



# **AGUAS RESIDUALES COMO FUENTE DE NUTRIENTES**

## **WASTEWATER AS A SOURCE OF NUTRIENTS**

### **MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

**Presentado por:**

**ELENA MELCÓN FERNÁNDEZ**

**Dirigido por:**

**Dr. ELOY GARCÍA CALVO**

**Alcalá de Henares, a 17 de Septiembre de 2019**

## ÍNDICE

RESUMEN.....	7
1. INTRODUCCIÓN .....	8
2. OBJETIVOS .....	10
3. NUTRIENTES EN LAS AGUAS RESIDUALES.....	11
3.1. NITRÓGENO .....	12
3.2. FÓSFORO.....	13
4. TÉCNICAS DE RECUPERACIÓN DE NUTRIENTES DE LAS AGUAS RESIDUALES.....	16
4.1. TÉCNICAS DE RECUPERACIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO .....	16
4.1.1. Recogida separada de los residuos de los inodoros (Separación de orina). 16	
4.1.2. Precipitación estruvita.....	18
4.1.3. Procesos de membrana.....	20
4.1.4. Procesos biológicos.....	24
4.1.4.1. Sistemas bioelectroquímicos .....	24
4.1.4.2. Recuperación mediante organismos acumuladores de poli-fosfatos .....	26
4.1.4.3. Mediante bacterias fototróficas púrpura.....	26
4.1.4.4. Mediante cultivos de algas .....	27
4.2. TÉCNICAS DE RECUPERACIÓN DE NITRÓGENO .....	27
4.2.1. Desorción de amoníaco por arrastre de aire (“Air Stripping”).....	27
4.2.2. Adsorción e intercambio iónico.....	29
4.3. TÉCNICAS DE RECUPERACIÓN DEL FÓSFORO .....	30
4.3.1. Precipitación/Cristalización (fase acuosa) .....	31
4.3.2. Tratamientos de química húmeda (lodos y cenizas de lodos).....	31
4.3.3. Tratamientos termoquímicos (cenizas de lodos) .....	32
4.4. PRODUCTOS OBTENIDOS Y EJEMPLOS DE APLICACIONES.....	33
5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES .....	36
6. BIBLIOGRAFÍA .....	39

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ciclos geológico (inorgánico) y orgánico del fósforo, modificado incluyendo los impactos antrópicos (Cornel et al., 2011). .....	14
<b>Figura 2.</b> Esquema del tratamiento de la orina tras su separación desde la fuente para la obtención de nitrato de amonio como fertilizante líquido (adaptada de Soares et al., 2017). .....	18
<b>Figura 3.</b> Esquema genérico de la separación mediante membranas.....	20
<b>Figura 4.</b> Representación esquemática de la recuperación simultánea de amonio y fosfato en una MEC (Chiva et al., 2018).....	25
<b>Figura 5.</b> Torre de desorción por aire.....	28
<b>Figura 6.</b> Diagrama de varias posibles localizaciones para la recuperación del fósforo en una EDAR (Adaptada de Egle, 2016).....	30
<b>Figura 7.</b> Esquema del proceso termoquímico (adaptado del Nieminen, 2010). (HM: “Heavy Metals”, Metales Pesados).....	32

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Principales productos obtenidos tras la recuperación de N y P. ....	33
<b>Tabla 2.</b> Algunas soluciones tecnológicas existentes para la recuperación de N y P. ....	34
<b>Tabla 3.</b> Proyectos de investigación en tecnologías de recuperación de N y P.....	35
<b>Tabla 4.</b> Resumen de ventajas e inconvenientes de las técnicas de recuperación de nitrógeno y fósforo descritas en trabajo.....	37
<b>Tabla 5.</b> Resumen de ventajas e inconvenientes de las técnicas de recuperación de nitrógeno descritas en trabajo. ....	38
<b>Tabla 6.</b> Resumen de ventajas e inconvenientes de las técnicas de recuperación de fósforo descritas en trabajo.....	38

## TABLA DE ABREVIATURAS

BES: *Bioelectrochemical systems* (Sistemas Bioelectroquímicos)

EBPR: Enhanced biological phosphorus removal (Eliminación biológica mejorada de fósforo)

ED: *Electrodialysis* (Electrodiálisis)

EDAR: Estación Depuradora de Aguas Residuales

FO: *Forward Osmosis* (Ósmosis Directa)

MBR: *Membrane Bioreactor* (Biorreactor de membrana)

MD: *Membrane Distillation* (Destilación por membrana)

MF: Microfiltración

NF: Nanofiltración

PAO: *Polyphosphate-accumulating organism* (Organismo acumulador de polifosfato)

PPB: *Purple phototrophic bacteria* (Bacteria fototrófica púrpura)

RO: *Reverse Osmosis* (Ósmosis Inversa)

UF: Ultrafiltración

## **RESUMEN**

La recuperación de recursos como agua, energía y nutrientes de las aguas residuales es uno de los mayores desafíos a los que las sociedades de hoy en día han de enfrentarse. La necesidad de recuperar nutrientes como nitrógeno y fósforo surge, no solo porque se trate de un recurso limitado (en el caso del fósforo), sino por acercarnos cada vez más a un modelo circular de los recursos y a un sistema más sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

En los últimos años se están desarrollando tecnologías que permiten la recuperación de los nutrientes, mejorando las técnicas tradicionales que solo procedían a su eliminación, para evitar los problemas asociados a sus elevadas concentraciones en los medios acuáticos, como la eutrofización.

El presente trabajo pretende proporcionar una perspectiva global de los procesos y técnicas que se han venido desarrollando en el tratamiento de las aguas residuales y que persiguen una recuperación de los nutrientes contenidos en ellas, focalizándonos en el nitrógeno y el fósforo. Además de una revisión del estado del arte de las técnicas ya existentes para la recuperación de nitrógeno, fósforo y de ambos conjuntamente, se han tenido en cuenta también las técnicas emergentes y líneas de investigación en desarrollo, así como, las ventajas e inconvenientes que cada una de las técnicas aportan.

## 1. INTRODUCCIÓN

La gestión de los residuos es uno de los mayores problemas a los que las sociedades de hoy en día han de hacer frente, por lo que desarrollar mejores sistemas de tratamiento de residuos ha de ser objetivo prioritario para gobiernos y ciudadanía.

Centrándonos en las aguas residuales, éstas han de pasar unos procesos de tratamiento adecuados antes de ser devueltas a su medio receptor, ya sea para su reutilización en agricultura, retorno a ríos, mar, etc. En este sentido, existe un marco legislativo que establece unos parámetros de calidad, los cuales han de ser respetados antes de que las aguas tratadas sean vertidas, con el fin de evitar problemas derivados de su contaminación.

En particular, uno de los procesos indispensables que se lleva a cabo en las estaciones de depuración de aguas residuales (EDARs) es la eliminación de nutrientes, especialmente de nitrógeno y fósforo, hasta alcanzar unos valores mínimos permitidos que no sobrepasen los valores máximos permitidos por ley para cada uno de ellos.

El nitrógeno (N) y el fósforo (P) son ambos nutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas, por lo que se encuentran en la composición de los fertilizantes utilizados en agricultura. El uso excesivo de fertilizantes origina que, en muchos casos, dichos nutrientes finalicen en las aguas superficiales y subterráneas, contaminándolas. Además, a esto se suma el aporte proveniente de las industrias y de las viviendas. Todo ello hace que las concentraciones de ambos elementos en el influente de la EDAR suela encontrarse muy por encima de los valores máximos permitidos para su vertido y sea necesaria su eliminación.

Las concentraciones elevadas de nitrógeno y fósforo pueden ocasionar graves problemas graves en los medios acuáticos, como el de la eutrofización. Esto se debe a que dichos nutrientes actúan como limitadores del crecimiento de las poblaciones en los ecosistemas, de manera que, cuando sus concentraciones aumentan, los organismos empiezan a aprovecharlos aumentando, en consecuencia, su crecimiento exponencialmente. Asimismo, la proliferación de algas en los sistemas acuáticos provoca enturbiamientos en las aguas. Estas algas impiden que la luz pueda penetrar en el fondo del ecosistema, acarreando la imposibilidad al resto de especies vegetales de realizar la fotosíntesis y ocasionando, por

tanto, su muerte. Como consecuencia, comienzan a aparecer bacterias que se alimentan de esa materia muerta consumiendo el oxígeno que queda en el agua hasta agotarlo, lo que puede conllevar la muerte además de otros organismos, y la muerte del ese ecosistema en general.

Por tanto, la eutrofización es una de las principales causas de la necesidad de eliminar el nitrógeno y fósforo durante los tratamientos de las aguas residuales. Concretamente, los límites en las concentraciones máximas permitidas de nitrógeno y fósforo de vertido de aguas residuales urbanas varían en cada país acorde a su normativa específica. En particular, en España oscilan de 1 a 2 mg/l de  $P_{total}$  (dependiendo del nº de habitantes equivalente) y de 10 a 15 mg/l de  $N_{total}$  (DOCE, 1991).

Ahora bien, sabiendo que es necesario eliminar nutrientes como el nitrógeno y el fósforo de las aguas residuales, ¿por qué en lugar de eliminarlos, no los recuperamos? En los últimos tiempos se han realizado esfuerzos considerables en este sentido, mediante el desarrollo e implantación de técnicas y sistemas que permiten recuperar y aprovechar estos nutrientes.

Las aguas residuales no solo pueden amortiguar los efectos de la escasez de agua mediante su tratamiento y posterior reutilización, sino que también proporcionan una alternativa para la recuperación de energía y nutrientes. De hecho, la recuperación de nutrientes de las aguas residuales permite compensar, además, la extracción de recursos limitados, como el caso del fósforo, que al tratarse de un elemento no renovable ni sintetizable artificialmente, su agotamiento supone un riesgo para la producción de alimentos a nivel mundial (Diaz-Elsayed et al., 2019). Por otro lado, pese a que no encontramos los mismos problemas si hablamos de nitrógeno a nivel de disponibilidad del elemento (al no considerarlo limitado), el interés en su recuperación en las EDARs puede venir motivado tanto por el gasto energético que supone la síntesis de los fertilizantes nitrogenados (mediante el proceso Haber-Bosch), como por la intencionalidad de acercarnos a un sistema cada vez más sostenible y menos dañino con el medio ambiente.

Esta motivación es la base de los trabajos que se están desarrollando para mejorar las tecnologías de recuperación de nutrientes y de su integración, en la medida de lo posible, en las infraestructuras de las EDARs. De esta forma, los nutrientes recuperados pueden ser

devueltos al suelo en forma de fertilizantes, ofreciendo, asimismo, una oportunidad para rentabilizar dichas tecnologías de recuperación.

Mediante este trabajo se trata de llevar a cabo una revisión de las tecnologías y procesos que se desarrollan con el objetivo de recuperar nutrientes (principalmente nitrógeno y fósforo) de las aguas residuales. Sin ahondar mucho en los procesos de cada técnica se intenta dar una visión global del empleo de los sistemas de reutilización de los nutrientes. Para ello, tras una introducción sobre los nutrientes en las aguas residuales, se describen diferentes técnicas aplicables a la recuperación de fósforo y nitrógeno (tanto de forma conjunta como individualizada). Asimismo, en este estudio bibliográfico, se han tenido en cuenta también las ventajas e inconvenientes de cada una de las técnicas, así como la importancia de las actividades de investigación que permiten mejorar las soluciones ya existentes.

## **2. OBJETIVOS**

Los objetivos perseguidos mediante la elaboración de este trabajo son:

- Proporcionar una visión global de los diferentes aspectos relacionados con la recuperación de nutrientes, haciendo especial enfoque en el nitrógeno y el fósforo, de las aguas residuales.
- Llevar a cabo una revisión bibliográfica de las distintas técnicas, procesos y soluciones existentes hasta ahora y actualmente en desarrollo.
- Conocer los principios básicos de las distintas técnicas de recuperación de nutrientes en el tratamiento de aguas residuales.
- Identificar las ventajas e inconvenientes de cada una de las técnicas, así como sus ámbitos de aplicación.
- Analizar los beneficios de la recuperación de nutrientes frente a los de su eliminación.
- Conocer las líneas de investigación que se están siguiendo en la actualidad para mejorar las técnicas de recuperación de nutrientes a partir de las aguas residuales.
- Desarrollar y consolidar las capacidades para buscar material bibliográfico científico (libros, artículos de revistas, contribuciones a conferencias, tesis



doctorales, trabajos fin de grado y máster) a través de diversas plataformas digitales y bases de datos (“Science Direct” de Elsevier, “Google Scholar”, “ResearchGate”, “ISI Web of Knowledge”, etc.), así como para combinar y sintetizar la información encontrada.

