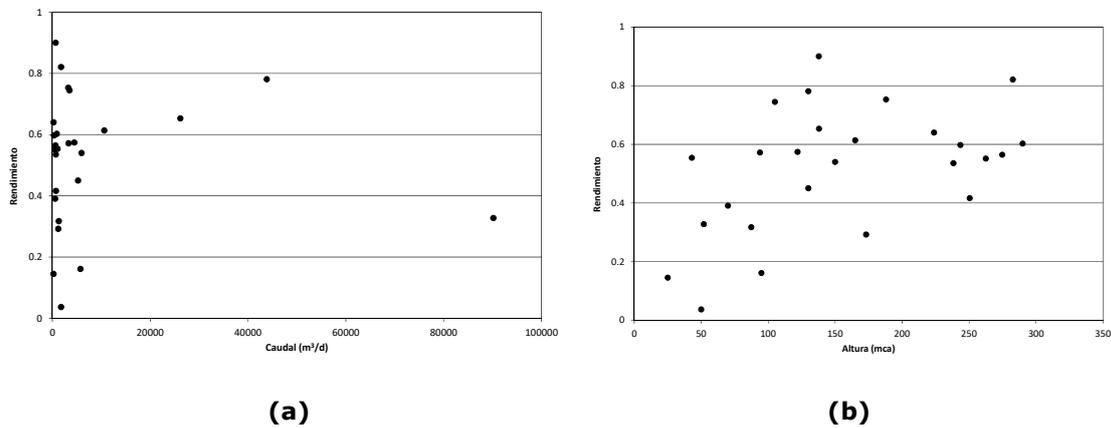


Figura 134. Rendimiento de los bombeos de las instalaciones de aducción frente a) al caudal impulsado b) la altura elevada.



### 5.5.1 Efecto del número de bombas.

En este apartado se analiza la posible relación entre el rendimiento de los sistemas de bombeo y el número de bombas en dichos sistemas. Para este análisis se han clasificado las instalaciones en 3 grupos según el número de bombas: 9 instalaciones con 1 ó 2 bombas, 8 instalaciones con 3 ó 4 bombas y 10 instalaciones con 5 ó más bombas. La Tabla 75 muestra el rendimiento de las distintas instalaciones en función del número de bombas. En esta tabla



se puede observar que no hay un efecto significativo del número de bombas en el rendimiento de las mismas.

Tabla 75. Rendimiento de las instalaciones de aducción en función del número de bombas. Entre paréntesis se muestra el número de instalaciones.

Nº Bombas	Rendimiento
1-2	0.57 ± 0.16 (9)
3-4	0.54 ± 0.15 (9)
≥ 5	0.43 ± 0.28 (9)

### 5.5.2 Efecto de la existencia de variadores de frecuencia.

En el conjunto de datos facilitado, 11 instalaciones disponen de variadores de frecuencia, mientras que otras 13 instalaciones no lo tienen. La Tabla 76 muestra el rendimiento de las distintas instalaciones en función de la existencia o no de variadores de frecuencia. En esta tabla se puede observar que la presencia de variadores de frecuencia no tiene efecto significativo en el rendimiento de las bombas.

Tabla 76. Rendimiento de las instalaciones de aducción en función de la presencia de variadores de frecuencia. Entre paréntesis se muestra el número de instalaciones.

Variador de frecuencia	Rendimiento
SI	0.50 (15)
NO	0.53 (12)

## 5.6 Conclusiones del estudio energético en el resto de instalaciones del ciclo integral del agua

Canal de Isabel II ha facilitado al grupo de investigación CALAGUA información referida a la explotación de 89 instalaciones de alcantarillado, 45 de regeneración, 14 de tratamiento de aguas potables, 25 de distribución y 113 de aducción. El análisis del consumo energético de las ETAP se ha realizado en base al consumo específico de cada instalación (kWh/m<sup>3</sup>) mientras que el análisis del resto de instalaciones se ha centrado en el consumo energético de los bombeos existentes por representar estos la mayor parte del consumo en dichas instalaciones. El análisis de los bombeos se ha realizado calculando el rendimiento de las bombas a partir de los datos de caudal impulsado, altura de elevación y consumo energético. Tras el análisis de cada uno de estos grupos de instalaciones se han obtenido las siguientes conclusiones:

