



**IDi AGUA**

EDICIÓN N.º 3 • DICIEMBRE 2021

# REUTILIZACIÓN Y REÚSO

REVISTA SOBRE TENDENCIAS EN LA I+D+i DE LA  
PLATAFORMA TECNOLÓGICA ESPAÑOLA DEL AGUA



# EDICIÓN, DISEÑO Y MAQUETACIÓN:

Secretaría y Secretaría Técnica de la PTEA

Plataforma Tecnológica Española del Agua (PTEA)

[www.plataformaagua.org](http://www.plataformaagua.org)

[secretariatecnica@plataformaagua.org](mailto:secretariatecnica@plataformaagua.org)

Alicia Andreu (ITC)  
Enrique Fernández (Tragsa)  
Ruth Latorre (PTEA ST)  
Ruth Parra (PTEA ST)

ISSN 2792-8101





# **OLVIDAMOS QUE EL CICLO DEL AGUA Y EL CICLO DE LA VIDA SON UNO MISMO**

JACQUES-YVES COUSTEAU



# PROF. FÉLIX FRANCES GARCÍA

## CARTA DEL PRESIDENTE DE LA PTEA

Estimado lector:

Por tercera vez consecutiva editamos el número anual de nuestra revista iDiAgua. El objetivo de esta revista es doble. Con ella queremos, por un lado, mostrar información de interés sobre un tema concreto del sector del Agua y, por otro lado, dar a conocer los avances científicos y tecnológicos de nuestros socios sobre el tema seleccionado.

El número anterior de iDiAgua estuvo dedicado a la economía circular. Ya en la fase de recopilación de artículos, detectamos que era necesario dar un protagonismo especial a la reutilización y reúso de las aguas depuradas, y la entrevista a nuestro actual Director General del Agua, Dr. Teodoro Estrela, le dedica unos cuantos párrafos al tema

([http://plataformaagua.org/images/Revista\\_2020/Revista\\_IDiAgua\\_2020\\_compressed.pdf](http://plataformaagua.org/images/Revista_2020/Revista_IDiAgua_2020_compressed.pdf)).

En 2020 se publicó el Reglamento 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo relativo a los “requisitos mínimos para la reutilización del agua”. Este reglamento se traspondrá en breve a la legislación española, actualizando el anterior Real Decreto 1620/2007 sobre el “régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas”. Hay que decir que el uso de agua regenerada se considera cada vez más una estrategia sostenible en todo el planeta, ya que puede ahorrar un importante consumo de agua dulce, reducir el vertido de efluentes tratados, contribuir a una menor huella de carbono y al progreso hacia una economía circular. Es por tanto un tema de plena actualidad y es el protagonista de este número.



Prof. Félix Frances García



Aunque la reutilización de las aguas depuradas puede tener diversos fines, desde luego su mayor aplicación en España y otros países del mundo con escasez de recursos hídricos es para riego agrícola. Es por ello por lo que comenzamos este número con una entrevista al presidente de FENACORE, el Dr. Andrés del Campo.

Pueden ser considerados artículos de opinión los de Tragsa y del grupo Calagua. Tragsa nos expone una serie de recomendaciones para la utilización de las aguas depuradas en la recarga gestionada de acuíferos, obtenidas en el marco de la red europea e israelí MARSOLUT. El grupo mixto de investigación Calagua (IIAMA-UV) nos habla sobre de las ventajas del uso de reactores anaerobios, pero también introduce el concepto del uso del nitrógeno y fósforo presente en las aguas depuradas para la fertirrigación, lo que no sólo reduciría los costes de producción del agricultor, sino también de la planta de depuración generando un valor añadido a la reutilización.

En cuanto a los artículos que exponen soluciones tecnológicas más concretas, nos encontramos con aquellos que mejoran las técnicas de depuración para poder cumplir con la nueva normativa: el proyecto AMIA incide en diferentes técnicas de tratamiento para pequeñas poblaciones y en el uso de las aguas depuradas para riego agrícola, y los proyectos DIRELMIVID y ESENCE más específicamente en la eliminación en planta de contaminantes emergentes. Los proyectos CONQUER y WALNUT utilizan técnicas de desalación de aguas residuales para la recuperación de nutrientes.

Las implicaciones en la salud humana de la presencia de fármacos y metales traza son abordadas por los proyectos ANBAGENS y FatePharM, mientras que los proyectos ESENCE y REGIREU buscan mejorar las tecnologías de detección de contaminantes emergentes y de E. coli, respectivamente.

Finalmente, se pueden encontrar en este número otros ámbitos de utilización de las aguas depuradas que no sea el riego. El proyecto europeo iWAYS es un claro ejemplo de reutilización industrial y NextGen de utilización para riego en jardines privados y recarga gestionada de acuíferos. El prototipo DRAIN2WC está pensado para la reutilización de aguas grises en el ámbito doméstico, y Cartif nos habla de las posibilidades de aprovechar el hidrógeno generado en las plantas con nuevos procesos de fermentación como otra vía de reutilización

He de decir que, para mí, todos estos artículos han sido muy interesantes, por lo que envíé mis mayores felicitaciones y agradecimientos a los autores de los mismos. Espero, estimados lectores, que os gusten y los encontréis de gran interés.

Un afectuoso saludo

# ÍNDICE



## ENTREVISTA

**D. ANDRÉS DEL CAMPO**

Presidente de FENACORE

## BLOQUES TEMÁTICOS

### **1** *NUEVO REGLAMENTO 2020/741 DE LA COMISIÓN SOBRE REUTILIZACIÓN DE JUNIO DE 2020*

1.1 Proyecto ANBAGENS

1.2 Proyecto MARSoluT

### **2** *LA REUTILIZACIÓN DE LAS AGUAS EN LA AGRICULTURA*

2.1 Proyecto LIFE AMIA

2.2 Proyecto FatePharM

2.3 Proyecto DIRELMIVID

2.4 Propuesta del Grupo de Investigación CALAGUA

### **3** *PROYECTOS ESPECÍFICOS DE REÚSO DEL AGUA*

3.1 Proyecto iWAYS

3.2 Proyecto LIFE CONQUER

3.3 Proyecto WALNUT

### **4** *SEGURIDAD HÍDRICA Y REÚSO*

4.1 Proyecto NextGen

4.2 Proyecto RIGIREU

### **5** *DEPURACIÓN Y DESALACIÓN*

5.1 Proyecto ESENCE

5.2 Proyecto H2TRANSEL

5.3 Resultados en electrocoagulación del Grupo de Investigación CIDTA

### **6** *OTROS*

6.1 Proyecto Smart Water (Artículo invitado sobre Ciberseguridad y reutilización)

## CONOCE LA PTEA

Conoce la Plataforma Tecnológica del Agua y cómo contribuye al fomento de la I+D+i dentro del sector del agua

**IN MEMORIAM. PROFESOR RAMÓN LLAMAS**

## ENTREVISTA

### DR. ANDRÉS DEL CAMPO

PRESIDENTE DE FENACORE



## ¿CUÁLES SON LOS PRINCIPALES OBJETIVOS Y PRIORIDADES DE FENACORE?

La Federación Nacional de Comunidades de Regantes (FENACORE) agrupa a las entidades dedicadas a la administración del agua para riego, tanto superficial como subterránea, con el objetivo de aunar esfuerzos y voluntades en la defensa de sus legítimos intereses y derechos de uso del agua. En la actualidad, cuenta con más de 700.000 regantes y más de dos millones de hectáreas, es decir, más del 80% del regadío nacional agrupado en Comunidades de Regantes.

FENACORE trabaja estrechamente tanto con el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación como con el Ministerio para la Transición Ecológica. Además, es órgano consultivo del Ministerio y vocal nato del Consejo Nacional del Agua. En el marco internacional, FENACORE es miembro fundador de la Comunidad Euromediterránea de Regantes (EIC) y de Irrigants d'Europe (IE) y miembro de la European Union of Water Management Associations (EUWMA).

Actualmente, entre sus principales prioridades se encuentra el avance en la modernización de los sistemas de riego. Para ello, la asignación de los fondos europeos resulta fundamental, pues encaja tanto con todos los objetivos fijados por la Comisión Europea, como con los Planes Hidrológicos, herramientas determinantes para la gestión del agua en España durante los próximos seis años.

Es cierto que España es un referente mundial en regadío modernizado, pero también es verdad que aún hay casi un millón de hectáreas pendientes de modernizar y que un porcentaje elevado de las obras de regulación y de infraestructuras hidráulicas de interés general no se han realizado, pese a haberse recogido en los sucesivos planes hidrológicos.

En estos momentos, necesitamos producir más alimentos usando menos agua y consumiendo menos energía. Esto sólo resulta posible con la modernización de los sistemas de riego y la incorporación de nuevas tecnologías.

## ¿SE REFIERE AL TELECONTROL?

Entre otras. Los sistemas de telecontrol ya se han implantado en más de un millón de hectáreas, lo que consolida a España como un referente internacional en regadío modernizado, pero deben seguir extendiéndose.

España tiene más de la mitad de su superficie regada, en concreto el 53% (más de 2 millones de hectáreas), dotada con sistemas de riego localizado, considerado el más eficiente. Un porcentaje que multiplica por nueve al que se registra a nivel mundial, donde apenas un 6% de los cultivos se riegan con este tipo de sistemas.

Por otro lado, el riego mediante aspersión representa un 23% del total de los sistemas, por lo que si lo sumamos al de goteo, obtenemos que más del 76% del regadío español ya está modernizado.

En este contexto, el telecontrol permite el riego a la demanda. En aquellos casos en los que sea necesario establecer turnos y se produzcan riegos nocturnos, la principal ventaja es que evita que un regante tenga que ir a su finca o explotación a deshoras, lo que mejora significativamente la calidad de vida del agricultor.

Además, la extensión de estos sistemas puede reducir los costes, puesto que la posibilidad de elegir el momento para regar ayuda a realizar estas labores durante las horas valle en las que la energía eléctrica es más barata, como por las noches y los fines de semana.