### **3. NUTRIENTES EN LAS AGUAS RESIDUALES**

El nitrógeno y el fósforo son dos de los principales nutrientes contenidos en las aguas residuales junto al carbono y ambos juegan un papel esencial en el crecimiento de las plantas y en el suministro de alimentos.

En concreto, en las aguas residuales estos nutrientes se encuentran de forma disuelta. Por un lado, el nitrógeno aparece principalmente en forma de ion amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) y en mínimo porcentaje como compuestos orgánicos de nitrógeno (por ejemplo, proteínas y urea), mientras que el fósforo existe principalmente como fosfato inorgánico y un reducido porcentaje como fósforo unido orgánicamente (Cornel et al., 2011). Por lo tanto, la recuperación y reutilización de estos elementos a partir de las aguas residuales puede resultar muy beneficiosa tanto económica como ambientalmente.

Como se ha mencionado en la introducción la presencia de nitrógeno y fósforo en las aguas residuales pondría en riesgo los ecosistemas acuáticos de no ser tratadas, sometiéndolos a problemas de eutrofización. Este fenómeno se refiere al proceso natural o artificial (antrópico) de aporte de nutrientes a los cuerpos de agua (lagos, humedales, embalses, estuarios, ríos y aguas marítimas) y a los efectos resultantes de dicha aportación.

La mayoría de los problemas de eutrofización a nivel mundial son consecuencia de la actividad del ser humano (agricultura, ganadería, actividad industrial, contaminación atmosférica, residuos domésticos como detergentes, actividad forestal, etc.)

La Directiva 91/271/CEE del 21 de mayo de 1991 (DOCE, 1991), sobre el tratamiento de las aguas urbanas define el concepto de eutrofización 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”.

La proliferación descontrolada de algas y otras especies vegetales superiores debido al aumento en las concentraciones de nutrientes, como nitrógeno y fósforo, produce que éstas se sitúen en las superficies de las columnas de agua impidiendo la penetración de luz a las zonas más profundas. Este fenómeno impide a otros organismos vegetales realizar la fotosíntesis, disminuyendo la concentración de oxígeno en esta zona y la pérdida de diversidad biológica de los cuerpos de agua y del ecosistema en general.

Una de las medidas para prevenir la eutrofización es reducir y controlar el uso excesivo de fertilizantes en la agricultura.

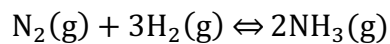
Para intentar evitar los daños producidos por dicho fenómeno se recurre a los tratamientos de aguas residuales en EDAR, donde, entre otras actividades de mejora en la calidad de las aguas, se reducen los niveles en las concentraciones de nitrógeno y fósforo para su retorno al medio receptor. En las EDARs las aguas usadas o contaminadas realizan un circuito en el que mediante procesos físicos, químicos y biológicos se eliminan los nutrientes en exceso y contaminantes, hasta alcanzar cumplir los estándares regulados según la normativa de vertido.

### 3.1. NITRÓGENO

El nitrógeno es un nutriente esencial para la vida de todos los organismos y está fuertemente relacionado con el crecimiento y desarrollo de las plantas. Es un componente fundamental de los ácidos nucleicos y de los aminoácidos, muestra gran versatilidad al estar presente en diferentes compuestos y posee diversos estados de oxidación. Además, puede formar parte de estructuras orgánicas, como proteínas, o de estructuras inorgánicas, como amoníaco.

Los únicos minerales importantes que contienen nitrógeno son el nitrato de potasio ( $\text{KNO}_3$ ) y el nitrato de sodio ( $\text{NaNO}_3$ ), localizadas explotaciones de estos minerales en algunas regiones desérticas (por ejemplo, Chile).

Se trata de un elemento que se encuentra principalmente en la atmósfera, constituyendo el 78,1% de los gases que la componen. Por tanto, la materia prima para la producción de los fertilizantes nitrogenados se encuentra en cantidades más que suficientes. Sin embargo, su producción a partir de nitrógeno elemental o aire, mediante el conocido proceso de Haber-Bosch requiere mucha energía. En dicho proceso el nitrógeno e hidrógeno reaccionan a altas presiones, con incremento de temperatura y presencia de un catalizador (generalmente óxidos de hierro) de acuerdo a la siguiente ecuación (Cornel et al., 2011):



Pese a que la producción de amoníaco no está sometida a las mismas limitaciones que la producción de fósforo, al ser considerado el nitrógeno un recurso inagotable, el proceso para su obtención es, como se ha mencionado anteriormente, muy costoso, lo que encarece el precio del producto final (fertilizante nitrogenado). La búsqueda de métodos alternativos al proceso de Haber-Bosch para la obtención de amoníaco es necesaria, no solo por los precios elevados de los fertilizantes nitrogenados, si no por el ahorro energético, la reducción de la huella ecológica, y la orientación hacia un modelo de economía circular en el que los residuos puedan ser concebidos como recursos.

El amonio presente en las aguas residuales es un producto tóxico que procede principalmente de haber sido excretado de forma natural por el metabolismo de los animales, además del procedente del uso de fertilizantes y de la emisión de efluentes en procesos industriales. Las concentraciones de nitrógeno amoniacal pueden variar de 5 a 1000 mg/L en las aguas residuales industriales y de 10 a 200 mg/L en las aguas residuales domésticas (Ashrafizadeh y Khorasani, 2010).

Típicamente, la eliminación de nitrógeno en las EDAR's se basa en la nitrificación y desnitrificación biológica, de alto consumo energético, por lo que las tecnologías emergentes buscan reducir las necesidades energéticas de los sistemas de tratamiento y además, recuperar los recursos (Nancharaiah et al., 2016).

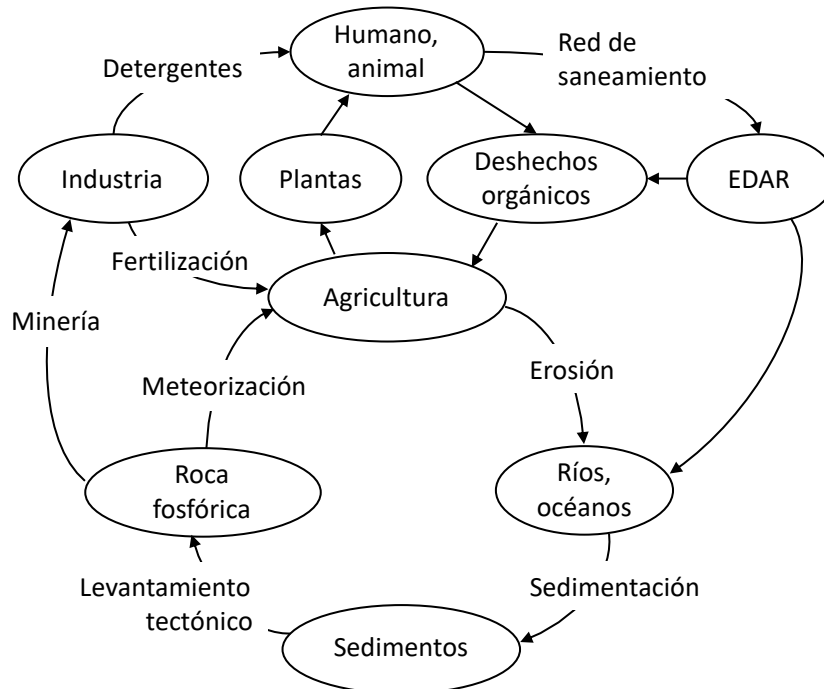
### 3.2. FÓSFORO

El fósforo es un elemento esencial para los organismos. Además del carbono, oxígeno, hidrógeno, y nitrógeno, el fósforo inorgánico forma parte de las moléculas de ADN y

ARN, y las células lo utilizan para almacenar y transportar energía mediante el adenosín trifosfato (ATP).

Se trata de un nutriente esencial y limitante para el crecimiento de las plantas. Como componente vital de las células, el fósforo no puede ser reemplazado por ningún otro elemento, ya que no existe ningún insumo, natural o sintético, capaz de ocupar su lugar. Es por ello, que el fósforo sea diferente a otros recursos, como los combustibles fósiles, de los que existen alternativas potenciales, o como los fertilizantes nitrogenados, los cuales pueden ser producidos a partir del nitrógeno del aire mediante el proceso de Haber-Bosch (Cornel et al., 2011).

La reserva de fósforo en los ecosistemas son las rocas, donde se encuentra enlazado con el oxígeno en forma de ion fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ). Asimismo, este elemento se encuentra en la naturaleza en los minerales del grupo de los fosfatos, en los sedimentos oceánicos, ricos en restos de seres vivo acuáticos y en los depósitos de guano o sedimentos formados por excrementos de aves marinas.



**Figura 1.** Ciclos geológico (inorgánico) y orgánico del fósforo, modificado incluyendo los impactos antrópicos (Cornel et al., 2011).

Una de las particularidades del ciclo del fósforo (ver Figura 1) es que carece de etapa atmosférica. El fósforo posee un ciclo geológico inorgánico y dos ciclos orgánicos (uno en tierra y el otro en agua).

Por un lado, el ciclo inorgánico es el ciclo de la erosión, transporte a los océanos, sedimentación, elevación tectónica, y alteración de la roca fosfatada en fosfato disponible para las plantas en el suelo (Filippelli, 2002). La duración de este ciclo se estima de varios millones de años, por lo que consideramos que el fosfato que llega a los océanos no se encuentra utilizable para usos agrícolas.

Por otro lado, los dos ciclos orgánicos describen el fósforo como parte de la cadena alimentaria. Uno de ellos se sitúa en la tierra (suelo-plantas/animales-residuos orgánicos-suelo) y el otro en el agua. El tiempo de estos ciclos va de unas semanas hasta un año (Bennett y Carpenter, 2012).

Los sistemas actuales de agricultura dependen de fertilizantes fosfáticos para desarrollar sus actividades intensivas, pero la roca fosfática, principal fuente para la obtención de fósforo, es un recurso limitado (Cordell et al., 2009). No obstante, el fósforo es un elemento que se utiliza en cantidades alarmantes para la producción de fertilizantes que aseguran la productividad agrícola y el suministro de alimentos. Como consecuencia, el fósforo ha sido nombrado como “nutriente en vías de desaparición” debido a su alta demanda en todo el mundo en contraste a su finita y asimétrica distribución (Gilbert, 2009). De hecho, se estima que este recurso puede agotarse en aproximadamente 200 años (Tarragó et al., 2016).

Las reservas de fósforo son escasas y están muy concentradas geográficamente, por lo que unos pocos países tienen el control. Según el Servicio Geológico de los Estados Unidos, casi el 90% de las reservas estimadas se encuentran en cinco países: Marruecos (el primer exportador mundial), China, Argelia, Siria y Sudáfrica. Es por esta razón que los países carentes de depósitos de fósforo dependan por completo de las importaciones y, por tanto, sean especialmente vulnerables a las fluctuaciones en los precios de fertilizantes y del mineral de fósforo (Egle et al., 2016).

La presencia de fosfatos en las aguas residuales urbanas es debida principalmente a la actividad humana: detergentes, restos de comida, orina y heces, aditivos alimenticios y otros productos. Concretamente, en las aguas residuales, el fósforo se puede presentar en las siguientes formas solubles: ortofosfatos (en mayor proporción), polifosfatos y como fósforo orgánico. Pese a que la gran mayoría lo encontramos en forma de disolución, puede presentarse en forma de partículas granuladas en una pequeña proporción del total de fósforo.

El fósforo orgánico proviene tanto de los residuos alimenticios como de micciones humanas. El inorgánico en cambio, proviene de residuos de jabones y detergentes comerciales, además de aguas de lluvia que contienen residuos de fertilizantes agrícolas.