### Instalaciones de alcantarillado

- De las 89 instalaciones existentes sólo de 47 se disponía de los datos completos para el análisis y tras el cálculo del rendimiento de las bombas, se desestimaron 4 instalaciones por presentar rendimientos superiores a la unidad.
- El valor medio del rendimiento de todas las instalaciones es 0.3 y el 75% de las instalaciones presenta un rendimiento inferior a 0.4. El rendimiento obtenido aumenta conforme lo hace el producto caudal impulsado por altura de elevación. Para productos de caudal por altura elevados el rendimiento se estabiliza en torno a 0.6. El análisis del



rendimiento en función de cada una de esas variables muestra que el rendimiento de las bombas depende del caudal tratado pero no depende de la altura de elevación.

- Las instalaciones con caudales impulsados inferiores a 500 m<sup>3</sup>/d presentan rendimientos inferiores a las demás (valores promedio de 0.11 y 0.43 respectivamente). Una posible causa de estos bajos rendimientos puede ser la inadecuada selección de las bombas motivada por elevadas diferencias entre el caudal punta (para el cuál se seleccionan las bombas) y los caudales habituales de operación. De todas formas, convendría analizar en profundidad las causas por las que estas instalaciones de bajo caudal presentan rendimientos tan bajos.
- Dentro de las instalaciones que impulsan caudales superiores a los 500 m<sup>3</sup>/d cabe señalar que los tanques de tormenta presentan un rendimiento promedio inferior (0.27) al de las estaciones de bombeo (0.47).
- El efecto del número de bombas en el rendimiento de las mismas es distinto en función del caudal impulsado. Para las instalaciones con caudales inferiores a 500 m<sup>3</sup>/d se observa un incremento en el rendimiento promedio conforme aumenta el número de bombas. No obstante, este incremento no puede considerarse estadísticamente significativo. Para las instalaciones con caudales superiores a 500 m<sup>3</sup>/d no se observa ningún efecto del número de bombas sobre el rendimiento.
- La presencia de variadores de frecuencia no tiene efecto significativo en el rendimiento de las instalaciones independientemente del caudal impulsado.

### **Instalaciones de regeneración**

- De las 45 instalaciones existentes, 42 incluyen sistema de bombeo y de ellas sólo de 21 se disponía de los datos completos para el análisis. Tras el cálculo del rendimiento de las bombas se desestimó 1 instalación por presentar un rendimiento superior a la unidad.
- El valor medio del rendimiento de todas las instalaciones es 0.33 con valores comprendidos entre 0.05 y 0.76. Al analizar como varía el rendimiento de las bombas en función del producto caudal impulsado por altura de elevación no se ha observado ninguna tendencia. Tampoco se ha observado ningún efecto por separado de dichas variables, es decir, el rendimiento de las bombas no depende ni del caudal impulsado ni de la altura de elevación.
- El número de bombas no influye en el rendimiento de las bombas. Se obtienen valores de rendimiento similares en las instalaciones independientemente del número de bombas existente. Dado que todas las instalaciones disponen de variadores de frecuencia no se ha podido analizar el efecto de este parámetro.

