



FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AMBIENTALES

**ELIMINACIÓN Y RECUPERACIÓN DE
NUTRIENTES DE AGUAS RESIDUALES**

**REMOVAL AND RECOVERY OF
NUTRIENTS FROM WASTEWATER**

Autor: Beatriz Cid Rubio

Tutor: Camino Fernández Rodríguez

GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

Febrero, 2023

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Estaciones depuradoras de aguas residuales	1
1.2 Depuración del agua basada en la economía circular	4
2. OBJETIVOS.....	6
3. METODOLOGÍA.....	6
4. ELIMINACIÓN Y RECUPERACIÓN DE NUTRIENTES EN AGUAS RESIDUALES.....	7
4.1 Eliminación y recuperación del nitrógeno.....	7
4.1.1 Eliminación biológica del nitrógeno.....	8
4.1.2 Desorción o eliminación de aire (air stripping) de amoníaco.....	9
4.1.3 Sistemas bioelectroquímicos.....	10
4.1.4 Métodos basados en intercambio iónico.....	11
4.2 Eliminación y recuperación del fósforo.....	11
4.2.1 Eliminación biológica del fósforo.....	12
4.2.2 Precipitación química.....	12
4.2.3 Cristalización.....	13
4.2.4 Adsorción.....	14
5. EJEMPLOS DE PLANTAS DONDE SE LLEVA A CABO UN PROCESO DE RECUPERACIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO.....	15
5.1 EDAR Sur (Madrid) “Primera planta de recuperación de fósforo en España”.....	15
5.1.1 Descripción del proceso	16
5.1.2 Descripción de la instalación	17
5.1.3 Otros proyectos que utilizan la estruvita	18
5.2 EDAR Arazuri (Pamplona) “Planta de compostaje de lodos”.....	19
5.2.1 Descripción del proceso	21
5.2.2 Descripción de la instalación.....	21
5.2.3 Compost – Arazuri.....	23
5.2.4 Otros ejemplos de plantas de compostaje.....	24
5.2.5 Nuevas tecnologías en plantas de compostaje.....	24
5.3 Otras posibles nuevas tecnologías para la recuperación de nutrientes.....	25
6. CONCLUSIONES.....	26
7. BIBLIOGRAFÍA.....	27

Resumen

El aumento de la población se traduce en un aumento de residuos generados, como son las aguas residuales. Estas poseen una elevada concentración de nutrientes que hay que controlar para que no provoquen futuros problemas en el medio ambiente e incluso en la salud humana. Con la idea de asegurar la calidad del agua surge la necesidad de una recuperación de nutrientes, como son el nitrógeno y el fósforo, para un futuro aprovechamiento dando un paso hacia la economía circular.

En este trabajo se exponen distintos métodos que permiten la eliminación y recuperación de los nutrientes, así como ejemplos de plantas de tratamiento de aguas que los implementan y futuros proyectos que se están estudiando. Viendo que en España se centra principalmente en la recuperación de fósforo para su posterior utilización en la agricultura.

Abstract

Population growth is translated into an increase in generation of wastes such as wastewater. They are mainly composed of high quantity of nutrients that need to be properly treated before its environment disposal to avoid future environmental or human health risks. Therefore, nitrogen and phosphorus recovery methods have recently drawn much attention in order to move towards a sustainable model based on the Circular Economy.

In this work, several nutrients recovery and removal technologies are presented, as well as future projects and examples of real plants that are currently in operation. Current trends in Spain, are mainly focused in phosphorous recovery to be used as fertiliser in agriculture applications.

Palabras clave: Economía circular, eliminación, estación depuradora de aguas residuales (EDAR), fósforo, nitrógeno y recuperación

Keywords: Circular economy, nitrogen, phosphorus, recovery, removal and wastewater treatment plant (WWTP)

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso fundamental para la humanidad, tanto biológicamente como para el uso en la vida cotidiana y en la realización de los distintos procesos industriales. Todo esto ocasiona una alteración de su estado natural que puede generar graves daños ambientales cuando esta regresa a su cauce. (Acciona, 2022)

Como la descontaminación natural del agua es limitada, el tratamiento de las aguas residuales se ha convertido en una acción obligatoria para favorecer la reutilización de la misma y cubrir las necesidades de la población. Las sustancias que aparecen en las aguas residuales pueden ser de naturaleza mineral u orgánica, y su peligrosidad se puede agravar debido a la presencia de organismos patógenos que pueden atacar contra la salud pública. Además de esto, estas aguas emiten malos olores por la acción de descomposición de los compuestos orgánicos, presentan una acción tóxica hacia la flora y la fauna, y provocan alteraciones en la apariencia física del entorno donde se descargan estos efluentes contaminados. (Pimentel, 2017)

El tratamiento de las aguas residuales debe llevarse a cabo con el fin del cumplimiento de los parámetros de calidad establecidos en las normativas correspondientes. Los valores de los mismos deben mantenerse dentro de los límites permitidos, reduciendo cualquier riesgo de contaminación. En el ámbito nacional, la normativa que se refiere a los aspectos relativos a la protección de estado de las aguas se encuentra recopilada en el Código de Aguas de la Normativa Estatal, en el que se incluye el texto refundido de la Ley de Aguas (Boletín Oficial del Estado, 2022)

1.1 Estaciones depuradoras de aguas residuales

Dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), establecidos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), figura el Objetivo 6, “Agua Limpia y Saneamiento”, con el que se pretende garantizar la disponibilidad de agua, su gestión sostenible y el saneamiento a nivel global. (Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030, 2022)

Para cumplir con los parámetros de calidad es necesario un correcto tratamiento de las aguas residuales, este se lleva a cabo en una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR), que se define como una "infraestructura sanitaria o conjunto de instalaciones que tienen por objeto la reducción de la contaminación de las aguas residuales hasta límites aceptables para el cauce receptor " (HdosO Ingeniería & Consultoría especializada en el CIA, 2014)

El esquema de una EDAR está compuesto por tres líneas básicas en las que se realizan tratamientos al agua, los fangos y los gases. Las dos primeras líneas se encuentran representadas en la figura 1.

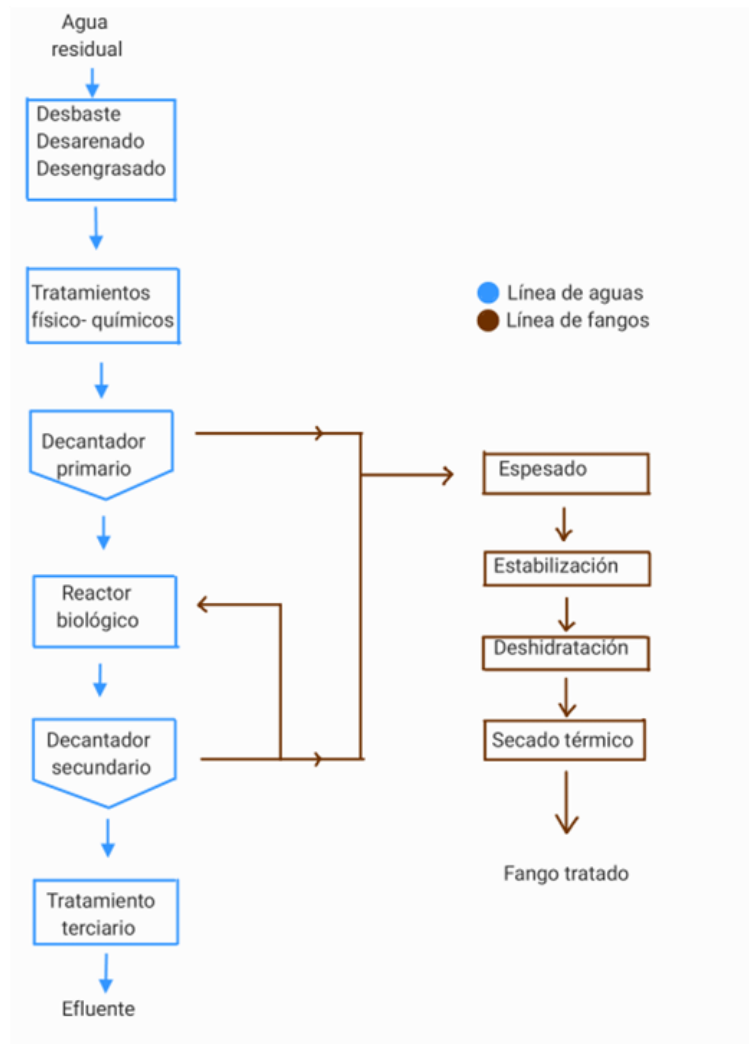


Figura 1. Esquema básico de una EDAR (Fuente: elaboración propia)

La línea de agua consta de cuatro niveles que son el pretratamiento, el tratamiento primario, el tratamiento secundario y el tratamiento terciario:

- El pretratamiento en el que se separan los sólidos de mayor tamaño que pueden crear problemas de obstrucción de la maquinaria. En esta fase podemos encontrar elementos como el pozo de gruesos donde se concentran los sólidos y las arenas que se recogen mediante unas cucharas bivalvas; y distintos sistemas como son por ejemplo el desbaste mediante el que se eliminan sólidos de tamaño grande y medio mediante rejas o tamices,

y el desarenado o desengrasado que se encarga de la eliminación de las arenas por sedimentación y la eliminación de las grasas por flotación.

