



universidad
de león



Facultad de Ciencias
Biológicas y Ambientales
Universidad de León

Cambios en las estaciones depuradoras de aguas residuales

Changes in wastewater treatment plants

Eva Cabal Villanueva

Ciencias ambientales

Junio 2020

DA CABAL VALLANCUA

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	6
3. BIORREFINERÍAS Y REFINERÍAS TRADICIONALES	7
4. PRODUCTOS RECUPERABLES EN DEPURADORAS TRANSFORMADAS EN BIORREFINERIAS	9
4.1 LODOS	9
4.1.1 Producción de biogás	10
4.1.2 Bioplásticos:	13
4.1.3 Fertilizantes:	14
4.2 AGUA	18
5. SITUACIÓN ACTUAL EN ESPAÑA	21
5.1 EJEMPLOS DE MODIFICACIONES DE PROCESOS EN PLANTAS EDAR O PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN.	22
6. CONCLUSIÓN	25
7. REFERENCIAS	26

Resumen:

En las estaciones depuradoras de aguas se lleva a cabo el tratamiento de las aguas residuales a través de diferentes procesos, con el fin de garantizar unos niveles de salubridad y contaminación óptimos previos a su vertido o reutilización. Este proceso de depuración al que son sometidas las aguas residuales, lleva relacionado la generación de lodos que, lejos de ser un inconveniente, gracias a las investigaciones y estudios, son una fuente de recursos muy amplia y versátil que permite una revalorización de materias previamente catalogadas como residuos, favoreciendo la economía circular y transformando las estaciones depuradoras en biorrefinerías. En el presente trabajo se realiza una comparativa y caracterización de las refinerías tradicionales y las biorrefinerías, se describen los procesos de obtención de biogás, fertilizantes o bioplásticos a partir de la estabilización y gestión de los lodos de depuradora, así como la evolución de su implementación en las plantas a nivel nacional y varios ejemplos de proyectos en estudio o funcionamiento.

Abstract:

In wastewater treatment plants, the treatment is carried out through different processes, in order to ensure health and contamination optimal levels prior to drain this water or reuse it. This process of recovery to which wastewater is subjected, relates the generation of sludge that, far from being an inconvenience, thanks to research and studies, is a productive and versatile resource base that allows a revaluation of materials previously classified as waste, encouraging the circular economy and transforming the treatment stations into biorefinery. In this study is carried out a comparison and characterization of traditional refineries and biorefineries, the different processes of obtaining biogas, fertilizers or bioplastics from the stabilization and management of sewage sludge are described, as well as the evolution of their implementation in plants at national level and various examples of projects under study or operating.

Palabras clave: Aguas residuales, biogás, biorrefinería, fertilizante, lodos, polihidroxicanoato.

Keywords: Biogas, biorefinery, polyhydroxyalkanoates, sludge, wastewater, fertiliser.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la generación de residuos es un problema a nivel global de gran relevancia. Para comenzar a tratar la problemática y entender de qué se trata, se ha de definir residuo según aparece en el artículo 3, punto 1, de la Directiva 2008/98/CE como “cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención o la obligación de desprenderse”. Cuando dicho poseedor se desprende del residuo, si se lleva a cabo de la manera correcta, comienza una nueva etapa para él, la de su gestión como residuo. Dicho proceso supone, evidentemente, un gasto energético y material importante, entre otros. De esta manera, la propia gestión de los residuos, para evitar mayores problemas, genera un impacto ambiental, ya que, por ejemplo, en una planta de gestión de aguas o de residuos como los vertederos, aparecen problemas colaterales como la formación de lixiviados y su infiltración en el suelo y aguas subterráneas o el gasto energético para alimentar dicha planta de tratamientos, dependiendo de qué tipo de residuo se trata.

Del mismo modo el agua también puede resultar contaminada por residuos, y como elemento fundamental para la vida y equilibrio ecológico se trata de una problemática muy importante, por lo tanto y según el Real Decreto-ley 11/1995 de 28 de diciembre, dependiendo de la naturaleza de estos residuos y de su procedencia se puede hablar de:

- Aguas residuales domésticas: Las aguas residuales procedentes de zonas de vivienda y de servicios, generadas principalmente por el metabolismo humano y las actividades domésticas.
- Aguas residuales industriales: Todas las aguas residuales vertidas desde locales utilizados para cualquier actividad comercial o industrial, que no sean aguas residuales domésticas ni aguas de escorrentía pluvial.
- Aguas de escorrentía pluvial: Todas aquellas aguas procedentes de las precipitaciones sobre una cuenca urbana, poseen, por lo tanto, carácter intermitente. (Delgadillo et al., 2010)
- Aguas residuales urbanas: Las aguas residuales domésticas o la mezcla de éstas con aguas residuales industriales o con aguas de escorrentía pluvial.

Las aguas residuales domésticas son aquellas generadas en los hogares, en instalaciones comerciales, públicas y derivados. Se encuentran principalmente compuestas por aguas fecales, de lavado y limpieza. Como principales contaminantes contienen gérmenes, materia orgánica, sólidos, nitrógeno, fósforo y otros en unas proporciones mucho más bajas.

Las aguas residuales industriales proceden de la actividad industrial. El sector industrial es muy amplio y variado, por consiguiente sus aguas contaminadas también lo son, algunos ejemplos de aguas pueden ser: aguas de proceso, de limpieza, asimilables a domésticas, de refrigeración o las de escorrentía de las propias zonas industriales y sus alrededores.

Las aguas residuales urbanas son aquellas que transitan por el alcantarillado de los núcleos urbanos, son la suma de las residuales domésticas, residuales industriales con una carga contaminante baja y escorrentía pluvial. La problemática aparece cuando todas estas aguas cargadas de residuos y contaminantes no son tratadas y pueden llegar a generar grandes problemas a nivel ambiental. (Delgadillo et al., 2010)

En la actualidad para tratar dichas aguas contaminadas se hace uso de unas plantas conocidas como EDAR, acrónimo de estación depuradora de aguas residuales, en ellas se producen una serie de procesos de eliminación y transformación de las sustancias contaminantes, que se encuentran presentes en las aguas de desecho, provenientes de todos los procesos mencionados anteriormente, para finalmente darle un nuevo uso o reintroducirla en los cauces sin producir daños. (Alonso Herbosa, A., 2011)

Es esencial conocer el procedimiento convencional de una EDAR (Figura 1), y para ello se clasifican en cuatro fases principales, donde normalmente las aguas industriales suelen tratarse con los procesos fisicoquímicos y las domésticas por los biológicos. Estos procesos biológicos son una fiel reproducción de la autodepuración en la naturaleza. (Vilanova *et al.*, 2017)

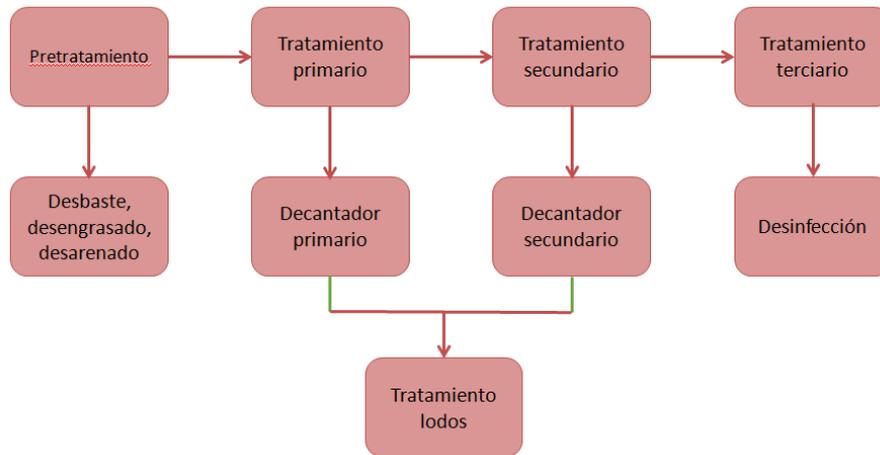


Figura 1. Esquema etapas de tratamiento de aguas residuales. FUENTE: elaboración propia.

- **Pretratamiento:** Se trata de procesos físicos y mecánicos cuya finalidad es separar el agua residual de ciertos materiales que por su tamaño o naturaleza dificultarían los posteriores procesos.
- **Tratamientos primarios:** procesos fisicoquímicos con el fin de eliminar sólidos en suspensión, metales pesados, fósforo y demás contaminantes insolubles. Se produce la eliminación parcial de la demanda biológica de oxígeno preparando así el agua para el tratamiento secundario. Procesos: coagulación-floculación, sedimentación primaria y neutralización.
- **Tratamientos secundarios:** también conocidos como biológicos, pueden ser aerobios (presencia de oxígeno) o anaerobios (en ausencia de oxígeno), siendo estos últimos utilizados para aquellos efluentes domésticos o industriales con cargas altas de materia orgánica. Su fin se basa en la eliminación de los sólidos coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica biodegradable.

