



Proyecto Water2REturn: caso práctico del modelo de economía circular en mataderos

Antonia María Lorenzo López ^{1,2}, Pilar Zapata Aranda ³ y Alejandro Caballero Hernández ^{4,5}

Autor de Correspondencia: alorenzo@bioazul.com

Resumen:

La **escasez de agua y la recuperación de recursos** son importantes retos globales, y existe una demanda creciente de soluciones circulares que permitan reutilizar el agua y recuperar recursos. Estas soluciones se vuelven imprescindibles cuando se trata de sectores industriales como los mataderos, una industria altamente consumidora de agua y que genera aguas residuales con alta concentración de materia orgánica, una valiosa fuente de nutrientes para la agricultura si se recuperan adecuadamente.

El uso de productos manufacturados a partir de recursos no renovables, como los fertilizantes químicos, se está revisando para encontrar otras opciones más respetuosas con el medio ambiente y evitar posibles problemas de contaminación de las aguas, y su eutrofización.

Water2Return, proyecto financiado por el H2020 de la Comisión Europea, promueve la **simbiosis industrial** convirtiendo las instalaciones de tratamiento de aguas residuales de los mataderos en **biorrefinerías**, siguiendo los **principios de la Economía Circular**, abordando **la escasez de agua y la recuperación recursos valiosos, y contribuyendo a la sostenibilidad de los sistemas agroalimentarios**. Se llevó a cabo un caso práctico en **“Matadero del Sur”** en Sevilla (España) tratando 50m³ aguas residuales/día, produciendo agua regenerada, energía y materias primas secundarias para la formulación de productos agrícolas de alto valor añadido.

Palabras clave: aguas residuales, matadero, economía circular, bioestimulantes, fertilización, materias primas secundarias, recuperación de nutrientes, escasez de agua, productos agronómicos.

Water2REturn project: a practical case of circular economy model in slaughterhouses

Antonia María Lorenzo López ^{1,2}, Pilar Zapata Aranda ³ and Alejandro Caballero Hernández ^{4,5}

Abstract:

Nowadays, **water scarcity** and **resource recovery** are global concerns. Thus, there is a rising demand for **implementing circular solutions** to reuse water and to recover resources that may be embedded in water streams. These solutions become a must when dealing with industrial sectors

¹ BIOAZUL SL, (España), alorenzo@bioazul.com; 0000-0001-9452-2317.

² Universidad de Córdoba, Grupo de investigación WEARE (España), ep2loloa@uco.es; 0000-0001-9452-2317.

³ BIOAZUL SL, (España), pzapata@bioazul.com; 0000-0002-3839-8603

⁴ BIOAZUL SL, (España), acaballero@bioazul.com; 0000-0002-7420-2153

⁵ Universidad de Sevilla, Tecnología y Aplicación de Enzimas, Departamento de Bioquímica y Biología Molecular (España), alecabher@alum.us.es; 0000-0002-7420-2153.

like **slaughtering**, a **water-intensive industry** that generates wastewater containing a high proportion of organic matter, a valuable source of nutrients for agriculture if properly recovered

Furthermore, the use of manufactured products based on non-renewable resources, such as chemical fertilizers, is being revised to move to other much more environmentally friendly options to avoid potential danger to the water bodies, that can get polluted and suffer eutrophication, among other environmental problems.

Water2Return, a project financed by the H2020 programme of the European Commission, promotes **industrial symbiosis** by turning wastewater treatment facilities in slaughterhouses into **bio-refineries**, following the **Circular Economy principles**, addressing **water scarcity while simultaneously recovering valuable resources, contributing to the Food System sustainability**. A real case study was carried out in “**Matadero del Sur**”, a slaughterhouse in Seville (Spain) treating 50m³ wastewater/day, producing reclaimed water, energy and different secondary raw materials for the formulation high added value agricultural products.

Key Words: waste water, slaughterhouse, circular economy, biostimulants, fertilisation, secondary raw materials, nutrient recovery, water scarcity, agronomic products.

1. INTRODUCCIÓN

La demanda de fertilizantes químicos por parte del sector agrícola está en continuo crecimiento debido, principalmente, al constante aumento de la población mundial que necesita ser alimentada. Según Naciones Unidas, seremos 9.700 millones en 2050, pudiendo llegar a unos 11.000 millones en 2100.