- El tratamiento primario se trata de tratamientos físico-químicos para sedimentar y eliminar los sólidos en suspensión. Esto se puede llevar a cabo mediante una decantación o por la adición de coagulantes y floculantes.
- El tratamiento secundario reduce la materia orgánica mediante tratamientos biológicos. En esta fase además de la eliminación de materia orgánica, se reducen los nutrientes como el nitrógeno y el fósforo. La reducción de estos nutrientes es importante cuando el efluente final se destina al consumo, riego y especialmente en las proximidades a zonas susceptibles de eutrofización.

Se pueden emplear tanto los procesos aerobios, en presencia de oxígeno, como los procesos anaerobios oxidando la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Para mantener los microorganismos en el reactor biológico se utilizan dos métodos, el cultivo fijo, en donde los microorganismos se adhieren a la superficie de un medio inerte, formando una biopelícula y quedando retenidos en el reactor. De esta manera, se pueden alcanzar elevadas concentraciones de biomasa. La segunda opción, es el cultivo en suspensión, en donde los microorganismos se encuentran en suspensión en el agua. En este caso se hace necesario separar los microorganismos del efluente líquido del reactor y devolverlos para mantener una concentración apropiada de biomasa. Entre los procesos disponibles, el sistema de fangos activos es el que se emplea habitualmente en las EDAR.

- El tratamiento terciario utiliza procesos físicos, químicos y biológicos para obtener una mejor calidad del efluente, removiendo los contaminantes que no se pudieron en los tratamientos anteriores. Para ello se utilizan distintos tratamientos como son la coagulación-floculación, electrodiálisis o procesos de oxidación avanzada. (MITECO, 2022_a)

La línea de fangos tiene como objetivo reducir los lodos y aprovechar sus componentes. Dentro de esta línea se pueden distinguir cuatro procesos:

- El espesado, en el que se elimina el agua que queda en los lodos, reduciendo así el volumen, este se produce por distintos procedimientos de gravedad, de flotación y mecánicos.

- La estabilización, también conocida como la digestión, en la que se transforma la materia orgánica. Puede realizarse una digestión anaerobia o aerobia, y tratamientos químicos como es la estabilización por cal.
- La deshidratación consiste en la eliminación del agua del lodo previamente tratado, obteniendo un producto sólido, mediante distintos sistemas como son la centrifugación, los filtros en banda y los filtros en prensa.
- El secado térmico, tratamiento que permite eliminar el agua hasta valores en torno al 90% de sólidos secos. (MITECO, 2022_b)

En último lugar, en la línea del gas, se produce el biogás por procesos de degradación de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas. Este gas está compuesto principalmente por metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), siendo un gas apto para ser utilizado como fuente de energía. (RETEMA, 2019)

1.2 Depuración del agua basada en un modelo de economía circular

Uno de los principales problemas provocados por un alto contenido en nutrientes es la eutrofización, principalmente por el nitrógeno y el fósforo. El incremento de nutrientes en el agua provoca un aumento del crecimiento de la flora acuática y una disminución del oxígeno. Las principales causas que la producen son el uso de fertilizantes nitrogenados en la agricultura, una mala gestión de los excrementos de ganaderías que terminan depositándose en las aguas cercanas, residuos urbanos como detergentes con fosfatos, distintas actividades industriales y residuos forestales que se depositan en las aguas y se degradan, elevando las concentraciones de nitrógeno.

La eutrofización afecta a la calidad de las aguas al aumentar la podredumbre, pudiendo provocar problemas de salud a las personas que se encuentren cerca. Al igual que problemas de producción piscícola y un crecimiento de bacterias que producen toxinas letales para el resto de organismos. (Sewervac Ibérica, 2018)

Se estima que la producción anual mundial de aguas residuales alcanza 380 mil millones de metros cúbicos. Entre los nutrientes principales contenidos, se encuentran nitrógeno, fósforo y potasio en cantidades cuya recuperación podría suponer cerca del 13% de la demanda agrícola actual. (RETEMA, 2020)

Con el fin de abandonar la idea de una economía lineal, en la que se utiliza un recurso y luego se desecha sin tener en cuenta la huella ambiental, ha surgido la idea de una economía circular, en la que se maximizan los recursos disponibles para que permanezcan en el ciclo productivo el mayor tiempo posible. Esta aspira a reducir los residuos generados y aprovecharlos al máximo. (MITECO, 2022_c)

En el caso de las estaciones depuradoras de aguas residuales, es posible plantear distintas valorizaciones a los residuos obtenidos durante el tratamiento. Los lodos generados en el proceso de depuración tienen varias aplicaciones, como por ejemplo, su uso como enmiendas orgánicas o la recuperación de fósforo y otros nutrientes. Otra posibilidad es su empleo para la fabricación de materiales de construcción formando parte de áridos, ladrillos, cemento, morteros, hormigón, etc. Así mismo, este tipo de plantas pueden autoabastecerse con la energía que supone el aprovechamiento del biogás producido en los digestores anaerobios (Emasesa, 2022). También, se plantean estrategias de cogeneración mediante el tratamiento combinado de los lodos con diferentes tipos de residuos agroindustriales que pueden incrementar la producción de biogás, favoreciendo el autoabastecimiento energético así como la generación adicional de electricidad para la incorporación a la red.

Entre los procesos que podemos encontrar en la economía circular del agua están los sistemas de reutilización y desalación. Algunos ejemplos de reutilización del agua son su uso en riego de parques, baldeo de calles o incluso para el abastecimiento de la población, evitando así el uso directo del agua de su reserva natural. La desalación tiene como objetivo captar aguas salobres para tratarlas, eliminando la concentración de sales y compuestos que impidan su uso. En la desalación se está estudiando el uso de la salmuera como subproducto en otros procesos. (Fundación Conoma, 2019)

2. OBJETIVOS

El presente trabajo de tipo revisión bibliográfica, se plantean los siguientes objetivos:

- Describir el funcionamiento de una depuradora y los procesos en los que se lleva a cabo la eliminación de nutrientes.
- Revisión de los principales métodos y tecnologías para la recuperación de nutrientes en estaciones depuradoras de aguas residuales, centrándose en la recuperación del nitrógeno y el fósforo.
- Exponer la utilidad de los distintos productos que se obtienen en la recuperación de nutrientes.
- Comentar plantas o proyectos actuales donde se lleva a cabo esta recuperación de nutrientes.

3. METODOLOGÍA

Para la elaboración de este trabajo se han utilizado distintas bases de datos, principalmente Google Scholar (<https://scholar.google.es/>) y ScienceDirect (<https://www.sciencedirect.com/>), introduciendo palabras clave como “Wastewater treatment plant (WWTP)”, “recovery”, “removal”, “nitrógeno”, “fósforo”, y “economía circular”.

También se han consultado revistas como la Revista Técnica de Medio Ambiente (RETEMA) (<https://www.retema.es/>), iagua (<https://www.iagua.es/>) y aguasresiduales (<https://www.aguasresiduales.info/>), estas dos últimas son revistas relacionadas con el agua y el tratamiento de aguas residuales en España.

Del mismo modo se han consultado páginas web de distintos organismos públicos, organizaciones, compañías o proyectos europeos. Asimismo se han utilizado las páginas corporativas de Canal Isabel II (<https://www.canaldeisabelsegunda.es/>) y de la Mancomunidad de la Comarca de Pamplona (<https://www.mcp.es/>) para aportar información sobre las instalaciones de las EDAR en España que recuperan los nutrientes.

La búsqueda de información se ha realizado en español e inglés de modo que el campo de búsqueda es más amplio, dando prioridad a los documentos más recientes para obtener una información actualizada.

4. ELIMINACIÓN Y RECUPERACIÓN DE NUTRIENTES EN AGUAS RESIDUALES

La generación de aguas residuales es uno de los mayores desafíos que se encuentra en la actualidad, esto es debido al desarrollo de la población y de las industrias que contaminan el suelo y las aguas. Debido a la limitación de agua dulce y a su creciente demanda, las aguas residuales se han convertido en un recurso de valor, recurso que es necesario conservar y aprovechar de una manera correcta. (UNESCO, 2022)

Estas aguas tienen una gran importancia como fuente de nutrientes, la recuperación de estos nutrientes podrían compensar más del 13% de la demanda global de nutrientes en la agricultura. Entre ellos presentan mayor relevancia el fósforo, incorporado en 2017 a la lista de la Unión Europea de materias primas críticas, por ser un recurso no renovable y vital para la agricultura. Y el nitrógeno, ya que los fertilizantes nitrogenados empleados son sintetizados químicamente a través de la obtención de amoníaco según el proceso de Haber-Bosch. Este se obtiene como resultado de la reacción del nitrógeno y el hidrógeno gaseoso. Se trata de una reacción que supone un elevado consumo de energía que se obtiene principalmente a través de procesos de combustión de gas natural. La recuperación de estos nutrientes implicaría una ganancia económica y medioambiental. (Barat Baviera et al., 2021)

4.1 Eliminación y recuperación del nitrógeno

A pesar de que este nutriente es esencial para la vida, cuando los compuestos nitrogenados superan los límites de concentración y llegan a los acuíferos pueden llegar a contaminarlos y ser nocivos para la salud. En las aguas residuales se puede encontrar el nitrógeno principalmente en forma de nitrógeno orgánico, amoníaco, nitrito y nitrato. (Microlab Industrial, 2017)

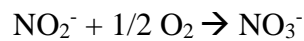
Entre las industrias más contaminantes encontramos las destilerías, textiles, mataderos e industrias de fertilizantes; estas industrias suelen controlar más sus emisiones ya que son puntuales. Pero las más preocupantes son la agricultura y ganadería intensiva, debido a las elevadas cantidades de residuo que producen. (Palomares, s. f.)