- Tratamientos terciarios: tratan de eliminar la materia orgánica restante y otras sustancias como pueden ser los sulfatos, fosfatos, algunos metales, complejos orgánicos sintéticos que no son biodegradables, etc. Este tratamiento además de lograr una disminución de sólidos en suspensión y materia orgánica residual, lleva a cabo la eliminación de agentes patógenos, disminuyendo los coliformes.

Como se ha visto, la actual generación de residuos no se limita únicamente a la acumulación en vertederos, es una cuestión mucho más extendida. La propia gestión del agua genera residuos que atendiendo a sus características pueden ser considerados materiales aptos para su recuperación, valoración y aprovechamiento. Se trata de darle la vuelta a la situación, y del problema de la generación o extracción de ciertos elementos de las aguas en las depuradoras llegar al punto por el que se vuelva rentable esta recuperación. Este es un proceso que se ve muy potenciado por la entrada en vigor de la Directiva 2008/98/CE (Comisión Europea, 2008), donde se definen los objetivos cuantitativos específicos para la reducción de los residuos gracias a la prevención, reutilización, reciclado, valorización del material y energía y la eliminación de residuos.

Como se ha comentado, una de las opciones que se presenta para alcanzar estos objetivos es la valorización de los residuos obtenidos o producidos, según esta Directiva “la valorización es cualquier operación cuyo resultado principal sea que el residuo sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales que de otro modo se habrían utilizado para cumplir una función particular”, (Patermann y Aguilar, 2018).

La valorización de los residuos radica en dar valor a algo que anteriormente era desechado, algo absolutamente relacionado con la bioeconomía, que no es más que una corriente económica que desafía a las economías tradicionales revisando las relaciones entre el hombre y la naturaleza y exige un modelo social más justo con el medio ambiente, utilizando recursos naturales o residuos como base para la producción de alimentos, bioenergía y otros productos sostenibles. (Le Clanche y Folliard, 2011).

Todo esto nos lleva a ver que los residuos que surgen del tratamiento de las aguas, entre otros, son una fuente importante de recursos, que, en muchos casos, pueden ser recirculados a la propia planta. Por ello ha aparecido el término biorrefinería, que según El Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) "la biorrefinería es el procesamiento sinérgico sostenible de la biomasa en un espectro de ingredientes comercializables de alimentos y piensos, productos (productos químicos, materiales) y energía (combustibles, electricidad, calor)" (IDAE, 2011).

La información disponible sobre el estado de la valorización de residuos actual en España refleja que solo el 10% se valoriza energéticamente y el principal sistema de gestión de los residuos continúa siendo la eliminación en vertederos, donde se envía el 60% de los residuos urbanos generados (IDAE, 2011). En el documento borrador de la Estrategia Española de Economía Circular 2030 (Gobierno de España, 2018), se menciona la propuesta de un plan de Apoyo a la implementación de soluciones que permitan la recuperación de energía y nutrientes en las EDAR. Son necesarios cambios en las instalaciones de depuración actuales para que se puedan enfocar hacia el modelo de economía circular. Estas se van a tener que adaptar incluyendo tecnologías apropiadas para la valorización de los residuos.

2. OBJETIVOS

Hasta hace relativamente poco tiempo se han considerado por parte de técnicos y organismos públicos a las estaciones depuradoras como generadoras de contaminantes, alejándose completamente de las posibilidades que ofrecen como biorrefinerías y todos los beneficios que con ello ofrecen al medio ambiente, minimizando daños y evitando enviar al vertedero la máxima cantidad de residuos posibles para promover la economía circular. (Pastor et al., 2017).

Por lo tanto en el presente trabajo se han planteado los siguientes objetivos con el fin de cambiar las perspectivas y seguir arrojando luz a todas las posibilidades que ofrecen las EDAR:

- Definición del concepto, las principales características y los tipos de biorrefinerías, así como definir y caracterizar a la economía circular.
- Identificación de los principales recursos recuperables a partir de los lodos de una depuradora y el agua depurada.
- Breve descriptiva de la situación actual. Identificación de los principales proyectos o plantas en funcionamiento y sus modificaciones en España.

3. BIORREFINERÍAS Y REFINERÍAS TRADICIONALES.

Las biorrefinerías transforman de un modo sostenible biomasa en un amplio abanico de productos ya conocidos o bien innovadores basándose en la economía circular. Para entender el proceso se debe de entender que la biomasa es, según la Directiva 2009/28/CE, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables: “la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal), de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales.”.

Actualmente la biomasa incluye al conjunto de productos energéticos y materias primas renovables con origen en la materia orgánica, excluyendo de esta manera los combustibles fósiles o todos aquellos productos orgánicos derivados de ellos, a pesar de sus lejanos orígenes biológicos. Esta biomasa es utilizada por tanto como materia prima en las biorrefinerías para producir de una manera más sostenible y “limpia” energía o biocombustibles, dándole una segunda vida a antiguos productos de desecho.

A grandes rasgos, las biorrefinerías se dividen en dos tipos (Suschem, 2017):

- Obtención de energía: Orientada hacia la producción de energía, tanto en forma de calor como electricidad, y biocombustibles. Se considera tanto la utilización en la propia planta como su futura venta.
- Obtención de productos: Orientada hacia la producción de materiales, alimentos, productos químicos o piensos.

En la tabla 1, se presentan las principales diferencias existentes entre las refinerías tradicionales y las biorrefinerías, en cuanto a las materias primas utilizadas, los tipos de procesos y los productos intermedios generados y desechos. Recopilado por el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales Tecnológicas (CIEMAT, 2016)

A grandes rasgos, en las biorrefinerías a partir de varios procesos y diferentes tecnologías se transforma la biomasa como materia prima principal generando energía, biocombustibles y productos de forma sostenible.

Una planta de tratamiento de aguas residuales sería una biorrefinería del tipo: desechos industriales y municipales, ya que utiliza todos esos tipos de desechos para producir metano, hidrogeno, combustibles, energía, químicos y materiales. (Naik *et al.*, 2010)

Tabla 1. Comparación de refinerías y biorrefinerías. FUENTE: CIEMAT, 2016

	Refinería	Biorrefinería
Materia prima	Relativamente homogénea	Heterogénea (carbohidratos, ligninas, proteínas, aceites extractivos, cenizas). Una gran parte de los componentes en forma polimérica (celulosa, almidón, proteínas, lignina).
	Bajo contenido en oxígeno.	Alto contenido en oxígeno
	El peso del producto generalmente aumenta con el proceso	El peso del producto generalmente disminuye con el proceso
	Alto contenido en azufre	Bajo contenido en azufre
Composición de los componentes elementales	Etileno, propileno, metano, benceno, tolueno, xileno, isómeros.	Glucosa, xilosa, ácidos grasos.
Procesos de conversión	Casi exclusivamente procesos químicos.	Combinación de procesos químicos y biológicos.
	Craqueo por vapor, reformado catalítico.	Pequeño rango de procesos químicos de conversión.
	Amplio rango de conversiones químicas.	Deshidratación, hidrogenación, fermentación.
Productos intermedios a escala comercial	Muchos	Pocos pero aumentando: etanol, butanol, furfural, biodiesel, ácido láctico, etc.

4. PRODUCTOS RECUPERABLES EN DEPURADORAS TRANSFORMADAS EN BIORREFINERIAS.

El modelo económico actual y la situación del planeta exigen que las aguas residuales sean consideradas como un recurso renovable a través del cual se pueda obtener agua regenerada, materiales como pueden ser fertilizantes o bioplásticos y energía útil por medio de los tratamientos de lodos, (Guest et al., 2009) Los productos resultantes tienen cabida en el ciclo económico o productivo actual, incluyendo la economía energética debido a la producción de biocombustible.

Se incluirá en este apartado los productos clave obtenidos, cómo y dónde se lleva a cabo su recuperación y su importancia.

4.1 Lodos

En una EDAR es esencial el tratamiento de los lodos producidos en los procesos de depuración del agua residual en los tratamientos primarios y secundarios, con el fin de obtener un producto que sea económica y/o ambientalmente rentable. (González, 2015)

Los objetivos de estos procesos de tratamiento de lodos son principalmente disminuir su contenido en agua y materia orgánica y estabilizarlos para su reutilización o evacuación final, así como llegar a alcanzar objetivos como la producción de: Biogás, biofertilizantes y bioplásticos.