Según un estudio de las reservas de fósforo en Centroeuropa, las aguas residuales urbanas contienen una cantidad de fósforo que podría teóricamente reemplazar del 40 al 50% del total de fertilizante a base de fósforo aplicado anualmente (Egle et al., 2016).

Las aguas residuales urbanas son una fuente prometedora de fósforo mediante su recuperación y reutilización, pudiendo sustituir en parte al fósforo proveniente de las minas de la roca fosfórica (Egle et al., 2016).

#### **4. TÉCNICAS DE RECUPERACIÓN DE NUTRIENTES DE LAS AGUAS RESIDUALES**

##### **4.1. TÉCNICAS DE RECUPERACIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO**

###### **4.1.1. Recogida separada de los residuos de los inodoros (Separación de orina)**

La mayoría de los nutrientes de las aguas residuales urbanas proceden de la orina, que suponen solo un 1% aproximadamente del volumen total de aguas residuales. De hecho, alrededor del 80% del nitrógeno, 50% del fósforo y 70% del potasio de las aguas residuales urbanas, provienen de la orina (Wilsenach et al., 2003).

Una persona excreta alrededor de 4.37-4.55 kg N/año, 0.54-0.73 kg P/año y 1.2-1.37 kg K/año, a través de la orina y heces (Anand y Apul, 2014).

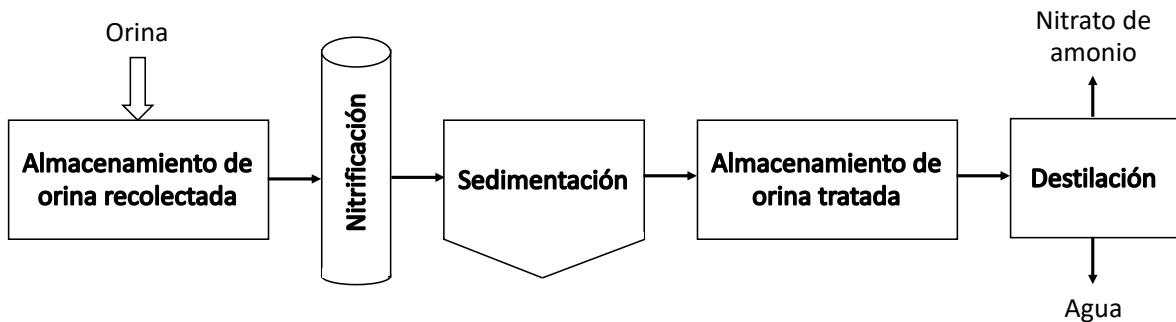
Bajo la idea de tratar las aguas residuales como recurso surgió el concepto de sistema de separación de efluentes desde el origen, con el fin de aprovechar los nutrientes contenidos en la orina.

Los nutrientes pueden ser recuperados a través de la recogida separada de los residuos de los inodoros, retretes de compostaje, fertirrigación (técnica que permite la aplicación simultánea de agua y fertilizantes a través del sistema de riego) y reutilización cercana directa para la fertilización de plantas. (Asano et al., 2007; Anand y Apul, 2014). Es por ello que el uso de orina como fertilizante es especialmente atractivo en aquellas zonas donde las distancias entre la fuente de la orina y el lugar de su aplicación son cortas. Esto se refiere principalmente a aquellas zonas rurales donde los costes de los fertilizantes puedan resultar inasequibles para sus habitantes. En casos en los que las distancias entre las fuentes de este recurso (orina) y las zonas de aplicación aumentan se debe considerar aumentar las concentraciones de los nutrientes, ya que la concentración de nitrógeno en la orina es de solo un 1% de su peso aproximadamente, comparado al 40% por peso de los fertilizantes comerciales (Cornel et al., 2011).

Para reducir el volumen y aumentar el concentrado de nutrientes se puede someter a la orina a procesos tales como evaporación, secado o precipitación para la obtención de estruvita (es decir, fosfato de amonio y magnesio, explicado en el apartado 4.1.2), facilitando así su transporte y manejabilidad. En este sentido, Maurer y colaboradores (Maurer et al., 2003) demostraron que aumentar la concentración de nutrientes de la orina mediante el proceso de evaporación es energéticamente más eficiente que la obtención de fertilizantes amoniacales mediante el proceso de Haber-Bosch. Sin embargo, obtener estruvita a partir de la orina puede parecer más intensivo energéticamente si nos centramos solo en la recuperación de uno de los nutrientes (bien sea nitrógeno o bien se trate de fósforo). No obstante, si nos centramos en la recuperación de ambos, el balance energético de dicho proceso se vuelve favorable (Maurer et al., 2003).

Por otro lado, también cabe destacar que otro de los beneficios de la separación en origen de la orina del resto de aguas residuales es que se disminuye el exceso de carga de nutrientes que llegan a las EDARs (Larsen et al., 2009; Ahmed et al., 2015).

Existen varias soluciones y ejemplos de aplicación de esta técnica en escenarios reales. Por ejemplo, la empresa VUNA ([www.vuna.ch](http://www.vuna.ch)) surgió en 2016 a raíz de un proyecto de investigación en el que se llevaron a cabo experimentos de laboratorio y experimentos piloto consistentes en la producción de nitrato de amonio a partir de la separación de la orina desde la fuente. El experimento consta de dos pasos principales, la nitrificación y la destilación (como se observa en la Figura 2).

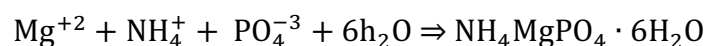


**Figura 2.** Esquema del tratamiento de la orina tras su separación desde la fuente para la obtención de nitrato de amonio como fertilizante líquido (adaptada de Soares et al., 2017).

En particular, la orina se recoge en inodoros especiales de separación de orina y posteriormente es estabilizada mediante el proceso de nitrificación. Durante el este proceso el amonio es biológicamente transformado a nitrato y filtrado a través de carbón activo para la eliminación de hormonas y medicamentos. La solución diluida de nitrato de amonio se procesa en el destilador, donde se reduce su volumen y se eliminan patógenos. Como resultado se obtiene una solución concentrada final comercializada como fertilizante líquido “Aurin” (Soares et al., 2017).

#### 4.1.2. Precipitación estruvita

Otra opción para recuperar nutrientes a partir de las aguas residuales es mediante técnicas basadas en la precipitación/cristalización para la obtención de sales de baja solubilidad como es el ejemplo de la estruvita ( $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ). Esta sal blanca cristalina, considerada fertilizante de liberación lenta, se forma cuando tiene lugar la precipitación de los iones magnesio, amonio y ortofosfato, en una relación molar 1:1:1, siguiendo la siguiente reacción reversible:





La estruvita se forma en un rango de pH de 7-11, donde alcanza su valor mínimo de solubilidad a pH 9-10 (Czajkowska, 2015; Soares et al., 2017). A un valor fijo del pH, el nivel de sobresaturación de la disolución afecta al proceso de cristalización al influir en la velocidad de crecimiento de los cristales, siendo la reacción de cristalización más rápida a mayores niveles de sobresaturación. Aunque la temperatura tiene un menor impacto en la cristalización de estruvita que otros parámetros, como el pH y la sobresaturación, puede afectar a la solubilidad de la estruvita y a la morfología del cristal.

La precipitación de este mineral se da a menudo de forma espontánea cuando se cumplen las condiciones óptimas, causando importantes daños que se traducen en incrustaciones en áreas específicas de las estaciones de tratamiento de aguas, tales como; tuberías que conducen los licores de lodos, centrífugas, filtros, etc. Para solventar los problemas originados por la precipitación descontrolada de estruvita, se lleva a cabo la precipitación controlada en reactores específicos de cristalización/precipitación, mediante los cuales se ayuda al mantenimiento de las instalaciones y se obtiene, además, un producto aprovechable como fertilizante.

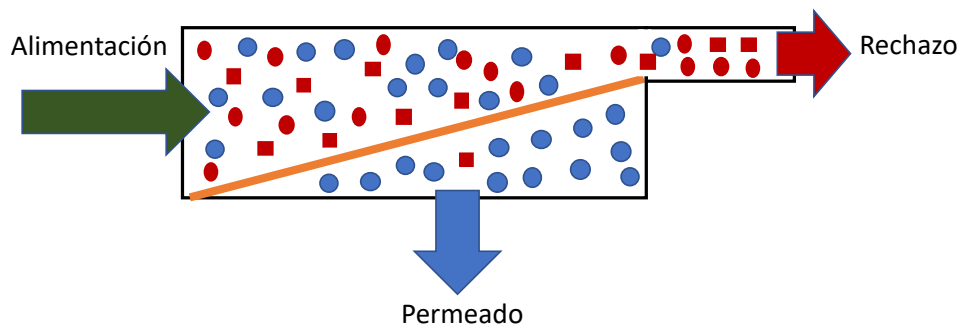
Uno de los inconvenientes de este proceso es que se necesitan altas concentraciones de fosfatos en los flujos de los que pretendamos obtener la estruvita como producto, por lo que está especialmente indicado para efluentes de digestión anaerobia de fangos de EDAR (Punto 3.2 de la Figura 6).

Según Cornel y colaboradores (Cornel et al., 2011) para que el proceso sea económicamente viable se necesitan efluentes con concentraciones de fósforo superiores a los 50 mg/L. Es por ello que las tecnologías desarrolladas en la recuperación de fósforo y nitrógeno mediante la cristalización/precipitación de estruvita, suelen emplear el licor de deshidratación de fangos digeridos, ya que las concentraciones de fósforo oscilan entre 60-100mg/L, las de amonio entre 300-700 mg/L y hay calcio y magnesio en condiciones alcalinas. Habitualmente, para optimizar el proceso, se requiere la adicción de magnesio al encontrarse en una concentración inferior a la necesaria. Generalmente se suele añadir cloruro de magnesio ( $MgCl_2$ ) o hidróxido de magnesio ( $Mg(OH)_2$ ) y en ciertas ocasiones se puede requerir la adicción también de potasio con el fin de obtener una estruvita que satisfaga necesidades específicas de un determinado cultivo.

Asimismo, estudios previos han demostrado la recuperación de nutrientes mediante la precipitación de estruvita a partir de diferentes flujos ricos en nutrientes, como aguas residuales de ganadería (Ichihashi e Hirooka, 2012; Gerardo et al., 2013), licor de deshidratación de fangos digeridos (Punto 3.2 de la Figura 6) (Pastor et al., 2010; Lahav et al., 2013), y orina (Punto 1 de la Figura 6)(Ronteltap et al., 2010; Triger et al., 2012).

#### 4.1.3. Procesos de membrana

Los procesos de membrana pueden utilizarse, por ejemplo, como tratamiento previo a la precipitación de estruvita (apartado 4.1.2), para conseguir corrientes más concentradas en fosfatos y en consecuencia una mayor eficiencia en la precipitación de dicha sal.



**Figura 3.** Esquema genérico de la separación mediante membranas.

Los procesos de separación por membrana cumplen un principio bastante simple: la membrana actúa como un filtro específico que deja pasar el agua (en la Figura 3 “permeado”), mientras que retiene sólidos en suspensión y otras sustancias (en la Figura 3 “rechazo”). Las tecnologías de membrana se pueden utilizar como una alternativa a múltiples procesos de separación como pueden ser: floculación, adsorción, extracción por aire o destilación (San José Caballero, 2017).

Hay varias fuerzas conductoras que permiten que las sustancias atraviesen la membrana como son: (1) aplicación de alta presión, (2) mantenimiento de gradiente de concentración (ósmosis), (3) potencial eléctrico y (4) gradiente térmico.

Los procesos de membrana más comunes son aquellos en los que se fuerza a que la corriente de agua atraviese la membrana mediante la aplicación de presión. Los procesos

de separación por membranas han sido utilizados en multitud de operaciones de aguas residuales (Norrdahl et al., 2006, Masse et al., 2007; Hasanoğlu et al., 2010) con microfiltración (MF), ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (RO), como las predominantes. Estos procesos de membrana ofrecen varias ventajas ya que las tasas de recuperación de amoníaco no son dependientes de los caudales sólidos o gaseosos, hay ausencia de contaminantes secundarios en el permeado de amoníaco, y la concentración de amoníaco no afecta a la eficiencia para su eliminación (Sengupta et al., 2015).