Para controlar estos vertidos se propone recurrir a métodos para la recuperación de los compuestos y su posterior utilización.

4.1.1 Eliminación biológica del nitrógeno

La eliminación biológica del nitrógeno consiste en una nitrificación- desnitrificación, mediante unos organismos procariontas quimioautótrofos oxidan el amonio y el nitrito a nitrato, y unos organismos heterótrofos que utilizan el nitrato o nitrito. (Valencia, 2014a)

Nitrificación:



En el proceso de la nitrificación se lleva a cabo en primer lugar, una oxidación de amonio (NH_4^+) a nitrito (NO_2^-) por la acción de bacterias amonioxidantes (AOB) y en segundo lugar, de nitrito (NO_2^-) a nitrato (NO_3^-) por la acción de bacterias nitritoxidantes (NOB).

Las bacterias amonioxidantes que aparecen normalmente en una EDAR son del género *Nitrosomonas*, estas son sensibles a bajas concentraciones de oxígeno, bajas temperaturas y a pH elevado. Mientras que las bacterias nitritoxidantes más comunes son del género *Nitrospira* y *Nitrobacter*, esta última se adapta mejor a concentraciones altas de nitrito y oxígeno, como se pueden dar en los reactores Batch. (Valencia, 2014b)

Desnitrificación:



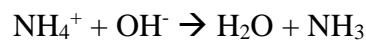
La desnitrificación que corresponde con la segunda etapa de eliminación del nitrógeno, se lleva a cabo en condiciones anóxicas, donde se reduce hasta nitrógeno gas por la acción de bacterias heterótrofas facultativas, estas utilizan el carbono de la materia orgánica como fuente de energía, y en ausencia de oxígeno el nitrato como aceptor de electrones. En las EDAR se suele encontrar generalmente el género *Pseudomonas*.

Al igual que en el proceso anterior, este se ve afectado por factores como son la temperatura, el oxígeno disuelto, la cantidad de materia orgánica disponible, la concentración de nitrato y el pH. (AEMA, 2021)

4.1.2 Desorción o eliminación de aire (air stripping) de amoníaco

La desorción se refiere a la eliminación de un fluido previamente absorbido por un material, en este caso para la eliminación de amoníaco de una corriente de agua residual.

Para que se produzca este proceso es necesario que el amoníaco se encuentre en su forma no iónica (NH_3). Este proceso depende del pH, se necesita un pH cerca del 9,3 para que el nitrógeno amónico se convierta en amoníaco. Esto se consigue añadiendo cal o sosa cáustica que aumenta el pH. (Sengupta et al., 2015), logrando la transformación de los iones de amonio a amoníaco gaseoso:



Las torres empaquetadas (figura 2) o de relleno son los sistemas más eficaces, debido a que proporcionan una gran área de transferencia de masa. (Ozyonar et al, 2012)

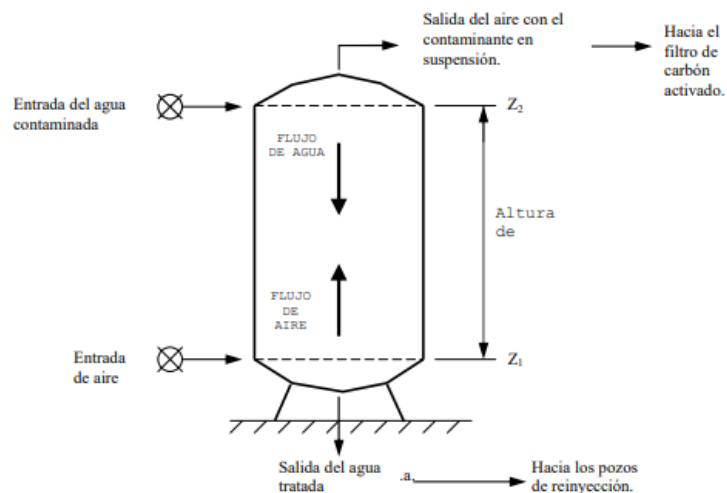


Figura 2. Esquema de una torre “Air- Stripping” (Fuente: Navarro et al ,2001)

Habitualmente se utilizan las “torres empacadas a contracorriente”, en estas el agua entra al dispositivo por la parte superior, circulando por su interior verticalmente en sentido descendente, donde a través del contacto de la superficie formada por un plástico llamado relleno con el líquido, se forman películas delgadas y corrientes subdivididas. Simultáneamente, entra por la parte inferior del dispositivo una corriente de aire ascendente, que arrastra los compuestos volátiles del agua obligándolos a salir por la parte superior de la torre en forma gaseosa, hasta un filtro de carbón activo que devuelve el aire limpio a la atmósfera. El agua

tratada sale por la parte inferior de la torre hasta un dispositivo final donde se terminará de tratar. (Navarro Flores et al, 2001)

Este procedimiento junto con la absorción se puede utilizar para recuperar el amoníaco del efluente gaseoso. Al salir el amoníaco en forma gaseosa es absorbido a una solución de ácido fuerte, generalmente ácido sulfúrico, formando una sal de amonio que se cristaliza y comercializa. (Martínez Campesino, 2014)

4.1.3 Sistemas bioelectroquímicos

Los sistemas bioelectroquímicos (BES) combinan reacciones de oxidación-reducción en las cuales la liberación/captura de electrones de un electrodo está facilitada por microorganismos (figura 3). Aplicados al tratamiento de aguas residuales permiten oxidar tanto la materia orgánica como el amonio, y reducir los nitritos y nitratos. El potencial de los BES es relevante y actualmente es un campo que se encuentra en desarrollo experimental previa a su posible implementación industrial. (Bosch- Jimenez et al., 2020)

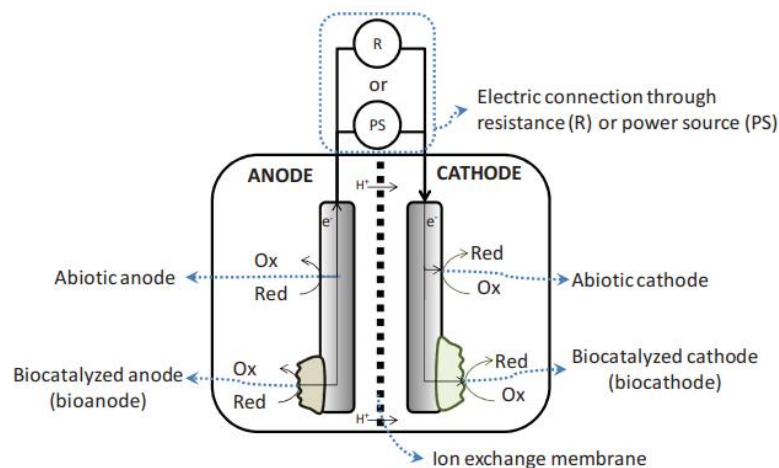


Figura 3. Esquema básico de un sistema bioelectroquímico (Fuente: Pous Rodriguez, 2015)

Actualmente hay numerosos proyectos de investigación que estudian la aplicación de este proceso para la recuperación de nutrientes y disminuir la energía consumida en los procesos de tratamiento de las aguas residuales. El proyecto Run4Life está investigando la recuperación de nutrientes de las aguas residuales, en el cual entra un sistema BES para la obtención de fertilizantes a través de la recuperación de nitrógeno. (Leitat, 2020)

4.1.4 Métodos basados en intercambio iónico

El intercambio de iones es un proceso normalmente usado para ablandar o desmineralizar el agua. El intercambio de iones describe un proceso en el que los iones disueltos no deseados se intercambian con otros de carga similar. Este intercambio se produce entre un sólido (resinas o zeolitas) y el agua, cuando estos compuestos contaminantes se intercambian por unos deseados, se cargan en las resinas. (Fluence, 2021)

El intercambiador de iones/adsorbente más popular para la recuperación de nitrógeno es la zeolita. La zeolita es un mineral aluminosilicato microporoso, de origen natural o sintético, que posee una estructura rectangular conformada por tetraedros tridimensionales de cationes de sílice (Si^{4+}) y de aluminio (Al^{3+}) rodeados por cuatro aniones de oxígeno (O^{2-}). (Vázquez-Rodríguez and Gallo-González, 2021)

El uso de zeolitas permite recuperar el nitrógeno amoniacal de aguas residuales para su uso como fertilizante. Se ha comprobado que la utilización de zeolitas sintéticas es más eficiente en la eliminación de amoníaco, aunque más costoso que el uso de zeolita natural. (Heredia Hernández, 2012)

También se ha estudiado el uso de zeolitas para recuperar el amonio en el agua residual de la digestión anaeróbica, esto se consigue pasando el agua por una columna de adsorción con zeolitas cargadas en forma sódica. (Jiménez Cárdenas, 2018)