Por norma general la línea de lodos para el aprovechamiento tiene los siguientes tratamientos (Cabildo Insular de Tenerife, 2017):

- **Espesado:** En el comienzo de la línea de fangos se aumenta la concentración del fango que se ha extraído de los decantadores primarios y secundarios, reduciendo el volumen a tratar en las unidades de estabilización.
- **Digestión anaerobia:** Para la estabilización, los fangos son introducidos en grandes depósitos donde las bacterias anaerobias descomponen la materia orgánica que contienen los lodos. Sin oxígeno, y gracias a un grupo de bacterias específicas, se produce, se representa en la Figura 2: biogás (CH_4 , CO_2 , H_2 , H_2S) y digestato material sólido/líquido estabilizado.

- Deshidratación: Cuando los fangos están estabilizados, se elimina parte del agua que contienen a través de un proceso mecánico.
- Secado térmico: La otra parte del agua que no se ha podido eliminar mecánicamente es extraída en los secadores térmicos, donde el fango pasa a ser un producto seco granular llamado digestato; se trata de una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, entre otros) que, si reúne las características adecuadas, puede ser utilizado como fertilizante en agricultura
- Cogeneración: En esta unidad, el biogás producido se aprovecha para obtener electricidad y calor para autoconsumo o posible venta.

A partir del tratamiento en la línea de lodos se pueden generar gran cantidad de productos que con o sin tratamientos posteriores se pueden utilizar como materias primas en los ciclos productivos o como fuentes de energía.

4.1.1 Producción de biogás

Durante el proceso de digestión anaerobia (Figura 3), se diferencian 4 etapas principales en las que intervienen diversas poblaciones de bacterias.

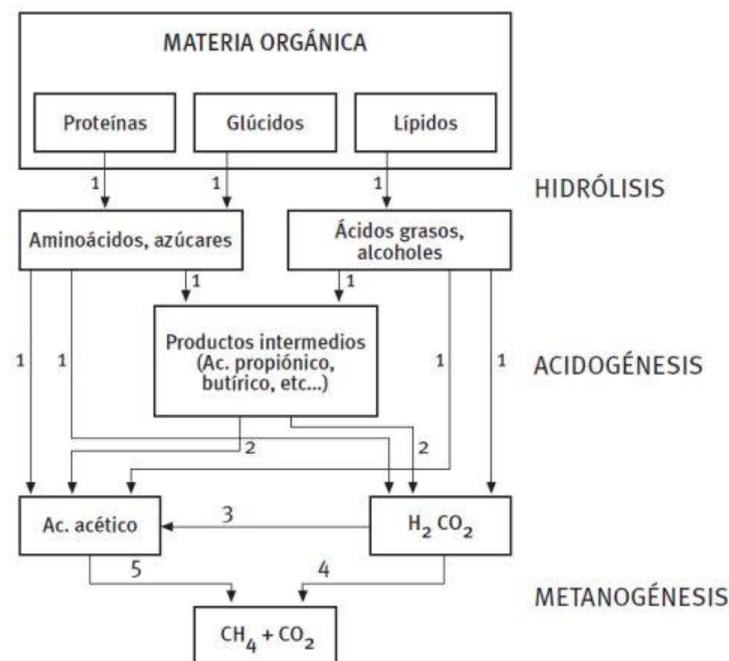


Figura 3. Fases de la digestión anaerobia y poblaciones de microorganismos. FUENTE: IDAE (2011b)

El biogás contiene un porcentaje elevado de metano, (alrededor del 50-70%), por lo que es susceptible de un aprovechamiento energético mediante su combustión en motores, en turbinas o en calderas, tanto sólo como mezclado con otro combustible. (Martín et al.2014)

En cuanto a medidas de optimización para la obtención de biogás, están muy marcadas por la velocidad, pudiendo obtener tiempos de procesos de días o semanas dependiendo de la velocidad de la etapa más lenta, la cual depende de la composición de cada residuo. Por lo tanto a nivel general los parámetros ambientales que deben de mantenerse para asegurar el proceso son (Sanmartín, 2010):

- pH cercano a 7 (neutral) debido a las bacterias metanogénicas.
- Alcalinidad, superior a 1,5 g/l CaCO₃ para evitar la acidificación.
- Potencial redox, con valores recomendables inferiores a -350 mV.
- Nutrientes suficientes que permitan el crecimiento de los microorganismos.
- Mínima concentración de tóxicos, inhibidores y concentración en sólidos ya que según aumenta, disminuye la movilidad de las bacterias metanogénicas en el substrato.

El biogás generado puede ser valorizado de múltiples formas, tal y como se muestra en la Figura 4:

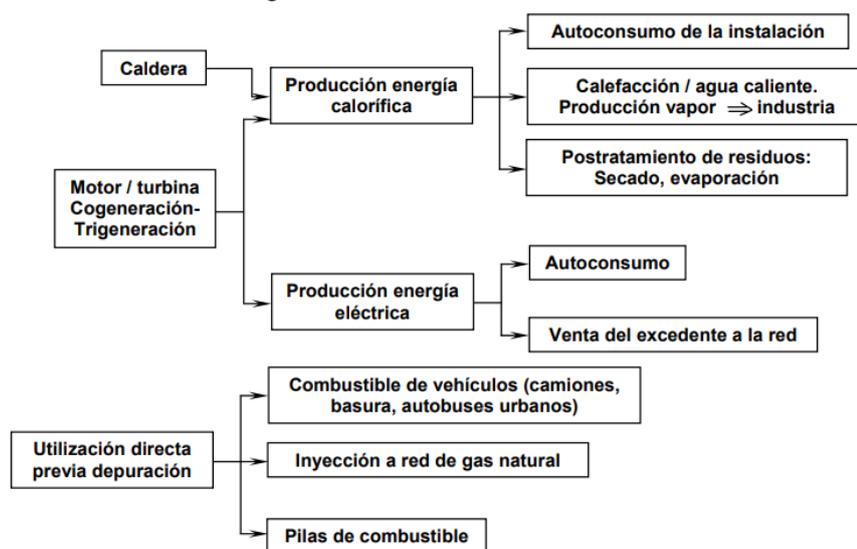


Figura 4. Usos del biogás. FUENTE: Montes, 2008.

Se trata de un proceso con ventajas y desventajas, gracias a la tabla 2 se observa cómo es uno de los procesos más idóneos para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero ya que puede ser un sustitutivo de los combustibles fósiles y se minimizan las emisiones incontroladas de CH₄ y de CO₂.

Tabla 2. Ventajas y desventajas en la producción de biogás en una EDAR. FUENTE: Oropeza, 2006 y Sanmartín, 2010.

Ventajas	Desventajas
Disminución de emisiones de efecto invernadero	Efluentes con alto contenido en nutrientes
Disminución de la dependencia de las energías fósiles	Imperativo post-tratamiento para el control de nutrientes
Reducción y valorización de los residuos generados a nivel municipal	La baja velocidad de crecimiento de las bacterias anaerobias es un limitante del proceso
Disminución de la cantidad de microorganismos causantes de enfermedades mediante la estabilización de los lodos	-

Cabe destacar que es un proceso que no modifica el contenido de nutrientes, siendo necesario un post-tratamiento, ya que, genera un efluente final rico en nitrógeno (en su mayoría en forma amoniacal) y fósforo, además, uno de los principales limitantes del proceso, es la velocidad de crecimiento lenta de las bacterias anaerobias, lo que supone elevados tiempos de retención celular que incrementan el volumen necesario de los digestores.

Entre las propuestas para poder cumplir los objetivos europeos de descarbonización e impulsar la economía circular y la valorización de los residuos, se encuentra la producción de biometano. Para su obtención, el biogás se puede someter a tratamientos de enriquecimiento o “Upgrading”. Se trata de procesos de limpieza, que incluyen la eliminación del CO₂ y otros compuestos que permiten que adquiera características similares al Gas Natural y se pueda plantear su inyección en la red de gas o su uso como combustible en vehículos.

4.1.2 Bioplásticos:

Se trata de otro producto que se puede obtener con el tratamiento de los lodos de una EDAR. En la constante y necesaria búsqueda de materiales alternativos al plástico convencional, aparece la opción de recuperar compuestos de interés presentes en los lodos que se pueden aprovechar como un biomaterial. Calero, (2015) estudió los bioplásticos formados por polihidroxicanoatos (PHAS). Se definen como polímeros producidos naturalmente por diferentes tipos de bacterias que los utilizan como reservas naturales de carbono y energía. El más abundante PHAS encontrado es el homopolímero poli (3-hidroxi-butirato) (PHB). Los PHAS han llamado el interés como bioplástico debido a que estos exhiben propiedades termoplásticas y elastómeras, no son tóxicos, son biocompatibles, son obtenidos de reservas renovables y son biodegradables.