Concretamente, las filtraciones mediante nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (RO) han demostrado unos altos niveles de retención o rechazo (forma de estimar el grado de separación conseguido por la membrana) y como consecuencia un alto potencial para la recuperación de nutrientes de las aguas residuales. Además, la ósmosis inversa (RO) se ha utilizado para aumentar la concentración de la orina proveniente del sistema de inodoros con separación de efluentes (véase apartado 4.1.1), dando lugar a unos valores altos de retención de amonio, fosfato y potasio (Maurer et al., 2006).

A pesar de su potencial, los procesos de membrana por corriente de presión (como NF y RO) no están exentos de limitaciones. Uno de los problemas más importantes a los que se enfrentan es el ensuciamiento de las membranas. Se trata de un fenómeno inevitable, que supone una reducción del área disponible de filtrado debido a la formación de precipitados (incrustaciones), haciéndose necesarios unos exhaustivos ciclos de limpieza. Dicha limpieza puede llevarse a cabo de forma física (mediante la aireación y la relajación/retrolavado de las membranas) y química (mediante el uso de reactivos que dependerán de la naturaleza orgánico o inorgánica de las incrustaciones) (Vásquez, 2015).

Debido a los problemas anteriores y sumando su alto coste energético, cabe mencionar tres procesos de membrana emergentes que podrían ayudar a mejorar la recuperación de nutrientes de las aguas residuales como son: la ósmosis directa (FO, del inglés “Forward Osmosis”), la destilación por membrana (MD, del inglés “Membrane distillation”) y la electrodiálisis (ED, en inglés “Electrodialysis”), que utilizan como fuerzas conductoras: gradiente de concentración, gradiente térmico y potencial eléctrico, respectivamente. En concreto, las principales ventajas de estas tecnologías son:

- Pueden facilitar el aumento en los factores de concentración para que pueda darse la precipitación de estruvita.
- Su selectividad es óptima para distintos nutrientes valiosos en distintos formatos.
- Sus necesidades energéticas y los costes asociados las hacen más competitivas que los procesos de membrana de presión como fuerza impulsora.

Asimismo, la combinación de estos procesos con el proceso de precipitación ya existente puede conducir a mejorar la gestión y las vías de recuperación de nutrientes en las instalaciones de tratamiento de aguas residuales (Xie et al., 2016).

A continuación, se describen brevemente las principales características de estos tres procesos:

- *Osmosis directa (FO)*: En este proceso se utiliza la diferencia de presión osmótica entre los dos lados de la membrana como fuerza conductora. A diferencia de la osmosis inversa, en este caso no es necesario aplicar presión hidráulica y el fluido de baja concentración de solutos pasa al lado de mayor concentración. Entre las ventajas de este proceso cabe destacar que, aparte de que la osmosis directa requiere menos aporte de energía que los procesos de osmosis inversa, los procesos de FO son menos propensos a los ensuciamientos de membrana e incrustación (Mi y Elimelech, 2010).
- *Destilación por membrana (MD)*: La destilación por membrana es un proceso de conducción térmica en el que solo las moléculas en estado de vapor son transportadas a través de los microporos de la membrana hidrofóbica. Centrándonos en la recuperación de amoníaco, al tratarse de una sustancia muy volátil, éste se recoge en forma gaseosa. Por ello la MD, conducida por la diferencia de presión de vapor, no solo es capaz de lograr un alto factor de concentración, sino que además, logra recuperar amoníaco volátil como fertilizante de alta calidad (Xie et al., 2016).
- *Electrodialisis (ED)*: En este proceso de membrana los iones son transportados a través de una membrana semipermeable bajo la influencia de un potencial eléctrico. Las membranas son aniónicas o catiónicas, lo que diferencia qué iones (positivos o negativos), fluirán a través de ella. Algunas de las principales ventajas de la ED

son: no hay necesidad de presión osmótica, no se requieren químicos adicionales, buena calidad del producto y respetuoso con el medio ambiente. Por el contrario, el mayor problema al que hace frente es el ensuciamiento de la membrana que causa el aumento de la resistencia de la membrana, la disminución del flujo y, por tanto, del rendimiento de la migración de iones, y una mayor polarización (Akhter et al., 2018).

Como se ha comentado, cada uno de estos procesos emergentes permite mejorar la recuperación de nutrientes de las aguas residuales optimizando diferentes factores. Por ejemplo, el proceso de FO permite maximizar la concentración de nutrientes, así como el proceso de ED permite mejorar la selectividad de los nutrientes, mientras que el proceso de MD permite mejorar ambos aspectos. Teniendo esto en cuenta, es posible combinar varios procesos con el fin de maximizar la eficiencia global de recuperación de nutrientes, dando lugar a los denominados procesos híbridos (Xie et al., 2016).

Existen múltiples combinaciones posibles en función del ámbito de aplicación u objetivo al que vayan destinados. Algunos ejemplos son:

- Recuperación de fósforo: En este sentido, la combinación de varios procesos de membrana puede mejorar la eficiencia de la precipitación de estruvita (Xie et al., 2016). Por ejemplo (Zhang et al., 2013), utilizaron el proceso de ED en combinación con un reactor de precipitación, mejorando la captura selectiva del fosfato en el efluente del reactor de estruvita. Como resultado, se consiguió mejorar la recuperación global de fósforo en un 97%.
- Recuperación de amoníaco: Con el objetivo de obtener una alta concentración de amonio, muy útil en aplicaciones agrarias, Mondor y sus colaboradores (Mondor et al., 2008) combinaron los procesos de ED y RO, donde la concentración del flujo rico en amonio procedente de los compartimentos de concentración de la ED fue aumentada posteriormente con un procesos de RO. Asimismo, se pueden utilizar sistemas híbridos de ED y MD para capturar el amoníaco volátil (Udert y Wächter, 2012). Por ejemplo, el proceso de ED puede producir amoníaco a partir de nitrato de amonio de las aguas residuales utilizando un solvente de separación y, posteriormente, se puede recuperar el amoníaco mediante desorción por MD.

- Producción de agua potable complementando la recuperación de nutrientes: Este es uno de las principales motivaciones de combinar el proceso de FO con otros procesos de membrana (Xie et al., 2016). Por ejemplo, un sistema híbrido combinando un proceso de FO y uno de RO puede proporcionar un alto rechazo de fosfato y amonio del efluente de aguas residuales (Hancock et al., 2013) o de fangos ricos en nutrientes (Nguyen et al., 2013) y al mismo tiempo ofrecer agua tratada de alta calidad. En otros casos, un proceso FO (que permite concentrar el ortofosfato y el amonio para la recuperación del fósforo y nitrógeno en forma de estruvita), puede combinarse con un proceso de MD para extraer agua limpia de los fangos digeridos (Xie et al., 2014). Otra posibilidad es combinar un proceso de FO con un reactor biológico de membrana (MBR, del inglés “Membrane Bioreactor”)<sup>1</sup> (Holloway et al., 2015), ya que el concepto osmótico del MBR puede beneficiarse de varios factores de la FO, como el alto rechazo de nutrientes de la membrana, el alto factor de concentración dada su baja propensión al ensuciamiento y el aporte de iones de magnesio que facilitan la precipitación de nutrientes (Xie et al., 2016). Como ejemplos, cabe destacar las propuestas de Qiu y colaboradores (Qiu et al., 2015) para extraer directamente fósforo de las aguas residuales a partir de sistemas híbridos FO-MBR. Finalmente, hay que destacar que, a pesar de su versatilidad y robustez, los sistemas híbridos basados en FO presentan inconvenientes importantes, como la acumulación de contaminantes que pueden reducir las prestaciones de estos sistemas (Hancock et al., 2013; Xie et al., 2014, 2016).

#### 4.1.4. Procesos biológicos

##### 4.1.4.1. Sistemas bioelectroquímicos

Los sistemas bioelectroquímicos (BES, del inglés “Bioelectrochemical Systems”) combinan procesos biológicos y electroquímicos basándose en reacciones de oxidación/reducción catalizadas por microorganismos y generalmente producidas en dos compartimentos separados por una membrana de intercambio iónico.

---

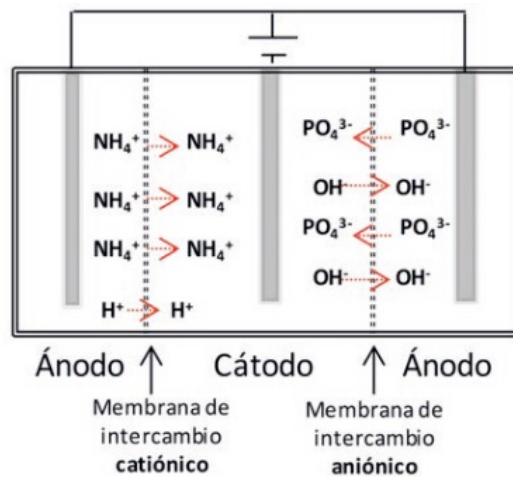
<sup>1</sup> Un MBR integra la degradación biológica de los contaminantes (biodegradación) y la filtración mediante sistemas de membrana (separación sólido-líquido). Se trata de una modificación del sistema convencional de fangos activados, en el que se sustituye el decantador secundario y el tratamiento terciario por unidades de membrana (Rodríguez Fernández-Alba et al., 2007).

Los BES combinados con la digestión anaerobia (DA) pueden resultar interesantes para mejorar la calidad de los digeridos y la recuperación de nutrientes (especialmente amonio y fosfato).

Cabe destacar que, a pesar de grandes progresos en el estudio de BES en laboratorio, los avances de estas técnicas con respecto a su aplicación práctica han sido limitados (Jain y He, 2018).

En función de los objetivos que se persigan, los sistemas BES pueden ser operados en celda de combustible microbiana (*Microbial Fuel Cell*, MFC) o en celda de electrólisis microbiana (*Microbial Electrolysis Cell*, MEC) (Hamelers et al., 2010).

Zhang y colaboradores (Zhang et al., 2014) propusieron un modelo en el que mediante la combinación de diferente tipos de membranas se hacía posible la recuperación simultánea de amonio y fosfato, usando conjuntamente membranas de intercambio catiónico y aniónico. La Figura 4 muestra esquemáticamente este concepto.



**Figura 4.** Representación esquemática de la recuperación simultánea de amonio y fosfato en una MEC (Chiva et al., 2018)

De esta forma, el movimiento de los iones amonio desde el ánodo hacia el cátodo es fomentado por la generación de corriente y el transporte del fosfato a través de la membrana se produce gracias al intercambio iónico con los iones hidroxilo producidos en el cátodo (Chiva et al., 2018).

#### 4.1.4.2. Recuperación mediante organismos acumuladores de poli-fosfatos

La recuperación biológica del fósforo puede lograrse mediante el uso de comunidades microbianas a través del proceso de “eliminación biológica mejorada del fósforo” (EBPR, del inglés “Enhanced Biological Phosphorus Removal”), pero en lugar de su eliminación se llevará a cabo su recuperación.

Dicho proceso se lleva a cabo por organismos acumuladores de fósforo (PAO “Polyphosphate Accumulating Organisms”) en dos etapas, una anaerobia y otra aerobia. Este tipo de eliminación de fósforo está basado en mejorar la habilidad de los organismos PAO’s para acumular más fósforo del que necesitan para su crecimiento (Tarayre et al., 2016). Cuando estos organismos acumuladores se someten a condiciones anaerobias, liberan los nutrientes como sales inorgánicas y el carbono como metano (CH<sub>4</sub>). El nitrógeno y fósforo se pueden recuperar a partir del licor de fangos digeridos (corriente con alto contenido en fósforo), pudiendo ser precipitados de manera controlada como estruvita, por ejemplo (véase apartado 4.1.2).