4.2 Eliminación y recuperación del fósforo

Debido al uso continuo de fertilizantes, pesticidas y detergentes las cantidades de fósforo que se encuentran en las aguas residuales cada vez son un problema mayor. Esto provoca que este nutriente haya pasado de ser deseable a ser contaminante en regiones densamente pobladas. (CREAF, 2017)

El fundamento de la eliminación de este compuesto es la conversión de fósforo soluble en un compuesto insoluble que se pueda separar de la disolución. La reducción, reutilización y reciclado de este nutriente es una forma económica y ambientalmente apta para la problemática de la escasez y el impacto que produce. (Villén Guzmán, 2021)

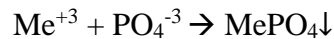
4.2.1 Eliminación biológica del fósforo

La eliminación biológica del fósforo se produce gracias a unos microorganismos capaces de asimilar un exceso de fósforo en condiciones aeróbicas, almacenándolo en forma de gránulos de polifosfatos. (Escaler & Mujeriego, 2001)

Estos microorganismos se conocen como PAO (Poliphosphate Accumulating Organisms) que en condiciones anaerobias acumulan ácidos grasos volátiles. Para acumular este compuesto se obtiene energía de la oxidación de glucógeno y de polifosfatos. Cuando estos microorganismos son arrastrados a la parte aerobia del reactor se encuentran con las heterótrofas, de modo que consumen sus reservas de ácidos grasos volátiles, por lo que necesitan ingerir grandes cantidades de fosfatos del medio para crecer. (Valencia, 2014_b)

4.2.2 Precipitación química

Se realiza mediante la adición de diferentes sales metálicas de hierro o aluminio produciendo una precipitación en forma de fosfatos.



El precipitado formado es eliminado del agua tratada mediante procesos como la sedimentación, flotación o filtración. De esta manera, estos precipitados pasan a formar parte de los fangos producidos en el proceso.

Estos tratamientos presentan una serie de desventajas como un incremento de los costes del tratamiento asociados al consumo de una mayor cantidad de reactivos y una mayor generación de lodos que deben gestionarse adecuadamente.

Los procesos de eliminación química del fósforo pueden clasificarse en función de los diferentes puntos de la planta en los que se puede adicionar el reactivo correspondiente: (Metcalf and Eddy, 2004)

- Pre-precipitación. Adición antes del decantador primario con eliminación del precipitado junto con el lodo primario.
- Co-precipitación. Adición en el tanque de aireación de un reactor biológico de tipo fangos activos.

- Post-precipitación. Adición en el efluente de salida del decantador secundario con separación del precipitado mediante filtración o una instalación complementaria de sedimentación.

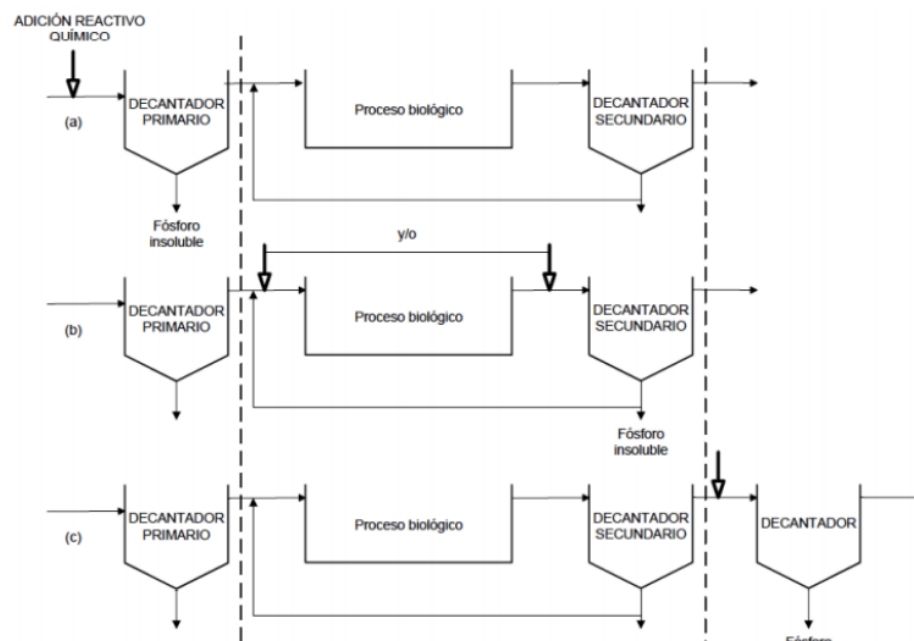


Figura 4. Eliminación química del fósforo en diferentes puntos de una EDAR. a) Pre-precipitación; b) Co-precipitación; c) Post-precipitación (Metcalf and Eddy, 2004)

4.2.3 Cristalización

Uno de los estudios de recuperación de fósforo más importantes en la actualidad es su recuperación por cristalización de estruvita, ya que puede ser usado en el suelo como fertilizante, reduciendo así el uso de fertilizantes químicos. La estruvita o fosfato doble de amonio y magnesio hexahidratado ($\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) es una sal blanca cristalina. La estruvita se forma cuando tiene lugar la precipitación de los iones magnesio, amonio y ortofosfato, siguiendo la siguiente ecuación:



La formación de los cristales de estruvita depende del estado inicial de los iones que la constituyen, así como de distintos parámetros fisicoquímicos, dentro de estos el pH es uno de los factores más influyentes, siendo su rango óptimo entre 8,5 y 9,5; otros factores a valorar son la sobresaturación de la disolución y la temperatura, pudiendo afectar a la solubilidad y a la morfología del cristal. (Rivas et al., 2011)

Otro producto de la cristalización a tener en cuenta es la hidroxiapatita ($\text{Ca}_5 (\text{PO}_4)_3 \text{OH}$), obtenida por precipitación química con hidróxido cálcico (Segura Morena, 2021):



Al igual que el anterior este se puede usar en la producción de fertilizante, así como en otros procesos de purificación del agua y otros campos de interés industrial. Dependiendo del proceso de fabricación se obtendrá una determinada pureza y características cristalográficas, por lo que se tiene en cuenta el pH, la temperatura de obtención, la concentración molar de los reactivos, el tiempo de agitación y la cinética de la reacción. (Vasconcelos Corrêa, 2013)

4.2.4 Adsorción

Una alternativa muy utilizada en la eliminación de contaminantes es la adsorción, gracias a su alta eficiencia, bajo costo y a la posibilidad de reutilizar y reciclar el adsorbente. Según Oriol Segura Morera (2021), la adsorción es un proceso de separación que ocurre cuando un adsorbente sólido, acumula en su superficie componentes presentes en una corriente líquida o gaseosa (adsorbato). En este proceso el adsorbente se mantiene en un lecho fijo, mientras que el fluido pasa por este.

La adsorción puede ser de dos tipos, adsorción química y adsorción física. En la adsorción química se establecen reacciones con la formación de uniones a través de enlaces químicos. Sin embargo, en la adsorción física las uniones son por medio de fuerzas de Van der Waals. (Illana Gregori, 2014)

La adsorción del fósforo depende del material que se utilice, generalmente se utilizan materiales muy porosos, entre ellos encontramos el carbón activo, zeolitas, arcillas, derivados de óxidos metálicos (alúmina, sílice,...), carbonatos; actualmente también se están estudiando materiales reutilizados, como las cenizas de cáscara de arroz, conchas de vieira y otros residuos. (Moscardó Carreño, 2018)

Todos estos materiales pueden ser usados posteriormente como fertilizantes de suelos (Ferrando Beneyto, 2021; Rodríguez et al., 2019), estos están condicionados por unos factores como son principalmente el pH, la temperatura, la concentración inicial y dosis de adsorbente, la naturaleza del adsorbente y el adsorbato, y por último, el área superficial y granulometría del adsorbente. (Moscardó Carreño, 2018)

5. EJEMPLOS DE PLANTAS DONDE SE LLEVA A CABO UN PROCESO DE RECUPERACIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO

5.1 EDAR Sur (Madrid) “Primera planta de recuperación de fósforo en España”

La EDAR Sur de Madrid se encuentra a la izquierda del río Manzanares, en el término municipal de Getafe. Se construyó en 1983, a cargo del ayuntamiento de Madrid, pero desde 2006 las depuradoras de este municipio las gestiona la empresa pública Canal de Isabel II. (Nuevo, 2021)

Esta EDAR consta de una línea de aguas, en la que se encuentra un pretratamiento, una decantación lamelar, una balsa reguladora, un reactor biológico, un tratamiento terciario, una línea de fangos, una deshidratación y un tratamiento de retornos. Todos los edificios disponen de extracción y tratamiento del volumen total de aire para evitar posibles fugas, además esto ayuda al control de olores en las instalaciones. (MITECO, 2023)

Esta EDAR cuenta con los siguientes parámetros (tabla 1 y 2): (MITECO, 2023)

Tabla 1. Parámetros de diseño EDAR Sur (Madrid) (MITECO, 2023a)

PARÁMETROS DE DISEÑO	UNIDAD	VALOR
Habitantes equivalentes	Hab-eq	2.937.600
Caudal medio	m ³ /d	518.400
Caudal punta	m ³ /h	518.400
Caudal máximo	m ³ /h	1.080.000
DBO ₅	mg/l	450
DQO	mg/l	780
SS	mg/l	384
Nitrógeno	mg/l	76,6

Tabla 2. Parámetros de agua tratada EDAR Sur (Madrid) (CYGSA, 2020)

PARÁMETROS DE AGUA TRATADA	UNIDAD	CONCENTRACIÓN
DBO ₅	%	99,1
DQO	%	96,8
SS	%	99

N _{total}	%	77
P _{total}	%	50

En esta EDAR se pueden desviar el agua residual de las plantas situadas aguas arriba mediante una red de colectores, por lo que tiene gran importancia a la hora de asegurar la calidad del cauce receptor. Por esto, y por ser la infraestructura de mayor capacidad de depuración de la Comunidad de Madrid, la empresa Canal de Isabel II decidió poner en marcha la primera planta de recuperación de fósforo en forma de estruvita a escala industrial en España.