La estructura química de los PHAS se representa a continuación en la Figura 5:

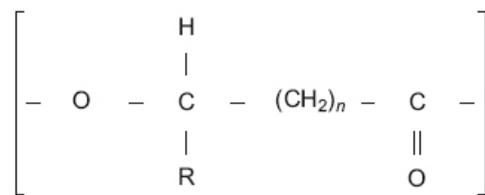


Figura 5. Estructura química del Polihidroxicanoato (PHA). FUENTE: González García et al., 2013.

Debido al alto coste económico que conllevan los cultivos puros, actualmente se está tendiendo al empleo y estudio de cultivos mixtos, procedentes en su mayoría de estaciones depuradoras de aguas residuales. Para que las bacterias de los lodos almacenen PHA en su interior de manera eficiente hay que atender a su sustrato, pH, temperatura y ciclos de alimentación y reposo. (Calero, 2015)

En cuanto al sustrato, el idóneo son los Ácidos grasos volátiles (AGV) que se producen en las primeras fases de fermentación de los procesos de digestión anaerobia de diferentes carbohidratos. Estos, se pueden obtener a partir del tratamiento de efluentes líquidos residuales como el suero lácteo o aguas residuales de la industria papelera (Fonseca y Sánchez, 2019). Una de las posibles estrategias para favorecer la recuperación de la biomasa acumuladora de PHA, es el empleo de reactores en serie. En estos sistemas, se diferencia una fase previa de fermentación acidogénica. (Gherghel et al. 2019)

A continuación, a través de una dinámica de alimentación y reposo (Feast and Famine), se procede a la selección de aquellas bacterias con mayor capacidad de almacenamiento de PHA utilizando los AGV. En la fase de alimentación, los microorganismos se alimentan de AGV como fuente de carbono y los transforman en reservas de PHA. En la fase de reposo, debido a la carencia de AGV, utilizan las reservas de PHA para alimentación y crecimiento. (Fonseca y Sánchez, 2019). La biomasa con el PHA almacenado es recuperada, y mediante un proceso de extracción con disolventes orgánicos o reactivos inorgánicos, se obtiene el PHA. (Mata y Dosta, 2019)

El PHA presenta características físicas similares a los plásticos derivados del petróleo como la densidad, fuerza de tensión o elongación entre otros, con la ventaja de la biodegradabilidad. Como desventaja principal se encuentra el todavía elevado coste de producción por lo que se es necesario continuar estudiando y trabajando en opciones que permitan economizar la recuperación del PHA (Alzate Maríán et al. 2015).

4.1.3 Fertilizantes:

A través del proceso del secado térmico durante el tratamiento tradicional de los lodos se pueden obtener, como bien se ha señalado anteriormente, fertilizantes gracias a la formación de un digestato rico en minerales tras la digestión anaerobia.

Según Pérez (2017), un fertilizante se trata de cualquier sustancia orgánica o inorgánica, natural o sintética, que proporciona a las plantas elementos nutritivos indispensables para su correcto desarrollo. Deben ser solubles en el agua contenida en el suelo para que sean asimilables por ellas y en cantidades adecuadas de acuerdo con la demanda del cultivo.

El nitrógeno es el elemento más abundante en el aire que, junto al fósforo, constituyen los nutrientes naturales más abundantes presentes en los ecosistemas acuáticos; siendo la base para el crecimiento de algas y plantas que servirán de alimento y refugio a muchos otros organismos si aparecen en unas concentraciones adecuadas, si las proporciones aumentan dan lugar a la eutrofización de las aguas, que aparece definida en La Directiva 91/271/CEE del Consejo de las Comunidades Europeas, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas como “el aumento de nutrientes en el agua, especialmente de los compuestos de nitrógeno y/o fósforo, que provoca un crecimiento acelerado de algas y especies vegetales superiores, con el

resultado de trastornos no deseados en el equilibrio entre organismos presentes en el agua y en la calidad del agua a la que afecta”.

Además del objetivo principal de eliminación de materia orgánica que persiguen los procesos de depuración de las aguas, la disminución de los problemas de eutrofización, en gran parte de las aguas superficiales y marítimas, está cobrando gran importancia, por lo tanto, la recuperación de nutrientes es en la actualidad esencial para favorecer su introducción al ciclo productivo de forma sostenible y por consiguiente evitar problemas ambientales derivados. (Pérez, 2017)

En la Figura 6, según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (FAO, 2015), se muestra la evolución y el aumento anual del consumo de éstos, aumentando por encima de los 200,5 millones de toneladas en 2018, siendo un 25% más que el valor registrado en 2008.

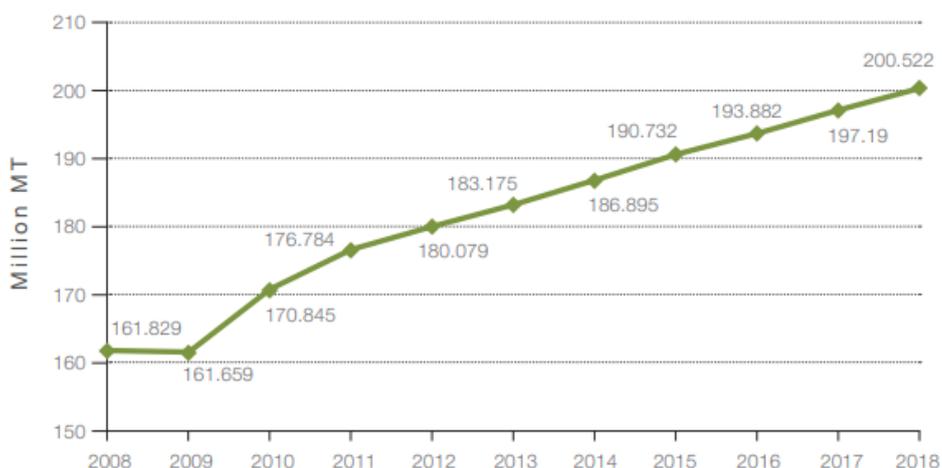


Figura 6. Evolución del consumo de fertilizantes mundial en millones de toneladas. FUENTE: FAO (2015)

En términos más actuales, en España, en 2017 se han consumido, en cuanto a nutrientes 5 millones de toneladas, diferenciándose: 1 millón de toneladas de nitrógeno, 436 mil toneladas de anhídrido fosfórico y 388 mil toneladas de óxido de potasio. Con respecto al 2016 son cifras algo superiores, ya que ese año se produjo un retroceso, sin embargo son inferiores a las de 2015.

En la Figura 7 aparece representada la evolución en el consumo de fertilizantes de 1998 a 2017 en miles de toneladas. (Fertiberia, 2018)

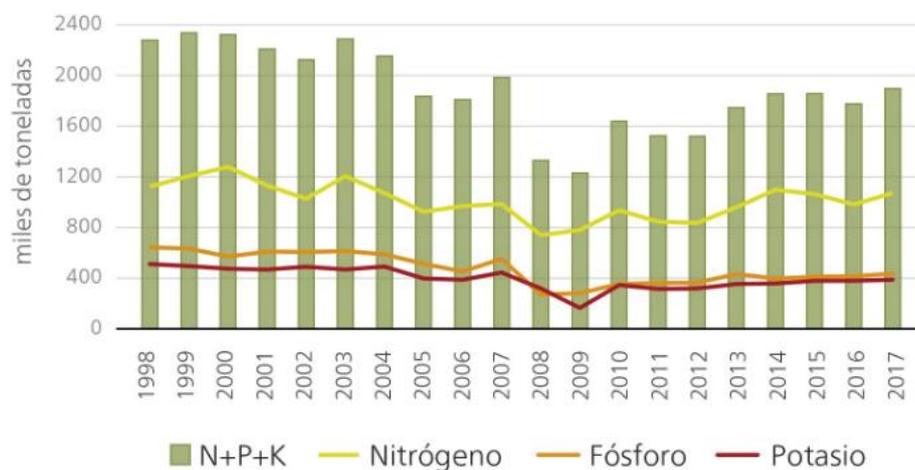


Figura 7. Evolución del consumo de fertilizantes en España en miles de toneladas. FUENTE: Fertiberia (2018)

La producción de nitrógeno para su uso en agricultura lleva relacionado un elevado consumo energético y una presión antropogénica sobre su ciclo biogeoquímico muy negativo para el medio ambiente, por otro lado, el fósforo es un recurso natural no renovable, por lo que su extracción reduce las reservas de este macronutriente. (Batstone et al., 2015). Conforme va aumentando la demanda de fertilizante y por consiguiente continúan los métodos tradicionales de obtención, estos perjuicios para el medio se perpetúan.

