

## Estudio del ciclo del agua en explotaciones ganaderas porcinas y desarrollo de nuevos métodos para su reutilización

### Resumen

La comarca de Osona es una de las zonas más afectadas por el problema de los residuos ganaderos. En esta región, la aplicación directa de purines al suelo para la fertilización ha sido la opción más utilizada para el manejo de residuos ganaderos. Desafortunadamente, el alto grado de humedad en el producto hace que el transporte y la aplicación a otras áreas cercanas donde los suelos tienen un bajo contenido de nutrientes sea una opción inviable. Esta situación ha fomentado el desarrollo e implementación de nuevas tecnologías para tratar los residuos ganaderos con el fin de estabilizar la materia orgánica, concentrar y/o eliminar nutrientes y producir energía. Sin embargo, ninguna de estas tecnologías se ha centrado en la reutilización del agua ni se han considerado sistemas integrales que valoren todos los efluentes obtenidos a partir del concepto de "residuo cero".

Para dar solución a este problema, los sistemas de nitrificación-desnitrificación (NDN) se han ensamblado con tecnologías de electrodiálisis (ED) y ozonización para el tratamiento de efluentes líquidos, obteniendo así agua de calidad que puede ser reutilizada en el mismo proceso industrial/agrícola o con fines medioambientales. Por otro lado, se ha llevado a cabo un proceso de compostaje con las fracciones sólidas (fracción sólida del separador y lodos deshidratados) de las unidades de tratamiento NDN con el objetivo de valorar todos los efluentes obtenidos en el proceso.

### Objetivos

El objetivo principal del proyecto es **poner en valor los efluentes líquidos de los residuos ganaderos** mediante tratamiento ED y ozonización y así obtener agua de calidad sin contaminantes, sales ni nutrientes, **que pueda ser reutilizada** en la propia finca o utilizada para recargar acuíferos y otros servicios ambientales.

El proyecto tiene como objetivo resolver una de las principales limitaciones de la tecnología NDN, mediante el **acoplamiento de sistemas NDN con tecnologías de electrodiálisis y ozonización** para tratar los efluentes líquidos obtenidos.

También se valoran las fracciones sólidas a través del compostaje y finalmente una evaluación técnica, económica y ambiental de la implementación de los resultados obtenidos.

### Descripción de las actuaciones llevadas a cabo en el proyecto

Para alcanzar los objetivos establecidos, este proyecto se ha estructurado en 5 actividades principales:

- Actividad 1: Diseño y construcción de la planta piloto de ED.
- Actividad 2: Tratamiento de efluentes NDN a través de ED.
- Actividad 3: Tratamiento de efluentes de ED mediante ozonización.
- Actividad 4: Tratamiento de fracciones sólidas y lodos mediante compostaje.
- Actividad 5: Evaluación técnica, ambiental y económica del proceso mediante técnicas de análisis de ciclo de vida y análisis de ciclo de costes.

## Resultados finales y recomendaciones prácticas

### Actividad 1: Diseño y construcción de la planta piloto de ED

Con el fin de tener un amplio conocimiento de los principales efluentes que necesitaban ser tratados en este proyecto y poder realizar un diseño personalizado de la planta de ED de acuerdo con las necesidades existentes, se realizó en primer lugar una caracterización de los diferentes efluentes de la planta de tratamiento de purines NDN.

Los altos valores de potasio a la salida del reactor NDN han puesto de manifiesto la necesidad de disponer de un sistema de tratamiento de efluentes para la reducción del contenido de potasio, así como para la reducción de la conductividad a valores permitidos, tanto para su reutilización como para su vertido al medio ambiente de acuerdo con la legislación vigente. También debe tenerse en cuenta que la reducción del contenido sólido presente en la salida NDN es un parámetro importante para el correcto funcionamiento de la tecnología ED.