La precipitación incontrolada de estruvita provoca graves problemas de obstrucción en las tuberías, generalmente en la línea de fangos. En el caso de esta planta, se producía en las tuberías de salida del fango digerido, en los codos de alimentación de las centrifugadoras y en el interior de los digestores anaerobios.

Mediante este proyecto se realizó una implantación de un sistema de producción de estruvita en la línea de fangos. Esta tecnología elimina entre un 80-90% de fósforo, obteniendo un efluente con una concentración de ortofosfatos entre el 25-50 mg/l, y un pequeño porcentaje de amonio. (Canal Isabel II, 2023)

5.1.1 Descripción del proceso

Para llevar a cabo este proceso se utiliza un reactor de lecho fluidificado de flujo ascendente, diseñado para tratar hasta 260 kg/ día de fósforo, en el que se distinguen dos etapas. La primera etapa es una nucleación, donde se comienzan a formar las partículas de estruvita, y en segundo lugar una deposición, en el que se forman del tamaño deseado los granos de estruvita.

Se emplea un reactor de cristalización, con una recirculación continua, en la que se dosifican cloruro magnésico y sosa cáustica, el primer producto sirve para suministrar magnesio que forma la estruvita y el segundo aporta unas condiciones óptimas que dan lugar a la cristalización. En este proyecto se ha instalado un reactor del modelo Pearl 2000 de OSTARA, que puede producir hasta 2000 kg de estruvita en condiciones óptimas.

La última fase de este proceso consiste en el secado a alta temperatura de los gránulos, estos tienen una alta pureza y se encuentran libre de patógenos, posteriormente se usa como fertilizante inorgánico. Este fertilizante tiene una velocidad de liberación de nutrientes lenta y

un contenido de fósforo, nitrógeno y magnesio, haciendo de este un fertilizante muy beneficioso. (Canal Isabel II, 2023)

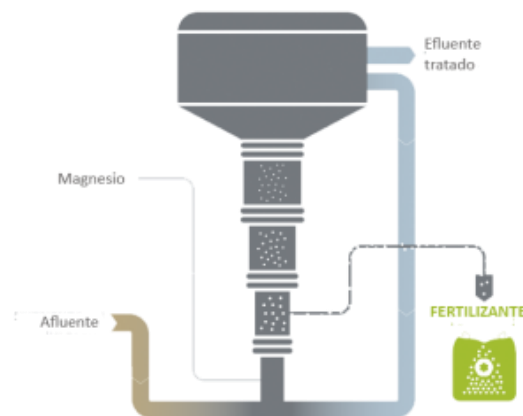


Figura 5. Diseño del reactor de lecho fluidificado de flujo ascendente en la EDAR Sur (Madrid) (Canal Isabel II, 2023)

5.1.2 Descripción de la instalación

La planta de recuperación de fósforo se encuentra en un edificio localizado entre los digestores, edificio de cogeneración y los decantadores primarios. La planta también cuenta con un área para el almacenamiento del producto y su transporte.

Se ha construido una nueva tubería que conduce los retornos de la planta de nuevo a la tubería de reboses de la flotación, y de la nueva conexión de los reboses de flotación al bombeo de alimentación de la planta de estruvita. (Veolia Water Technologies, 2017)

- Bombeo de alimentación

La instalación cuenta con dos arquetas de bombeo independientes, en una de ellas se impulsa al reactor el rebose procedente de la deshidratación, que es el más rico en fosfatos, mediante bombas centrífugas sumergibles. En el caso de que se necesite completar la carga de fósforo del reactor, se conducirán los reboses procedentes de la flotación a este mediante unas bombas centrífugas sumergibles que se encuentran en un pozo de bombeo contiguo.

- Almacenamiento y dosificación de producto químico

Como se ha mencionado anteriormente para la precipitación de la estruvita se necesita magnesio, amonio y fosfatos, en relación molar 1:1:1. En el tratamiento de aguas residuales el

precipitante limitante es el magnesio. La dosificación de cloruro de magnesio, se realiza mediante dos bombas (una de reserva) de 100 l/h, de un depósito de 40 m³ en plástico reforzado con vidrio (PRFV) instalado en el interior de un cubeto de hormigón.

Para que se lleve a cabo esta precipitación es necesario tener un pH óptimo, el cual se encuentra entre los 7,6 y 8,1. Esto se consigue mediante la adicción de sosa, que regula el pH a 7,6-7,8. La dosificación se efectúa con dos bombas (una de reserva), de 36 l/h, de un depósito de 25 m³ en PRFV instalado en el interior de un cubeto de hormigón. (Veolia Water Technologies, 2017)

- Reactor de lecho fluido

El proceso de la precipitación de la estruvita se logra mediante un reactor de lecho fluido ascendente, esta fluidización del lecho se consigue con un bombeo de recirculación que mantiene la velocidad ascensional en el reactor. A este reactor se le dosifica el producto químico por una tubería de inyección.

El efluente sale del reactor por una tubuladura en la parte superior y regresa a la cabecera de la planta. Las partículas cristalizadas que se han formado se extraen de manera controlada para un posterior tratamiento, esta secuencia de purga del producto se controla gracias a presión diferencial del reactor.

- Tratamiento del producto elaborado: tamizado, secado y almacenamiento

El producto obtenido sale del reactor a una tamizadora circular vibratoria de un nivel, que procede a una separación líquido – sólido. A continuación el producto pasa a un secador de lecho fluido, alimentado por aire caliente, que se controla por resistencias eléctricas.

Finalmente, el producto seco se transporta a la parte superior de los silos de almacenamiento. En esta etapa se produce una clasificación del tamaño de los gránulos mediante un tamiz vibratorio clasificador, separándolo en 4 silos flexibles, con una capacidad de 9 toneladas. Los gránulos de estruvita se descargan con una empaquetadora bigbag y se llevan al área de almacenamiento.

5.1.3 Otros proyectos que utilizan la estruvita

Con el fin de contribuir a una economía circular y aprovechar los nutrientes de las aguas residuales, el proyecto LIFE ENRICH ha desarrollado un tren de tratamiento innovador a escala

real para la recuperación de nitrógeno y fósforo en forma de sales de amonio y estruvita, para su posterior utilización como fertilizantes, en una planta piloto situada en Murcia. Concretamente este proyecto se situará en la EDAR Murcia Este, localizada en el margen izquierdo del río Segura. Con este proyecto se pretende recuperar hasta el 40% del fósforo en el tratamiento de 100.000 m³/d de agua. (Castro M. et al., 2020)

En esta planta se encontrarán nuevas instalaciones a escala piloto (figura 6), en la primera se presenta un cristalizador de estruvita, que esta alimentado de los sobrenadantes que se obtienen del espesamiento de lodos primario y secundario, produciendo estruvita para su posterior comercialización. El siguiente proceso incluido en la planta piloto se encuentra a la salida de la deshidratación de los lodos procedentes de la digestión anaerobia, que se llevan a cabo en unas centrifugadoras. El efluente líquido es conducido a en una columna de adsorción con zeolitas; tras una etapa de regeneración de la columna con NaOH, el producto que sale de estas zeolitas rico en amonio pasa a unos conectores de membranas que producen sal de amonio, este producto también es usado como fertilizante. (ENRICH, s.f.)

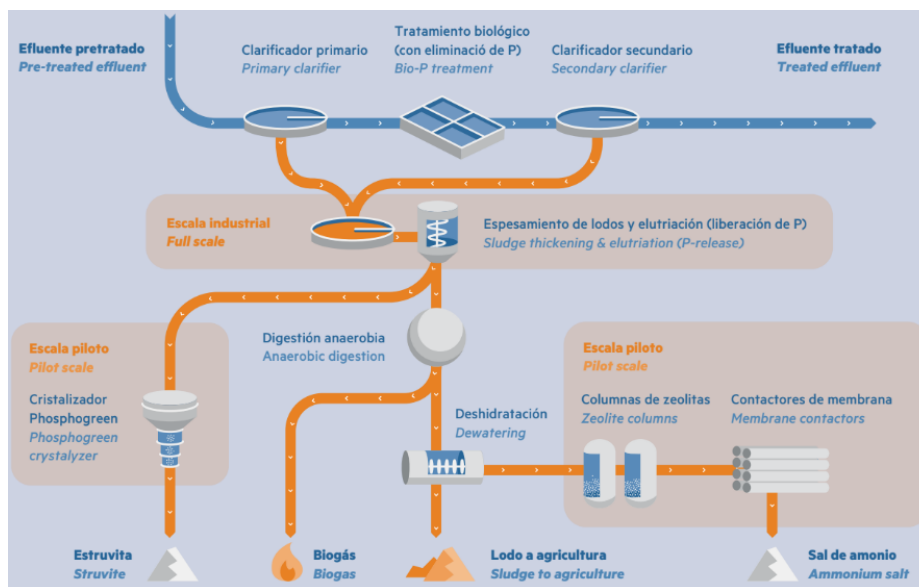


Figura 6. Diseño planta piloto de LIFE ENRICH (ENRICH, s.f.)