Del digestato se pueden obtener nutrientes clasificados como macronutrientes, ya que las especies vegetales los necesitan en cantidades elevadas y se consideran a su vez como nutrientes principales (nitrógeno N, fósforo P y potasio K). Estos nutrientes son absorbidos por la planta en forma de NO_3^- , NH_4^+ , H_2PO_4 , K^+ . Es esencial para asegurar la buena calidad del producto final que el digerido esté correctamente separado ya que puede contener productos tóxicos o impurezas físicas que disminuyan su calidad o entorpezcan el proceso. (Pérez, 2017)

La valorización agrícola del digestato tiene dos direcciones (Pérez, 2017):

- Empleo directo del digerido bruto como fertilizante líquido, proceso conocido como fertirrigación, donde se riega y fertiliza al mismo tiempo a través del sistema de riego, durante este proceso se debe ser riguroso en la verificación del cumplimiento de los requisitos establecidos para asegurar la calidad y el buen desarrollo de los cultivos fertirrigados, como por ejemplo, no tener concentraciones tóxicas de sales y metales pesados o asegurar su degradación dentro de un período adecuado para evitar que interfiera en la cadena alimenticia animal y humana. (Nacci, 1986)
- Separar el digerido bruto para optimizar el aprovechamiento de sus propiedades fertilizantes y optar por la posibilidad a mayores de recuperar el fósforo contenido en la fracción líquida a través de la formación de estruvita.

En la Figura 8 aparece representado el proceso de separación del digestato y formación de estruvita:

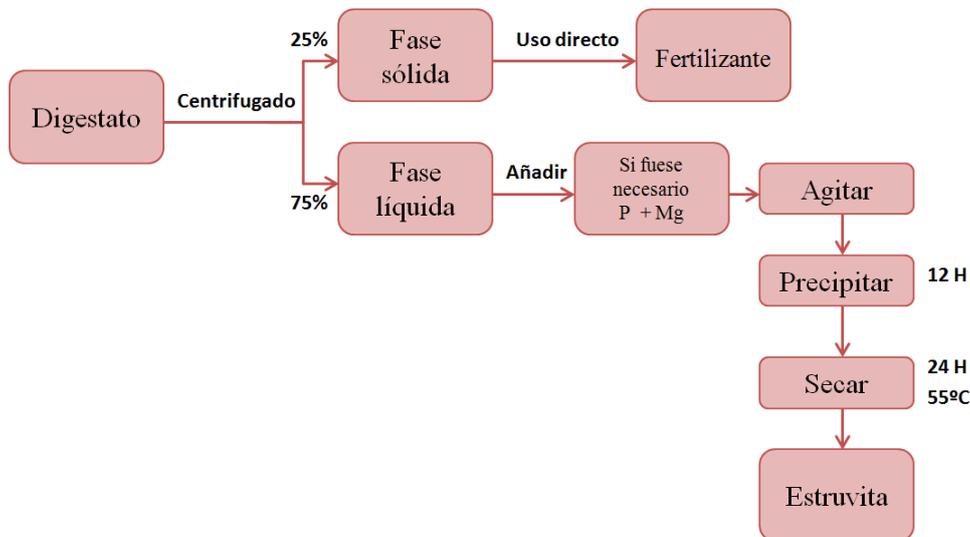


Figura 8. Fases de la separación del digestato. FUENTE: Adaptado de Pérez, 2017.

En esta alternativa el efluente procedente de la digestión anaerobia es sometido a un proceso de centrifugado logrando su separación en dos fases: 75% de fase líquida y 25% de fase sólida que se podría emplear directamente como fertilizante.

Dependiendo de las características que se deseen en la estruvita final, si fuese necesario se añadiría mediante fuentes externas fósforo y magnesio hasta obtener una relación satisfactoria de N/P/Mg. A continuación, se agita para lograr la homogenización para posteriormente precipitar durante 12 horas. Finalmente, se obtiene una fase líquida clarificada que se puede verter de forma directa, y tras un secado de 24 horas a 55°C se obtiene estruvita en forma de precipitado blanco en una riqueza superior al 98%, siendo un fertilizante totalmente viable para los campos de cultivo. (Pérez, 2017)

A través de la tabla 3, se refleja como la obtención de estos productos y su uso como fertilizantes en agricultura tiene varias ventajas e inconvenientes.

Tabla 3. Ventajas y desventajas en la producción de estruvita a partir de la fase líquida del digestato.
FUENTE: Le Corre et al., 2009 y iAgua, 2014.

Ventajas	Desventajas
Aplicación comercial de la cristalización del fósforo	La cristalización debe de ser controlada para evitar obstrucciones
Incremento de la investigación en este campo	Condiciones estables en el proceso: <ul style="list-style-type: none"> • pH entre 8-10 • Grado de saturación de nitrógeno, fósforo magnesio y calcio adecuados
Disminución del costo del tratamiento de las aguas	Puede ser requerida la adicción de potasio para que la estruvita sea de calidad
Disminución del precio de los fertilizantes a base de fósforo	-

4.2 Agua

El agua es el principal producto obtenido tras los procesos de depuración, es uno de los recursos más valiosos y a la vez el líquido más abundante de la Tierra, siendo la base para la vida, interviniendo en la mayor parte de los procesos metabólicos de los seres vivos, o siendo hábitat para muchos otros. La importancia imperante del agua para el ser humano y el aumento de sus necesidades ha generado que su consumo produzca una cantidad cada vez mayor de estas aguas residuales.

En paralelo, las sociedades han incrementado las normativas y leyes para controlar esta contaminación, estas medidas exigen cada vez unos mayores niveles de depuración de las aguas, obligando a mantener las instalaciones y mejorar continuamente todos los procesos a los que se somete el agua y los productos derivados. De esta manera se garantiza el correcto estado del agua de consumo y de su vertido a los cauces tras su tratamiento de depuración, eliminando materia orgánica, patógena y nutrientes.

Acorde a la legislación vigente, el efluente de una EDAR tras el tratamiento secundario es lo bastante seguro como para incorporarlo de nuevo a los cauces fluviales, y si la planta posee tratamiento terciario, este agua puede ser reutilizada por los humanos. La reutilización del agua está cada vez más extendida, ya que es una fuente de agua no convencional que permite incrementar los recursos hídricos disponibles y disminuir la presión sobre otras fuentes de agua más convencionales o tradicionales.

Estos tratamientos son utilizados con dos objetivos:

- Obtener una mejora exigida del efluente depurado previa a la incorporación al cauce receptor.
- Mejorar el efluente con vistas a su reutilización, llamándose en este caso “tratamiento de regeneración” (Ortega de Miguel, 2009).

En la actualidad las EDAR están preparadas tecnológicamente para ofrecer los tratamientos terciarios que posibilitan la reutilización del agua y se estima que ya son reutilizados más de 400 hectómetros cúbicos al año, entre el 7 y el 13% del agua residual tratada. El agua procedente de este tratamiento es normalmente utilizada para el riego de jardines públicos o similares sin causar ningún riesgo a la salud humana. Los tratamientos terciarios, también conocidos como tratamientos avanzados, requieren un influente de cierta calidad, por eso, se ubica tras el tratamiento secundario. (AEDYR, 2019).

Dichos procesos terciarios para la reutilización de las aguas, por norma general, se suelen basar en diferentes combinaciones de las siguientes tecnologías (AEDYR, 2019):

- Físico-Químicos: Coagulación, floculación y decantación.
- Filtración profunda
- Filtración superficial

- Flotación con aire disuelto
- Oxidaciones Avanzadas
- Membranas de filtración
- Desinfección: Radiación Ultravioleta, Cloro y Ozono

En España, los tratamientos terciarios que predominan son los físico-químico, seguidos de una filtración con arena, y finalmente un tratamiento de desinfección por radiación ultravioleta y administración de hipoclorito sódico. Como complemento para asegurar menores niveles de turbidez se puede añadir una línea de ultrafiltración (AEDYR, 2019).

Sin embargo, una tecnología que ha ido creciendo en el territorio debido a la búsqueda de la sostenibilidad ambiental, el desarrollo tecnológico y la eficiencia para recuperar agua de calidad son los procesos avanzados de separación por membranas. Son técnicas muy versátiles y fácilmente combinables con otras técnicas para aumentar el rendimiento en las distintas etapas sucesivas, optimizando el rendimiento de la planta. Su finalidad es la separación, concentración y/o purificación de los compuestos deseados procedentes de una disolución o corriente a tratar, convirtiéndose en un proceso cercano a la economía circular, utilizando los vertidos y residuos como recursos o materias primas (Aguasresiduales, 2019).