La agricultura del siglo XXI enfrenta múltiples desafíos; debe alimentar a esta población creciente en un contexto de despoblamiento rural y, por tanto, con una mano de obra rural mermada, y en un contexto de cambio climático con la escasez de recursos que lleva asociado, y las limitaciones en el uso del terreno debido, entre otros factores, a la degradación del suelo.

Una de las claves para enfrentar esta situación es la transición necesaria de la **economía lineal** actual (extracción – fabricación – utilización – eliminación) hacia una **economía circular** (extensión del ciclo de vida de los productos y reducción de la producción de residuos). Esta transición contribuye al Nuevo Plan de Acción de Economía Circular que lanza a Comisión Europea en marzo de 2020, y que constituye uno de los principales pilares del Pacto Verde Europeo, la nueva agenda de Europa para el crecimiento sostenible.

Según la Fundación Ellen MacArthur, el concepto de economía circular constituye un nuevo modelo económico que aborda los crecientes desafíos

relacionados con los recursos para las empresas y las economías. La implementación de estos modelos genera crecimiento, crea empleos y reduce los impactos ambientales, incluidas las emisiones de carbono. En línea con esta perspectiva, la implementación de modelos de economía circular en mataderos reducirá sus emisiones y promoverá la revalorización de los residuos que generan.

En el proyecto **Water2return** se ha trabajado, desde un enfoque de economía circular, en dos sectores económicos, el de los mataderos industriales y el de la fabricación de productos agronómicos.

El sector europeo de los mataderos se caracteriza por un alto consumo de agua y energía, y a su vez por la elevada generación de agua residual y residuos, que son emitidos al medio ambiente teniendo un alto contenido en materia orgánica fácilmente metanizable y nutrientes, que potencialmente pueden transformarse en energía, productos fertilizantes y bioestimulantes, pero son peligrosos para el medio ambiente si se descargan sin tratamiento adecuado.

La demanda agrícola de fertilizantes químicos está aumentando debido al crecimiento de la población mundial, alcanzando alrededor de 20 millones de toneladas en 2018. Su uso extensivo es problemático, pues están asociados a las emisiones de óxido nitroso, un potente gas de efecto invernadero, así como a otros problemas medioambientales como la eutrofización si llegan a las masas de agua. Además, también pueden tener un efecto negativo en la salud humana, especialmente cuando contienen nitrógeno, potasio, fósforo y metales pesados. Estos impactos pueden causar cáncer, enfermedad de Parkinson, aumentar el riesgo de enfermedad de Alzheimer y diabetes, efectos neurológicos y reproductivos.

Por otra parte, la importancia del reciclaje de nutrientes es crucial en Europa, donde la ausencia general de nutrientes representa **una amenaza considerable para la seguridad alimentaria de la UE**. Esta tensión entre la escasez de recursos y la creciente demanda de los mismos continuará **disparando sus precios en el futuro próximo**.

Water2REturn contribuye a la necesidad de encontrar fuentes alternativas de nutrientes que contribuyan a la seguridad alimentaria de la Unión Europea, y fomenta la **simbiosis industrial** proponiendo una solución integrada para el tratamiento de aguas residuales de mataderos y la recuperación de nutrientes, para la producción de biofertilizantes y bioestimulantes. Este enfoque convierte las plantas de tratamiento de aguas residuales en "**bio-refinerías**".

Water2REturn tiene como objetivo recuperar **tres materias primas secundarias de alto valor**: concentrado de nutrientes, lodos hidrolizados fermentados con *Bacillus spp.* y biomasa algal, la base para fabricar tres productos agronómicos, un biofertilizante alternativo y dos bioestimulantes que fomentan el crecimiento de las plantas, así como para producir energía.

2. MÉTODO/DESARROLLO DE LA EXPERIENCIA DE INNOVACIÓN

Water2Return es una Acción de Innovación cofinanciada por la Comisión Europea dentro de su Programa Horizonte 2020 (número de contrato 730398) y en primera convocatoria de "agua en el contexto de la economía circular". El proyecto, coordinado por BIOAZUL SL, comenzó en julio de 2017, con una duración de 57 meses y un presupuesto de 7.129.322,00 € (contribución CE: 5.871.895,44 €) para implementar las actividades previstas en el proyecto.