Sin embargo, su implantación requiere una inversión económica y un mantenimiento, por lo que convendría abaratar la factura eléctrica que, incomprensiblemente, se ha encarecido de forma notoria como consecuencia de la nueva metodología para calcular los peajes de transporte y distribución. Todo ello, después de que desde 2008 el aumento medio de la factura para el regadío haya superado el 120 %, debido al incremento tanto del consumo como de las inadecuadas tarifas eléctricas, sin haber sido considerados los desorbitados costes de la energía de estos últimos meses.

## ➔ Evolución de sistemas de Riego en España

TIPO DE RIEGO	Antes del año 2000		Año 2020	
	Hectáreas	%	Hectáreas	%
Gravedad (superficie)	1.973.336	59,0	888.094	23,1
Aspersión y automotriz	802.712	24,0	884.766	23,0
Localizado (goteo)	568.588	17,0	2.058.322	53,9
<b>TOTAL</b>	<b>3.344.636</b>	<b>100,0</b>	<b>3.831.182</b>	<b>100,0</b>

### ¿HASTA QUÉ PUNTO LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS PERMITIRÁN MEJORAR LA REUTILIZACIÓN DE AGUAS?

El regadío español defiende la depuración de las aguas residuales y su posterior reutilización, lo que ahora se denomina "agua regenerada", porque ofrece una garantía de suministro muy superior a la de las fuentes convencionales. Hay que tener en cuenta que el agua regenerada de los núcleos urbanos se puede producir de modo continuo en el tiempo, porque el ciudadano la necesita a diario para vivir.

La reutilización de las aguas regeneradas, sin duda, puede verse mejorada gracias a las aportaciones de la tecnología y la innovación. De cualquier modo, va a depender mucho de factores relacionados con la calidad, los costes, las cotas y distancia a la zona regable...

En este marco, conviene advertir que, aunque la normativa europea sobre la reutilización de aguas exige calidades 10 veces superiores a la normativa española, el problema no radica en la exigencia de una mayor calidad a la salida de la planta de tratamiento, sino en mantenerla en toda la red de distribución de riego (canales, balsas...) y sobre todo, cuando se producen mezcla de aguas de otras fuentes como superficiales o subterráneas.



**Una asociación  
apolítica para la  
defensa de los  
intereses y  
derechos del agua**

La Federación Nacional de Comunidades de Regantes de España (FENACORE) es una asociación sin ánimo de lucro e independiente políticamente, con más de medio siglo de existencia, que agrupa a las entidades (comunidades de regantes, sindicatos de riegos, etc.) dedicadas a la administración del agua para riego, tanto superficial como subterránea.

Así, cualquier intento de “rebajar excesivamente los parámetros” puede crear un problema de comercialización en todos los productos alimenticios que se exportan; ya que, aunque la Unión Europea quiera “normalizar” el uso de estas aguas, la sociedad es todavía muy reticente a comprar y comer productos alimenticios regados con agua regenerada, a veces influenciados por la publicidad contradictoria que se hace desde otros países para eliminar la competencia española de nuestros productos extra tempranos en los mercados centroeuropeos.

España es el país de Europa con el mayor volumen de agua reutilizada (350-400 hm<sup>3</sup>), y con un reglamento que lleva funcionando 12 años sin ningún problema. Por ello, siempre hemos reivindicado que el conocimiento adquirido por los operadores de plantas de tratamiento y reutilización en España debería ser un referente para tener en cuenta en el desarrollo legislativo europeo.

España es el país de Europa con el mayor volumen de agua reutilizada (350-400 hm<sup>3</sup>), y con un reglamento que lleva funcionando 12 años sin ningún problema. Por ello, siempre hemos reivindicado que el conocimiento adquirido por los operadores de plantas de tratamiento y reutilización en España debería ser un referente para tener en cuenta en el desarrollo legislativo europeo.

Sea como fuere, nosotros siempre hemos defendido el principio de ‘quien contamina paga’ para que el coste del tratamiento recaiga sobre el usuario que genera el agua residual. También hay que ser consciente de que las aguas regeneradas suponen una medida alternativa o complementaria para atender una situación de déficit o escasez coyuntural. Pero no son una solución alternativa a los clásicos trasvases y embalses de regulación que transportan y almacenan grandes volúmenes de agua y que ahora pueden ser más necesarios que nunca para mitigar los efectos negativos del cambio climático, como consecuencia de los probables fenómenos extremos de inundaciones y sequías.

Es decir, el uso de aguas regeneradas y desaladas debe ser sólo un complemento a los recursos ordinarios superficiales o subterráneos para garantizar la alimentación en el futuro, ya que cubrir las necesidades crecientes de alimentos requiere un incremento del agua disponible para riego. Frente a la escasez, que se agrava en periodos de sequía, resulta imprescindible buscar recursos alternativos y complementarios a los convencionales. Una tarea para la que resulta fundamental la aportación de la tecnología.

Desde FENACORE siempre hemos defendido que las Comunidades de Regantes que cedan su agua para los abastecimientos deben de disfrutar de un derecho preferente a la reutilización de esas aguas, una vez que hayan sido depuradas por el primer usuario urbano sin aplicar costes extras al regadío. A la hora de otorgar una concesión, debe respetarse el orden de preferencia previsto en los Planes Hidrológicos de cuenca.

## **HABLANDO DE PLANES HIDROLÓGICOS DE CUENCA, ¿QUÉ OPINA FENACORE DE LA NUEVA PLANIFICACIÓN HIDROLÓGICA?**

Nos encontramos en la fase de información pública de los borradores de los Planes Hidrológicos de cuenca correspondientes al 3º Ciclo de Planificación Hidrológica (2022-2027), que marcarán nuestro futuro no solo en los próximos 6 años, sino en un plazo muy superior que se contaría por decenas de años.

Estos borradores de Planes Hidrológicos confirman la filosofía eminentemente ambiental que marca el MITERD tanto en sus actuaciones, como en sus objetivos. Nos preocupa enormemente que puede imponerse en el nuevo ciclo de planificación hidrológica un enfoque propio del ecologismo radical que busca exclusivamente objetivos ambientales, fijando unos inventados “caudales ecológicos” en múltiples puntos de nuestras cuencas hidrográficas, lo que no es un mandato ni obligación de la Directiva Marco de Agua de la UE, sin haber evaluado ni considerado los efectos sobre las demandas existentes y futuras.

Se da más importancia a los objetivos ambientales que al resto de los objetivos de la planificación hidrológica, sin intentar buscar el necesario equilibrio entre la satisfacción de las demandas y el respeto al medio ambiente. Sin duda, por la prelación de usos de la Ley de Aguas, seremos los regantes los que sufriremos las consecuencias al reducirnos los caudales disponibles para riego, pudiendo provocar abandono de la población del medio rural al tener que cesar su actividad por falta de recursos disponibles.

## ➔ Suwanu Europe



**SUWANU  
EUROPE**

**La escasez de  
agua es un  
problema mundial**

SUWANU EUROPE se centra en proyectos de reutilización de agua en Europa mediante la reutilización de aguas residuales tratadas en la agricultura. La razón es que las aguas residuales tratadas de acuerdo con los estándares y métodos apropiados tienen un gran potencial para complementar los recursos hídricos convencionales utilizados en el riego agrícola.

## ➔ SolAqua



Este proyecto ha recibido financiación del programa de Investigación e Innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea en virtud del acuerdo de cooperación n.º 101017974

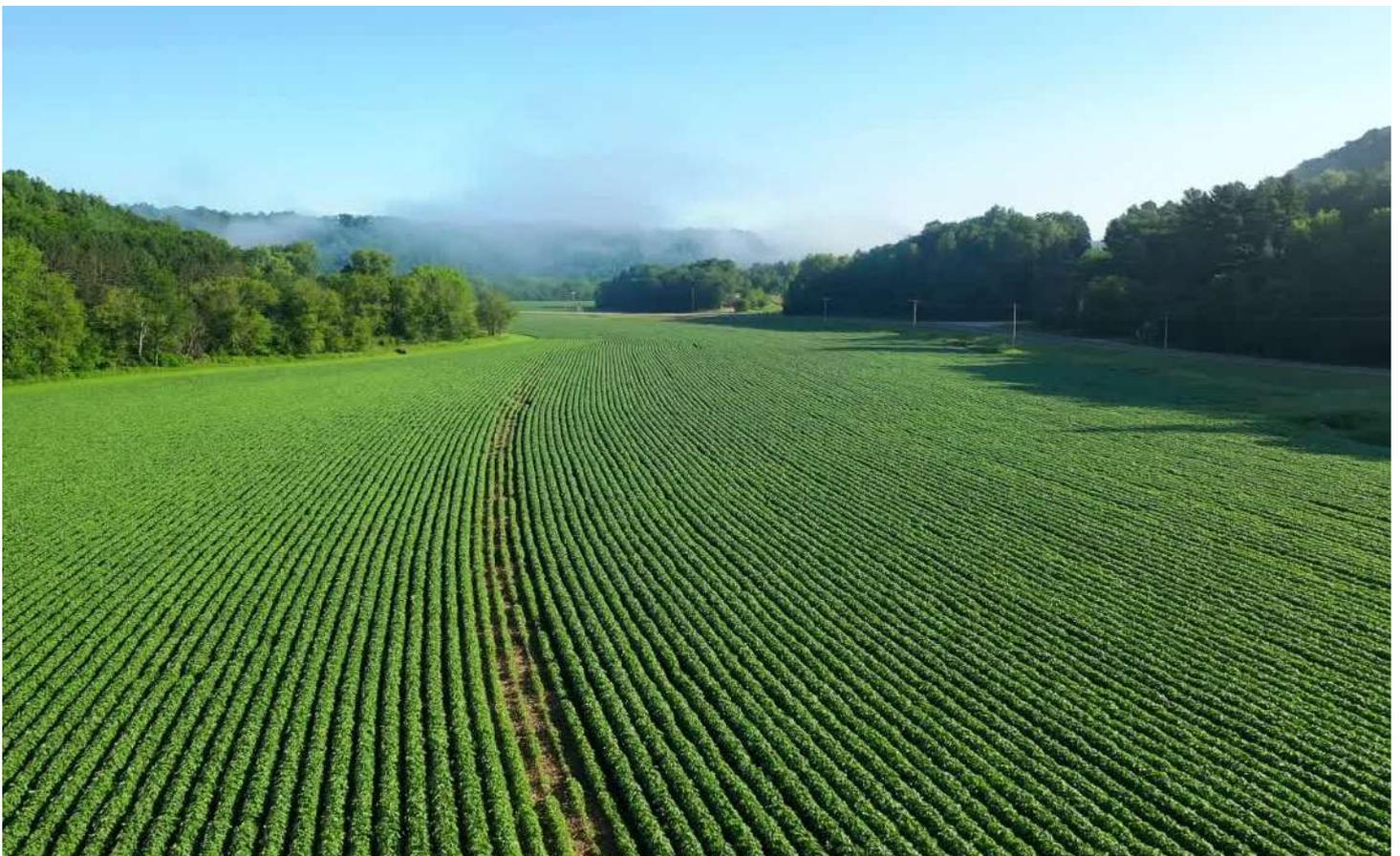
**Riego con energía solar accesible, fiable y asequible para Europa y más allá**