Antes del inicio de las pruebas de ED a escala piloto, se llevaron a cabo experimentos de ED a escala de laboratorio para verificar su eficiencia como tecnología para la reducción de la conductividad, el contenido de potasio y la reducción de COE. Se encontró la necesidad de reducir el contenido de materia coloidal ya que se observó un alto nivel de ensuciamiento de las membranas ED que condujo a una reducción en el flujo de permeado obtenido. Aunque la concentración de sólidos de entrada fue superior a la óptima para llevar a cabo el proceso, se observó una disminución significativa tanto en la conductividad como en el contenido de potasio. La realización de ciclos consecutivos de ED permitió determinar un porcentaje de agua recuperada en torno al 80%, demostrando así la alta eficiencia de la tecnología ED, tanto para la recuperación de agua limpia como para la reducción de sales.

Dado que parámetros fisicoquímicos como la cantidad de sólidos (partículas coloidales) y la conductividad en el efluente del que dependen el NDN pueden condicionar el buen funcionamiento del sistema ED, se evaluaron posibles escenarios operativos de concentración y conductividad sólida y se confirmó la necesidad de un sistema eficiente de pretratamiento de la coagulación/floculación previo a la aplicación de ED.

Así, el diseño y construcción de la planta piloto se realizó considerando la necesidad de contar con un sistema de pretratamiento previo a la pila ED con el fin de asegurar su correcto funcionamiento, evitar problemas operativos y maximizar las eficiencias del proceso. Los principales elementos del sistema de pretratamiento incorporado a la planta fueron un proceso de coagulación/floculación, filtración por filtro de arena y un sistema de membrana de ultrafiltración (UF).

### Actividad 2: Tratamiento de efluentes de NDN a través de ED

Antes de la puesta en marcha de la batería ED, se llevaron a cabo varias pruebas operativas del sistema de pretratamiento (coagulación/floculación, filtración del filtro de arena y ultrafiltración). Los resultados mostraron la eficiencia del filtro de arena para reducir el contenido de sólidos totales hasta un 65% de los sólidos de entrada, pero no una reducción en la turbidez del efluente de entrada. Por el contrario, el proceso de ultrafiltración logró reducir la turbidez del agua por debajo del valor límite requerido para poder tratar el agua con un proceso de ED. En el caso de la DQO, ni el filtro de arena ni la membrana de ultrafiltración permitieron obtener un efluente por debajo del valor umbral para poder tratar el efluente con la pila ED sin que existiera la posibilidad de un posible ensuciamiento de las membranas causado por la presencia de materia orgánica.

Para evaluar la posible suciedad debida a las altas concentraciones de DQO, y así evaluar la viabilidad del uso de la tecnología para el tratamiento de efluentes NDN, fue necesario realizar una prueba operativa sin hacer ninguna limpieza química durante un período de 50 horas, lo que equivaldría a una semana de funcionamiento continuo de la batería. No se observaron cambios o disminuciones en los flujos, no se observó un aumento en la presión de la pila de ED y las condiciones operativas se

recuperaron con la limpieza diaria realizada sin agente oxidante. Estos tres hechos muestran que la presencia de materia orgánica en el efluente a la entrada de la batería no causaría problemas de bioincrustación en la superficie de las membranas durante la operación continua y durante largas jornadas de trabajo.

También se realizaron simulaciones para conocer la concentración máxima de sales (conductividad) de trabajo para que la deposición de sales no tenga lugar en la superficie de la membrana. Un alto riesgo de ensuciamiento de las membranas fue determinado por la precipitación de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) en los valores de pH en los que se estaban realizando los experimentos, de modo que el concentrado de la batería no podía funcionar con conductividades superiores a  $18000 \mu\text{S}$  en operaciones a largo plazo. Para evitar problemas *de incrustación* en estas condiciones operativas ( $\text{EC} > 18000 \mu\text{S}$ ) es necesario agregar ácido en el efluente concentrado para aumentar la solubilidad de estas sales.

En septiembre de 2020, se inició la puesta en funcionamiento de la planta piloto de ED en la granja de tratamiento de purines de Monellots. Para verificar el correcto funcionamiento de la pila ED, la densidad de corriente límite de la batería se determinó registrando el amperaje con el aumento progresivo del voltaje de la batería. Normalmente, se considera que el voltaje de trabajo óptimo es del 70-80% del valor límite (punto de inflexión de la curva). En este caso, la planta de molienda limitó el voltaje a aplicar a 55V. Por ello, y viendo los resultados obtenidos en la curva, se decidió que podría ser un buen rango de trabajo entre 40 y 50V. Además, se registró la conductividad para comprobar la eficiencia y el correcto funcionamiento de la batería en términos de separación.