El consorcio de **Water2REturn** está compuesto por 15 socios multidisciplinares: 9 PYMEs, 2 asociaciones europeas y 4 instituciones investigadoras. **Water2REturn** reúne la experiencia de actores de **toda la cadena de valor** en ocho países diferentes (España, Portugal, Eslovenia, Rumanía, Italia, Bélgica, Alemania y Reino Unido): expertos en tratamiento de aguas residuales y recuperación de nutrientes, valorización de lodos, producción de energía y Tecnologías de la Información y Comunicación, fabricantes experimentados en la producción de fertilizantes que invertirán en el reciclaje de nutrientes y usuarios finales de la tecnología de recuperación de nutrientes (organización que representa la industria cárnica a nivel europeo) y de los productos agronómicos (organización europea de propietarios rurales), así como una cooperativa agrícola que pondrá a prueba los tres productos agronómicos en sus propios terrenos.

Water2Return se centra en la recuperación y reciclaje de nutrientes del agua residual generada por los mataderos siguiendo un modelo de economía circular. Así, Water2Return enfrenta los retos ambientales y económicas de los mataderos como una **oportunidad de mercado**, aplica los preceptos de la economía circular para extraer el máximo valor posible de sus residuos y posibilita la recuperación de nutrientes del agua residual y su conversión en productos agronómicos de alto valor añadido y de mercado para la industria agroquímica y, en consecuencia, para el sector agrícola.

Water2Return propone una **demonstración a gran escala** para la recuperación integrada de nutrientes de las aguas residuales en la industria de los mataderos en un caso de estudio real en el matadero 'Matadero del Sur' ubicado en Salteras, España. La novedad del sistema Water2Return radica en su innovadora combinación en cascada, **de tecnologías y procesos bioquímicos y físicos para tratar y regenerar las aguas residuales de matadero**. Todas estas tecnologías se agrupan en cuatro líneas de tratamiento dentro del sistema Water2Return, denominadas: **línea de aguas, línea de lodos, línea de energía y línea de algas**.

1. **La línea de aguas** recibe las **aguas residuales del matadero** y consiste en un **sistema de tratamiento y un módulo de recuperación de nutrientes**. La tecnología propuesta es un Reactor Discontinuo Secuencial (SBR según sus siglas en inglés), con una capacidad de tratamiento de 50m³/día. El agua tratada pasa al **módulo de recuperación de nutrientes** que consiste en una **unidad de filtración**: microfiltración, ultrafiltración y ósmosis inversa. El subproducto resultante es un **concentrado de nutrientes**, que constituye **la materia prima secundaria 1 (MPS1)**, que servirá de base para producir el primer producto agronómico (PA1): un **biofertilizante alternativo líquido rico en Nitrógeno**.

Además, el agua regenerada resultante puede descargarse al entorno receptor de acuerdo con las regulaciones de aplicación, o usarse en la línea de algas, llenando los estanques donde crecen las algas y, por lo tanto, cerrando completamente el ciclo.

2. **Línea de lodos.** La pauta de operación del SBR permite la generación de un segundo subproducto, los lodos resultantes del tratamiento de aguas residuales. Este lodo entra en la línea de lodos, pasando por un primer **proceso de pretratamiento** donde se eliminan los microorganismos patógenos y se consigue su higienización. Posteriormente, pasa a la **unidad de fermentación**, un biorreactor donde el lodo se fermenta con *Bacillus spp.* Como resultado, se obtiene un **lodo hidrolizado** con alta disponibilidad de materia orgánica, y puede ser utilizado en otros procesos biológicos como la digestión anaeróbica en la línea de energía, produciendo biogás. El lodo hidrolizado también constituye la **materia prima secundaria (MPS2)** que sirve de base para producir el segundo producto agronómico (PA2): un **bioestimulante**. Las pruebas agronómicas realizadas en el proyecto han demostrado que, en general, aumenta la productividad de los cultivos en los que se ha aplicado (melón, tomate y pepino).