El objetivo principal de SolAqua es fomentar el uso de energía renovable en Europa, facilitando la implantación del riego con energía solar en el sector agrícola

# YA PARA FINALIZAR, Y HABLANDO DE MEDIO AMBIENTE, ¿QUÉ PROYECTOS TIENE EN MARCHA FENACORE PARA MEJORAR LOS SISTEMAS DE RIEGO GRACIAS AL USO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS Y ENERGÍAS RENOVABLES QUE EVITEN LA CONTAMINACIÓN?

Pues uno de los proyectos más interesantes, que acaba de finalizar, es SUWANU EUROPE, donde se ha puesto de manifiesto la importancia de dar a conocer los beneficios del uso del agua regenerada para la agricultura en zonas de escasez, así como la relevancia de expandir el conocimiento existente entre los múltiples actores (operadores de depuración, usuarios, administración, empresas I+D+i, consumidor final...).

Pero en este contexto no podemos pasar por alto la importancia de producir energía fotovoltaica distribuida para autoconsumo en las zonas regables. En este sentido, participamos en el proyecto SOLAQUA, que trata de poner a disposición de las Comunidades de Regantes una herramienta financiera, contratos PPA (acuerdos de compra de energía) mediante los cuales los regantes no tienen que hacer inversiones en una planta fotovoltaica y se garantizan precios inferiores y una cantidad de kWh de energía para el bombeo durante la primavera y el verano. Las empresas instaladoras son las encargadas de realizar la instalación y operar la planta fotovoltaica generadora. Los agricultores solo deben aportar el terreno necesario para colocar la instalación.



# 1

## **NUEVO REGLAMENTO 2020/741 DE LA COMISIÓN SOBRE REUTILIZACIÓN DE JUNIO DE 2020**

**Significado respecto a la legislación  
actual y gobernanza.**



# ARTÍCULO 1.1

## IMPACTO DE LA REUTILIZACIÓN DE AGUA EN RIEGO AGRÍCOLA: PROYECTO ANBAGENS

### Introducción

La escasez de agua y el deterioro progresivo de su calidad son dos factores que representan un grave problema a nivel mundial. El aumento continuo de la población, el crecimiento de los núcleos urbanos, el desarrollo de la industria y la necesidad de incrementar la producción agraria, son factores relevantes que están contribuyendo a la escasez del recurso hídrico, agudizada aún más por el contexto de cambio climático en el que estamos inmersos. Por ello es necesario buscar nuevas fuentes de agua dulce, que satisfagan la actual demanda, en especial en el sector agrario, que representa el mayor porcentaje de demanda de agua dulce.

La regeneración de las aguas residuales representa una excelente alternativa que está en línea con los principios de desarrollo sostenible y que permite alcanzar un doble objetivo: la mejora de la calidad de las aguas naturales, permitiendo vertidos menos contaminantes, y la posibilidad de reutilizar las aguas regeneradas para otros fines, fomentando así una economía circular. Es bien reconocido que la reutilización de aguas regeneradas conlleva una serie de ventajas, como la disminución de la presión sobre las fuentes naturales, cada vez más sobreexplotadas y escasas, especialmente en zonas áridas y semi-áridas.



La reutilización del agua en riego agrícola es una actividad en creciente expansión que puede ayudar a paliar la escasez del recurso hídrico. La reciente publicación del REGLAMENTO (UE) 2020/741 sobre requisitos mínimos de calidad para la reutilización del agua, pretende impulsar la implantación de esta práctica sostenible en la Unión. Sin embargo, existe cierto recelo social asociado a la presencia de contaminantes químicos y microbiológicos que puedan estar presentes. El proyecto ANBAGENS aborda el estudio integral de un esquema real de reutilización que proporcionará información sólida sobre el posible impacto, en escenarios reales, de la aplicación de agua regenerada.

El empleo de aguas regeneradas tiene también un menor impacto ambiental que otros métodos alternativos de suministro de agua, como los trasvases de agua o la desalinización y constituye una fuente constante e inagotable. Por otro lado, su empleo en riego agrícola permite aprovechar la composición de estas aguas, reduciendo el consumo de fertilizantes y, por tanto, los costes de producción.

### Antecedentes

Pese a las ventajas indiscutibles asociadas a la reutilización, su práctica a nivel europeo es limitada, estando muy por debajo de su potencial. Ello se debe, por un lado, a la necesidad de implementar tratamientos terciarios eficaces que mejoren la calidad de los efluentes, y por otro, al recelo social asociado al posible impacto negativo de estas prácticas para la salud humana y ambiental, especialmente en un sector tan sensible como el agroalimentario.

La reciente publicación del Reglamento (UE) 2020/741, relativo a los requisitos mínimos de calidad para la reutilización del agua, pretende impulsar la implantación de esta práctica sostenible en Europa. Este reglamento, que será aplicable a partir del 27 de junio de 2023, establece nuevas clasificaciones de calidad de agua según el cultivo y el tipo de riego, y en algunos aspectos, es más exigente que la actual normativa española (RD 1620/2007) reduciendo los niveles de tolerancia en parámetros físico-químicos (sólidos en suspensión, turbidez) y microbiológicos (E. coli), y añadiendo un nivel exigible de DBO5, que no se recoge en el RD. Sin embargo, sigue sin considerar el potencial riesgo asociado a la presencia de contaminantes químicos en las aguas regeneradas, solo mencionados en el Anexo II del Reglamento. Aun presentes en concentraciones muy bajas en las aguas, estos microcontaminantes pueden acumularse en el suelo y ser transferidos a las plantas, alcanzando las zonas comestibles.

## PALABRAS CLAVE

### Reutilización Riego agrícola Translocación de antibióticos Resistencia a antibióticos

Si bien hasta el momento no hay evidencias de que este proceso conlleve riesgo para el consumidor, no es menos cierto que los estudios son aún muy limitados. Por ello, desde el punto de vista científico, resulta imprescindible profundizar en el conocimiento de la presencia y comportamiento de estos contaminantes en el nexo Agua-Suelo-Planta, aportando información acerca de su acumulación, distribución, persistencia y asimilación/translocación por la planta. Esta información es esencial para establecer el nivel de riesgo que pueda estar asociado al riego, tanto para el consumidor como para el medio ambiente.



ANBAGENS surge como iniciativa para cubrir en parte el vacío de información existente, identificando peligros dentro de un escenario de exposición real. Así, se aborda de forma integral el estudio de la contaminación química y microbiológica en un esquema completo de reutilización en condiciones reales de campo, mediante el seguimiento de un cultivo intensivo de tomate, típico de la provincia de Almería, regado con agua regenerada (Figura 1.1\_1). El estudio se centra en un grupo de contaminantes de interés preferente, como son los antibióticos, abordándose aspectos como la eficiencia de los tratamientos de regeneración en su eliminación, su estabilidad y movilidad a lo largo del ciclo de cultivo y su influencia en la generación y transferencia de genes y bacterias resistentes a antibióticos (ARG y ARB), éstas últimas consideradas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como una de las mayores amenazas para la salud mundial, la seguridad alimentaria y el desarrollo.

Para garantizar la consecución de estos objetivos, el proyecto ANBAGENS cuenta con la participación de dos grupos de investigación pertenecientes a dos instituciones, la Plataforma Solar de Almería y la Universidad de Almería. A lo largo del proyecto, aun en curso, se han desarrollado y aplicado metodologías de análisis para la detección de antibióticos (HPLC-MS/MS), ARG (q-PCR), ARB y otros patógenos (aislamiento por cultivo en placa), se ha realizado el seguimiento de estos contaminantes a lo largo de una campaña completa de cultivo de tomate en 4 fincas localizadas en la comarca del Bajo Andarax y se han detectado puntos críticos en el proceso, asociados al recrecimiento de patógenos en las balsas de almacenamiento.