5. SITUACIÓN ACTUAL EN ESPAÑA

Gracias a los datos facilitados anteriormente, se puede ver cómo el cambio del sistema productivo tiene una plataforma sólida donde basar el crecimiento tecnológico en el tratamiento de aguas residuales con una historia muy longeva a lo largo de todo el mundo (van Loosdrecht y Brdjanovic, 2014). En Europa, el tipo de tratamiento de aguas residuales utilizado en núcleos poblacionales iguales o superiores a 150.000 habitantes, según los datos de la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA) (EEA, 2017), es en un 75,4% tratamiento terciario, expresado como un porcentaje de la carga total de aguas residuales generadas, seguido de un 21,4% tratamientos secundarios. El porcentaje restante lo ocupan los sistemas individuales u otros sistemas apropiados, como las fosas sépticas, se usan donde no está justificado establecer un sistema de recolección, ya sea porque no produciría ningún beneficio ambiental o porque implicaría un costo elevado.

En España, el 27% de las más de 2.000 estaciones depuradoras de aguas residuales están preparadas tecnológicamente para ofrecer los tratamientos terciarios que posibilitan la reutilización del agua y se estima que ya se reutilizan más de 400.000.000 m³ al año (AEDYR, 2019) de los 4.944.207.027 m³ de agua residual tratada para una población en el territorio de 46.549.047 habitantes (Miteco, 2017), tratándose por lo tanto de una tasa de reutilización de aguas depuradas de un 8%. Este porcentaje es significativamente menor que a nivel europeo ya que, hacen falta depuradoras para dar servicio a poblaciones medianas o pequeñas en nuestro territorio, finalizando las infraestructuras de depuración pendientes, comprometidas con el desarrollo de las directivas europeas, (Morcillo, 2014).

La Unión Europea ha establecido una serie de políticas dirigidas hacia una economía sostenible y cuidado del medio ambiente recogidas en la Estrategia Europea 2020 (Comisión Europea, 2010). Además de objetivos como la investigación, el cambio climático o la lucha contra la pobreza, aparecen objetivos relativos al medio ambiente como el uso eficaz de los recursos, uso de fuentes de energía renovables, un modelo económico más sostenible y la modernización del transporte entre otros. En estos objetivos aparecía una bajada de los niveles de emisión de gases de efecto invernadero, un 20% en comparación con los registrados en 1990, así como un aumento del 20% el consumo de fuentes de energía renovables y un 20% en eficacia energética.

En la misma línea de actuación, en el Marco sobre clima y energía para 2030, en toda la UE se contemplan como Objetivos clave para 2030: Al menos un 40% de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (con respecto a 1990), al menos un 32% de cuota de energías renovables y al menos un 32,5% de mejora de la eficiencia energética. (Comisión Europea, 2014)

Según los datos recogidos por el Instituto Nacional de Estadística (INE), en febrero de 2017 las energías renovables han producido un 36,3% del total producido en España, (INE, 2019). Estos datos son esperanzadores, sin embargo, llegar a obtener los resultados establecidos en la Estrategia Europea requiere mucha constancia y una disminución continuada de la dependencia de los combustibles fósiles.

A nivel nacional, el principal aprovechamiento del biogás es la producción de energía eléctrica. En términos de energía eléctrica vertida a la red, la mayor parte del biogás producido tiene su origen en los vertederos de residuos municipales (80-90%), en segundo lugar a través de la digestión anaerobia o codigestión de los residuos agroalimentarios ganaderos o agrícolas y por último aquel que se genera en el proceso de digestión anaerobia de lodos de depuradoras urbanas e industriales. (IDAE, 2011b)

De igual manera, según estudios realizados por Naturgy en colaboración con varias Universidades españolas, se estima que en el año 2020 el potencial energético del biometano obtenido del tratamiento de aguas residuales se correspondería con 0,28 bcm/año. (Retema, 2018)

5.1 Ejemplos de modificaciones de procesos en plantas EDAR o proyectos de investigación.

La transformación de las estaciones depuradoras en biorrefinerías es un proceso que se va extendiendo a pasos lentos y firmes en el panorama nacional. Un ejemplo es la empresa pública gallega Edar Bens S.A, depuradora que trata las aguas residuales de A Coruña, Arteixo, Cambre, Culleredo y Oleiros. Estas instalaciones albergan una Unidad Mixta de Gas Renovable, se trata de un proyecto piloto de Edar Bens S.A, junto con las empresas españolas Naturgy y EnergyLab contando con el apoyo de la Xunta de Galicia y financiado y cofinanciado por la Unión Europea (en el marco del Programa Operativo FEDER Galicia 2014-2020) y la Axencia Galega de Innovación (GAIN) respectivamente. En esta Unidad Mixta se genera biometano a partir del biogás

producido en la depuración de las aguas utilizando una tecnología única en España; una planta de “upgrading” de biometano mediante purificación biológica con bacterias hidrogenotróficas y membranas.

El biometano producido es introducido en el sector comercial y doméstico ya que se inyecta en la red comercial de gas natural y ha hecho posible el funcionamiento, durante 100.000 km de un autobús de línea. El nivel de producción en la planta es tal que, con respecto al gas natural, disminuiría 6.600 toneladas de CO₂ al año. (Bannister, 2019)

A finales de 2019, NEDGIA, la distribuidora de Gas Natural del grupo Naturgy, instaló en la EDAR de Butarque (Madrid) un módulo de producción de biometano purificando el biogás procedente de los residuos de la estación depuradora y otro para inyectar el biometano producido en su red de distribución de gas natural. Se trata de un hito a nivel nacional, al tratarse de la primera vez que se inyecta gas renovable en la red de distribución. (Gasnam, 2019)

Otro ejemplo es la colaboración del grupo de investigación GENOCOV de la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB) con la empresa municipal de depuración de aguas, Aguas de Manresa S.A. que forma parte del proyecto europeo Smart-plant, integrado por 26 socios (empresas y universidades) de 10 países de la UE. En el proyecto, se propone obtener materiales de alta calidad a partir de las aguas residuales, que puedan ser empleados como materias primas en la industria, o bien para otros usos. Se ha realizado la instalación de una planta piloto en la estación depuradora de aguas residuales de Manresa-Sant donde, gracias a una nueva tecnología desarrollada por la UAB llamada "Main-stream SCEPPHAR (Short-Cut Enhanced Phosphorus and PHA Recovery)", se tratan de manera eficiente 10 m³ de aguas residuales urbanas al día, de las que se extrae un 50% del fósforo presente en el agua en forma de estruvita y se recupera parte de la materia orgánica presente en los lodos para ser utilizada como materia prima para producción de precursores de bioplásticos (alrededor del 30% del volumen total de los lodos). (iResiduo, 2017)

Asimismo cabe destacar el proyecto Bioedaria (FACSA, 2019), financiado por la Agència Valenciana de la Innovació/Proyecto BIOEDARIA (INNCAD00/19/061), que cuenta con la colaboración del Centro Tecnológico AINIA para cuestiones técnicas y trabajo de laboratorio. Se trata de una planta piloto depuradora de aguas en Alcoy (Alicante), donde se trabaja en la actualidad y desde 2019, con un plazo de finalización del estudio a finales de 2020, con un conjunto de tecnologías integradas para la valorización de lodos de EDARs, con la finalidad de generar como biopolímeros (PHAs), biogás y biofertilizantes como fosfatos y microalgas, a través de tecnologías punteras como la digestión anaerobia en doble fase, la bioacumulación de PHAs y polifosfatos (Poli-P) y el cultivo de microalgas.

Otros proyectos como Life Methamorphosis para la producción de biogás para vehículos a través de residuos agroindustriales o In-Brief o Anadry para la obtención de biogás y fertilizantes a partir de los lodos de las plantas de aguas residuales urbanas, realizados por consorcios de empresas privadas y organismos públicos, son también ejemplos de compromiso y evolución en el tratamiento de aguas residuales. (AEBIG, 2019)

Gracias a proyectos como el de la planta de Manresa Sant y su financiación, aparecen innovadoras propuestas de proyectos en el panorama nacional y europeo como la aprobación de alrededor de 9 plantas piloto en 5 depuradoras diferentes con el fin de optimizar el proceso de depuración de las aguas, la eficiencia energética, la minimización de la emisión de gases de efecto invernadero y recuperación de recursos con el fin de transformarlos en productos comercializables. “El objetivo global del proyecto es escalar y demostrar soluciones eco-innovadoras para modernizar las estaciones depuradoras de aguas residuales existentes en un entorno real”. (iResiduo, 2017)

Respecto a las posibilidades de reutilización del agua, en la estación depuradora de Gavá-Viladecans, se obtiene agua que se destina al riego agrícola, de parques y jardines urbanos, así como a la recarga de acuíferos o a la limpieza de calles. La cantidad de agua que se ha contabilizado, permite ahorrar 180.000 m³ de agua potable al año que supone el 50% del consumo del municipio. (Fundación COTEC para la Innovación, 2019)

6. CONCLUSIÓN

Las estaciones depuradoras de aguas, son en definitiva, unas biorrefinerías eficientes a nivel técnico y económico y éticas a nivel social y ecológico. Gracias a la obtención de un amplio abanico de opciones como materias primas o energía, entre otras, se ponen de manifiesto así, sus muchos beneficios y ventajas, ya que, la mitigación del calentamiento global es una de las principales prioridades en las políticas energéticas y medioambientales de la Unión Europea.