Para llevar a cabo la evaluación en términos de recuperación de agua y rechazo de sal en el sistema, se propusieron 4 escenarios operativos que se eligieron considerando la conductividad de salida del producto final de ED y parámetros operativos como el flujo de rechazo. La conductividad de salida de la ED es el parámetro clave que determina el destino o el uso del efluente de salida. Las conductividades bajas ( $2500 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) se encuentran en el umbral para el consumo animal, mientras que los valores de alrededor de  $4000 \mu\text{S}/\text{cm}$  deben utilizarse para vertido en cauce público.

- Escenario 1 (E1): Obtención de un producto final en torno a  $2500 \mu\text{S}$  y un alto flujo de rechazo que permitiría trabajar por debajo del valor límite de conductividad del concentrado en términos de ensuciamiento por precipitación salina.
- Escenario 2 (E2): Obtención de un producto final en torno a  $2500 \mu\text{S}$  y un flujo de rechazo bajo. Este escenario contempla la adición de ácido en el concentrado para poder trabajar con conductividades superiores al umbral de solubilidad del concentrado.
- Escenario 3 (E3): Obtención de un producto final en torno a  $4000 \mu\text{S}$  y un bajo flujo de rechazo.
- Escenario 4 (E4): Obtención de un producto final en torno a  $2500 \mu\text{S}$  y un bajo flujo de rechazo donde en este caso no se añadirá ácido a pesar de obtener conductividades por encima del umbral de solubilidad salina.

Con los resultados obtenidos, se establecieron como posibles escenarios reales E3 y E4 en la planta para llevar a cabo el estudio detallado de estos dos con el consiguiente tratamiento con el proceso de ozonización. El escenario E3 fue seleccionado para responder a la obtención de un producto apto para el vertido en el cauce fluvial en términos de conductividad y el escenario E4 para la obtención de un producto con un posible uso para agua potable en la propia finca.

### Actividad 3: Tratamiento de los efluentes de la ED mediante ozonización

Una vez seleccionados los escenarios E3 y E4 como los ideales para llevar a cabo la evaluación de la tecnología ED y la ozonización para el tratamiento de efluentes NDN, se realizó una caracterización detallada de los efluentes obtenidos en estos dos escenarios. Luego, los productos finales obtenidos en el proceso de ozonización fueron tratados mediante un proceso de ozonización a diferentes dosis.

Los resultados mostraron cómo el contenido de potasio de los productos obtenidos en el proceso de ED disminuyó hasta en un 70%. Con respecto a otros parámetros como el fósforo o el contenido de materia orgánica, el proceso de ED no supuso una reducción significativa de estos. Por otro lado, aunque el proceso de ozonización se evaluó a diferentes concentraciones de ozono, no se obtuvieron eficiencias de eliminación de materia orgánica superiores al 30%.

Con el fin de evaluar el posible uso de agua tratada, no solo para consumo animal sino para una posible reutilización de ésta, se determinó la carga bacteriana y patógena de los productos finales obtenidos en los procesos de ED y ozonización en el escenario E3 y E4. Los resultados obtenidos en el análisis de microorganismos mostraron que las altas dosis de ozono utilizadas en este experimento, hasta 2,88 g O<sub>3</sub>/L, no fueron suficientes para eliminar la carga bacteriana presente en los efluentes obtenidos en el proceso de DE. Este proceso, con las condiciones evaluadas de ozonización, no sería suficiente para reutilizar los efluentes como aguas para consumo animal.

Con el fin de evaluar la eficiencia del proceso de electrodiálisis para reducir la presencia de COE, se determinó la concentración de 23 compuestos orgánicos emergentes. De los 23 COEs seleccionados, solo se detectaron 6 compuestos a la entrada del DE durante los muestreos. Durante los tratamientos de ED, se observó una reducción en la carga de masa total en la concentración de estos 6 compuestos, presentando reducciones promedio globales del 50%, independientemente del régimen operativo de la pila ED. Los resultados obtenidos para la ozonización mostraron un alto potencial para reducir la concentración de COE ya que 3 de los 6 COEs detectados en el producto final de ED fueron eliminados por encima del 99% incluso aplicando la dosis más baja de ozono (0,7 g O<sub>3</sub>/L). Para los otros 3 compuestos detectados (compuestos orgánicos más recalcitrantes) se observó una correlación entre la dosis de ozono aplicada y la efectividad de eliminación de estos, alcanzando valores de eliminación superiores al 95% en la aplicación de ozono en dosis más altas.