# PROYECTO ANBAGENS

**Samira Nahim-Granados<sup>1,2</sup>**

**Ángela González <sup>1,3</sup>**

**María Jesús Abeledo-Lameiro <sup>1,2</sup>**

**Inmaculada Polo-López <sup>1,2</sup>**

**Isabel Oller <sup>1,2</sup>**

**Sixto Malato <sup>1,2</sup>**

**Patricia Plaza-Bolaños <sup>1,3</sup>**

**Ana Agüera <sup>1,3</sup>**

**1. CIESOL, Centro mixto de Investigación en Energía Solar UAL-CIEMAT**

**2. Plataforma Solar de Almería-CIEMAT**

**3. Departamento de Química y Física-Universidad de Almería**

**aaguera@ual.es\***



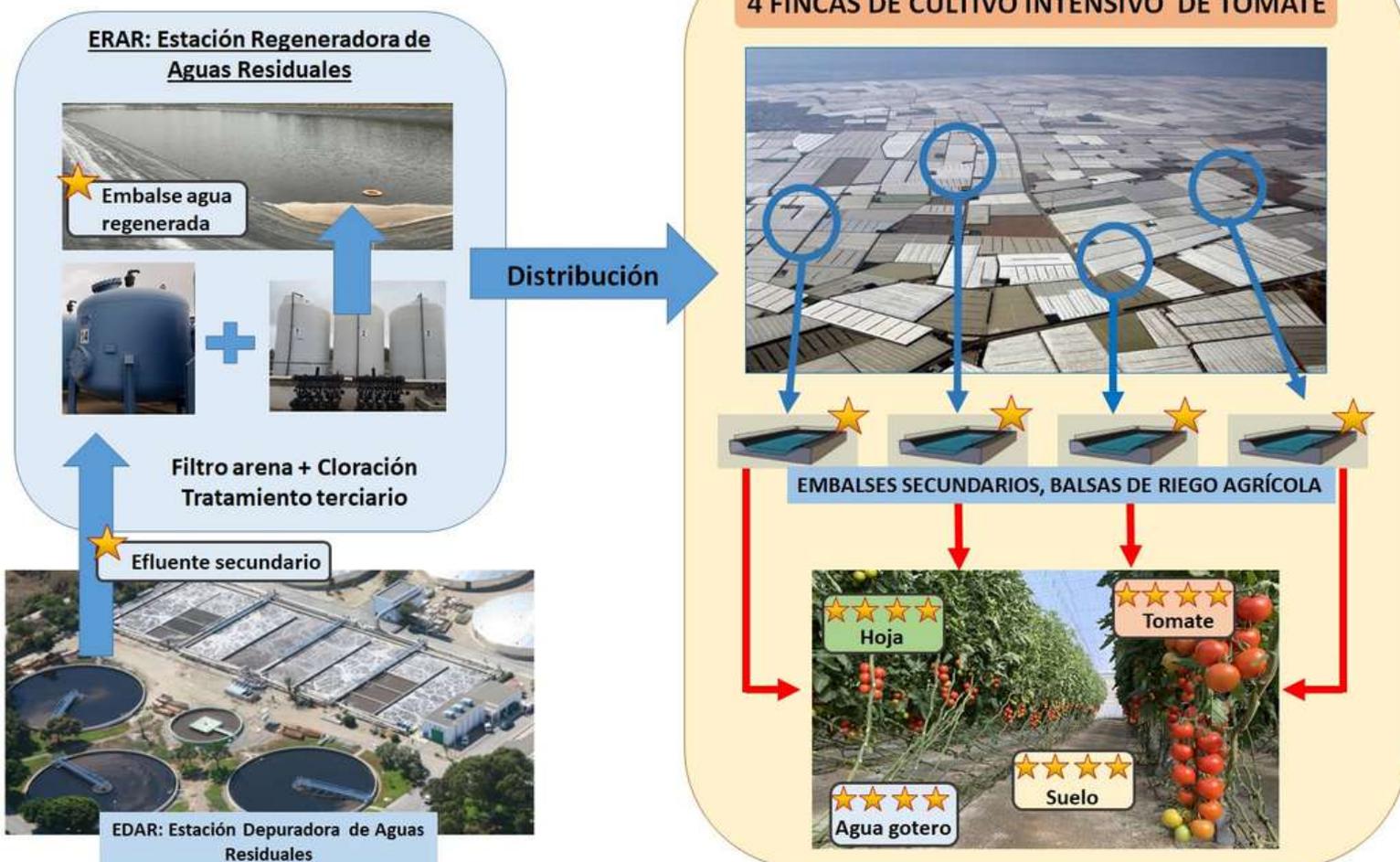


Figura 1.1\_1 Esquema conceptual del estudio experimental

## Resultados preliminares

Los resultados preliminares obtenidos hasta el momento han permitido establecer que, en lo referente a la calidad microbiológica, el tratamiento de regeneración aplicado (cloración) permite alcanzar el nivel de desinfección exigido por el Reglamento Europeo (UE) 2020/741 (E. coli <1000 CFU / 100 mL, categoría C) inmediatamente después del proceso de cloración. Sin embargo, el almacenamiento posterior del agua regenerada en balsas de riego puede incrementar la carga microbiológica si el tiempo de almacenamiento es prolongado (11 % de muestras analizadas), siendo por tanto recomendable el empleo directo en riego del agua regenerada.

Por otro lado, la presencia de trazas de antibióticos y genes de resistencia a antibióticos (qnrS, blaTEM, blaCTX-M32, sulI and intI1) en las aguas tratadas revela la ineficacia de este tratamiento terciario para la eliminación de estos contaminantes. En lo referente al cultivo, es de destacar que no se ha detectado contaminación microbiológica en ningún caso en las muestras de tomate previamente lavadas, garantizándose así la seguridad del consumidor.

Con todo ello, se pretende contribuir a un mejor conocimiento de esta práctica agrícola que garantice su implantación en ausencia de riesgo para el consumidor y el medio ambiente.

# ARTÍCULO 1.2

## SUGERENCIAS PARA LAS FUTURAS DIRECTRICES EUROPEAS DE RECARGA INTENCIONADA DE ACUÍFEROS CON AGUAS REGENERADAS Y DE OTRAS FUENTES

### Objetivos

Proponer al legislador europeo unas recomendaciones para el desarrollo del futuro marco jurídico relativo a la recarga gestionada de acuíferos o Managed Aquifer Recharge (MAR).

### Contexto y marco legal

Las Directrices sobre la reutilización del agua en Europa (JRC, 2017) originaron el primer Reglamento 2020/741 de 5 de junio, que especifica requisitos mínimos para la reutilización del agua a nivel europeo. Estas directrices expanden el alcance de la Directiva del Marco del Agua, 2000/60/CE (DMA o WFD), que aglutina una serie de normas que tienen por objeto proteger y gestionar todas las masas de agua europeas. La DMA obliga a los Estados Miembros a lograr un buen estado cualitativo y cuantitativo de las aguas, y considera la recarga gestionada de acuíferos como uno de los instrumentos de gestión para lograrlo. Adicional y complementariamente, la CE publicó la Directiva para proteger el estado cualitativo de las masas de agua subterránea 2006/118/CE (DAS o GWD).



El Reglamento 2020/741 de la Comisión Europea (CE) sobre reutilización de las aguas, de Junio de 2020, corresponde a un paso intermedio en la publicación final de las directrices europeas para la recarga gestionada de acuíferos con aguas regeneradas. En este momento, a pesar de haber un borrador de dichas directrices, persiste un vacío legal y los organismos de cuenca y autoridades del agua se reservan la soberanía para autorizar o denegar propuestas de recarga intencionada de acuíferos, sobre todo con aguas regeneradas.

En el marco del proyecto H2020 MARSoluT se están desarrollando propuestas encaminadas a la CE a través del Grupo de trabajo de la Estrategia de Implementación Común (CIS por sus siglas en inglés). Dichas propuestas buscan proporcionar acciones comprobadas científicamente y recomendaciones para las futuras "European Guidelines on Managed Aquifer Recharge (MAR)", ya que hasta ahora, las Directrices Australianas y las de USA (US EPA y ASCE) son las más empleadas en Europa; mientras que en países en vías de desarrollo se utilizan las Directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 1990 y 2003) para la reutilización de las aguas. Este artículo resume las propuestas mencionadas.

El grupo de trabajo CIS de la DMA es un proceso de consulta técnica informal entre la CE y los Estados miembros para orientar el proceso de aplicación práctico de la DMA. En cuanto a recarga artificial o Managed Aquifer Recharge (MAR), actualmente este organismo está desarrollando un entregable que cumple con la DMA y con la DAS, en cooperación con el grupo de trabajo ad hoc sobre reutilización del agua: "EU Guidance Document on Managed Aquifer Recharge" (en CIS work programme, pg. 10, en prensa).

## Discusión

Se han generado una serie de recomendaciones relacionadas con las directrices para MAR que podrían ser consideradas por la CE canalizadas a través del CIS. Cabe destacar:

- Desarrollar un acuerdo terminológico común relativo a las tecnologías MAR, con implicaciones legales y obligatoriedad de uso a nivel europeo.
- Consensuar el proceso de concesión de autorizaciones para la recarga intencionada de acuíferos con un enfoque de riesgo.
- Desarrollar una base legal común. Actualmente existe un bagaje teórico insuficiente sobre los aspectos legales de las tecnologías MAR. Las cuestiones cualitativas plantean un reto en cuanto al uso de la zona saturada y su capacidad de autodepuración para contaminantes presentes en el agua de recarga, especialmente si es regenerada y reutilizable.
- Inclusión de aspectos presupuestarios: Los aspectos financieros de los proyectos MAR están frecuentemente excluidos, tanto en la normativa como en las autorizaciones concedidas. Estos aspectos deberían incluir los beneficios monetarios y no monetarios (e.g. el aumento en la disponibilidad de agua, la reducción de los costes de bombeo debido al ascenso del nivel freático, etc.).
- Demostrar mediante experiencias reales los beneficios generados por la recarga gestionada de acuíferos, de cara a evitar una malinterpretación de la técnica, como ocurre en el marco legal de algunos países como España, donde se considera un "vertido" o una "presión". A su vez, la implementación de las tecnologías MAR debe ser responsable, ya que de lo contrario pueden causar efectos adversos (e.g. aumentar el nivel freático e inundar cultivos).
- Avanzar con la modernización de la DMA y establecer programas de medidas intermedios: La aplicación de MAR y SAT-MAR (o recarga intencionada con aguas regeneradas) en la UE puede facilitarse adoptando las siguientes acciones: 1) Establecer un marco de permiso o autorizaciones (CE, 2009); 2) Establecer mecanismos de control y vigilancia para garantizar la exacta aplicación de las condiciones del permiso; y 3) Realizar el seguimiento necesario de los sistemas MAR para renovar cualquier permiso o concesión (Sapiano, 2021, CIS 2021, en prensa).