5.2 EDAR Arazuri (Pamplona) “Planta de compostaje de lodos”

La EDAR de las aguas residuales generadas en Pamplona está situada en la localidad de Arazuri, sobre el meandro del río Arga. Esta se inauguró en 1990 con un tratamiento primario y en 1999 se incorporó el tratamiento biológico y el proceso de nitrificación y desnitrificación.

La EDAR de Arazuri cuenta con una línea para el tratamiento del agua, compuesta de un tratamiento primario y un tratamiento biológico, una línea de tratamiento de fangos y una línea para el aprovechamiento del biogás. Esta planta también cuenta con un reciclaje y compostaje de los lodos.

En la primera etapa del tratamiento del agua se realiza un pretratamiento, con eliminación de gruesos y un desarenado /desengrasado, una decantación primaria (mediante 6 decantadores). La segunda etapa donde se lleva a cabo el tratamiento biológico consta de 4 balsas de aireación, en estas se produce la eliminación de materia orgánica y de nitrógeno, para este último se necesita de una zona anóxica para la eliminación microbiana; y una decantación secundaria.

Los fangos se obtienen en los 5 digestores anaerobios que presenta esta planta, aquí se extrae el biogás, que posteriormente es aprovechado. Una vez digeridos estos fangos se deshidratan en las centrifugadoras. (Mancomunidad de la Comarca de Pamplona, 2022)

Esta depuradora cuenta con los siguientes parámetros (tabla 3) (Mancomunidad de la Comarca de Pamplona, 2021)

Tabla 3. Parámetros de la EDAR Arazuri (Pamplona)

PARÁMETROS EDAR	UNIDAD	VALOR
Habitantes equivalentes	Hab-eq	776.190
Caudal medio	m ³ /d	86.140,8
DBO ₅	%	96,2
DQO	%	94,4
SS	%	96,9
Nitrógeno	%	80,4
Fósforo	%	88,1

Los lodos que se generan en las etapas de la depuración de las aguas residuales deben tratarse para reducir el agua, los patógenos y asegurarse de un destino final apropiado. Este destino puede ser reciclado en la agricultura.

En la EDAR de Arazuri se reciclan la totalidad de lodos que se producen. En el año 2021 se generaron 40.757 toneladas de lodos digeridos, de estos un 78% son destinados a los cultivos

extensivos (cereal, maíz y girasol principalmente) y el otro 22% se utilizan para hacer compost junto con los restos verdes. (Mancomunidad de la Comarca de Pamplona, 2021)

Debido al desfase que existe en esta planta entre la producción continua de lodos y su valorización agrícola en determinadas épocas, donde las condiciones climáticas no favorecen al reciclaje de estos, se diseñó una planta de compostaje capaz de tratar 11.800 toneladas de lodos deshidratados al año. De esta manera se asegura el control de compostaje mediante un sistema cerrado, los túneles de compostaje. (Mancomunidad de la Comarca de Pamplona, 2022)

5.2.1 Descripción del proceso

Para la elaboración del compost, los biosólidos se mezclan con los restos verdes recogidos de las zonas públicas, principalmente estos restos corresponden con corteza de pino y restos de jardinería. Esta mezcla se lleva a una descomposición de la materia orgánica por la acción de microorganismos en presencia de oxígeno.

El compostaje presenta dos fases, la primera donde se lleva a cabo la descomposición, pudiendo llegar a alcanzar hasta los 70°C; y en segundo lugar la maduración o almacenamiento, donde tiene lugar una estabilización del producto. Este proceso puede superar los 3 meses dependiendo del resultado final que se busca. (MITECO, 2022_d)

En la planta de compostaje en primer lugar se tiene una recepción de los materiales y se prepara la mezcla mencionada anteriormente, se llenan los túneles donde se lleva a cabo la descomposición. Por último se forma una meseta de maduración y se almacena el compost.

5.2.2 Descripción de la instalación

Con el fin de minimizar el impacto, la instalación de la planta de compostaje se llevó a cabo adecuando las edificaciones de la EDAR de Arazuri que estaban en desuso. Esta instalación ocupa 9.517 m². En ella podemos encontrar los siguientes apartados (Mancomunidad de la Comarca de Pamplona, 2022):

- Sistema de túneles

Esta planta cuenta con una tolva de recepción de lodos y un sistema de 5 túneles donde se lleva a cabo la mezcla de los biosólidos con los restos verdes, mediante una mezcladora de palas; produciéndose la etapa de descomposición e higienización del material. Estos túneles tienen

una capacidad de almacenar 113 toneladas de lodo. (Mancomunidad de la Comarca de Pamplona, 2022)

Para que se produzca el proceso de descomposición se dispone de unos ventiladores que proporcionan aire, además de unas válvulas que permiten la recirculación de parte del aire al proceso.

- Meseta ventilada

La etapa de maduración se efectúa en la nave de maduración y almacenamiento, en una meseta sobre una solera ventilada, esta etapa puede durar hasta 15 semanas. El aire se suministra mediante 3 moto-ventiladores centrífugos.

Tras la maduración se realiza un cribado donde se separa el compost que se almacena para su posterior comercialización y biomasa que no se ha desintegrado que se volverá a reutilizar para el compostaje. (Mancomunidad de la Comarca de Pamplona, 2022)

- Sistema de ventilación y tratamiento del aire

El aire procedente de los túneles, con una alta carga de amoníaco (NH_3) es enviado al biofiltro para una desodorización, debido a la alta concentración se necesita realizar un tratamiento previo, en el que se lava este aire con una solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4) en un lavador químico tipo scrubber. Si la solución recirculada tiene una concentración elevada de sulfato amónico ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$), no es apta para el lavado, se almacena o se manda a la cabecera de la EDAR.

El aire que se extrae de las distintas naves, la nave de túneles y la nave de maduración/almacenamiento, pasan por un humidificador donde se trata el aire con agua, y pasa a un biofiltro para su desodorización. El líquido del humidificador se recircula hasta que su temperatura o pH no tengan las condiciones adecuadas para realizar este proceso de lavado, este cuenta con dos bombas de recirculación.

- Tratamiento del polvo

La planta de compostaje cuenta con campanas de polipropileno que captan y conducen el polvo que se forma durante la formación del compost. Para que esto se realice se utiliza una válvula rotativa para la descarga y un tornillo transportador.

- Gestión de lixiviados

Todos los lixiviados que aparecen en este proceso se mandan a la cabecera de la depuradora.

En el año 2021 se ha comenzado a utilizar la planta piloto de secado solar de lodo, esta deshidrató ese año 1.104 toneladas de lodos centrifugados. Este lodo se separa en 8 lotes que se secan con una media del 37% de materia seca. (Mancomunidad de la Comarca de Pamplona, 2021)

5.2.3 Compost-Arazuri

El compost que se produce en esta planta, también conocido como “Compost-Arazuri”, presenta unas características adecuadas para ser usado como fertilizante. La textura que presenta lo hace muy manejable tanto manual como mecánicamente. Su densidad varía entre los 0,5-0,7 kg/l, dependiendo de su grado de sequedad.

Este producto presenta una composición química que lo vuelve apto para todo tipo de suelo (tabla 4): (Mancomunidad de la Comarca de Pamplona, 2022)

Tabla 4. Composición química del Compost-Arazuri (%sss) (Mancomunidad de la Comarca de Pamplona, 2022)

Materia orgánica	40 - 50
Nitrógeno total (Nt)	1,25 - 1,50
Fósforo (P ₂ O ₅)	3,0 - 3,5
Potasio (K ₂ O)	0,5 - 1,0
Magnesio (MgO)	0,5 - 1,0
Calcio (CaO)	10,0 – 15,0

Este compost se utiliza principalmente como soporte orgánico en plantaciones, como enmienda de suelos para mejorar sus cualidades y como cubresiembras para mantener la humedad y los nutrientes para las semillas. Esto se debe principalmente a las elevadas concentraciones que tiene este compost de nitrógeno y fósforo. (Mancomunidad de la Comarca de Pamplona, 2022)

Actualmente se realizan ensayos de la aplicación de este compost en la finca experimental de Arazuri cada 3 años para evaluar la respuesta de los cultivos a estos, a manos del Instituto Técnico de Gestión Agrícola (ITGA) ahora INTIASA, sociedad pública del Gobierno de Navarra. (Mancomunidad de la Comarca de Pamplona, 2021)

5.2.4 Otros ejemplos de plantas de compostaje

El compostaje de lodos de las depuradoras de aguas residuales es una solución eficaz para reducir este residuo de manera sostenible, a esta solución se han sumado otros municipios como es Écija (Sevilla) con la construcción de la Planta de Compostaje de lodos y biomasa “El Montecillo” .