### **ETAP**

- De las 14 instalaciones existentes, 3 de ellas no estuvieron en funcionamiento durante 2015. Al analizar los consumos energéticos de las 11 instalaciones en funcionamiento se observa que la ETAP de Pinilla presenta un consumo energético de 1.52 kWh/m<sup>3</sup> muy por encima del resto (0.089 kWh/m<sup>3</sup> es el consumo energético promedio del resto de instalaciones). Este consumo tan elevado se debe a la existencia de un bombeo de salida con una altura de elevación de 250 m.
- No existe ninguna relación entre el consumo energético específico de las ETAP y el caudal tratado.
- Al analizar por separado las ETAP que tienen bombeo de entrada o bombeo de salida y las que no lo tienen se observa que el consumo energético por metro cúbico de las 4 ETAP que tienen bombeo varía entre 0.055 y 0.175 kWh/m<sup>3</sup> obteniéndose un valor promedio de 0.109 kWh/m<sup>3</sup>. En el caso de las ETAP que no tienen bombeo hay 4 instalaciones que presentan consumos energéticos muy bajos (inferiores a 0.03



kWh/m<sup>3</sup>) mientras que las ETAP de La Aceña y de Griñón presentan consumos más elevados (0.235 y 0.140 kWh/m<sup>3</sup>, respectivamente). Sería interesante analizar en profundidad los consumos de dichas instalaciones.

### **Instalaciones de distribución**

- De las 25 instalaciones existentes, 21 incluyen sistema de bombeo y de ellas sólo de 10 se disponía de los datos completos para el análisis. Tras el cálculo del rendimiento de las bombas se desestimaron 5 instalaciones por presentar rendimientos superiores a la unidad.
- El valor promedio del rendimiento de las bombas es 0.50 estando los valores comprendidos entre 0.30 y 0.64. A pesar de los pocos datos existentes el rendimiento aumenta conforme lo hace el producto caudal por altura obteniéndose valores en torno a 0.6 para elevados valores de este producto. El análisis del rendimiento en función de cada una de esas variables muestra que el rendimiento de las bombas depende del caudal tratado pero no depende de la altura de elevación La única instalación que no sigue la tendencia es el Bombeo a Algete Sector 3, que presenta un rendimiento más bajo de lo que cabría esperar en función del caudal impulsado.

### **Instalaciones de aducción**

- De las 113 instalaciones existentes, 81 incluyen sistema de bombeo y de ellas sólo de 37 se disponía de los datos completos para el análisis. Tras el cálculo del rendimiento de las bombas se desestimaron 10 instalaciones por presentar rendimientos superiores a la unidad.
- El valor promedio del rendimiento de las instalaciones de aducción es 0.51 sin que exista diferencia entre el rendimiento promedio de los pozos (0.58±0.17) y el de los bombeos y elevadoras (0.48±0.23).
- No existe ninguna relación entre el rendimiento de los sistemas de bombeo en las instalaciones de aducción y el producto caudal impulsado por altura de elevación. Al analizar el efecto de las variables por separado, se observa que no existe ninguna relación entre el rendimiento de las bombas y el caudal impulsado y, aunque hay una importante dispersión de valores, se aprecia una tendencia entre el rendimiento y la altura de elevación, de forma que el rendimiento de las bombas aumenta conforme lo hace la altura de elevación hasta los 200 mca.
- El rendimiento de los sistemas de bombeo no se ve afectado por el número de bombas ni por la presencia de variadores de frecuencia.

### **Comparación de los distintos tipos de instalaciones**

- La Tabla 77 muestra los valores promedio de los rendimientos de los sistemas de bombeo en los distintos tipos de instalaciones. En dicha tabla se observa que el rendimiento promedio tanto en las EBAR que impulsan caudales superiores a 500 m<sup>3</sup>/d, como en las instalaciones de distribución y aducción está próximo a 0.5. En cambio el rendimiento obtenido en los tanques de tormenta y en las instalaciones de regeneración es claramente inferior (próximo a 0.3).



Tabla 77. Comparación de los rendimientos promedio de los sistemas de bombeo presentes en los distintos tipos de instalaciones

Rendimiento		
Alcantarillado	Q < 500 m <sup>3</sup> /d	Q > 500 m <sup>3</sup> /d
EBAR	0.11	0.47
Tanque de tormenta	0.07	0.27
Regeneración	0.33	
Distribución	0.5	
Aducción	0.51	

### Comparación de los distintos tipos de instalaciones

- La Tabla 77 muestra los valores promedio de los rendimientos de los sistemas de bombeo en los distintos tipos de instalaciones. En dicha tabla se observa que el rendimiento promedio tanto en las EBAR que impulsan caudales superiores a 500 m<sup>3</sup>/d, como en las instalaciones de distribución y aducción está próximo a 0.5. En cambio el rendimiento obtenido en los tanques de tormenta y en las instalaciones de regeneración es claramente inferior (próximo a 0.3).