Los aspectos a tener en cuenta se han sintetizado en la Figura 1.2\_1, proponiendo un término para su integración: "Recarga Intencional Monitorizada" (MIR). Los distintos componentes, líneas de acción y futuras sugerencias están dissociadas en siete bloques correlacionados con las siete columnas de la Figura 1.2\_1, respectivamente:



\*Managed Aquifer Recharge (MAR)  
 \*Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)  
 \*River Bank Filtration (RBF)

Figura 1.2\_1 Aproximación metodológica y recomendaciones para la "Recarga Intencional Monitorizada" (MIR)

1. Fuentes de agua, con especial atención en la procedente de depuradoras con tratamiento terciario.
2. Condiciones ambientales, con énfasis en las del medio receptor (suelo y acuífero).
3. Tecnologías empleadas para la recarga gestionada del acuífero.
4. Sensórica empleada para el monitoreo de parámetros cualitativos y cuantitativos en modos presencial y remoto y en tiempos cuasi-real y en diferido.
5. Uso final de las aguas (e.g. el abastecimiento urbano requiere una calidad del agua superior a la requerida para regadío).
6. Consideraciones generales para el monitoreo, seguimiento, vigilancia y control, y propuestas pragmáticas para el futuro desarrollo de las directrices europeas.
7. Análisis en campo y laboratorio, tipo, lugar, costes, persona encargada, etc.



Figura 1.2\_2 Monitoreo presencial en un piezómetro perforado en el interior de una balsa de recarga gestionada en el acuífero Los Arenales, Segovia

## PALABRAS CLAVE

Guidelines  
Managed Aquifer Recharge (MAR)  
Recarga Intencional Monitorizada (MIR)  
Monitoreo  
Directiva Marco del Agua  
CIS  
Recarga Artificial  
DSEAR

## Conclusiones

Algunos aspectos deben abordarse de antemano cuando se adapten o modifiquen los reglamentos que atañen a la recarga gestionada de acuíferos a nivel europeo, tales como la inclusión de un sistema claro de permisos y de normas sobre la propiedad del agua, régimen concesional, etc. Además, debe establecerse de manera vinculante una terminología común y una definición legal de “Recarga Gestionada de Acuíferos” o “Recarga Artificial”.

La normativa debería incluir mecanismos de control y vigilancia, garantizar una continuidad temporal suficiente de los proyectos y pilotos MAR, y considerar aspectos presupuestarios, especialmente aquellos relacionados con la inversión pública.

En cuanto a las normas de calidad del agua, deberían diseñarse a nivel de acuífero. Para ello, se deberían considerar como mínimo las condiciones específicas de cada acuífero (incluyendo su capacidad de depuración), la calidad del agua de recarga y su variabilidad, el sistema de infiltración y el uso final. Además, deben establecerse directrices concretas de monitoreo teniendo en cuenta aspectos presupuestarios, lugar y frecuencia de muestreo.

Además, la evaluación de riesgos debería ser parte de la normativa final sobre MAR, tal y como contemplan las Directrices Australianas, el Reglamento 2020/741 y el actual Plan DSEAR en su capítulo 6.

## Agradecimientos

Esta propuesta de acciones emana del proyecto H2020 MSCA MARSolut, CA 814066.

# PROYECTO MARSOLUT

**Enrique Fernández Escalante**  
Especialista I+D+i  
efernan6@tragsa.es\*

**José David Henao Casas**

**Rodrigo Calero Gil**



# 2

## LA REUTILIZACIÓN DE LAS AGUAS EN LA AGRICULTURA



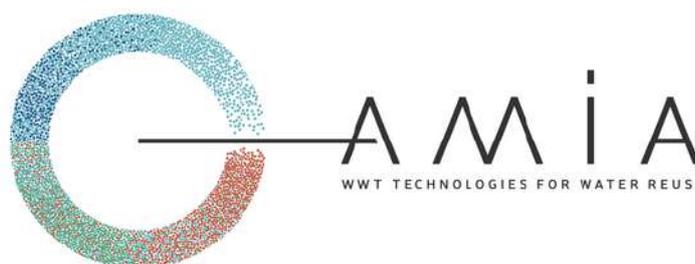
# ARTÍCULO 2.1

## PROYECTO LIFE AMIA. COMBINACIÓN DE TECNOLOGÍAS INNOVADORAS PARA LA REUTILIZACIÓN DE AGUA

### Introducción

El progresivo endurecimiento de las políticas ambientales en materia de exigencia de la calidad de las aguas residuales urbanas tratadas y regeneradas, eficiencia energética, y recuperación de recursos, han puesto en entredicho la idoneidad de las tecnologías tradicionales de depuración y regeneración basadas en fangos activos y cloración o UV, respectivamente, por lo que nuevas propuestas tecnológicas son necesarias para cubrir estas necesidades, especialmente para poblaciones pequeñas.

En el proyecto LIFE AMIA se está desarrollando una novedosa combinación de tecnologías que permite la depuración y regeneración de aguas residuales urbanas con un mínimo consumo energético y aplicando los principios de economía circular. El sistema propuesto está siendo validado a escala demostrativa en las instalaciones de la EDAR de Alhama de Murcia, donde la planta de LIFE AMIA está tratando un caudal de 12 m<sup>3</sup>/d.



El proyecto LIFE AMIA está desarrollando un nuevo concepto de EDAR, innovador y sostenible, combinando un tratamiento compacto anaerobio-aerobio (A2C), un biorreactor de microalgas (HRAP) y un proceso de adsorción - oxidación avanzada (AOP). El proyecto busca ofrecer una solución tecnológica apta para pequeñas poblaciones que permita el tratamiento y regeneración de aguas residuales urbanas, produciendo un agua de calidad apta para su uso en agricultura y recarga gestionada de acuíferos.

El nuevo proceso está siendo validado a escala demostrativa en la EDAR de Alhama de Murcia y ofrece resultados prometedores en cuanto a calidad del agua, consumo energético y producción de biogás y microalgas.

# PALABRAS CLAVE:

## EDAR REGENERACIÓN DE AGUAS BIOGÁS RECUPERACIÓN DE NUTRIENTES

El proyecto está siendo liderado por la empresa española FACSA y cuenta con la participación de los socios EUROFINS-IPROMA (España), ESAMUR (España), CEBAS-CSIC (España), ARVIA (Reino Unido) y ATLANTIS (Chipre).

### Metodología y resultados preliminares

El tratamiento propuesto se inicia con un sistema compacto que combina de forma verticalmente apilada una etapa anaerobia situada en la parte inferior con una etapa aerobia en la parte superior. El agua a tratar se introduce por la parte inferior de la cámara anaerobia, que opera con biomasa granular y está configurada como un reactor de flujo ascendente tipo EGSB. En esta primera etapa se produce la eliminación de la mayor parte de la carga orgánica contaminante y su conversión a biogás, lo cual permite una reducción importante del consumo energético y una potencial valorización energética del metano contenido en el biogás.

Tras un sistema de separación trifásico, el agua asciende a la cámara superior donde se aplica un tratamiento aerobio basada en tecnología de lecho móvil (MBBR), en la que gracias al uso de carriers que permiten una retención mas efectiva de biomasa, se consigue eliminar el resto de materia orgánica.

Seguidamente el agua se introduce en un reactor de microalgas tipo raceway o HRAP, que en el caso del proyecto se encuentra distribuido en dos reactores idénticos operados en paralelo para dotar de mayor flexibilidad a la instalación. En estos reactores, especialmente diseñados para maximizar la incidencia solar en el cultivo y mantener una correcta agitación, se realiza un cultivo de microalgas que crecen sobre el agua a tratar. Estos microorganismos autótrofos fotosintéticos utilizan la luz solar para fijar el CO<sub>2</sub> disuelto y asimilar los nutrientes presentes en el agua residual (principalmente N y P), evitando de este modo el posible impacto negativo de los mismos sobre el medio en caso de que el agua tratada llegue a cauce.

Para la optimización del HRAP, se utiliza un control de pH que dosifica CO<sub>2</sub> para asegurar la presencia de carbono inorgánico en el medio, lo que permite maximizar la calidad del efluente y producción de biomasa algal.

Tras la salida del HRAP, las microalgas son separadas del medio líquido con un sistema de flotación por aire disuelto (DAF), que permite el cosechado de las microalgas, las cuales pueden ser valorizadas como fertilizante gracias a su elevado contenido en nutrientes. Las propiedades de esta biomasa algal como fertilizante están siendo estudiadas a escala de invernadero y de campo sobre diferentes cultivos, demostrando su contribución positiva al aportar nutrientes y materia orgánica al suelo de agrícola.



Figura 2.1\_1 Imagen de la planta demostrativa LIFE AMIA ubicada en Alhama de Murcia

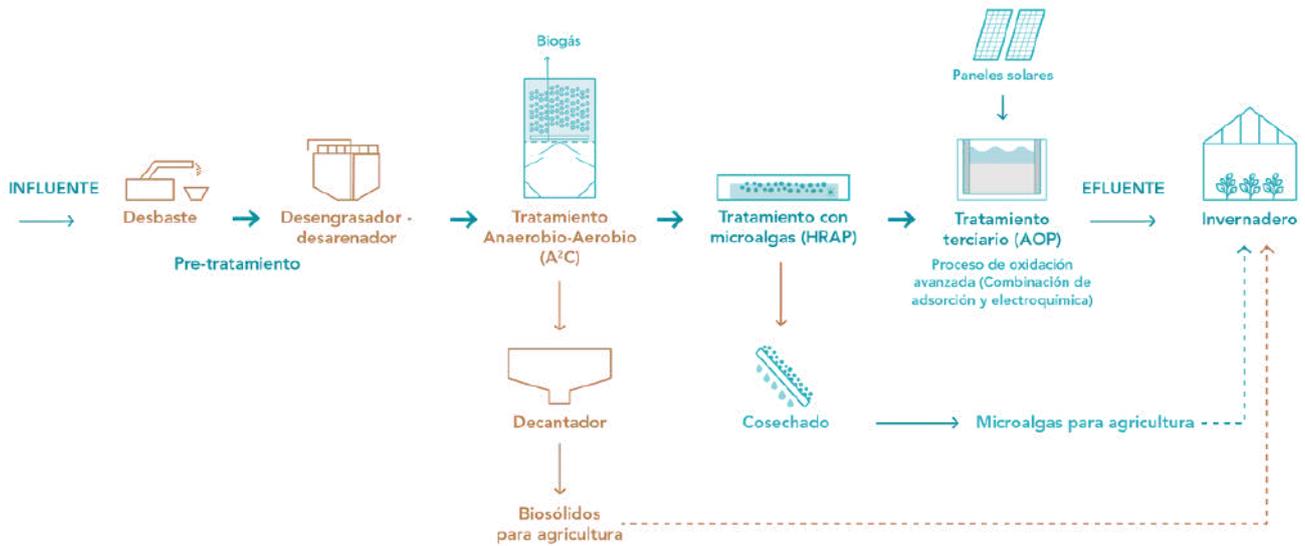


Figura 2.1\_2 Diagrama del proceso de depuración y regeneración LIFE AMIA

Finalmente, el agua depurada y libre de sólidos pasa del DAF al tratamiento terciario para su regeneración mediante un proceso de adsorción y electro-oxidación avanzada (AOP) alimentado con energía solar. Este novedoso proceso se basa en el uso de las partículas patentadas NYEX®, que permiten la adsorción de moléculas orgánicas como microcontaminantes, materia orgánica refractaria o incluso patógenos, que posteriormente son oxidados a CO<sub>2</sub> mediante la aplicación de una pequeña corriente eléctrica que permite además la regeneración de las partículas. De este modo se obtiene un agua regenerada de alta calidad que puede ser tanto para riego en agricultura como para recarga de acuíferos, en función de las necesidades del momento.