Esta planta de 14.988 m² de superficie tiene la capacidad de procesar hasta 40.052,80 toneladas de lodos al año. Estos lodos se mezclan con biomasa vegetal de parques y jardines municipales. Entre las operaciones que se llevan a cabo en esta instalación encontramos la recepción y pretratamiento de los materiales, un mezclado y formación de las pilas de compostaje, donde gracias al volteado comienza la fermentación, luego se lleva a una zona de maduración, y por último, sucede un cribado o refinado para su almacenamiento y comercialización. (ECILIMP, 2020)

5.2.5 Nuevas tecnologías en plantas de compostaje

Debido al aumento del volumen de aguas residuales por el crecimiento de la población el estudio de la transformación de lodos es un camino muy estudiado para reducir su contaminación.

La universidad de Córdoba, en colaboración con la universidad de Granada ha ratificado una nueva tecnología, que consiste en la utilización de un sistema de aireación forzada en el interior de cubiertas. Este nuevo sistema es capaz de evitar los malos olores que se producen durante el compostaje, esto se debe a que dejan pasar el dióxido de carbono pero retienen los compuestos volátiles causantes del mal olor; y reduce el tiempo de maduración hasta dos meses en comparación al uso de pilas al descubierto y un mes respecto al uso de túneles de hormigón. (Agencia Sinc, 2020)

Para el anterior proyecto se utilizaron unas membranas semipermeables de Gore-Tex con unos microporos (0,2µm) entre dos capas de materiales resistentes a los factores ambientales. Estas actúan formando una fina película de condensación en el interior de la cubierta cuando se está

produciendo la descomposición, en esta película de condensación las sustancias gaseosas se disuelven cayendo de nuevo al montón. En el suelo se encuentra un sistema de aireación que proporciona un entorno húmedo y rico en oxígeno a los microorganismos. (Robledo-Mahón et al., 2019)

5.3 Otras posibles nuevas tecnologías para la recuperación de nutrientes

El estudio de nuevas tecnologías para aprovechar los nutrientes de las aguas residuales se está llevando a distintos ámbitos, como son las piscifactorías, que producen un alto contenido en nitrógeno y fósforo. En estas instalaciones se pretende utilizar una nueva tecnología que consiste en un biorreactor por el que pasa el agua, exponiéndose a microalgas y a la luz solar, que estimula el crecimiento. Se produce la limpieza del agua a la vez se obtiene un material sólido con un 40-50% de proteína que puede recuperarse y ser aprovechado como alimento para los peces. (ACCIONA, 2023)

Otro de los posibles tratamientos emergentes es la tecnología Nereda®, que está basada en el crecimiento de biomasa granular que constituye los fangos del tratamiento biológico de la EDAR. Se pretende que en un mismo gránulo, se acumulen bacterias que permitan la eliminación simultánea de materia orgánica y de nutrientes (Nitrógeno y Fósforo). Se presenta como una alternativa que permite reducir el espacio y el coste de funcionamiento (Royal HaskonigDHV s.f.)

6. CONCLUSIONES

Concluyendo con este trabajo se pueden distinguir las siguientes conclusiones obtenidas, la primera es la necesidad de implantar una economía circular en el tratamiento de aguas residuales, es decir una reutilización y reciclado de los nutrientes de estas aguas en vez de eliminarlos directamente, permitiendo un enfoque más sostenible y eficiente. Esto se debe a que el tratamiento de nutrientes de las aguas residuales es un proceso crítico para la conservación de la calidad del agua, del medio ambiente y la salud humana; más concretamente los nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, que en exceso pueden provocar la eutrofización del medio acuático, provocando una proliferación de algas tóxicas y la reducción del oxígeno presente.

Partiendo de esta idea principal, el trabajo se ha centrado en el estudio de distintos métodos para la eliminación y recuperación del nitrógeno y el fósforo, campo de investigación que se está desarrollando en la actualidad. Los distintos métodos que se han mencionado en el trabajo no solo permiten una reutilización de los nutrientes, generalmente como fertilizantes, sino que además optimizan los procesos existentes en las EDAR.

Aunque ya existen varios métodos comprobados capaces de reutilizar estos nutrientes, son pocas las EDAR en España que los incorporan en sus plantas. Principalmente se centran en la recuperación del fósforo, ya que este nutriente es difícil de obtener y vital en la agricultura, una de las principales fuentes económicas de España.

7. BIBLIOGRAFÍA

- ACCIONA (2022) *Tratamiento de agua: Depuración*. Disponible en: https://www.accionacom.es/tratamiento-de-agua/depuracion/?_adin=02021864894 (Accedido: 17 de noviembre de 2022)
- ACCIONA (2023) *Nuevas tecnologías para obtener fertilizantes de aguas residuales*. Disponible en: https://www.innovation-hub.com/es/agua/nuevas-tecnologias-obtener-fertilizantes-aguas-residuales/?_adin=02021864894 (Accedido: 11 de febrero de 2023)
- Agencia Sinc. (2020) *¿Cómo transformar el lodo de las aguas residuales en abono?. Iagua*. Disponible en: <https://www.iagua.es/noticias/agencia-sinc/como-transformar-lodo-aguas-residuales-abono> (Accedido: 28 de diciembre de 2022)
- Asociación Española de Empresas de Abastecimiento de Agua y Saneamiento (AEMA). (2021). *Eliminación de nitrógeno en aguas residuales*. Disponible en: <https://www.iagua.es/noticias/aema/eliminación-nitrogeno-aguas-residuales> (Accedido: 13 de diciembre de 2022).
- Barat Baviera R., Ferrer Polo J. y Seco Torrecillas A. (2021) *Economía circular de las aguas residuales. Retema*. Disponible en: <https://www.retema.es/actualidad/economia-circular-aguas-residuales> (Accedido: 5 de febrero de 2023)
- Boletín Oficial del Estado (2022) *Código de Aguas Normativa Estatal*. Disponible en: https://www.boe.es/biblioteca_juridica/codigos/codigo.php?id=32&modo=2¬a=0 (Accedido: 21 de Enero de 2023)
- Bosch-Jimenez, P., Molognoni, D., Corbella C. y Borràs E. (2020) “Sistemas bioelectroquímicos para aumentar la sostenibilidad en procesos de tratamiento de aguas”. *Automática e Instrumentación*, 516, 29-31.
- Canal Isabel II (2023) *Gestión, pionera en la recuperación de fósforo. Veolia Water Technologies*. Disponible en: <https://www.veoliawatertechnologies.com/latam/es/media/caso-estudio/canal-isabel-ii-gestion-pionera-recuperacion-fosforo> (Accedido: 21 de enero de 2023)
- Castro M., Gadea A., Mena E., Barat R. y Basset N. (2020) *Recuperación de nitrógeno y fósforo del agua residual e integración en la cadena de valor. CONOMA 2020. LIFE ENRICH*. Disponible en: <http://www.conoma2020.org/web/generico.php?idpaginas=&lang=es&menu=257&id=694&op=view> (Accedido: 3 de febrero de 2023)
- CREAF (2017) *Fósforo: De nutriente a contaminante global. Iagua*. Disponible en: <https://www.iagua.es/noticias/espana/creaf/17/03/17/fosforo-nutriente-contaminante-global> (Accedido: 1 de febrero de 2023)
- ECILIMP (2020). *Comienzan las obras de la Planta de Compostaje de lodos y biomasa «El Montecillo» en Andalucía. Aguasresiduales*. Disponible en: <https://www.aguasresiduales.info/revista/reportajes/comienzan-las-obras-de-la-planta-de-compostaje-de-lodos-y-biomasa-el-montecillo-en-andalucia> (Accedido: 28 de diciembre de 2022)
- Emasesa. (2022). *Valorización de residuos en EDAR*. Disponible en: <https://www.emasesa.com/sostenibilidad/economia-circular/valorizacion-de-residuos-en-edar/> (Accedido: 24 de noviembre de 2022)
- ENRICH (s.f.) *Boosting synergies between water and agriculture sectors. LIFE ENRICH*. Disponible en: <http://www.life-enrich.eu/> (Accedido: 3 de febrero de 2023)
- Escaler, M. I., y Mujeriego, R. (2001). “Eliminación biológica de nutrientes (nitrógeno y fósforo) mediante un proceso discontinuo de fangos activados.” *Ingeniería del agua*, 8(1), 67-77.