### Resumen de medidas propuestas para la disminución de la huella energética.

Dado que el consumo energético de las instalaciones de alcantarillado, regeneración, distribución y aducción se debe fundamentalmente a la presencia de bombes las principales medidas que se proponen para reducir el consumo energético en estas instalaciones son:

- Adecuar el conjunto de bombas existente al caudal de bombeo de forma que el sistema de bombeo pueda ofrecer una respuesta adecuada en los distintos escenarios de caudales.
- Una vez definido adecuadamente el conjunto de bombas necesarias, instalar variadores de frecuencia y desarrollar un sistema de control para optimizar el rendimiento de las bombas a distintos caudales bombeados.

El porcentaje de ahorro energético esperable con la implantación de las medidas indicadas será muy variable en función de la instalación, dada la gran dispersión observada en los rendimientos de los bombeos dentro de cada uno de los tipos de instalaciones. Los datos mostrados en la Tabla 77 indican que los mayores porcentajes de ahorro energético se podrán conseguir en las instalaciones de alcantarillado con bombeo de caudal inferior a 500 m<sup>3</sup>/d y en las instalaciones de regeneración puesto que son las que presentan un menor rendimiento promedio. En estas instalaciones se podrían alcanzar porcentajes de ahorro energético entre un 30% y un 60%.



## 6 CONSIDERACIONES FINALES

Este trabajo representa una primera aproximación para el cálculo detallado de la huella energética de las instalaciones gestionadas por Canal de Isabel II en las distintas fases del ciclo integral del agua, para la estimación del potencial de ahorro energético y para el planteamiento de medidas encaminadas a la optimización de los consumos eléctricos.

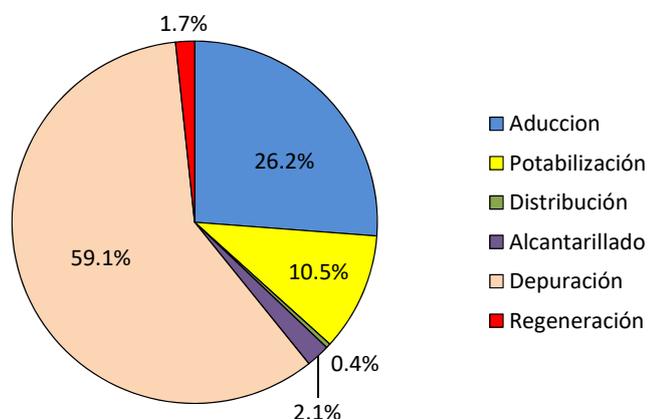
A partir de los datos de consumos energéticos procedentes de más del 92% de las instalaciones se obtiene la siguiente distribución (ver Tabla 78) de consumos energéticos entre las distintas fases del ciclo integral del agua. El consumo específico de las instalaciones de aducción, potabilización y distribución se ha calculado con el caudal total registrado en las ETAP (1,324,823 m<sup>3</sup>/d) mientras que el consumo de las instalaciones de alcantarillado, depuración y regeneración se ha calculado con el caudal total registrado en las EDAR (1,350,685 m<sup>3</sup>/d).

Tabla 78. Resumen del consumo anual y consumo específico de las instalaciones gestionadas por Canal de Isabel II para las distintas fases del ciclo integral del agua. Estos datos corresponden al año 2015.

Fase	Consumo anual (kWh/año)	Consumo específico (kWh/m <sup>3</sup> )
Aducción	73,045,132	0.15
Potabilización	29,360,823	0.06
Distribución	1,116,511	0.002
Alcantarillado	5,893,944	0.01
Depuración	164,618,877	0.33
Regeneración	4,657,518	0.01
<b>TOTAL</b>	<b>278,692,805</b>	<b>0.57</b>

La Figura 135 muestra la distribución porcentual del consumo energético entre las instalaciones de las distintas fases del ciclo integral del agua.