#### Actividad 4: Tratamiento de fracciones sólidas y lodos mediante compostaje

Otro de los objetivos del proyecto ha sido valorar la fracción de purín sólido del proceso NDN para obtener un compuesto de calidad. Para evaluar este proceso, se han llevado a cabo dos experimentos de compostaje:

- Proceso de compostaje de la fracción sólida del purín obtenida del separador sólido líquido.
- Proceso de compostaje de la fracción sólida del purín obtenida del separador sólido líquido enriquecido (añadido) con producto concentrado o rechazo obtenido en el escenario E3.

Al finalizar los procesos de maduración del compostaje de la fracción sólida y co-compostaje, se obtuvieron materiales bioestabilizados con IRD24 inferior a 1 g O<sub>2</sub> h<sup>-1</sup> kg SV<sup>-1</sup>, valor inferior al valor de referencia para ser considerado estable.

Teniendo en cuenta las concentraciones de cobre y zinc de los materiales finales en los dos procesos de compostaje, tanto el compuesto de fracción sólida como el co-compostaje con el concentrado ED, se considerarían material de clase B adecuado para la agricultura.

El co-compostaje permitiría obtener un compuesto de calidad y evitaría la gestión o transporte del producto concentrado en el proceso de ED.

#### Actividad 5: Evaluación técnica, ambiental y económica del proceso mediante técnicas de análisis de ciclo de vida y análisis de ciclo de costes

En el marco del proyecto, una de las actividades más relevantes ha sido el análisis del ciclo de costes que permite valorar la viabilidad de las tecnologías estudiadas. Los cálculos se han realizado para 4 posibles escenarios diferentes que podrían darse en una situación real y para las dos opciones de implementación de tecnologías (alquiler o compra), así como considerando diferentes distancias al mismo tiempo del transporte de flujos (productos).

Los resultados han mostrado únicamente ahorros económicos (sin pérdidas) implementando un sistema ED+O<sub>3</sub> donde se considera la recuperación de agua para su reutilización, y cuando sea necesario el transporte del efluente actual NDN a una distancia de más de 95 Km en el caso de alquiler de equipos y 75 Km en caso de compra.

El análisis del ciclo de vida (ACV) se ha realizado de acuerdo con la metodología PEF2.0 donde se han seleccionado 3 indicadores: cambio climático, agotamiento de los recursos hídricos y recursos fósiles. Los resultados mostraron que los tratamientos propuestos tendrían un impacto 6 veces mayor en la categoría de cambio climático con respecto a la situación actual donde solo el efluente NDN se transporta a una distancia de 3 Km. Así, se ha determinado una relación entre el impacto en Kg CO<sub>2</sub> y los kilómetros de transporte, que han indicado que, los impactos sobre el cambio climático serían comparables entre las nuevas tecnologías propuestas y la gestión actual realizada cuando se superara un kilometraje igual a 18.

El impacto asociado al agotamiento de los recursos hídricos en cada uno de los escenarios ha indicado que en la operación actual y la implementación única de ED, escenarios donde el agua tratada se utiliza para la agricultura, el impacto es mucho mayor ya que el modelo no considera un retorno de agua al sistema debido a la evapotranspiración. La reducción del impacto solo es notable en prácticas donde se vierten efluentes en el cauce fluvial y donde el agua se reutiliza en las instalaciones ya que supone un ahorro en la extracción del recurso hídrico.