Además, la línea de lodos cuenta con un innovador sistema de pretratamiento, desarrollado por la Universidad de Sevilla, avalado por la **Verificación Tecnológica Medioambiental de la UE** (ETV según sus siglas en inglés), que es la herramienta oficial de la Comisión Europea para verificar el rendimiento de tecnologías innovadoras con carácter ambiental. El objetivo principal de la ETV es facilitar la entrada en el mercado de nuevas tecnologías innovadoras que tengan un beneficio ambiental en comparación con las tecnologías existentes y confirmar sus credenciales ecológicas.

3. El lodo hidrolizado se valoriza en la **línea de energía**, donde pasa por un proceso de digestión anaeróbica, en el que la materia orgánica se transforma en biogás, compuesto principalmente por metano y CO₂. El biogás se convierte después en energía en una unidad de cogeneración. La energía generada se puede utilizar para alimentar al matadero o al propio sistema.

4. **En la línea de algas** se lleva a cabo un proceso de tratamiento de algas, se utiliza la **tecnología AlgaBioGas (AGB)**, que se basa en un sistema de **estanques de algas** que permite controlar y medir los parámetros de entrada y salida del agua, al que llega parte del lodo hidrolizado y el digestato resultante de la línea de energía para contribuir al crecimiento de biomasa

algal. La **biomasa algal** que se produce constituye la **materia prima secundaria** (MPS3) que servirá de base para producir el tercer producto agronómico (PA3): un **bioestimulante**. Las pruebas agronómicas realizadas en el proyecto han demostrado la alta eficiencia de este producto. Se ha probado en varios cultivos y frutas como el pepino y el albaricoque. Se obtiene un mayor desarrollo vegetativo cuando el bioestimulante se aplica en el suelo, y cuando se aplica sobre las hojas, ha aumentado la intensidad y calidad de floración y brotación, y del rendimiento del fruto. También ha demostrado ser un producto competitivo, con un rendimiento igual que los mejores productos del mercado, pero constituyendo una alternativa mucho más ecológica.