Figura 135. Distribución porcentual del consumo energético entre las instalaciones de las distintas fases del ciclo integral del agua. Este gráfico se ha elaborado con los datos correspondientes al año 2015.





Tal y como se aprecia en esta figura el mayor porcentaje del consumo energético corresponde a las instalaciones de depuración (59.1%). Este elevado consumo en las instalaciones de depuración indica que los mayores esfuerzos para la reducción de la huella energética en el ciclo integral del agua deben centrarse en dos ámbitos de actuación:

- La optimización de las EDAR actuales con la implantación de sistemas de cogeneración en las EDAR con digestión anaerobia y sistemas de control avanzados en los principales puntos de consumo (aireación y bombeos).
- La implantación de nuevas tecnologías de depuración basadas en la valorización energética de la materia orgánica contenida en el agua residual a través de procesos anaerobios.

Aunque muchas de las EDAR presentan consumos energéticos específicos bastante elevados y se podrían conseguir elevados porcentajes de reducción del consumo con la implantación de las medidas propuestas, las EDAR que tratan más de la mitad del caudal total de agua depurada presentan consumos energéticos específicos adecuados ( $< 0.25 \text{ kWh/m}^3$ ). Es por ello que el consumo específico global de las instalaciones de depuración en la Comunidad de Madrid es relativamente bajo ( $0.33 \text{ kWh/m}^3$ ) y el porcentaje de ahorro estimado tras la implantación de estas medidas a escala global en las instalaciones de depuración estaría por debajo del 15%.

La implantación a escala global de las medidas propuestas para la optimización de los sistemas de bombeo del resto de instalaciones del ciclo integral del agua supondría un pequeño porcentaje ( $<10\%$ ) en el consumo energético global. Esto se debe a que las instalaciones de aducción, que son las que representan un mayor peso en el consumo energético global, tienen un rendimiento promedio bastante bueno con un reducido margen de mejora.



## 7 BIBLIOGRAFÍA

- Carlson S.W. y Walburger A. (2007). Energy Index Development for Benchmarking Water and Wastewater Utilities. Awwa Research Foundation.
- Cooley H. and Wilkinson R. (2012) Implications of Future Water Supply Sources for Energy Demands. WaterReuse Research Foundation.
- EPRI (2000). Water and Sustainability: U.S. Electricity Consumption for Water Supply & Treatment—The Next Half Century, Palo Alto, CA. 1006787
- Ferrer Polo, José y Seco Torrecillas, Aurora (2012). Tratamientos biológicos de aguas residuales. Valencia. Editorial UPV. 2ª ed.
- Ferro G. y Lentini E. (2015). Eficiencia energética y regulación económica en los servicios de agua potable y alcantarillado. Serie Recursos Naturales e Infraestructura. Naciones Unidas. CEPAL.
- Grady Jr. C.P.L., Daigger G.T., Love N.G. y Filipe C.D.M.. Biological Wastewater Treatment. Third Edition. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group, 2011.
- Hardy, L.; Garrido, A. & Juana, L. (2012). Evaluation of Spain's Water-Energy Nexus. International Journal of Water Resources Development, 28(1), Special Issue: Water Policy and Management in Spain. Taylor & Francis, Leiden, the Netherlands.
- IDAE (2010). Estudio de Prospectiva. Consumo energético en el sector del agua.
- Klein G., Krebs M., Hall V., O'Brien T and Blevins B. (2005) California's Water-Energy Relationship. CEC-700-2005-011-SF.
- Martínez F.J. (2011). Estudio de la huella energética del abastecimiento urbano de agua de la provincia de Almería. Trabajo de Investigación del Máster Agua y Medio Ambiente en Áreas Semiáridas (AQUARID).
- Metcalf & Eddy (2003). Wastewater engineering: treatment and reuse. 4th ed. New York: McGraw-Hill.
- Murgui M., Cabrera E., Pardo M., Cabrera E. Jr., (2009). Estimación del consumo de energía ligado al uso del agua en la ciudad de Valencia. Primeras Jornadas Ingeniería del Agua. Centro de Estudios Hidrográficos. Madrid.
- Romero R. y Zúnica L.R. (2012). Métodos estadísticos en ingeniería. ISBN 9788497057271. Valencia. Editorial UPV
- Sala L. (2007) Balances energéticos del ciclo del agua y experiencias de reutilización planificada en municipios de la Costa Brava. Seminario Internacional Agua, Energía y Cambio Climático. Valencia.
- UNESCO (2014) Water and Energy. The United Nations World Water Report Development Report.