## Conclusiones

Del desarrollo de este proyecto se extraen las siguientes conclusiones:

1. El proceso de electrodiálisis para el tratamiento del efluente NDN ha demostrado una alta eficiencia en la reducción de la **conductividad** y el contenido de potasio, obteniendo porcentajes de reducción de estos en un 60% y 70%, respectivamente, en condiciones óptimas de funcionamiento.
2. El tratamiento mediante electrodiálisis permite obtener porcentajes de **recuperación** de agua tratada de hasta el 85%.
3. Las dos tecnologías en cascada (ED + ozonización) reducen la carga de **compuestos orgánicos emergentes** alrededor del 99%, mientras que solo el uso de ED alcanzaría una tasa de reducción del 50%.
4. La gran carga orgánica residual presente en la salida del proceso ED dificulta la eliminación total de **microorganismos**, impidiendo alcanzar la calidad de agua necesaria para ser reutilizada para uso animal.
5. La ozonización permitiría obtener, en las condiciones estudiadas, un producto final con calidad suficiente para ser reutilizado como **agua de limpieza** en las propias instalaciones según la normativa vigente.
6. El proceso de **co-compostaje** de la fracción sólida permitiría obtener un compuesto bioestabilizado apto para la agricultura y evitaría el transporte de la fracción concentrada del proceso ED, reduciendo así parte de los costes de gestión.
7. El **ahorro económico**, teniendo en cuenta la inversión inicial realizada con los tratamientos propuestos, sólo se conseguiría en el caso de que el transporte del efluente actual NDN tuviera que transportarse a más de 75 Km del punto de origen.
8. El análisis del ciclo de vida muestra que la **huella de carbono** del tratamiento actual es inferior a la implementación de las tecnologías propuestas y que estas tendrían el mismo impacto que la situación actual cuando el transporte superara los 18 km. En el caso de utilizar energías renovables como fuente de energía, esta huella de carbono se reduciría significativamente, y los escenarios serían comparables en el caso de tener la necesidad de transportar los efluentes a 9,3 Km.

9. Las tecnologías propuestas en las que el agua se devuelve al lecho del río o se reutiliza para usos de limpieza tendrían un impacto mucho menor en el agotamiento de los **recursos hídricos**, reduciendo el impacto en casi un 75%.

### Líder del Grupo Operativo

ENTIDAD: Granges Terragrisa SL

### Otros miembros del Grupo Operativo (no perceptores de ayuda)

ENTIDAD: Fundación Universitaria Balmes (UVIC)

CORREO ELECTRÓNICO DE CONTACTO : [sergio.ponsa@uvic.cat](mailto:sergio.ponsa@uvic.cat)

### Ámbito/s temático/s de aplicación

- Gestión del agua  
 Gestión de residuos y subproductos

### Ámbito/s territorial/es de aplicación/es

PROVINCIA/S: BARCELONA

COMARCA/S: OSONA

### Difusión del proyecto: publicaciones, jornadas, multimedia... (Indicar enlaces)

Enlace específico a las noticias de presentación del proyecto:

Participación en la "Feria Internacional para la producción animal 2021 (FIGAN 2021, <https://www.feriazaragoza.es/figan-2021>)" del día 22 de septiembre de 2021 en la ciudad de Zaragoza. Ponencia titulada "Implementación de tecnologías innovadoras para la recuperación de agua en el tratamiento de purín porcino"

### Página web del proyecto

<https://betatechcenter.com/ca/projectes/study-of-the-water-cycle-in-pig-farms-and-development-of-new-methods-for-its-reuse/>

### Otra información del proyecto

FECHAS DEL PROYECTO	PRESUPUESTO TOTAL
Fecha de inicio: julio 2019	Presupuesto total: 135.761,91 €
Fecha final: setiembre 2021	Financiación DACC: 54.151,05 €
Estado actual: Ejecutado	Financiación UE: 40.850,79 €
	Financiación propia: 40.760,07 €

Con la financiación de:

Proyecto financiado a través de la Operación 16.01.01 (Cooperación para la innovación) a través del Programa de desarrollo rural de Cataluña 2014-2020.

Orden ARP/133/2017, de 21 de junio, por la que se aprueban las bases reguladoras de las ayudas a la cooperación para la innovación a través del fomento de la creación de grupos operativos de la Asociación Europea para la innovación en materia de productividad y sostenibilidad agrícolas y la realización de proyectos piloto innovadores por parte de estos grupos, y la Resolución ARP/1282/2018, de 8 de junio, por la que se convoca la citada ayuda.