#### 4.1.4.3. Mediante bacterias fototróficas púrpura

Otra posibilidad de recuperación biológica de nutrientes es la llevada a cabo por bacterias fototróficas púrpura (PBB, del inglés “Purple Phototrophic Bacteria”). El Grupo de Ingeniería Química y Ambiental (GIQA) de la Universidad Rey Juan Carlos ha desarrollado una tecnología en la que dichas bacterias asimilan y acumulan nutrientes contenidos en el agua residual, especialmente nitrógeno y fósforo, empleando como fuente de energía luz infrarroja. Tal proceso se desarrolla en un fotobiorreactor anaerobio, donde la acumulación de nutrientes utilizando estas bacterias fototróficas púrpura (PPB) tiene el potencial de concentrarlos biológicamente a través de su crecimiento. El metabolismo de estas bacterias permite obtener diversos productos de alto valor añadido al ser capaces de acumular fósforo y tener un alto contenido proteico, pudiendo emplear la biomasa como fertilizante orgánico, o bien como proteína bacteriana de alto poder nutritivo para alimentación.



#### 4.1.4.4. Mediante cultivos de algas

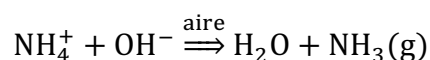
En la actualidad los sistemas basados en cultivos de algas representan una pequeña fracción de los sistemas de tratamiento terciario en uso. Comparado con la biomasa obtenida a partir del proceso EBPR (eliminación biológica mejorada del fósforo, apartado 4.1.4.2), la biomasa algal requiere de mayor tiempo, ya que la liberación de los nutrientes es más lenta (Perera et al., 2019). A partir de la biomasa de las algas pueden elaborarse gran cantidad de bioproductos, como biofertilizantes. Esta técnica no se encuentra desarrollada con fines de recuperación de nutrientes, pero cabe mencionarla como técnica potencial para ello.

## 4.2. TÉCNICAS DE RECUPERACIÓN DE NITRÓGENO

### 4.2.1. Desorción de amoníaco por arrastre de aire (“Air Stripping”)

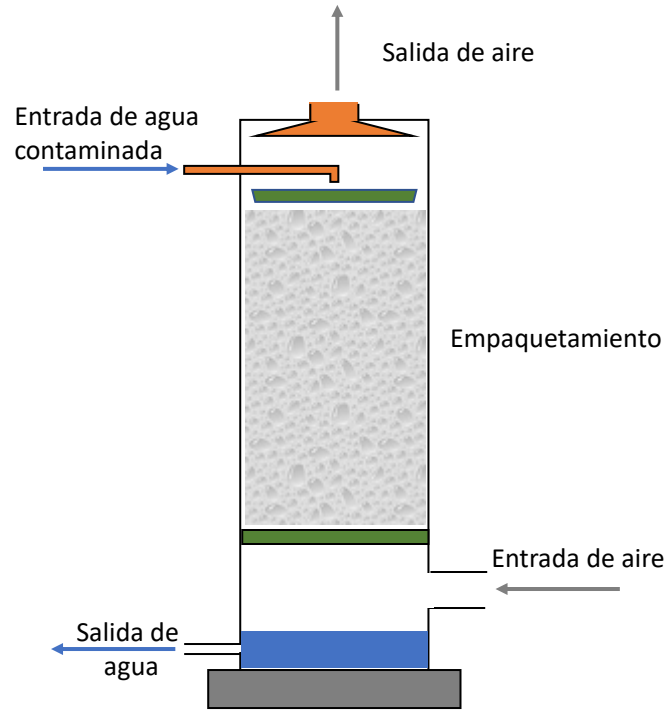
La desorción de amoníaco por arrastre de gas o aire, al igual que la separación por membranas o la adsorción, no es un tratamiento en sí para la recuperación nutrientes, sino más bien un método utilizado como pre o post tratamiento para la eliminación o posible recuperación de amoníaco de las aguas residuales. Es una manera de transferir los elementos que deseamos eliminar, o bien recuperar, de un estado a otro, para que puedan ser manejables.

Se trata de un proceso relativamente sencillo consistente en la eliminación de un gas disuelto en un líquido al ponerse en contacto con el aire. Es un proceso pH dependiente en el que, con un pH alrededor de 9.3, el amonio ( $\text{NH}_4^+(\text{l})$ ) de la disolución pasa a convertirse en amoníaco ( $\text{NH}_3(\text{g})$ ). Por tanto, se suele aplicar hidróxido de calcio ( $\text{CaOH}_2$ ) o sosa caustica ( $\text{NaOH}$ ) para mantener los valores de pH entre 10.8-11.5. Esto convierte los iones de amonio en amoníaco en disolución, y el suministro simultáneo de aire convierte esto en amoníaco gas, extraíble por desorción, siguiendo la siguiente reacción (Sengupta et al., 2015):



De esta forma, a medida que el pH del agua aumenta, el equilibrio se desplaza hacia el lado derecho de la reacción y el ion amonio ( $\text{NH}_4^+(\text{l})$ ) se convierte en amoníaco ( $\text{NH}_3(\text{g})$ ) (Soares et al., 2017).

Para obtener una alta eficiencia de extracción de amoníaco, el proceso se realiza en una torre de empaque o de relleno (véase Figura 5), ya que proporciona una gran área de transferencia de masa.



**Figura 5.** Torre de desorción por aire

El proceso se ve afectado por diversos factores, como la concentración de nitrógeno amoniacal, la carga hidráulica, el caudal de aire, el empaque, etc., pero los más importantes son el pH y la temperatura (Norddahl et al., 2006; Quan et al., 2009; Guo et al., 2010). La desorción de amoníaco se ha utilizado para la eliminación de nitrógeno (Ozturk et al., 2003), pero en combinación con la absorción se puede utilizar, además, para recuperar amoníaco de los efluentes.

Una vez el amoníaco se encuentra en la corriente de aire, puede ser absorbido desde el aire a una solución de ácido fuerte (ácido sulfúrico,  $H_2SO_4$ , típicamente) generándose una sal de amonio (sulfato de amonio,  $(NH_4)_2SO_4$ ) que puede cristalizarse y posteriormente ser comercializada (Martínez Campesino, 2014). Además del ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) como sorbente, también se puede aplicar ácido nítrico ( $HNO_3$ ) para obtener nitrato de amonio ( $NH_4NO_3$ ) como fertilizante.

#### 4.2.2. Adsorción e intercambio iónico

La adsorción es un proceso de separación en el que ciertos componentes de una fase fluida se transfieren a la superficie de un sólido adsorbente. En este sentido, la zeolita es el intercambiador iónico/adsorbente más popular en la recuperación de nitrógeno. Concretamente, las zeolitas son minerales aluminosilicatos microporosos que tienen una estructura tetraédrica formada por un catión y cuatro átomos de oxígeno. Los cationes pueden ser de silicio o aluminio, los cuales están unidos mediante enlace covalente a los átomos de oxígeno formando jaulas y canales interconectados (Englert y Rubio , 2005). La sustitución de cada átomo de silicio ( $\text{Si}^{4+}$ ) por un átomo de aluminio ( $\text{Al}^{3+}$ ) origina una carga neta negativa en la estructura, de forma que cuanto mayor sea la sustitución, mayor será la carga negativa sobre la zeolita. Estas cargas negativas dentro de los poros se equilibran con cationes como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , y  $\text{Mg}^{2+}$  en la superficie de la zeolita. Dichos cationes se mantienen por fuerzas electrostáticas más débiles por lo que se intercambian con ion amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) en la solución y una vez agotados los adsorbentes o intercambiadores iónicos, se puede comenzar a explotar las oportunidades para la recuperación del nitrógeno mediante su regeneración. En cualquier caso, las zeolitas cargadas pueden ser aplicadas directamente en campos agrícolas como fertilizantes de liberación lenta (Alshameri et al., 2014).

Si no es mediante el uso directo de la zeolita como fertilizante, la técnica más común para la regeneración de amonio es utilizando una solución de cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ ) (Li et al., 2011; Alshameri et al., 2014) donde el ion amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) es desorbido y cambiado por el ion sodio ( $\text{Na}^+$ ) en la solución. Como resultado se obtiene un flujo concentrado de ion amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) (Widiastuti et al., 2011; Malovanyy et al., 2013).

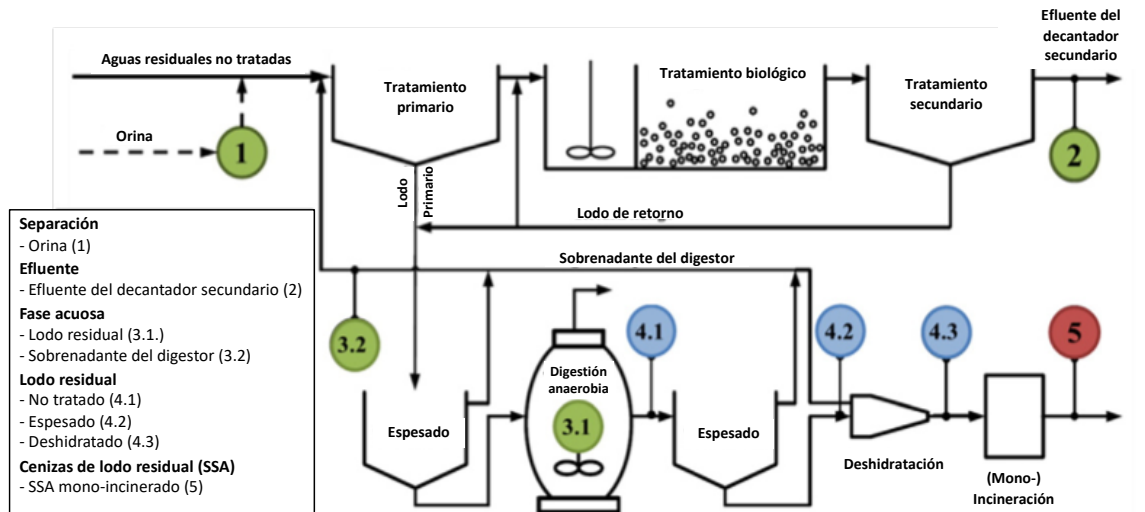
Asimismo, otras técnicas de regeneración también pueden ser utilizadas, dependiendo del proceso de recuperación posterior, como por ejemplo: la regeneración química (Malovanyy et al., 2013), la regeneración térmica (especialmente útil para el proceso de adsorción exotérmica) (Li et al., 2011), y la regeneración biológica (Green et al., 1996). En particular, en la regeneración química se obtendrá un flujo concentrado de cloruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) (Sarioglu, 2005; Leyva-Ramos et al., 2010) y de nitrato de sodio ( $\text{NaNO}_3$ ) en la regeneración biológica (Green et al., 1996; Lahav y Green, 1998). La disolución concentrada resultante, tras aumentar su pH por encima de 9,3, podrá ser sometida al

proceso de “air stripping” (explicado en el apartado 4.2.1) mediante el cual el amoníaco volátil se separará de la disolución, pudiéndose después ser absorbido en una disolución ácida.

Finalmente cabe destacar el modelo propuesto por Liberti y colaboradores (Liberti et al., 2001) basado en un modelo combinado de intercambio aniónico y catiónico donde iones de amonio y fosfato estaban concentrados y, posteriormente, precipitaban como fosfato de amonio y magnesio, que como ya se ha visto en el apartado 4.1.2 se conoce como estruvita.

### 4.3. TÉCNICAS DE RECUPERACIÓN DEL FÓSFORO

Como referencia, la Figura 6 muestra las posibles localizaciones de las que se puede obtener fósforo para su posterior recuperación. De color verde los puntos 1, 2, 3.1 y 3.2, que representan la fase acuosa. De color azul los puntos 4.1, 4.2 y 4.3, en forma de fangos y por último de color rojo, el punto 5, las cenizas de los fangos.



**Figura 6.** Diagrama de varias posibles localizaciones para la recuperación del fósforo en una EDAR (Adaptada de Egle, 2016).

En este apartado, se repasan de manera superficial las diferentes técnicas existentes para la recuperación de fósforo. Dependiendo de la localización de la que decidamos extraer la materia prima se podrán aplicar unas técnicas u otras.