El proyecto LIFE AMIA ha sido financiado por el Programa LIFE de la Unión Europea (bajo el Grant Agreement LIFE AMIA 18/ENV/ES/000170).

# PROYECTO LIFE AMIA

**Elena Zuriaga Agustí**  
Responsable técnico de I+D+i en  
FACSA  
ezuriaga@facsa.com\*

**Ruben Gracia Tirado**  
Técnico I+D+i en FACSA

**Nuria Zamorano Lopez**  
Técnico I+D+i en FACSA

**Cristian Perez Hernandez**  
Técnico I+D+i en FACSA

**Francisco Valero Canals**  
Jefe de explotación en FACSA

**Ignacio Pastor Carbonell**  
Coordinador de explotaciones en  
FACSA

**Manuel Abellán Soler**  
Responsable de explotación en  
ESAMUR

**Estefanía Ferrer Caraco**  
Técnico Área de diversificación y  
desarrollo en EUROFINS-IPROMA

# ARTÍCULO 2.2

## RIESGOS DE LA REUTILIZACIÓN INDIRECTA EN EL MEDIO AGRÍCOLA



### Introducción

La contaminación ambiental es un problema de salud pública global. No es sorprendente, por tanto, que la salud ambiental sea un elemento clave del Pacto Verde Europeo y los Objetivos de Desarrollo Sostenible. En aras de la seguridad alimentaria, el objetivo principal de la Misión de Salud del Suelo y Alimentos de la Unión Europea es garantizar que al menos el 75% de los suelos de cada Estado miembro estén en un estado saludable para 2030. Para lograr esto, es necesario actuar sobre las fuentes contaminantes y sus vías de propagación.

### Antecedentes

En áreas urbanas y periurbanas, los suelos agrícolas son a menudo regados con aguas superficiales que contienen una mezcla muy compleja de contaminantes, como consecuencia de la descarga de efluentes de las estaciones de depuración de aguas residuales (EDARs). Por tanto, la reutilización indirecta de estos recursos hídricos puede representar una vía de propagación de contaminantes en el medioambiente.

La reutilización indirecta en la agricultura puede favorecer la entrada de contaminantes en el medioambiente. Si bien es cierto que los procesos de atenuación natural pueden amortiguar la propagación de la contaminación, esta práctica puede suponer un riesgo para la salud por la entrada de contaminantes en la cadena alimentaria.

En particular, cuando esta agua se utiliza para la producción de alimentos, existe un riesgo para la salud humana relacionado con la introducción de contaminantes en la cadena trófica.

En el área mediterránea donde los efluentes de las EDARs representan una fracción importante del caudal de los ríos aguas abajo de grandes ciudades, el problema de la contaminación de los recursos hídricos y, por tanto, los riesgos para la seguridad alimentaria se ven agravados. Entre los contaminantes que se encuentran frecuentemente destacan los contaminantes de preocupación emergente (CPEs), que incluyen tanto sustancias químicas no deseables como patógenos. La presencia de CPEs en el medioambiente no es nueva, pero sí la preocupación sobre su impacto en la salud humana y ambiental. Debido a sus efectos potencialmente dañinos son el foco de atención de distintas iniciativas a nivel global, como la Lista de Observación Europea, NORMAN Network, AMR Industry Alliance, etc. Por ejemplo, entre ellos encontramos los fármacos, donde hormonas y antibióticos son de importancia prioritaria por su impacto incluso a muy bajas concentraciones.

## Descripción del proyecto FatePharM

En el grupo de investigación Soil and Water Quality del Instituto IMDEA Agua se investiga para garantizar la calidad de agua y alimentos. Concretamente, en el marco del proyecto FatePharM "Riego de cultivos con aguas superficiales contaminadas con fármacos y metales traza: ¿atenuación natural o riesgo para la salud?", coordinado por Ana de Santiago y Raffaella Meffe, se ha evaluado la atenuación natural de fármacos en suelos agrícolas aguas abajo de la ciudad de Madrid y el riesgo potencial para la salud humana derivado del consumo de alimentos. Para ello, se seleccionó como área de estudio la cuenca baja del río Jarama, que supone un escenario inmejorable al tratarse de un acuífero aluvial aguas abajo de una gran urbe y cuyo uso del suelo está casi totalmente destinado a prácticas agrícolas intensivas. Los terrenos, cultivados principalmente con maíz, son regados por inundación con aguas superficiales de la Real Acequia del Jarama, receptora de efluentes de las principales EDARs de Madrid.

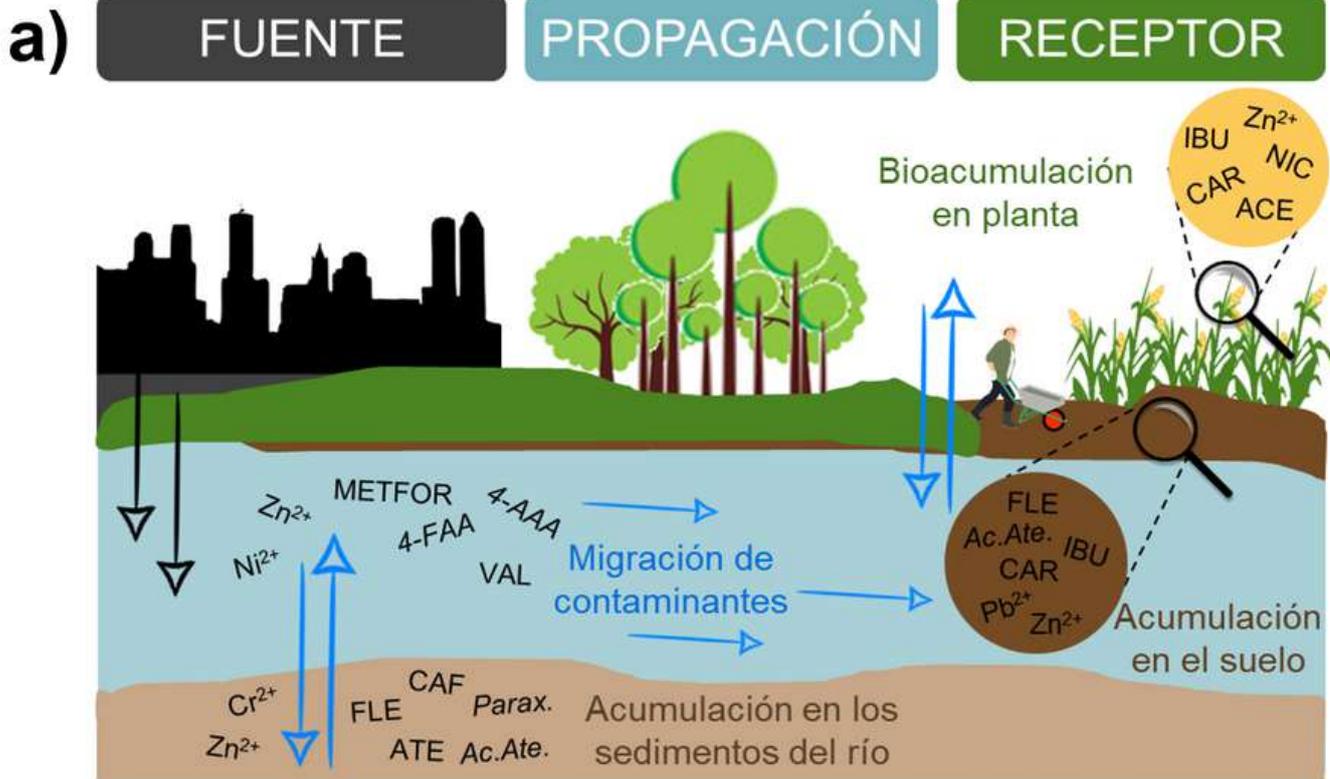
## Algunos resultados preliminares

La investigación indica la presencia de la mayor parte de los CPEs estudiados, tanto en el efluente de la EDAR seleccionada, como en el río Manzanares y el agua de riego, aunque en concentraciones bajas (del orden de ng L<sup>-1</sup>) (de Santiago-Martín et al., 2020). La mayor concentración se observa para un grupo de fármacos que actúan sobre el metabolismo y sobre los sistemas nervioso y cardiovascular (metformina, productos de transformación del metamizol y valsartán, respectivamente).