Gracias a la instalación y el desarrollo de nuevos proyectos y la aplicación de una serie de procesos tecnológicos y apuesta por la innovación, se obtienen los productos deseados valorizables como puede ser biometano, bioplásticos o estruvita, que además de tener utilidad como fertilizante, supone una solución a nivel de mantenimiento de la misma planta. Desde hace varios años, afortunadamente, estas instalaciones son consideradas como sistemas de recuperación de recursos, en lugar de únicamente como instalaciones para la prevenir o evitar la emisión de contaminantes al medio ambiente.

Se puede concluir afirmando que las EDAR son unas biorrefinerías viables y con un futuro muy amplio, pero para ello se deberá seguir innovando en los tratamientos y las tecnologías para abaratar los costes de su implementación.

7. REFERENCIAS

Aguasresiduales.info (2019) “Reciclaje de agua y recuperación de recursos mediante tecnologías de membrana” Disponible en: <https://www.aguasresiduales.info/revista/noticias/reciclaje-de-agua-y-recuperacion-de-recursos-mediante-tecnologias-de-membrana-vhnm> (Accedido: 16 de Junio de 2020).

Alonso Herbosa, A. (2011): *Edar para una población de más de 100.000 habitantes equivalentes*, Trabajo Fin de Grado, Universidad Politécnica de Cataluña, Ingeniería industrial, especialidad en ingeniería química. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/12871> (Accedido: 10 de Marzo 2020).

Alzate Maríán Juan C., Caravelli Alejandro H., Zaritzky Noemí (2015): *Obtención de plásticos biodegradables por microorganismos acumuladores de polihidroxialcanoatos en cultivos mixtos (lodos activados) utilizando efluentes de la industria*. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/47850> (Accedido: 8 de Abril 2020).

Asociación española de biogás (AEBIG) (2019): “*Biogás, balance anual del sector en 2018 y expectativas para 2019*” Disponible en: <https://www.aebig.org/aebig/biogas-balance-anual-del-sector-2018-expectativas-2019/> (Accedido: 21 de mayo de 2020).

Asociación española de desalación y reutilización (AEDyR) (2019): “*Tratamientos terciarios para la reutilización del agua*.” Disponible en: <https://www.aedyr.com/es/blog/tratamientos-terciarios-reutilizacion-agua> (Accedido: 20 de Abril de 2020).

Bannister (2019): “La Unidad Mixta de Gas Renovable de Edar Bens SA se presenta como caso de éxito en la cumbre del clima de Madrid” *Edar Bens*, 3 de diciembre. Disponible en: <https://edarbens.es/la-unidad-mixta-de-gas-renovable-de-edar-bens-sa-se-presenta-como-caso-de-exito-en-la-cumbre-del-clima-de-madrid/> (Accedido: 21 de mayo de 2020).

Batstone, D.J., Hülsen, T., Mehta, C.M., and Keller, J (2015): “Platforms for energy nutrient recovery from domestic wastewater: A review”, *Chemosphere* 1402-11. (Accedido: 10 de Abril de 2020).

Cabildo Insular de Tenerife. Área de Sostenibilidad, Medio Ambiente y Seguridad (2017) “*Anexo I Estudio nacional e internacional de modelos de gestión de residuos*.” Disponible en: https://www.tenerife.es/planes/PTEOResiduos/adjuntos/Anexo01_Info05.pdf (Accedido: 12 de Junio 2020).

Calero Mendoza, R. (2015): “Obtención de polihidroxialcanoatos (PHA) a partir de cultivos mixtos microbianos usando efluentes ricos en ácidos grasos volátiles como sustrato”, *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 2(1), doi: 10.26423/rctu.v2i1.36.

Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales Tecnológicas (CIEMAT) (2016) “*Curso de bioeconomía: gestión y financiación de proyectos de bioeconomía*” Disponible en: <http://agripa.org/download-file/63823-105861> (Accedido: 28 de Abril de 2020).

Comisión Europea (2010) “*EUROPA 2020 Una estrategia para un crecimiento inteligente, sostenible e integrador*.” Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52010DC2020&from=ES> (Accedido: 5 de Mayo de 2020).

Comisión Europea (2014) “*Un Marco Estratégico en materia de clima y energía para el periodo 2020-2030*” Disponible en: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_es (Accedido 19 de Junio de 2020)

- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. F. y Andrade, M. (2010) *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochabamba: Nelson Antequera Durán. Disponible en: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=1kO2J5aDljQC&oi=fnd&pg=PA1&dq=depuraci%C3%B3n+aguas&ots=Kim3A-xY3m&sig=DFWcX0QHTqmB-1f7_CbMF_6S1y8#v=onepage&q=depuraci%C3%B3n%20aguas&f=false (Accedido: 5 de Marzo de 2020).
- España (1995), “Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas”, Boletín Oficial del Estado, 30 de diciembre de 1995, (312), pp. 37517 a 37519.
- España (1998), “Real Decreto 2116/1998, de 2 de octubre, por el que se modifica el Real Decreto 509/1996, de 15 de Marzo, de desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, donde se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas.”, Boletín Oficial del Estado, 20 de Octubre de 1998, (251), pp. 34635-34636.
- European Environment Agency (EEA) (2017) “Type of waste water treatment in 'big cities' in the EU” Disponible en: https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/type-of-waste-water-treatment#tab-chart_1 (Accedido: 5 de Mayo de 2020).
- European Comission (2014) Proyecto Life Anadry. Disponible en: <http://www.life-anadry.eu/index.php/spanish/> (Accedido 22 de Mayo de 2020).
- European Comission (2014) Proyecto Life In Brief. Disponible en: <http://www.lifeinbrief.eu/25-2/> (Accedido 22 de Mayo de 2020).
- European Comission (2015) Proyecto Life Metamorphosis. Disponible en: <http://www.life-metamorphosis.eu/home> (Accedido 24 de Mayo de 2020).
- FACSA (2019) Bioedaria. Disponible en: <https://www.facsa.com/idi/bioedaria/> (Accedido: 18 de Mayo de 2020).
- Fertiberia (2018): “Consumo de fertilizantes en España-2017”. Disponible en: <https://www.fertiberia.com/es/blog/2018/marzo/consumo-de-fertilizantes-en-espa%C3%B1a-2017/> (Accedido: 30 de Mayo de 2020).
- Fonseca Amaya, L.C., Sanchez Bedoya, M.F. (2019): *Evaluación de la influencia del sustrato principal (ácido acético y ácido acético/melaza) en al selección de cultivo mixto de bacterias acumuladoras de PHA, en un reactor air-lift.*, Trabajo Fin de Grado, Fundación Universidad de América, Ingeniería química. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.11839/7596> (Accedido: 5 de Abril 2020).
- Food and agriculture organization of the United Nations (FAO) (2015). “World fertilizer trends and outlook to 2018”. (Rome: Food and agriculture organization of the United Nations). Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i4324e.pdf> (Accedido: 12 de Abril de 2020).
- Fundación COTEC para la Innovación (2019) “Situación y Evolución de la Economía Circular en España. Informe 2019” Disponible en: <https://cotec.es/media/informe-cotec-economia-circular-2019.pdf> (Accedido 19 de Junio de 2020)
- Gasnam (2019) “Noticias: El Consorcio Europeo ECO-GATE inicia la inyección y distribución de gas renovable en la red de Nedgia” Disponible en: <https://gasnam.es/blog/2019/11/26/el-consorcio-europeo-eco-gate-inicia-inyeccion-gas-renovable-en-la-red-de-nedgia/> (Accedido 19 de Junio de 2020)
- Gherghel, A., Teodosia C., and De Gisib, S. (2019) “A review on wastewater sludge valorisation and its challenges in the context of circular economy”, Journal of cleaner production, 228, pp. 244-263.