## 8 ANEJO

En este anejo se muestra la encuesta utilizada en el estudio "Energy Index Development for Benchmarking Water and Wastewater Utilities" realizado por la Awwa Research Foundation para caracterizar las plantas de tratamiento de aguas residuales.

### Wastewater Utility Energy Use Survey

#### Contact Information

NPDES Permit Number: ..... \_\_\_\_\_

Facility Name:..... \_\_\_\_\_

Facility Address: ..... \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Name of Person Completing Survey: \_\_\_\_\_

Phone: \_\_\_\_\_ E-mail: \_\_\_\_\_

Number of wastewater treatment plants in utility..... (No. plants) \_\_\_\_\_

**Plant Characteristics** (please provide data for the single plant identified by the NPDES permit number on the ID label on page 3. You might receive separate surveys for other plants in your utility.)

1. What is the design flow rate? ..... (million gallons per day - MGD) \_\_\_\_\_

2. What is the average flow rate? ..... (million gallons per day - MGD) \_\_\_\_\_

3. What percentage of flow is from industrial users?..... (%) \_\_\_\_\_

4. What is the treatment level (check one)?

a.  Primary

b.  Advanced Primary

c.  Secondary

d.  Secondary with Nutrient Removal

e.  Advanced I

f.  Advanced I with Nutrient Removal

g.  Advanced II (Permit BOD < 10 mg/l)

h.  Advanced II with Nutrient Removal

5. Please mark [yes] or [no] for each treatment process used at your treatment plant.

#### Activated Sludge - Aeration Method

Mechanical ..... a. [yes] [no]

Course Bubble ..... b. [yes] [no]

Fine Bubble ..... c. [yes] [no]

Pure Oxygen ..... d. [yes] [no]

Is automated dissolved oxygen control use to modulate air flow in the aeration process? ..... e. [yes] [no]

#### Fixed Film

Rotating Biological Contactor ..... f. [yes] [no]

Trickling Filter ..... g. [yes] [no]

#### Nutrient Removal

Biological Nitrification ..... h. [yes] [no]

Biological Denitrification ..... i. [yes] [no]

Biological Phosphorus Removal...j. [yes] [no]

#### Disinfection

Chemical ..... k. [yes] [no]

Ultraviolet (UV) ..... l. [yes] [no]

#### Sludge Treatment

Thickening ..... m. [yes] [no]

Dewatering ..... n. [yes] [no]

#### Sludge Digestion

Aerobic ..... o. [yes] [no]

Anerobic ..... p. [yes] [no]

#### Sludge Use

Composting ..... q. [yes] [no]

Land Application ..... r. [yes] [no]

Incineration ..... s. [yes] [no]

Land Fill ..... t. [yes] [no]



**Plant Loading**

6a. What was the average daily biosolids production in 2004? .....(dry tons per day)\_\_\_\_\_

6b. Does the plant send biosolids to another plant for processing? .....[yes] [no]

6c. Does the plant process biosolids from another plant? .....[yes] [no]

7. What were the average concentration levels of conventional pollutants in 2004?

<i>Concentration (mg/l)</i>	<i>Influent</i>	<i>Effluent</i>
a. Average BOD		
b. Average COD		
c. Average TSS		