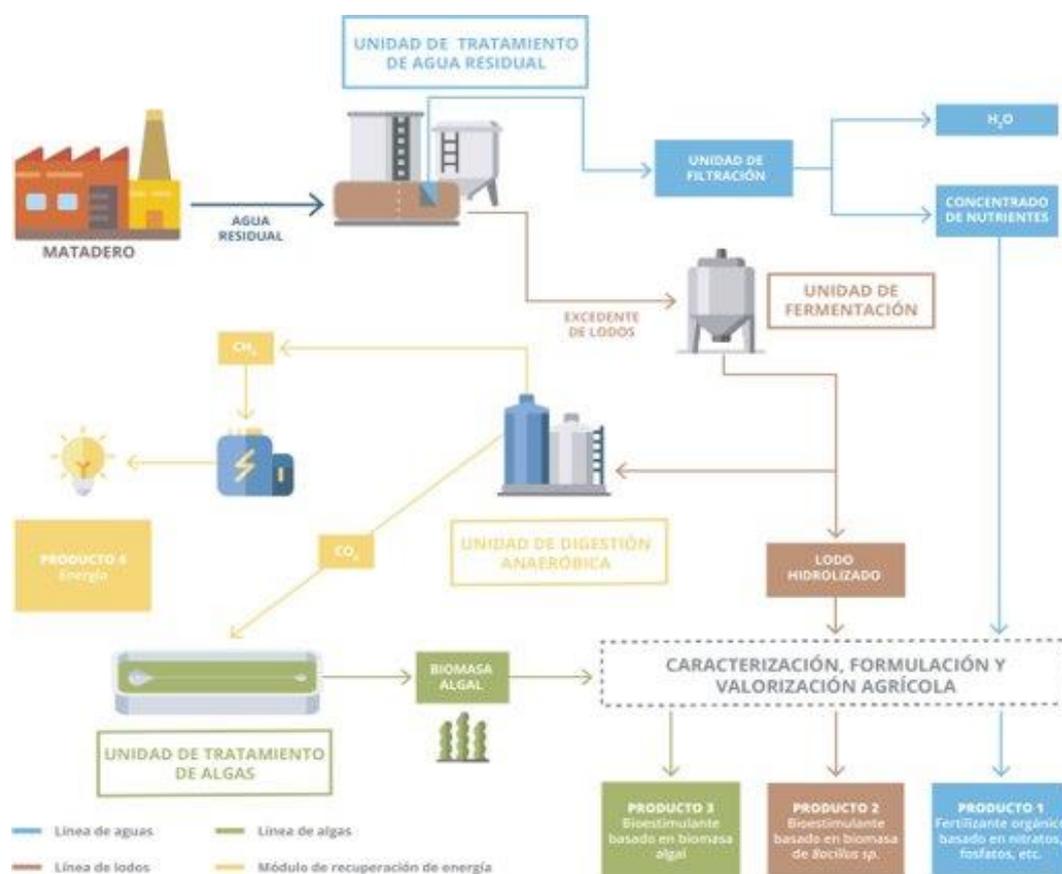


Figura 1. Esquema del sistema Water2Return



Figura 2. Sistema Water2Return instalado en Matadero del Sur, Salteras (Sevilla)

3. RESULTADOS

Los resultados que se presentan a nivel técnico son los asociados a la línea de agua que ha sido liderada por la empresa BIOAZUL.

La puesta en marcha de la línea de agua comenzó en abril de 2020, inoculando lodos activos procedentes de la depuradora en funcionamiento del Fundación Pública Andaluza Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA), y posteriormente se adaptó el funcionamiento del SBR a las fluctuaciones de caudal y carga orgánica de las aguas residuales procedentes de Matadero del Sur.

CENTA propuso el protocolo de análisis que permitía evaluar el rendimiento y las tasas de eficiencia del tratamiento de acuerdo con la Directiva del Consejo [91/271/CEE](#), y sus transposiciones nacionales. R.D. Ley 11/1995, R.D. 509/1996 y R.D. 2116/1998, relativa va la "recogida, tratamiento y vertido de aguas residuales urbanas y al tratamiento y vertido de aguas residuales de determinados sectores industriales". Los requisitos para el vertido de plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas sujetas a los artículos 4 y 5 de la

Directiva son los siguientes (aplicando los valores de concentración o el porcentaje de reducción):

- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5 a 20 °C) sin nitrificación: concentración permitida, 25 mg/l O₂; Porcentaje mínimo de reducción requerido, 70-90%.
- Demanda química de oxígeno (DQO): concentración permitida, 125 mg/l O₂; Porcentaje mínimo de reducción exigido, 75%.
- Sólidos suspendidos totales (SST): concentración permitida, 35 mg/l; Porcentaje mínimo de reducción exigido, 90%.

Además de estos parámetros, también se monitorizó el Nitrógeno midiendo semanalmente el N-NH₄ y el N-NO₃ en muestras tomadas en diferentes puntos de muestreo: el afluente del SBR (pozo de bombeo de entrada), el reactor del SBR, el efluente tratado (pozo de salida foso de la instalación de tratamiento) y, a partir de junio de 2021, en el Flotador por Aire Disuelto, (DAF según sus siglas en inglés).



Figura 3. Water2Return SBR instalado en Matadero del Sur, Salteras (Sevilla)

Desde septiembre de 2020 se tomaron dos tipos de muestras semanalmente: muestras puntuales y muestras agregadas de 24 horas. Todas las muestras fueron tomadas, conservadas y trasladadas siguiendo las normas normalizadas para el desarrollo de la actividad. Las determinaciones analíticas se realizaron en los laboratorios del CENTA.

Los resultados de las analíticas del efluente del SBR se presentan en la tabla 1 y las figuras (4-6).

Tabla 1. Resultados analíticos influente/efluente del 07/09/2020 al 10/03/2022

	N-NH ₄ (mg/l)	N-NO ₃ (mg/l)	N-Total*(mg/l)
Max Influyente	43940,00	103,00	650,00
Min Influyente	0,10	0,60	2,70
Media Influyente	865,12	7,69	199,72
Max Efluente	80,70	72,00	33,60
Min Efluente	0,00	0,10	0,80
Media Efluente	1,94	10,52	9,57