# PALABRAS CLAVE: REUTILIZACIÓN INDIRECTA CONTAMINANTES DE PREOCUPACIÓN EMERGENTE MEDIO AGRÍCOLA RIESGO PARA LA SALUD

De los fármacos incluidos en las listas de observación de la UE los antibióticos macrólidos, el ciprofloxacino y el diclofenaco aparecen en concentraciones muy bajas, mientras que el diclofenaco excede en gran medida el límite máximo aceptable de detección del método, lo que sugiere la presencia de entradas considerables de este contaminante al medioambiente (> 300 ng L<sup>-1</sup>). Considerando el sistema fuente-propagación-receptor, se observa que el patrón de concentración de fármacos es diferente entre los distintos compartimentos ambientales (Fig. 1a). Este resultado acentúa la necesidad de incluir los diferentes compartimentos al evaluar el destino de los contaminantes en condiciones reales a escala de campo. Así, en el grano de maíz se cuantifica un grupo de fármacos (acetaminofén, nicotina, ibuprofeno y carbamazepina) cuya concentración en el agua de riego no es de las más elevadas. Como puede observarse en la Fig. 1b, se detecta la presencia de una variedad de fármacos, aunque no todos han podido ser cuantificados.

En una segunda campaña de campo focalizada en una parcela agrícola instrumentalizada se observó que los procesos de atenuación natural que ocurren en el suelo son efectivos en la reducción de la concentración de la mayoría de los fármacos (> 60%), excepto para la carbamazepina, su producto de transformación 10,11-epóxido de carbamazepina y el sulfametoxazol (Meffe et al., 2021). En este segundo estudio se llevó a cabo el cálculo del balance de masa, fundamental para tener una perspectiva global de la transferencia entre compartimentos ambientales (Fig. 2). Los resultados indican que el proceso de absorción por las plantas de maíz no es tan relevante como la atenuación natural durante la infiltración de agua a través del suelo, siendo la masa de fármacos absorbida por el maíz el 0,07% del total de la masa aportada por el agua de riego. Por otro lado, la masa que se infiltra hacia el acuífero es aproximadamente del 13,5%. El estudio pone de manifiesto que es esencial vigilar aquellos fármacos que se encuentran en altas concentraciones en el agua de riego, pues la transferencia al agua subterránea podría ser elevada.



Adaptado de **de Santiago-Martín et al (2020) STOTEN 705, 135825**

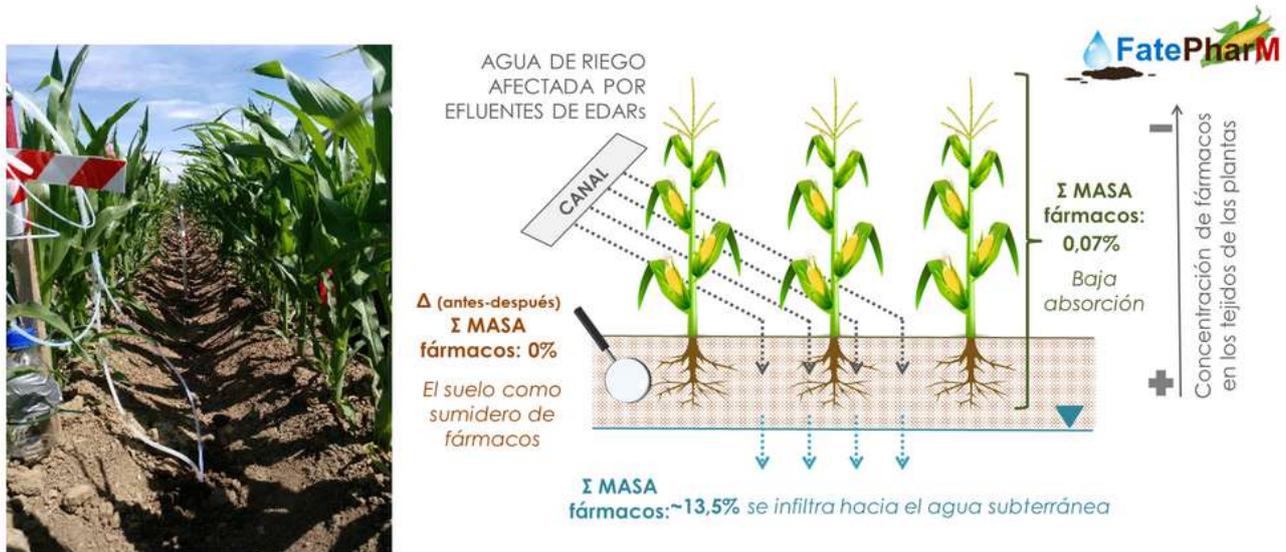


**Teijón-Ávila et al (2019) ZNS XIV, pp. 83-90**

Figura 2.2\_1 a) Esquema del sistema fuente-propagación-receptor en la transferencia de fármacos y metales en el medioambiente provenientes de los efluentes de las EDARs; y b) relación de fármacos detectados y/o cuantificados en el grano de maíz

Como conclusión principal, la reutilización indirecta supone una fuente y vía de propagación de fármacos en el medio agrícola. No obstante, la planta de cultivo predominante en la zona de estudio (el maíz) presenta una absorción limitada de fármacos y no representa una amenaza para la seguridad alimentaria.

Estos resultados son parte de FatePharM, Proyecto CTM2017-89995-R financiado por MCIN/ AEI /10.13039/501100011033/ y por “FEDER, Una manera de hacer Europa”.



Adaptado de **Meffe et al (2021) Environment International 157, 106835**

Figura 2.2\_2 Esquema del balance de masas de fármacos en el sistema agua-suelo-planta en el medio agrícola tras la reutilización indirecta de agua afectada por efluentes de EDARs

## Perspectivas futuras

Como continuación del proyecto FatePharM, arranca este año el proyecto Nat4Health “Antibióticos, hormonas, contaminantes orgánicos persistentes y móviles y patógenos, la compleja mezcla del escenario agrícola y ganadero ¿Riesgo para la salud o atenuación natural?” (Proyecto PID2020-118521RB-I00 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033) en colaboración con el Instituto de Salud Carlos III, Université Laval (Canadá) y Karl-Franzens-Universität Graz (Austria). El desafío de Nat4Health es evaluar la transferencia de virus, parásitos y bacterias resistentes a antibióticos, además de CPEs químicos, en el escenario agrícola y ganadero, en el sistema aire-suelo-agua-planta.

Los resultados de los proyectos del grupo están disponibles en la web ([www.soilwaterquality.es](http://www.soilwaterquality.es)), en Facebook (Soil and Water Quality) y en Twitter (@SoilWaterQ).

## Referencias

- de Santiago-Martín, A., Meffe, R., Teijón, G., Hernández, V. M., López-Heras, I., Alonso, C. A., Arenas\_romasanta, M. de Bustamante, I. (2020). Pharmaceuticals and trace metals in the surface water used for crop irrigation: Risk to health or natural attenuation? *Science of the Total Environment*, 705, 135825.
- Meffe, R., de Santiago-Martín, A., Teijón, G., Hernández, V. M., López-Heras, I., Nozal, L., & M; de Bustamante, I. (2021). Pharmaceutical and transformation products during unplanned water reuse: Insights into natural attenuation, plant uptake and human health impact under field conditions. *Environment International*, 157, 106835.

# PROYECTO FATEPHARM

Ana de Santiago Martín  
Investigadora  
[ana.desantiago@imdea.org](mailto:ana.desantiago@imdea.org)\*

Raffaella Meffe  
Investigadora  
[raffaella.meffe@imdea.org](mailto:raffaella.meffe@imdea.org)

Virtudes Martínez Hernández  
Investigadora  
[virtudes.martinez@imdea.org](mailto:virtudes.martinez@imdea.org)

Irene de Bustamante  
Investigadora y Directora Adjunta  
[irene.bustamante@imdea.org](mailto:irene.bustamante@imdea.org)

# ARTÍCULO 2.3

## PROYECTO DIRELMIVID. MAYOR SEGURIDAD EN LA REGENERACIÓN DE AGUAS

### Introducción

La pandemia por COVID-19 ha puesto de manifiesto diferentes amenazas relacionadas con la gestión y el tratamiento de las aguas residuales. Han emergido nuevos desafíos derivados de muchos hábitos surgidos a raíz de esta crisis, generando potenciales impactos tanto sanitarios como medioambientales. El consumo de nuevos fármacos específicos para la infección respiratoria, los medicamentos utilizados como soporte clínico o diversos productos de higiene, incrementan la presencia de ciertos compuestos en las aguas residuales.

Las entidades reguladoras europeas establecen una serie de restricciones relacionadas con los contaminantes de preocupación emergente (CECs), identificados en los últimos años en el ciclo integral del agua. Por un lado, la Directiva 2013/39/UE (traspuesta al derecho español con el RD 817/2015) incluye 45 sustancias prioritarias para las que se establecen concentraciones máximas permisibles (NCAs) en los cuerpos de agua. Esta lista se amplía a 75 sustancias en observación mediante el anexo de la Decisión de Ejecución (UE) 2015/495. Por otro lado, la Comisión Europea también pretende impulsar la reutilización del agua en la agricultura, para lo que ha desarrollado el Reglamento (UE) 2020/741. Este Reglamento define los parámetros de calidad para las aguas regeneradas usadas en riego y establece los usos agrícolas y métodos de riego permitidos, aunque, de momento, no establece límites de CECs para estas aguas. No obstante, se requiere la vigilancia de ciertos CECs con miras a definir los rangos permisibles en un futuro próximo.



CENTRO DE EDAFOLOGÍA Y BIOLOGÍA APLICADA DEL SEGURO



Centro Tecnológico  
de la Energía y del  
Medio Ambiente



El Sexto Informe de Evaluación del IPCC concluye que el cambio climático es un hecho. Estima que la subida de las temperaturas y los fenómenos meteorológicos extremos, más intensos y frecuentes, son consecuencia directa de ello, lo que contribuye al aumento de las sequías. Considerando este escenario, las prácticas capaces de revertir esta situación resultan prioritarias y, entre ellas, se enmarca la reutilización de aguas. Sin embargo, preocupa la llegada de compuestos farmacéuticos al ciclo hidrológico.

El proyecto DIRELMIVID desarrolla y valida tecnologías de regeneración de aguas para uso agrícola, garantizando la eliminación de contaminantes de preocupación emergente.