**Collection System** (*The collection system data may serve multiple plants, if so, please note in 8e.*)

8a. Do you operate pump stations within your collection system? .....[yes] [no]

8b. What is the total pumping capacity? ..... (million gallons per day - MGD)\_\_\_\_\_

8c. What is the total motor horsepower (excluding backup pumps)? .....(hp)\_\_\_\_\_

8d. How many pumps are included above? ..... (No. pumps)\_\_\_\_\_

8e. How many treatment plants are served by the collection system..... (No. plants)\_\_\_\_\_

**Energy Use** (*For a utility with multiple treatment plants, please provide energy data for the treatment plant that corresponds to the plant characteristics noted on page 1.*)

9. Please provide electricity use and cost for the collection system and treatment plant in 2004.

<i>Electricity</i>	<i>Use (kWh)</i>	<i>Peak Demand (kW)</i>	<i>Total Electricity Cost (\$)</i>
a. Collection			
b. Treatment Plant			
c. Total			

10. Please provide natural gas use and cost for 2004.

<i>Natural Gas</i>	<i>Use (therms)</i>	<i>Total Natural Gas Cost (\$)</i>
a. Total		

11. Total floor area of buildings served by above utilities..... (square feet)\_\_\_\_\_



- 12a. Are any engine driven pumps used? .....[yes] [no]
- 12b. What is the total engine horsepower.....(hp) \_\_\_\_\_
- 12c. What is the engine fuel?..... biogas, natural gas, diesel, other: \_\_\_\_\_
- 13a. Do you purchase other energy? .....[yes] [no]
- 13b. Type of energy source? (propane, oil, etc) .....specify: \_\_\_\_\_
- 13c. Amount of energy used? ..... (specify units: \_\_\_\_\_ ) \_\_\_\_\_
- 13d. Energy cost? .....(\$) \_\_\_\_\_
- 14a. Is digester gas recovered? .....[yes] [no]
- 14b. How much biogas is used? .....(ccf) \_\_\_\_\_
- 15a. Is electricity generated on-site?.....[yes] [no]
- 15b. What is the fuel source?..... biogas, natural gas, or other: \_\_\_\_\_
- 15c. What was the annual electricity production in 2004? .....(kWh) \_\_\_\_\_
16. Does someone in operations regularly (monthly/quarterly) review the utility energy bills? ...[yes] [no]
17. Were there any extraordinary events in 2004 that impacted energy use or plant loading? .....[yes] [no]
18. Please feel free to make any additional comments on utility energy use, plant loading or system characteristics below:



Esta versión forma parte de la Biblioteca Virtual de la **Comunidad de Madrid** y las condiciones de su distribución y difusión se encuentran amparadas por el marco legal de la misma.

[www.madrid.org/publicamadrid](http://www.madrid.org/publicamadrid)





FUNDACIÓN CANAL  
Canal de Isabel II



[fundacioncanal.com](http://fundacioncanal.com)



Mateo Inurria, 2. 28036 Madrid

Este documento es una obra de arte y no debe ser reproducido o distribuido sin el consentimiento expreso de la Fundación Canal de Isabel II. La reproducción o distribución de este documento sin el consentimiento expreso de la Fundación Canal de Isabel II puede constituir un delito de falsedad documental y de daños a la propiedad intelectual. La Fundación Canal de Isabel II no se hace responsable de los errores o omisiones que puedan contenerse en este documento. La Fundación Canal de Isabel II se reserva todos los derechos que no estén expresamente expresados en este documento. La Fundación Canal de Isabel II no se hace responsable de los daños o perjuicios que puedan derivarse del uso de este documento. La Fundación Canal de Isabel II se reserva todos los derechos que no estén expresamente expresados en este documento.

Fundación Canal de Isabel II. Calle Mateo Inurria, 2. 28036 Madrid. Tel: 91 547 40 00. Fax: 91 547 40 01. Email: [info@fundacioncanal.com](mailto:info@fundacioncanal.com)