Guest, J.S., Skerlos, S.J., Barnard, J.L., Beck, M.B., Daigger, G.T., Hilger, H., Jackson, S.J., Karvazy, K., Kelly, L., Macpherson, L., Mihelcic, J.R., Pramanik, A., Raskin, L., Van Loosdrecht, M.C.M., Yeh, D., Love, N.G. (2009). "A New Planning and Design Paradigm to Achieve Sustainable Resource Recovery from Wastewater." *Environ. Sci. Technol.* 43, pp. 6126–6130. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/es9010515> (Accedido: 25 de Marzo de 2020).

Gobierno de España (2018): España 2030, estrategia española de economía circular. Disponible en : <http://www.prodetur.es/prodetur/AlfrescoFileTransferServlet?action=download&ref=25675460-51d5-487d-8b78-9388f20aa763> (Accedido 8 de Marzo de 2020).

González García, Y., Meza Contreras, J.C., González Reynoso, O., Córdova López, J.A. (2013): "Síntesis y biodegradación de polihidroxialcanoatos: plásticos de origen microbiano." *Revista internacional de contaminación ambiental* 29, pp. 77-115. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v29n1/v29n1a7.pdf> (Accedido: 3 de Abril de 2020).

González Granados, I. (2015): *Generación, caracterización y tratamiento de lodos de EDAR*, Tesis Doctoral, Universidad de Córdoba, Departamento De Química Inorgánica e Ingeniería Química. Disponible en: <https://helvia.uco.es/bitstream/handle/10396/13199/2016000001232.pdf?sequence=3&isAllowed=y> (Accedido: 12 de Marzo 2020).

iAgua, (2014): "Estruvita, el problema que se convirtió en solución" Disponible en: <https://www.iagua.es/blogs/elena-rama/estruvita-el-problema-que-se-convirtio-en-solucion> (Accedido: 29 de Mayo de 2020).

Instituto Nacional de Estadística (INE) (2019) "España en cifras 2019" Disponible en: https://www.ine.es/prodyser/espa_cifras/2019/ (Accedido: 5 de Mayo de 2020).

Instituto para la Diversificación y ahorro de la Energía. IDAE (2011) "Situación y potencial de valorización energética directa de residuos. Estudio técnico per 2011-2020" Disponible en: www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e15_residuos_c3ead071.pdf (Accedido: 30 de Marzo de 2020).

Instituto para la Diversificación y ahorro de la Energía. IDAE (2011b) "Situación y potencial de valorización generación de biogas" Disponible en: https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e16_biogas_db43a675.pdf (Accedido: 8 de Mayo de 2020).

iResiduo (2017) "De depuradora a biorrefinería gracias a una tecnología pionera" Disponible en: <http://agripa.org/download-file/63823-105861> (Accedido: 21 de Mayo de 2020).

Le Clanche, JF., Folliard, G. (2011): *La bio-économie, une critique de l'approche néo-libérale*. Disponible en: <https://tice.agrocampus-ouest.fr/file.php/531/9-Concept - Connaissance - EcoDD-Bioeco - MEP EP.pdf> (Accedido: 1 de Marzo de 2020).

Le Corre, K.S., Valsami-Jones, E., Hobbs, P., and Parsons, S.A. (2009) " Phosphorus recovery from wastewater by struvite crystallization: A review". *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*" pp.433-477 (Accedido: 30 de Marzo de 2020).

Martín, M., Castro, M., Serna, T.R., Gadea, A. (2014): *Iniciativas para el aprovechamiento energético del biogás generado en EDAR*. Disponible en: <http://www.conama2014.conama.org/conama2014/download/files/conama2014/CT%202014/1896711838.pdf> (Accedido: 20 de Marzo de 2020).

- Mata, J. y Dosta, J. (2019) *El proyecto europeo RESURBIS para la valorización de lodos mediante la producción de bioplásticos*. Disponible en: <http://www.ategrus.org/wp-content/uploads/2019/11/3-Ponencia UNIVERSITAT-DE-BARCELONA Joan-Mata.pdf> (Accedido: 24 de Mayo de 2020).
- Miteco (2017) “*Tratamiento de aguas residuales domésticas*” Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/091002-trat-ag-res-domestic_tcm30-429866.pdf (Accedido: 18 de Junio de 2020).
- Montes Carmona, M E. (2008): *Estudio técnico-económico de la digestión anaerobia conjunta de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y lodos de depuradora para la obtención de biogás*. Tesis doctoral. Universidad de Almería, Ingeniería Civil. Disponible en: <http://oa.upm.es/1049/> (Accedido: 20 de Marzo 2020).
- Morcillo, F., (2014): “El reto del cumplimiento de la Directiva Marco Europea en la dotación de infraestructuras de saneamiento en España” *RETEMA* 172, pp. 80-83.
- Nacci, S. (1986): *Fertirrigacion con efluentes procedentes de industrias agrícolas (alpechin y vinazas)*. Disponible en: https://digital.csic.es/bitstream/10261/154276/1/Fertirrigacion_efluentes_industrias_agricolas_CIEBV_1986.pdf (Accedido: 30 de Mayo de 2020).
- Naik, S.N., Goud, V.V., Rout, P.K., Dalai, A.K. (2010): “Production of first and second generation bioenergy: a comprehensive review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, pp. 578-597.
- Oropeza García, N. (2006): “Lodos residuales: estabilización y manejo.”, *Caos conciencia* 1, pp. 51-58. Disponible en: http://dci.uqroo.mx/RevistaCaos/2006_Vol_1/Num_1/NO_Vol_I_21-30_2006.pdf (Accedido: 23 de Marzo de 2020).
- Ortega de Miguel, E., 2009. XXVII Curso sobre tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras (CEDEX). Tema 2: Esquema de una EDAR. Pretratamientos. Tomo I. ISBN: 978-84-7790-504-2. (Accedido: 12 de Mayo de 2020).
- Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea (1991) “ Directiva 91/271 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de Mayo de 1991, por la ue se establece un marco comunitario sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas ”, Diario Oficial de las Comunidades Europeas, Serie L, 30 de Mayo de 1991, (135), pp. 40-52.
- Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea (2008) “ Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas.” Diario Oficial de la Unión Europea, Serie L, 22 de Noviembre de 2008, (312), pp. 3-312.
- Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea (2009) “Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE.”, Diario Oficial de la Unión Europea, Serie L, 5 de Junio de 2009, (140), pp. 16-62.
- Pastor, F.S.E., Baptista, E.T., García, J.L.M., (2017): “Gestión de residuos en las EDAR: nuevas posibilidades” in: XXXIV Jornadas Técnicas de AEAS, 2017. Presented at the XXXIV Jornadas Técnicas de AEAS, Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento, pp. 500–505. (Accedido: 7 de Marzo de 2020)
- Patermann, C., Aguilar, A.. (2018): “The origins of the bioeconomy in the European Union.”, *New Biotechnology, Bioeconomy* 40, pp. 20-24. (Accedido: 15 de Marzo de 2020)

Pérez Mata, C. (2017): *Comparación del efecto fertilizante de productos derivados del digestato obtenido en la digestión anaerobia de residuos de supermercado*, Trabajo Fin de Máster, Universidad de Oviedo, Biotecnología alimentaria. Disponible en: http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/43744/3/TFM_CristinaPerezMata.pdf. (Accedido: 12 de Abril de 2020).

Retema (2018) “El biometano obtenido de los residuos cubriría la demanda de gas natural ciudadana” Disponible en: <https://www.retema.es/noticia/el-biometano-obtenido-de-los-residuos-cubriria-la-demanda-de-gas-natural-ciudadana-vSnBx> (Accedido 19 de Junio de 2020)

Sanmartín Baños, E. (2010): *Simulación de una cogeneración basada en microturbinas de biogás en una e.d.a.r. urbana*, Trabajo Fin de Máster, Universidad Politécnica de Cartagena, Escuela de Ingeniería de Caminos y de Minas. Disponible en: <http://repositorio.upct.es/bitstream/10317/1805/1/pfm179.pdf> (Accedido: 14 de Marzo 2020).

Sustainable Chemistry. (SusChem.) (2017) “Manual de las biorrefinerías en España” Disponible en: http://www.suschem-es.org/docum/pb/2017/publicaciones/Manual_de_Biorrefinerias_en_Espana_feb_2017.pdf (Accedido: 2 de Mayo de 2020).

Van Loosdrecht, M.C.M., and Brdjanovic, D. (2014): “Anticipating the next century of wastewater treatment.” *Science* 344(6191), pp. 1452-1453. (Accedido: 7 de Mayo de 2020)

Vilanova, R., Santín, I., Pedret, C. (2017): “Control y Operación de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales: Modelado y Simulación.”, *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 14, pp. 217-233. (Accedido: 10 de Marzo de 2020)