#### 4.3.1. Precipitación/Cristalización (fase acuosa)

Las tecnologías de cristalización y precipitación se encargan de transformar el  $\text{PO}_4\text{-P}$  soluble de la fase acuosa a una forma sólida. Los productos principales que se obtienen en este proceso son la estruvita ( $(\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$ , vista en el apartado 4.1.2) y el fosfato cálcico ( $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ )

El interés en recuperar fósforo de aguas residuales en forma de estruvita radica en que puede ser reutilizado como fertilizante de liberación lenta en agricultura, reduciendo con ello la demanda de fertilizantes químicos industriales. Por otro lado, la recuperación de fósforo mediante fosfato cálcico es una opción muy atractiva también debido a que es directamente comparable a la roca fosfórica y, por tanto, de gran utilidad tanto en la industria del fósforo como en la de los fertilizantes

Una de las ventajas de la recuperación de fósforo de la fase acuosa es que se debe añadir una pequeña y sencilla etapa, fácilmente instalable en las plantas de tratamiento de aguas residuales ya existentes (Urdalen, 2013). Además, se trata de un proceso que puede llevarse a cabo tanto a pequeña como a gran escala, a diferencia de los tratamientos de química húmeda y termoquímicos que solo están indicados a gran escala (Sartorius et al., 2012). El mayor inconveniente, es que en la fase acuosa se obtienen unas tasas de recuperación de fósforo muy por debajo de las obtenidas a partir de los lodos residuales o de las cenizas de lodos.

#### 4.3.2. Tratamientos de química húmeda (lodos y cenizas de lodos)

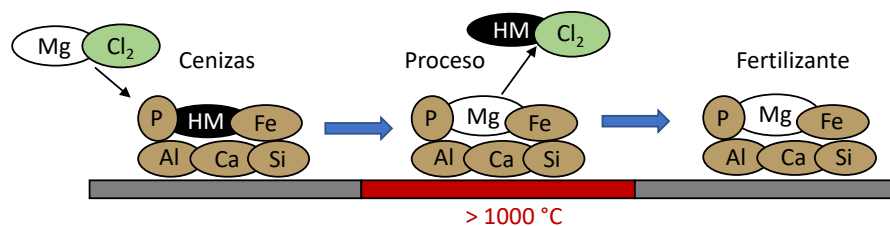
Los tratamientos de química húmeda (en inglés “wet chemical process”) de lodos residuales implican que, en un primer paso, se disuelva el fósforo que se encuentra unido al lodo residual. Para ello, se procede añadiendo un ácido y/o base, en combinación con la temperatura, si es necesario. Por lo que, en muchos casos, los metales pesados son del mismo modo disueltos. Tras la eliminación de los compuestos insolubles, el fósforo puede separarse de la disolución, por ejemplo, mediante precipitación, intercambio iónico o nanofiltración (Cornel et al., 2011).

Estos mismos tratamientos pueden ser aplicados para la recuperación de fósforo a partir de las cenizas de lodos. La principal ventaja en estos casos es que, al tratarse de cenizas de lodos, la materia orgánica ha sido previamente desintegrada, además de los contaminantes orgánicos. Por ello, se ha producido un enriquecimiento en fósforo, dándose una consecuente elevación en la concentración de fósforo en la fase acuosa. A diferencia de los lodos residuales, con las cenizas de lodos la separación sólido-líquida después del tratamiento alcalino o ácido es bastante más fácil de llevar a cabo, debido a que solo aparecen componentes orgánicos (Schaum, 2007; Cornel et al., 2011).

La mayor ventaja de los procesos de química húmeda de lodos y cenizas de lodos es que se pueden alcanzar unos ratios de recuperación de fósforo superiores al 90%. Como contrapartida, son tratamientos en los que se requieren grandes cantidades de productos químicos y equipos especiales resistentes a los ácidos, además de que generan muchos sub-productos que precisan un elevado coste para ser eliminados (Sartorius et al., 2012; Tarayre et al., 2016).

#### 4.3.3. Tratamientos termoquímicos (cenizas de lodos)

Al igual que sucede con los fangos residuales de depuradora, el uso directo de las cenizas de lodos obtenidas tras incineración de fangos residuales es limitado debido a la alta concentración de metales pesados contenidos. Por ello, los tratamientos termoquímicos sobre las cenizas de fangos (punto 5 de la Figura 6) se hacen necesarios si se pretende utilizar tales cenizas directamente como fertilizante.



**Figura 7.** Esquema del proceso termoquímico (adaptado del Nieminen, 2010). (HM: “Heavy Metals”, Metales Pesados).

Mediante los tratamientos termoquímicos sobre las cenizas de los fangos residuales se procede a la eliminación de los metales pesados ligados a ellas y por ende, se mejora la disponibilidad del fósforo para las plantas como fertilizante. Basándonos en el proceso

termoquímico correspondiente (ver Figura 7), se expone a las cenizas a sustancias cloradas (como cloruro de potasio o de magnesio), para que reaccionen entre sí, y, posteriormente, se tratan térmicamente a temperaturas mayores a los 1000 °C. Un gran porcentaje de esos metales pesados se transforman en cloruros de metales pesados, los cuales se evaporan, quedando liberados de las cenizas (Cornel et al., 2011).

Asimismo, cabe resaltar que en la recuperación de fósforo a partir de lodos o cenizas de lodos por procesos de química-húmeda o termoquímicos se obtienen mayores tasas de recuperación que las obtenidas de la fase acuosa. Como ya se apuntaba en el apartado anterior, más del 90% de fósforo puede ser recuperado de los lodos o de las cenizas de lodos. Sin embargo, por otro lado, se necesitan grandes cantidades de químicos y/o energía y más procesos posteriores, lo que implica mayor inversión y costes operacionales en comparación con la recuperación de fósforo de la fase acuosa (Desmidt et al., 2015).

#### 4.4. PRODUCTOS OBTENIDOS Y EJEMPLOS DE APLICACIONES

En la Tabla 1 se mencionan los principales productos obtenidos tras los procesos de recuperación de nitrógeno y fósforo de las aguas residuales:

**Tabla 1.** Principales productos obtenidos tras la recuperación de N y P.

<b>Nutriente</b>	<b>Producto obtenido</b>
Fósforo	Estruvita ( $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) Fosfato de potasio ( $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ) Fosfato cálcico ( $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ) Hidroxiapatita ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ ) Carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ )
Nitrógeno	Estruvita ( $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) Amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) Sulfato de amonio ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ) Cloruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) Bicarbonato de amonio ( $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ ) Nitrato de amonio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ )

Multitud de empresas y organizaciones han desarrollado técnicas para la recuperación de nitrógeno y fósforo. En la Tabla 2 se citan algunas de ellas.

**Tabla 2.** Algunas soluciones tecnológicas existentes para la recuperación de N y P.

<b>Solución</b>	<b>Nutriente recuperado</b>	<b>Técnica</b>	<b>Web</b>
<b>AirPrex<sup>R</sup></b>	Fósforo	Precipitación/Cristalización (fase acuosa)	<a href="https://www.centrisys-cnp.com/airprex">https://www.centrisys-cnp.com/airprex</a>
<b>PHOXNAN<sup>R</sup></b>	Fósforo	Oxidación química (lodos residuales)	<a href="https://www.phosphorrecycling.eu/index.php/en/bmbf-projects/phoxnan-mainmenu-24.html">https://www.phosphorrecycling.eu/index.php/en/bmbf-projects/phoxnan-mainmenu-24.html</a>
<b>EcoPhos<sup>R</sup></b>	Fósforo	Química húmeda (cenizas de lodos)	<a href="https://www.ecophos.com/ecophos-group/p-recovery/">https://www.ecophos.com/ecophos-group/p-recovery/</a>
<b>AshDec<sup>R</sup> Rhenania</b>	Fósforo	Termoquímica (cenizas de lodos)	Tecnología adquirida por Outotec: <a href="https://www.outotec.com/">https://www.outotec.com/</a>
<b>ADVANSIST (GIQA-URJC y FCC Aqualia)</b>	Fósforo y nitrógeno	Acumulación de nutrientes mediante bacterias fototróficas púrpura (PPB)/energía solar infrarroja.	<a href="https://www.aqualia.com/en/web/aqualia-en/eco-efficiency">https://www.aqualia.com/en/web/aqualia-en/eco-efficiency</a>
<b>Pearl<sup>R</sup> (Ostara)</b>	Fósforo y nitrógeno	Precipitación de estruvita	<a href="https://ostara.com/nutrient-management-solutions/">https://ostara.com/nutrient-management-solutions/</a>
<b>ABNR<sup>TM</sup> (Clearas)</b>	Fósforo y nitrógeno	Mezcla de algas y microorganismos / bioreactor/deshidratación biomasa algal.	<a href="https://www.clearaswater.com/solution">https://www.clearaswater.com/solution</a>
<b>Struvia<sup>TM</sup> (Veolia Water Technologies)</b>	Fósforo y nitrógeno	Precipitación de estruvita	<a href="http://www.veoliawatertechnologies.es/tecnologias/recuperacion_fosforo/">http://www.veoliawatertechnologies.es/tecnologias/recuperacion_fosforo/</a>
<b>Phosphogreen<sup>TM</sup> (Suez)</b>	Fósforo y nitrógeno	Cristalización-precipitación de estruvita	<a href="https://www.suezwaterhandbook.com/degremont-R-technologies/sludge-treatment/recovery/">https://www.suezwaterhandbook.com/degremont-R-technologies/sludge-treatment/recovery/</a>

Dado que la recuperación de nutrientes de las aguas residuales sigue siendo actualmente un importante campo de investigación, cabe mencionar algunos de los numerosos proyectos de investigación (tanto nacionales como europeos) que se han ejecutado o están siendo desarrollados. La Tabla 3 resume algunos de ellos. Aparte de estos proyectos también cabe citar algunas plataformas de colaboración para actividades y trabajos relacionados con la recuperación de nutrientes de las aguas residuales, tales como:

- European Sustainable Phosphorus Platform: <https://www.phosphorusplatform.eu/>
- Nutrient Management and Nutrient Recovery Thematic Network (Nutrinam): <https://nutriman.net/farmer-platform/es>
- Red Madrileña de Tratamientos Avanzados de Aguas Residuales: <http://remtavares.com/procesos/>
- BioRefine Cluster Europe: <https://www.biorefine.eu/projects/p-rex>



**Tabla 3.** Proyectos de investigación en tecnologías de recuperación de N y P.

Proyecto	Ámbito	Nutriente recuperado	Técnica
<b>PHORWater</b> (09/2013 – 08/2016) <a href="http://phorwater.eu/">http://phorwater.eu/</a>	Europeo (España y Francia)	Fósforo	Cristalización a partir de la línea de fangos.
<b>MANUREECOMINE</b> (11/2013 – 10/2016) <a href="https://cordis.europa.eu/project/rcn/110857">https://cordis.europa.eu/project/rcn/110857</a>	Europeo (España, Austria, Alemania, Bélgica, Holanda)	Fósforo Nitrógeno	Precipitación de estruvita Combina el “air-stripping” de amonio con el proceso de digestión anaerobia termofílica.
<b>NECOVERY</b> (07/2013 – 12/2017) <a href="http://www.life-necoverly.eu">www.life-necoverly.eu</a>	Europeo (España y Bélgica)	Nitrógeno	Proceso de intercambio iónico mediante zeolitas.
<b>INCOVER</b> (06/2016 – 07/ 2019) <a href="https://incover-project.eu">https://incover-project.eu</a>	Europeo (Casos de estudio en España y Alemania)	Fósforo y nitrógeno	Adsorción en columnas mediante materiales innovadores de geles y filtros verdes.
<b>LIFE ANSWER</b> (09/2016 – 05/2019) <a href="http://life-answer.eu">http://life-answer.eu</a>	Nacional (España)	Fósforo y nitrógeno	Los electrodos obtenidos a partir del aluminio recuperado se disuelven y generan sales que co-precipitan con el fósforo y nitrógeno contenido en los efluentes de cerveceras, y permiten la valorización de los nutrientes como fertilizante.
<b>Water2REturn</b> (07/2017 –12/2020) <a href="https://water2return.eu">https://water2return.eu</a>	Europeo (España, Portugal, Eslovenia, Rumanía, Italia, Bélgica, Alemania y Reino Unido)	Fósforo y nitrógeno	Combinación de técnicas incluyendo aireación biológica, tecnologías de membrana, procesos anaerobios para la producción de biometano y tecnologías de algas. En aguas procedentes de un matadero.
<b>LIFE ENRICH</b> (09/2017 – 02/2021) <a href="http://www.life-enrich.eu">www.life-enrich.eu</a>	Nacional (España)	Fósforo Nitrógeno	Cristalización a partir de la línea de fangos. Adsorción en combinación con contactores de membrana.
<b>DigesTake</b> (05/2018 – 03/2021) <a href="http://www.comunitataigua.cat/projects/digestake/">http://www.comunitataigua.cat/projects/digestake/</a>	Regional (Cataluña)	Fósforo Nitrógeno	Cristalización (usando subproductos de minería) a partir de digestión anaerobia de los lodos de depuradoras urbanas. Adsorción-desorción con zeolitas regenerables y contactores de membrana.