*Analíticas desde el 23/03/2021

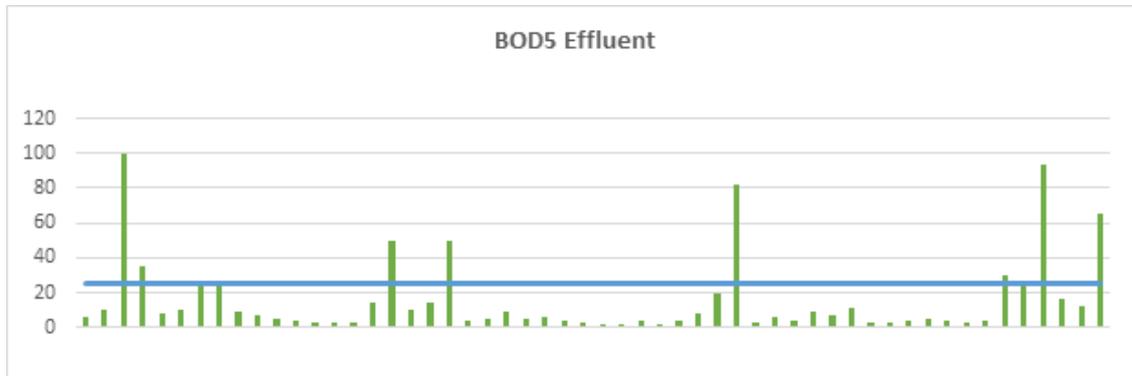


Figura 4. DBO₅ (mg/l O₂) de septiembre de 2020 a marzo de 2022



Figura 5. DQO (mg/l O₂) de septiembre de 2020 a marzo de 2022

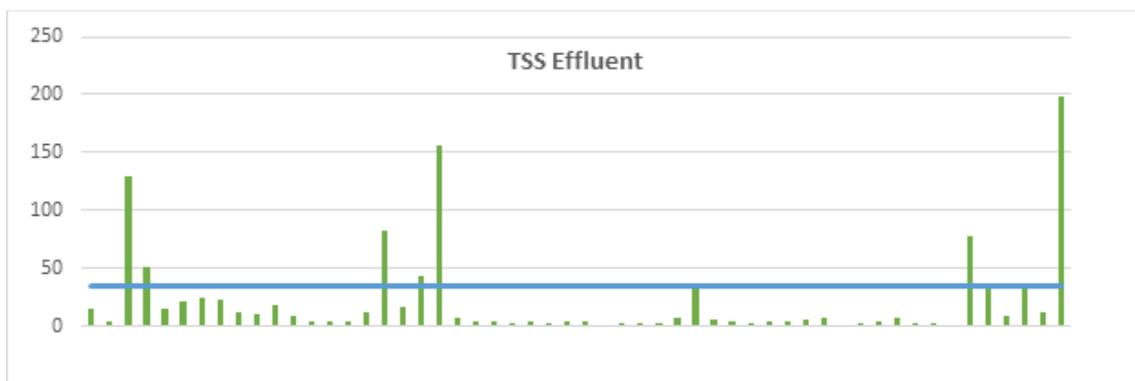


Figura 6. SST (mg/l O₂) de septiembre de 2020 a marzo de 2022

4. DISCUSIÓN/CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las analíticas, el tratamiento aplicado a las aguas residuales por la línea de agua Water2REturn siempre ha cumplido con los requisitos legales.

- DBO₅: todas las muestras cumplen la legislación aplicando ya sea los valores de concentración o el porcentaje de reducción. En la mayoría de los casos los valores están por debajo de la concentración permitida, 25 mg/l O₂. En todos los casos, el porcentaje de reducción respecto a las muestras afluentes es superior al 90%, por lo que para aquellas muestras con DBO₅ superior a 25 mg/l O₂ se cumple el porcentaje de eliminación requerido (mínimo 70-90%).
- DQO: todas las muestras cumplen la legislación aplicando ya sea los valores de concentración o el porcentaje de reducción. En la mayoría de los casos los valores de DQO están por debajo de la concentración permitida, 125 mg/l O₂. En todos los casos, el porcentaje de reducción respecto a las muestras del afluente es superior al 80%, por lo que para aquellas muestras con DQO superior a 125 mg/l O₂ se cumple el porcentaje de eliminación requerido (mínimo del 75%).
- SST: Todas las muestras cumplen la legislación aplicando ya sea los valores de concentración o el porcentaje de reducción. En la mayoría de los casos, los valores de SST están por debajo de la concentración permitida, 35 mg/l. En todos los casos, el porcentaje de reducción respecto a las muestras afluentes es superior al 80%, por lo que para aquellas muestras

con SST superiores a 35 mg/l se cumple el porcentaje de eliminación requerido (mínimo del 90%).