- Ferrando Beneyto, T. (2021). *Uso de zeolitas para la reducción de fosfatos en el agua*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Fluence (2021) *¿Qué es el Intercambio Iónico?* Disponible en: <https://www.fluencecorp.com/es/que-es-el-intercambio-ionic/> (Accedido: 28 de diciembre de 2022)
- Fundación Conoma. (2019). *Agua y Economía Circular*. Disponible en: <https://www.fundacionconoma.org/wp-content/uploads/2019/09/Agua-y-Economi%cc%81a-Circular.pdf> (Accedido: 24 de noviembre de 2022)
- HdosO Ingeniería & Consultoría especializada en la CIA (2014) *Nuevo concepto de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR). Aguas residuales*. Disponible en: <https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/nuevo-concepto-de-la-estacion-depuradora-de-aguas-residuales-edar> (Accedido: 28 de noviembre de 2022)
- Heredia Hernández, L. (2012). *Remoción de Fosfatos, Amonio y dureza total del agua residual tratada, por adsorción reactiva-precipitación e intercambio iónico*. Tesis de maestría en ciencias. Universidad Autónoma de Baja California.
- Illana Gregori, M. (2014). *Estudio de la adsorción de fosfatos en aguas de depuradora mediante intercambiadores iónicos*. Trabajo Fin de Grado. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Jiménez Cárdenas, J. (2018). *Valorización de amonio de aguas residuales como fertilizante líquido (sales de amonio) mediante contactores de membrana*. Trabajo de Fin de Grado. Universidad politécnica de Cataluña.
- Leitat (2020) *Sistemas bioelectroquímicos para incrementar la sostenibilidad en procesos de tratamiento de aguas. Retema*. Disponible en: <https://www.retema.es/actualidad/sistemas-bioelectroquimicos-incrementar-sostenibilidad-procesos-tratamiento-aguas> (Accedido: 27 de diciembre de 2022)
- Mancomunidad de la Comarca de Pamplona (2021) *Ciclo integral del agua. Informe de gestión 2021*. Disponible en: <https://www.mcp.es/sites/default/files/memorias/memoria2021/es/informe-gestion-2021/ciclo-integral-del-agua.htm> (Accedido: 28 de diciembre de 2022)
- Mancomunidad de la Comarca de Pamplona (2022) *Gestión sostenible del ciclo integral del agua*. Disponible en: <https://www.mcp.es/agua/ciclo-integral/gestion-sostenible> (Accedido: 28 de diciembre de 2022)
- Martínez Campesino, L. (2014). *Uso de membranas selectivas para la recuperación de nitrógeno amoniacal durante el proceso de digestión anaerobia*. Trabajo de Fin de Grado. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Metcalf and Eddy, (2004) *Ingeniería de aguas residuales*, Mc Graw Hill, Barcelona.
- Microlab Industrial (2017) *Las formas múltiples del Nitrógeno (amónio-nitrito-nitrato-nitrificación-desnitrificación). Aguasresiduales*. Disponible en: <https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/las-formas-multiples-del-nitrogeno> (Accedido el 1 de febrero de 2023)
- Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030 (2022) *Estrategia de Desarrollo Sostenible 2030*. Disponible en: <https://www.mdsocialesa2030.gob.es/agenda2030/documentos/eds-cast-acce.pdf> (Accedido: 11 de diciembre de 2022).
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) (2022a) *Sistemas de saneamiento y depuración. Línea de agua*. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/saneamiento-depuracion/sistemas/edar/linea-agua/default.aspx> (Accedido: 18 de noviembre de 2022)

- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2022_b) *Sistemas de saneamiento y depuración. Línea de fango*. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/saneamiento-depuracion/sistemas/edar/linea-fango/default.aspx> (Accedido: 18 de noviembre de 2022)
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2022_c). *Economía Circular*. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/> (Accedido: 23 de noviembre de 2022)
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2022_d) *Sistemas de tratamiento Valorización y reciclaje material*. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/sistema-tratamiento/Tratamientos-biologicos-compostaje.aspx> (Accedido: 28 de diciembre de 2022)
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2023) *Actuaciones de saneamiento y depuración*. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/saneamiento-depuracion/actuaciones/Madrid%20China%20Butarque%20y%20Sur.aspx> (Accedido: 21 de enero de 2023)
- Moscardó Carreño, C. (2018). *Estudio de viabilidad para la reutilización de los fangos de ETAP como material adsorbente de fósforo procedente de efluentes de EDAR*. Trabajo Fin de Máster. Universidad Politécnica de Valencia.
- Navarro Flores, A., Almarcha Morell, M. y Franco Rotger, D. (2001) “Tratamiento de aguas subterráneas contaminadas por air stripping”. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, 24, pp. 427-439
- Nuevo, D. (2021). *La depuradora de aguas más grande de España*. *Tecpa.es*. Disponible en: <https://www.tecpa.es/depuradora-mas-grande-espana/> (Accedido: 21 de enero de 2023)
- Ozyonar, F., Karagozolu, B. y Kobya, M. (2012). “Air stripping of ammonia from coke wastewater”. *Jestech*, 15(2), 85-91.
- Palomares A. E. (s. f.) *Contaminación del agua por nitratos y técnicas para su tratamiento*. *Esferadelagua*. Disponible en: <https://www.esferadelagua.es/agua-y-tecnologia/contaminacion-del-agua-por-nitratos-y-tecnicas-para-su-tratamiento> (Accedido: 1 de febrero de 2023)
- Pimentel, H. R. (2017). *Las aguas residuales y sus efectos contaminantes*. *Iagua*. Disponible en: <https://www.iagua.es/blogs/hector-rodriguez-pimentel/aguas-residuales-y-efectos-contaminantes> (Accedido: 10 de diciembre de 2022)
- Pous Rodriguez N. (2015) *Bioremediation of nitrate-polluted groundwater using bioelectrochemical systems*. Tesis doctoral. Universidad de Girona.
- Revista Técnica de Medio Ambiente (RETEMA) (2019) *La EDAR de Bens será la primera instalación de su tipo que inyecte gas renovable a la red*. *Retema* Disponible en: <https://www.retema.es/actualidad/edar-bens-sera-primera-instalacion-su-tipo-inyecte-gas-renovable-red> (Accedido: 20 de noviembre de 2022)
- Revista Técnica de Medio Ambiente (RETEMA) (2020). *Las aguas residuales, una fuente de valor*. Disponible en: <https://www.retema.es/actualidad/aguas-residuales-una-fuente-valor> (Accedido: 20 de noviembre de 2022)
- Rivas, L. S., Prieto, S. B., Romero, G. G. T. y Fernández, J. M. G. (2011). “Recuperación de fósforo mediante cristalización de estruvita en efluente de industrias de productos congelados marinos”. *Tecnología del agua*, 31(335), 26-35.
- Robledo-Mahón, T., Martín, M. A., Gutiérrez, M. C., Toledo, M., González, I., Aranda, E. y Calvo, C. (2019). “Sewage sludge composting under semi-permeable film at full-scale: Evaluation of odour emissions and relationships between microbiological activities and physico-chemical variables”. *Environmental Research*, 177, 108624.

- Rodríguez, A. C., Campos, R. A. M. y Pérez Flores, A. (2019). “Obtención y caracterización de materiales adsorbentes a partir de cascarilla de arroz”. *Revista Mutis*, 9(1), pp. 29–39.
- Royal HaskoningDHV. (s.f.). *Nereda: Eficiente tratamiento de aguas residuales*. Disponible en: <https://nereda.royalhaskoningdhv.com/> (Accedido: 11 de febrero de 2023)
- Segura Morera (2021) *Recuperación de fósforo de aguas residuales*. Trabajo Fin de Máster. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Sengupta, S., Nawaz, T. y Beaudry, J. (2015). “Nitrogen and phosphorus recovery from wastewater”. *Current Pollution Reports*, 1, 155-166.
- Sewervac Ibérica. (2018). *Eutrofización: Causas, consecuencias y soluciones*. *Iagua*. Disponible en: <https://www.iagua.es/noticias/sewervac-iberica/eutrofizacion-causas-consecuencias-y-soluciones> (Accedido: 21 de noviembre de 2022)
- UNESCO (2022) *¿Son las aguas residuales el nuevo ‘oro negro’?* Disponible en: <https://www.unesco.org/es/articles/son-las-aguas-residuales-el-nuevo-oro-negro> (Accedido: 5 de febrero de 2023)
- Valencia, M. S. (2014_a). *Estudio de la recuperación de fósforo en la EDAR de Arazuri-Pamplona*. Trabajo de Fin de Máster. Universidad politécnica de Valencia.
- Valencia, M. S. (2014_b). *Eliminación biológica de Nitrógeno y Fósforo en EDAR. Aguasresiduales*. Disponible en: <https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/eliminacion-biologica-de-nitrogeno-y-fosforo-en-edars> (Accedido: 14 de diciembre de 2022).
- Vasconcelos Corrêa, C. (2013). *Estudio de la cristalización y recuperación de hidroxiapatita en un reactor de tanque agitado*. Trabajo de investigación para estudiantes de intercambio. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Vázquez-Rodríguez, G. A. y Gallo-González, A. K. (2021). “Uso de zeolitas para el control de fuentes no puntuales de contaminación del agua: revisión”. *Ingeniería del agua*, 25(4), 241-255.
- Veolia Water Technologies (2017) *Primera planta de recuperación de fósforo en España*. *FutuEnviro*. Disponible en: https://www.veoliawatertechnologies.com/latam/sites/g/files/dvc3606/files/document/2020/09/FutuEnviro_Junio_2017.pdf (Accedido: 22 de enero de 2023)
- Villén Guzmán M. (2021) *Cómo convertir las aguas residuales en una mina de fósforo*. *Iagua*. Disponible en: <https://www.iagua.es/blogs/maria-villen-guzman/como-convertir-aguas-residuales-mina-fosforo> (Accedido: 1 de febrero de 2023)