## **5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES**

Acercarnos a un modelo más sostenible pasa por cambiar el concepto que tenemos acerca de los residuos que generamos, debiendo ser tratados como un potencial recurso de energía, agua y nutrientes. En este sentido, la recuperación de nutrientes de las aguas residuales (principalmente de nitrógeno y fósforo) puede contribuir de forma significativa a dicho cambio de perspectiva. La necesidad de cerrar los ciclos de producción y permitir la sostenibilidad de los recursos está impulsando a ciertos países a optar por una economía más respetuosa con el medio ambiente y más autosuficiente (Puyol et al., 2017).

Pese a que mediante la recuperación de nitrógeno y fósforo en las EDARs no se conseguiría cubrir la demanda total de estos elementos, por un lado, sirve para ayudar a aliviar la necesidad que las sociedades tienen hacia ellos, y, por el otro, sirve para facilitar el tratamiento en las EDARs al reducir la carga de nutrientes a eliminar.

Como se ha presentado en la sección 3, existen diversas técnicas que permiten recuperar nitrógeno y fósforo de las aguas residuales (tanto de forma conjunta como de forma individualizada). Existen numerosos factores que influyen en la elección de una técnica de recuperación frente a otras. Por ejemplo, aparte del coste económico que supone la instauración y utilización de una técnica, se han de tener en cuenta el impacto medioambiental que pueda generar, si requiere de la adición de químicos (en ese caso, si requiere de técnicas de eliminación de posibles subproductos contaminantes), la energía requerida para su empleo, la posible implantación en instalaciones ya existentes, si con una misma técnica se pueden recuperar uno o varios nutrientes, si también permiten la recuperación de energía, etc. Por ello, se deben analizar las ventajas e inconvenientes de cada una de las técnicas y las posibles combinaciones entre ellas. Como ejemplo, las Tablas 4-6 resumen algunos de estos aspectos.

Sin embargo, identificar la técnica adecuada y tratar de aumentar cada vez más la eficiencia de los procesos de recuperación de nutrientes no es la solución última. Todo ello debe ir acompañado de una mejor gestión de dichos recursos desde el origen. En particular, la recuperación de nitrógeno y fósforo para su posterior reutilización en forma de fertilizantes, debe ir de la mano de un uso más responsable de éstos en agricultura, sector en el que generalmente se abusa de ellos de manera desmedida. El modelo económico que

rige nuestra sociedad, favorece un uso abusivo del recurso suelo, con una agricultura intensiva demandante de cada vez más fertilizantes para alcanzar unos elevados niveles de productividad.

**Tabla 4.** Resumen de ventajas e inconvenientes de las técnicas de recuperación de nitrógeno y fósforo descritas en trabajo

<b>Técnica</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Inconvenientes</b>
Tecnologías de membrana	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Técnicas sencillas.</li> <li>• No contaminantes en el permeado.</li> <li>• No necesidad de añadir químicos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Posibles problemas de ensuciamiento e incrustación de membrana.</li> </ul>
Sistemas bioelectroquímicos (BES)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Técnica en la que se puede generar la energía necesaria para el proceso si hay suficiente materia orgánica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensible al Ph, toxicidad del afluente y carga de sustrato.</li> </ul>
Organismos acumuladores de Polifosfatos (PAO's)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las PAO's pueden acumular más del 20% de fósforo en peso seco.</li> <li>• Los nutrientes pueden recuperarse de forma eficiente del licor de fangos anaerobios digeridos</li> <li>• Posibilidad de eliminación simultánea de nitrógeno y fósforo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Complejidad operacional</li> <li>• Sensible a las características del agua del influente; Ph, concentración de cationes, temperatura, etc.</li> </ul>
Bacterias fototróficas púrpura (PPB)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eficiencia energética.</li> <li>• No necesidad de adición de químicos.</li> <li>• No requiere grandes superficies.</li> <li>• Obtención de energía.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tecnología reciente poco desarrollada a nivel industrial.</li> </ul>
Cultivos de algas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Técnica más "limpia" y sostenible con el medio ambiente que las técnicas convencionales de eliminación de nutrientes en las EDAR's</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proceso en desarrollo</li> <li>• Necesidad de grandes superficies.</li> <li>• Hasta el momento, no muy enfocado en la recuperación de nutrientes, pero con potencial.</li> </ul>

Asimismo, otro tema de estudio sería la posibilidad de llevar a cabo separación de los efluentes de las viviendas, de forma similar a lo que se ha descrito en el caso de la separación de la orina desde los inodoros. En los domicilios las aguas grises (ducha, lavabo, fregadero) y las aguas negras (inodoro) se unen antes de llegar a las plantas de tratamiento de aguas residuales. La composición de estos dos tipos de aguas residuales es diferente ya que las aguas negras poseen mayores concentraciones de materia orgánica y de nutrientes que las grises. Por tanto, el hecho de tratar ambos efluentes por separado podría mejorar la eficiencia en la recuperación del nitrógeno y fósforo. Si bien es cierto que en viviendas ya construidas con el sistema habitual supondría una alta inversión económica, se podría estudiar este modelo para urbanizaciones en proyecto de construcción.

**Tabla 5.** Resumen de ventajas e inconvenientes de las técnicas de recuperación de nitrógeno descritas en trabajo.

Técnica	Ventajas	Inconvenientes
“Air stripping” o desorción por arrastre aire	<ul style="list-style-type: none"> <li>Proceso y diseño bastante simple.</li> <li>Tecnología ya probada y utilizada ampliamente en industria para diferentes aplicaciones.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mayor espacio requerido en comparación con los procesos de membrana (uso de tanques).</li> <li>Puede haber problemas de ensuciamiento e incrustamiento (adición de químicos).</li> <li>Eficiencia dependiente del Ph y la temperatura por lo que es demandante de energía.</li> <li>Necesidad de un proceso posterior para absorber el NH<sub>3</sub> gas a una disolución.</li> </ul>
Adsorción e intercambio iónico (zeolita)	<ul style="list-style-type: none"> <li>La zeolita se puede utilizar directamente como fertilizante.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Necesita grandes superficies.</li> <li>Corrientes con altas concentraciones de metales, reducirían su eficiencia.</li> <li>Más utilizado para la eliminación que para la recuperación de nitrógeno.</li> </ul>
Separación de la orina	<ul style="list-style-type: none"> <li>Posibilidad de obtener un fertilizante líquido de nitrato de amonio, o precipitado en forma de estruvita.</li> <li>Menor la carga de nutrientes a eliminar en las EDARs.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Necesidad de infraestructura especial (inodoros de separación, red de saneamiento, etc.)</li> <li>Indicada para poblaciones pequeñas o para urbanizaciones futuras.</li> </ul>

**Tabla 6.** Resumen de ventajas e inconvenientes de las técnicas de recuperación de fósforo descritas en trabajo.

Técnica	Ventajas	Inconvenientes
Precipitación /cristalización de compuestos fosfatados (fase acuosa)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fácil implantación en la EDAR.</li> <li>No requiere grandes inversiones.</li> <li>Aplicable a gran y pequeña escala.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ratios de obtención de fósforo menores que si se obtiene de fangos residuales o de cenizas de fangos.</li> </ul>
“Wet chemical” o tecnologías de química húmeda. (lodos residuales y cenizas de lodos)	<ul style="list-style-type: none"> <li>A partir de los fangos y de las cenizas de fangos es mayor el porcentaje de fósforo recuperado que a partir de la fase acuosa.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aplicación de grandes cantidades de químicos. Necesidad de aplicar técnicas de eliminación de los subproductos químicos generados.</li> <li>Se requieren equipos resistentes a los ácidos.</li> <li>Solo aplicables a gran escala.</li> </ul>
Tratamientos termoquímicos (cenizas de lodos)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Altas tasas de recuperación de fósforo.</li> <li>Tras dichos tratamientos sobre las cenizas se eliminan Slos metales pesados y pueden ser utilizadas como fertilizante.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Necesidad de adición de elevadas cantidades de químicos.</li> <li>Solo aplicables a gran escala.</li> </ul>

Teniendo esto en cuenta, la transición hacia el empleo de técnicas cada vez más sostenibles debe tratar de integrar en la medida de lo posible, no sólo las inversiones y aspectos económicos, sino también los aspectos técnicos, los regulatorios (que a veces no facilitan la reutilización de recursos) así como los sociales y medioambientales.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Ahmed, M., Hasan, C.K., Rahman, H., Hossain, M.A, Uddin, S.A. (2015). Prospects of Using Wastewater as a Resource-Nutrient Recovery and Energy Generation. *American Journal of Environmental Sciences*, 11(2), 99–114.
- Akhter, M., Habib, G., Qamar S.U. (2018). Application of Electrodialysis in Waste Water Treatment and Impact of Fouling on Process Performance. *Journal of Membrane Science*, 8(2), 1–8.
- Alshameri, A., Ibrahim, A., Assabri, A.M., Lei, X., Wang, H., Yan, C. (2014). The investigation into the ammonium removal performance of Yemeni natural zeolite: modification, ion exchange mechanism, and thermodynamics. *Powder Technology*, 258, 20–31.
- Anand, C.K., Apul, D.S. (2014). Composting toilets as a sustainable alternative to urban sanitation—a review. *Waste Management*, 34(2), 329–343.
- Asano, T., Burton, F.L., Leverenz, H.L., Tsuchihashi, R., Tchobanoglous, G. (2007). *Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications*. Nueva York. McGraw-Hill.
- Ashrafizadeh, S., Khorasani Z. (2010). Ammonia removal from aqueous solutions using hollow-fiber membrane contactor. *Chemical Engineering Journal*, 162, 242–249.
- Bennett, E., Carpenter, S.P. (2002). Soup – the global phosphorus cycle. *World Watch Magazine*, 15(2), 24–32.
- Chiva, S., Berlanga, J., Martínez, R., Climent, J. (2018). Depuración de aguas residuales: Digestión anaerobia. Publicaciones de la Universitat Jaume I.
- Czajkowska, J. (2015). Conditions of Sediments Precipitation Containing Struvite. *Tesis Doctoral*. Warsaw University of Life Sciences, Varsovia, Poland.
- Cordell, D., Drangert, J.O., White, S. (2009). The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, 19(2), 292–305.
- Cornel, P., Meda, A., Bieker, S. (2011). Wastewater as a Source of Energy, Nutrients, and Service Water. *Treatise on Water Science*, 4, 337–375.
- Desmidt, E., Ghyselbrecht, K., Zhang, Y., Pinoy, L., Van der Bruggen, B., Verstraete, W., Meesschaert, B. (2015). Global phosphorus scarcity and full-scale P-recovery

- techniques-a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45, 336–384.
- Diaz-Elsayed, N., Rezaei, N., Guo, T., Mohebbi, S., Zhang, Q. (2019). Wastewater-based resource recovery technologies across scale: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 145(Febrero), 94–112.
- DOCE (1991). Directiva 91/271/CEE del Consejo. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*.
- Egle, L., Rechberger, H., Krampe, J., Zessner, M. (2016). Phosphorus recovery from municipal wastewater: An integrated comparative technological, environmental and economic assessment of P recovery technologies. *Science of the Total Environment*, 571, 522–542.
- Englert, A.H., Rubio, J. (2005). Characterization and environmental application of a Chilean natural zeolite. *International Journal of Mineral Processing*, 75(1), 21–29.
- Filippelli, G.M. (2002). The Global Phosphorus Cycle. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 48(1), 391–425.
- Gerardo, M.L., Zacharof, M.P., Lovitt, R.W. (2013). Strategies for the recovery of nutrients and metals from anaerobically digested dairy farm sludge using cross-flow microfiltration. *Water Research*, 47(14), 4833–4842.
- Gilbert, N. (2009). The disappearing nutrient. *Nature*, 461, 716–718.
- Green, M., Mels A., Lahav O. (1996). Biological-ion exchange process for ammonium removal from secondary effluent. *Water Science and Technology*, 34(1), 449–58.
- Guo, J.S., Abbas, A.A., Chen, Y.P., Liu, Z.P., Fang, F., Chen, P. (2010). Treatment of landfill leachate using a combined stripping, Fenton, SBR, and coagulation process. *Journal of Hazardous Materials*, 178(1), 699–705.
- Hamelers, H.V.M., Heijne, A.T., Sleutels, T.H.J.A., Jeremiasse, A.W., Strik, D.P.B.T.B., Buisman, C.J.N. (2010). New applications and performance of bioelectrochemical systems. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(6), 1673-1685.
- Hancock, N.T., Xu, P., Roby, M.J., Gomez, J.D., Cath, T.Y. (2013). Towards direct potable reuse with forward osmosis: technical assessment of long-term process performance at the pilot scale. *Journal of Membrane Science*, 445, 34–46.