El subproducto resultante, **concentrado líquido de nutrientes**, resultó no ser comercialmente factible debido a que las aguas residuales del matadero presentaban una concentración de nitrógeno más baja de lo esperado. Esto podría ser consecuencia de las mejoras que se fueron implementando en el matadero durante la implementación del proyecto, incluyendo la crisis del SARS-CoV-2, además del alto coste de su transporte por lo que sí se consideró como un muy buen candidato para la fertilización directa de campos locales cercanos al matadero. Esta opción contribuye a la reducción de agua de riego y de los fertilizantes.

En relación con las materias primas secundarias que se obtuvieron en la línea de lodos y la de algas, tras su caracterización, se procedió a la formulación de dos bioestimulantes que se testaron con diferentes cultivos tal como albaricoques, tomates, pepinos y melón, en el marco del proyecto con resultados muy prometedores (confidenciales en este momento) que abrirán nuevas líneas de negocio para algunos de los socios del proyecto.

Por otra parte, se puede concluir que, de forma general, la implementación de esta tipología de proyectos donde se proponen enfoques de economía circular para convertir residuos en recursos, son necesarios en la transición hacia una economía sostenible y descarbonizada, especialmente en un contexto de Cambio Climático. En el caso de Water2Return, son varios los beneficios identificados:

Para la industria de los mataderos y de procesamiento de carne:

- Reducción del impacto ambiental de la producción.
- Menores costes de tratamiento de aguas residuales y lodos.
- Recuperación de energía y de nutrientes.
- Apertura de nuevas oportunidades de negocio.

Para los distribuidores de productos agronómicos y el sector agrícola convencional y orgánica:

- Reducción del impacto ambiental de la producción de alimentos y promoción de sinergias entre sectores industriales clave (agricultura, mataderos y tratamiento de aguas).
- Nuevas materias prima para producción de productos bio-agronómicos.
- Nuevas oportunidades de mercado brindando soluciones novedosas y con alta demanda.

Para la sociedad y el medio ambiente:

- Disminución de la dependencia de nutrientes y aumento de la seguridad del suministro de alimentos en la UE.
- Sustitución de fertilizantes convencionales por productos fertilizantes alternativos y bioestimulantes.
- Reducción de los efectos adversos de las emisiones de nutrientes en los cuerpos de agua y el suelo.
- Cierre de los ciclos de agua y nutrientes en toda la cadena de valor de producción y consumo.
- Reducción de los efectos negativos sobre la salud humana.
- Creación de nuevos empleos e industrias verdes en torno a la recuperación y reciclaje de nutrientes contenidos en el agua.
- Creación de nuevas oportunidades de negocio para la industria y las PYMEs en la UE y mejora de la competitividad de las empresas el mercado global.
- Mejora de la política y las condiciones del mercado en la UE y a nivel global para el despliegue a gran escala de soluciones innovadoras para la economía circular.

Creación de evidencia que facilitan la transición hacia una economía circular en la UE.

REFERENCIAS

Towards the Circular Economy: Economic and business rationale for an accelerated transition. 2013. Ellen Macarthur Foundation. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/towards-a-circular-economy-business-rationale-for-an-accelerated-transition> .

Fertilizers Europe Annual Overview 2018-2019. Consumo total de fertilizantes minerales (N+P₂O₅+K₂O) en Europa según datos de Fertilizers Europe / Eurostat, e incluyendo productos para uso agrícola e industrial. https://www.fertilizerseurope.com/wp-content/uploads/2019/08/Fertilizers_Europe_Annual_Overview_2018-2019_web.pdf

UDEIGWE, T. K., TEBOH, J. M., EZE, P. N., STIETIYA, M. H., KUMAR, V., HENDRIX, J., MASCAGNI, H. J., JR, YING, T., & KANDAKJI, T. (2015). Implications of leading crop production practices on environmental quality and human health. *Journal of environmental management*, 151, 267–279. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.11.024>