- Hasanoğlu, A., Romero, J., Pérez, B., Plaza, A. (2010). Ammonia removal from wastewater streams through membrane contactors: Experimental and theoretical analysis of operation parameters and configuration. *Chemical Engineering Journal*, 160(2),530–537.
- Holloway, R.W., Wait, A.S., Fernandes da Silva, A., Herron, J., Schutter, M.D., Lampi, K., Cath, T.Y. (2015). Long-term pilot scale investigation of novel hybrid ultrafiltration-osmotic membrane bioreactors. *Desalination*, 363, 64–74.
- Ichihashi, O., Hirooka, K. (2012). Removal and recovery of phosphorus as struvite from swine wastewater using microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, 114, 303–307.
- Jain, A., He, Z. (2018). “New” resource recovery from wastewater using bioelectrochemical systems: Moving forward with functions. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 12(4), 1–13.
- Lahav, O., Green, M. (1998). Ammonium removal using ion exchange and biological regeneration. *Water Research*, 32(7), 2019–2028.
- Lahav, O., Telzhensky, M., Zewuhn, A., Gendel, Y., Gerth, J., Calmano, W., Birnhack, L. (2013). Struvite recovery from municipal-wastewater sludge centrifuge supernatant using seawater NF concentrate as a cheap Mg(II) source. *Separation and Purification Technology*, 108, 103–110.
- Larsen, T.A., Alder, A.C., Eggen R.I.L., Maurer, M., Lienert, J. (2009). Source separation: Will we see a paradigm shift in wastewater handling? *Environmental Science & Technology*, 43(16), 6121–6125.
- Leyva-Ramos, R., Monsivais-Rocha, J.E., Aragon-Piña, A., Berber-Mendoza, M.S., Guerrero-Coronado, R.M., Alonso-Davila, P., Mendoza-Barron, J. (2010). Removal of ammonium from aqueous solution by ion exchange on natural and modified chabazite. *Journal of Environmental Management*, 91(12), 2662–2668.
- Li, M., Zhu, X., Zhu, F., Ren, G., Cao, G., Song, L. (2011). Application of modified zeolite for ammonium removal from drinking water. *Desalination*, 271(1), 295–300.
- Liberti, L., Petruzzelli, D., De Florio, L. (2001). REM NUT ion exchange plus struvite precipitation process. *Environmental Technology*, 22(11), 1313–1324.

- Malovanyy, A., Sakalova, H., Yatchyshyn, Y., Plaza, E., Malovanyy, M. (2013). Concentration of ammonium from municipal wastewater using ion exchange process. *Desalination*, 329, 93–102.
- Martínez Campesino, L. (2014). Uso de membranas selectivas para la recuperación de nitrógeno amoniacal durante el proceso de digestión anaerobia. *Trabajo Fin de Grado*. Ingeniería de Sistemas Biológicos. Universitat Politècnica de Catalunya, España.
- Masse, L., Masse, D.I., Pellerin, Y. (2007). The use of membranes for the treatment of manure: a critical literature review. *Biosystems Engineering*, 98(4), 371–80.
- Maurer, M., Pronk, W., Larsen, T.A. (2006). Treatment processes for source-separated urine. *Water Research*, 40(17), 3151–3166.
- Maurer, M., Schwegler, P., and Larsen, T.A. (2003), Nutrients in urine: Energetic aspects of removal and recovery. *Water Science and Technology*, 48(1), 37–46.
- Mi, B., Elimelech, M. (2010). Organic Fouling of Forward Osmosis Membranes: Fouling Reversibility and Cleaning without Chemical Reagents. *Journal of Membrane Science*, 348, 337–345.
- Mondor, M., Masse, L., Ippersiel, D., Lamarche, F., Masse, D.I. (2008). Use of electro-dialysis and reverse osmosis for the recovery and concentration of ammonia from swine manure. *Bioresource Technology*, 99(15), 7363–7368.
- Nancharaiah, Y.V., Venkata Mohan, S., Lens, P.N.L. (2016). Recent advances in nutrient removal and recovery in biological and bioelectrochemical systems. *Bioresource Technology*, 215, 173–185.
- Nguyen, N.C., Chen, S.-S., Yang, H.-Y., Hau, N.T. (2013). Application of forward osmosis on dewatering of high nutrient sludge. *Bioresource Technology*, 132, 224–229.
- Nieminen, J. (2010). Phosphorus recovery and recycling from municipal wastewater sludge. *Trabajo Fin de Máster*. Aalto University, Helsinki, Finlandia.
- Norddahl, B., Christensen, K.V., Horn, V., Larsson, M., du Preez, J.H. (2006). A membrane contactor for ammonia stripping, pilot scale experience and modeling. *Desalination*, 199, 172–174.



- Ozturk, I., Altinbas, M., Koyuncu, I., Arikan, O., Gomec-Yangin, C. (2003). Advanced physico-chemical treatment experiences on young municipal landfill leachates. *Waste Management*, 23(5), 441–446.
- Pastor, L., Mangin, D., Ferrer, J., Seco, A. (2010). Struvite formation from the supernatants of an anaerobic digestion pilot plant. *Bioresource Technology*, 101(1), 118–125.
- Perera, M., Englehardt, J.D., Dvorak, A.C. (2019). Technologies for Recovering Nutrients from Wastewater: A Critical Review. *Environmental Engineering Science*, 36(5).
- Puyol, D., Batstone, D. J., Hülsen, T., Astals, S., Peces, M., Krömer, J. O. (2017). Resource recovery from wastewater by biological technologies: Opportunities, challenges, and prospects. *Frontiers in Microbiology*, 7(Enero), 1–23.
- Qiu, G., Law, Y.-M., Das, S., Ting, Y.-P., (2015). Direct and complete phosphorus recovery from municipal wastewater using a hybrid microfiltration-forward osmosis membrane bioreactor process with seawater brine as draw solution. *Environmental Science & Technology*. 49(10), 6156–6163.
- Quan, X., Wang, F., Zhao, Q., Zhao, T., Xiang, J. (2009). Air stripping of ammonia in a water-sparged aerocyclone reactor. *Journal of Hazardous Materials*, 170(2), 983–988.
- Rodríguez Fernández-Alba, A., Letón García, P., Rosal García, R., Dorado Valiño, M., Villar Fernández, S., Sanz García, J.M. (2007). Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. MadrI+D, Informe de Vigilancia Tecnológica.
- Ronteltap, M., Maurer, M., Hausherr, R., Gujer, W. (2010). Struvite precipitation from urine e influencing factors on particle size. *Water Research*, 44(6), 2038–2046.
- San José Caballero, M. (2017). Tecnologías de membrana para recuperar el nitrógeno amoniacal procedente de aguas residuales urbanas. *Trabajo Fin de Máster*. Máster en Ingeniería Ambiental. Universidad de Valladolid, España.
- Sarioglu, M. (2005) Removal of ammonium from municipal wastewater using natural Turkish (Dogantepe) zeolite. *Separation and Purification Technology*, 41(1), 1–11.
- Sartorius, C., von Horn, J., Tettenborn, F. (2012). Phosphorus Recovery from Wastewater- Expert Survey on Present Use and Future Potential. *Water Environment Research*, 84(4), 313–322.

- Schaum, C. (2007). Verfahren für eine zukünftige Klärschlammbehandlung – Klärschlammkonditionierung und Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlammmasche, *Tesis Doctoral*, Technische Universität Darmstadt, Alemania.
- Sengupta, S., Nawaz, T., Beaudry, J. (2015). Nitrogen and Phosphorus Recovery from Wastewater. *Current Pollution Reports*, 1(3), 155–166.
- Soares, A., Czajkowska, J., Colprim, J., Gali, A., Johansson, S., Masic, A., Marchi, A., McLeod, A., Nevov, V., Rusalleda, M., Siwec, T. (2017). Nutrients recovery from wastewater streams. En: Lema, J. M., & Suarez, S. (Eds.). *Innovative Wastewater Treatment & Resource Recovery Technologies: Impacts on Energy, Economy and Environment* (pp. 369-398). IWA Publishing.
- Tarayre, C., De Clercq, L., Charlier, R., Michels, E., Meers, E., Camargo-Valero, M., Delvigne, F. (2016) New perspectives for the design of sustainable bioprocesses for phosphorus recovery from waste. *Bioresource Technology*, 206, 264–274.
- Tarragó, E., Puig, S., Rusalleda, M., Balaguer, M. D., Colprim, J. (2016). Controlling struvite particles' size using the up-flow velocity. *Chemical Engineering Journal*, 302, 819–827.
- Triger, A., Pic, J.-S., Cabassud, C. (2012). Determination of struvite crystallization mechanisms in urine using turbidity measurement. *Water Research*, 46(18), 6084–6094.
- Udert, K.M., Wächter, M. (2012). Complete nutrient recovery from source-separated urine by nitrification and distillation. *Water Research*, 46 (2), 453–464.
- Urdalen, I. (2013). Phosphorus recovery from municipal wastewater - Literature Review. *Trabajo Fin de Máster*. Máster en Aguas e Ingeniería de Aguas Residuales, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Noruega.
- Vásquez, E.D. (2015). Estudio de bioreactor de membrana para el tratamiento de aguas residuales urbanas. *Trabajo Fin de Máster*, Máster Universitario en Gestión Sostenible y Tecnologías del Agua, Universidad de Alicante, España.
- Widiastuti, N., Wu, H., Ang, H.M., Zhang, D. (2011). Removal of ammonium from greywater using natural zeolite. *Desalination*, 277(1), 15–23.

- Wilsenach, J.A., Maurer, M., Larsen, T.A., van Loosdrecht, M.C.M. (2003). From waste treatment to integrated resource management. *Water Science & Technology*, 48(1), 1–9.
- Xie, M., Kyong, H., Gray, S. R., Elimelech, M. (2016). Membrane-based processes for wastewater nutrient recovery: Technology, challenges, and future direction. *Water Research*, 89, 210–221.
- Xie, M., Nghiem, L.D., Price, W.E., Elimelech, M. (2014). Toward resource recovery from wastewater: extraction of phosphorus from digested sludge using a hybrid forward osmosis-membrane distillation process. *Environmental Science & Technology Letters*, 1(2), 191–195.
- Zhang, Y., Desmidt, E., Van Looveren, A., Pinoy, L., Meesschaert, B., Van der Bruggen, B. (2013). Phosphate separation and recovery from wastewater by novel electro dialysis. *Environmental Science & Technology*, 47(11), 5888–5895.
- Zhang, F., Li, J, He, Z. (2014). A new method for nutrients removal and recovery from wastewater using a bioelectrochemical system. *Bioresource Technology*, 166, 630–634.