### Tecnologías innovadoras en evaluación

El objetivo del proyecto DIRELMIVID es el desarrollo y validación de tecnologías de regeneración que permitan la producción de aguas aptas para riego de manera técnica y económicamente eficiente, proporcionando garantías de eliminación de CECs, incluyendo compuestos de interés clínico relacionados con la COVID-19. Los sistemas se integran en una plataforma digital para permitir, a través de la sensorización de los sistemas de regeneración y del desarrollo de modelos asociados, la gestión óptima del recurso hídrico mediante herramientas de operación remota y apoyo a la toma de decisiones.

Las tecnologías que han sido seleccionadas para la eliminación de CECs persistentes en efluentes de EDAR se basan en dos sistemas de oxidación avanzada: fotocátalisis heterogénea y ozonización. Ambos son procesos en fase acuosa basados en la acción de especies altamente reactivas que conducen a la oxidación completa de las moléculas contaminantes.

La plataforma digital de gestión, por su parte, se basa en una arquitectura modular en capas cuyos componentes se configuran en una máquina virtual que utiliza interfaces abiertas y flexibles, garantizando la interacción e incorporación de componentes externos.

### Eficiencia de las tecnologías

Actualmente, se trabaja en la evaluación y optimización de la tecnología de fotocátalisis heterogénea, cuyos resultados preliminares ponen de manifiesto una gran eficiencia de desinfección, con efluentes libres de parámetros microbiológicos, en concreto, E. Coli, esporas de Clostridium perfringens y Colifagos totales.

Respecto a la eliminación de CECs, se ha trabajado con 7 compuestos farmacéuticos y los primeros resultados indican valores de rendimiento de eliminación que oscilan entre el 20% y el 60% para los distintos modos fotocatalíticos ensayados: LED, CPC-solar y CPC-solar+LED, en presencia de un catalizador comercial (P25, TiO<sub>2</sub>). Los resultados son alentadores, especialmente, para el modo de CPC-solar+LED y considerando que el proceso aún sigue en fase de optimización. Los rendimientos más desfavorables detectados se asocian a la menor área de irradiancia presentada por la tecnología LED con respecto a los modos de operación que incluyen el reactor CPC-solar. Asimismo, se ha evidenciado la relevancia de la dosis de catalizador empleada.

Del sistema de ozonización se ha optimizado el proceso de inyección de la fase gaseosa, obteniendo excelentes resultados preliminares de eficiencia de intercambio químico.



Figura 2.3\_1 Prototipo ozonización

# PROYECTO DIRELMIVID

**Beatriz Masdemont Hernández**  
Coordinadora I+D+i  
AZUD  
beatriz@azud.com\*

**Laura Ponce Robles**  
Doctora en Química Analítica  
CEBAS-CSIC  
lponce@cebas.csic.es

**Juan Andrés Sánchez Segado**  
Ingeniero Senior  
ODINS  
jasanchez@odins.es

**Aránzazu Pagán Muñoz**  
Técnico I+D+i Medio Ambiente  
CETENMA

**Aranzazu.pagan@cetenma.es**  
Eva Mena Gil  
Responsable de Innovación  
EMUASA  
emena@emuasa.es

## Próximos pasos

El panorama de incertidumbre en la disponibilidad de recursos hídricos unido al incremento en la demanda de agua por el crecimiento de la población mundial, contribuyen a que la implantación de tratamientos terciarios avanzados específicamente diseñados para la eliminación de parámetros microbiológicos y CECs y que permitan la reutilización con fines agrícolas, sea una prioridad cada vez más acuciante.

Por ello, la innovación tecnológica, la adaptación de los sistemas de depuración convencionales para proporcionar aguas de alta calidad agronómica y la gestión digitalizada, que se plantean en el proyecto DIRELMIVID, resultan fundamentales en la preservación del medioambiente y la gestión eficiente del recurso hídrico.



Figura 2.3\_2 Prototipo fotocatalisis

## Agradecimientos

El trabajo recogido en este artículo forma parte del proyecto estratégico Ris3MUR DIRELMIVID, financiado por la Consejería de Empresa, Empleo, Universidades y Portavocía, en el marco del Fondo Europeo de Desarrollo Regional 2014-2020.

El equipo de trabajo lo conforman las empresas Sistema AZUD, Empresa Municipal de Aguas y Saneamiento de Murcia (EMUASA) y ODIN Solutions; y los organismos de investigación Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS-CSIC) y el Centro Tecnológico de la Energía y Medio Ambiente (CETENMA), como coordinador del proyecto.

## Referencias

- Intergovernmental Panel on Climate Change. AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Race, M. et al. 2020. "Current Emerging SARS-CoV-2 Pandemic: Potential Direct/Indirect Negative Impacts of Virus Persistence and Related Therapeutic Drugs on the Aquatic Compartments." *Environmental Research* 188(April): 109808.
- REGLAMENTO (UE) 2020/741 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 25 de mayo de 2020 relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua.
- Mujeriego, R., Compte, J., Cazorra, T., & Gullón, M. 2008. The water reclamation and reuse project of El Prat de Llobregat, Barcelona, Spain. *Water Science and Technology*, 57(4), 567-574.
- Midassi, S. et al. 2020. "Efficient degradation of chloroquine drug by electro-Fenton oxidation: Effects of operating conditions and degradation mechanism". *Chemosphere* 260 (June); 127558.
- Bourgin, M., Beck, B., Boehler, M., Borowska, E., Fleiner, J., Salhi, E., ... McArdell, C. S. 2018. Evaluation of a full-scale wastewater treatment plant upgraded with ozonation and biological post-treatments: Abatement of micropollutants, formation of transformation products and oxidation by-products. *Water Research*, 129, 486-498.

# ARTÍCULO 2.4

## RETOS Y OPORTUNIDADES DE LA REUTILIZACIÓN AGRÍCOLA DE EFLUENTES DE EDAR BASADAS EN REACTORES ANAEROBIOS DE MEMBRANAS



Unidad Mixta UV-UPV

### Introducción

Para garantizar el acceso al agua en cantidad y calidad adecuadas, además de desarrollar acciones para fomentar el ahorro y la eficiencia, deben explorarse fuentes alternativas bajo una perspectiva de sostenibilidad económica, ambiental y social. El aprovechamiento de las aguas residuales se convierte en un vector de innovación transformando las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) en estaciones de recuperación de recursos (ERR).

El tratamiento convencional por vía aerobia de la materia orgánica conlleva un considerable consumo energético y la pérdida de su potencial valorización. Mediante los procesos de digestión anaerobia, esta materia orgánica es transformada en metano que puede ser usado para producir energía en las plantas depuradoras o ser inyectado en la red de gas natural.

Por otra parte, el nitrógeno y fósforo presentes son potenciales contaminantes, pero también son nutrientes esenciales para la agricultura. Su aprovechamiento permitiría reducir la dependencia de las importaciones de fósforo, las emisiones de CO<sub>2</sub> y los costes de producción del agricultor.

La aplicación de los principios de la Economía Circular al Ciclo del Agua supone la transformación de las actuales estaciones depuradoras de aguas residuales en estaciones de recuperación de recursos. En este sentido, la implementación de la tecnología de reactores anaerobios de membranas (AnMBR) en el tratamiento de aguas residuales permite la valorización de la materia orgánica (al basarse en procesos anaerobios) y produce un efluente rico en nutrientes susceptible de ser reutilizado en agricultura. Los resultados obtenidos para el caso de estudio desarrollado para la población de Oliva (Valencia) muestran disminuciones de hasta un 70% en la emisión de gases de efecto invernadero y una reducción en las necesidades de N y P procedentes de fertilizantes minerales de un 70% y 36% respectivamente. Además, la combinación del tratamiento con AnMBR junto con la reutilización del efluente permite un ahorro económico significativo que podría destinarse a sufragar la implementación del correspondiente Plan de Gestión del Riesgo.

## Contexto

En Europa, para 2030, el estrés hídrico y la escasez podría afectar a la mitad de las cuencas hidrológicas, mientras que el agua reutilizada no llega al 3% de la producción de agua residual. Su aprovechamiento permitiría disponer de un suministro asegurado y contribuir a la preservación de las fuentes tradicionales, tanto en cantidad, como en calidad.

No obstante, existen condicionantes legales, económicos y ambientales, que impiden una mayor generalización de esta práctica. En el ámbito legal, la Directiva 91/271/CEE ya contempla la reutilización de aguas, pero su concepción de "vertido" impide un aprovechamiento directo de los nutrientes presentes en el agua (fertilización) en zonas sensibles. Por su parte, el Reglamento (UE) 741/2020 relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua, permitirá una mayor armonización de esta práctica dentro de la Unión. Entre los condicionantes económicos cabe nombrar el coste de los tratamientos adicionales requeridas, así como la implementación de los Planes de Gestión del Riesgo obligatorios. En cuanto a los retos ambientales, destacar el adecuado control de las calidades de los efluentes, incluidos contaminantes emergentes, bacterias y genes resistentes a los antibióticos, o el uso controlado de los nutrientes presentes en las aguas.

# PALABRAS CLAVE:

## REUTILIZACIÓN AGRÍCOLA REACTORES ANAEROBIOS DE MEMBRANAS VALORIZACIÓN ENERGÉTICA NUTRIENTES

### Metodología y resultados

Respecto a la eliminación de CECs, se ha trabajado con 7 compuestos farmacéuticos y los primeros resultados indican valores de rendimiento de eliminación que oscilan entre el 20% y el 60% para los distintos modos fotocatalíticos ensayados: LED, CPC-solar y CPC-solar+LED, en presencia de un catalizador comercial (P25, TiO<sub>2</sub>). Los resultados son alentadores, especialmente, para el modo de CPC-solar+LED y considerando que el proceso aún sigue en fase de optimización. Los rendimientos más desfavorables detectados se asocian a la menor área de irradiación presentada por la tecnología LED con respecto a los modos de operación que incluyen el reactor CPC-solar. Asimismo, se ha evidenciado la relevancia de la dosis de catalizador empleada.

Del sistema de ozonización se ha optimizado el proceso de inyección de la fase gaseosa, obteniendo excelentes resultados preliminares de eficiencia de intercambio químico.

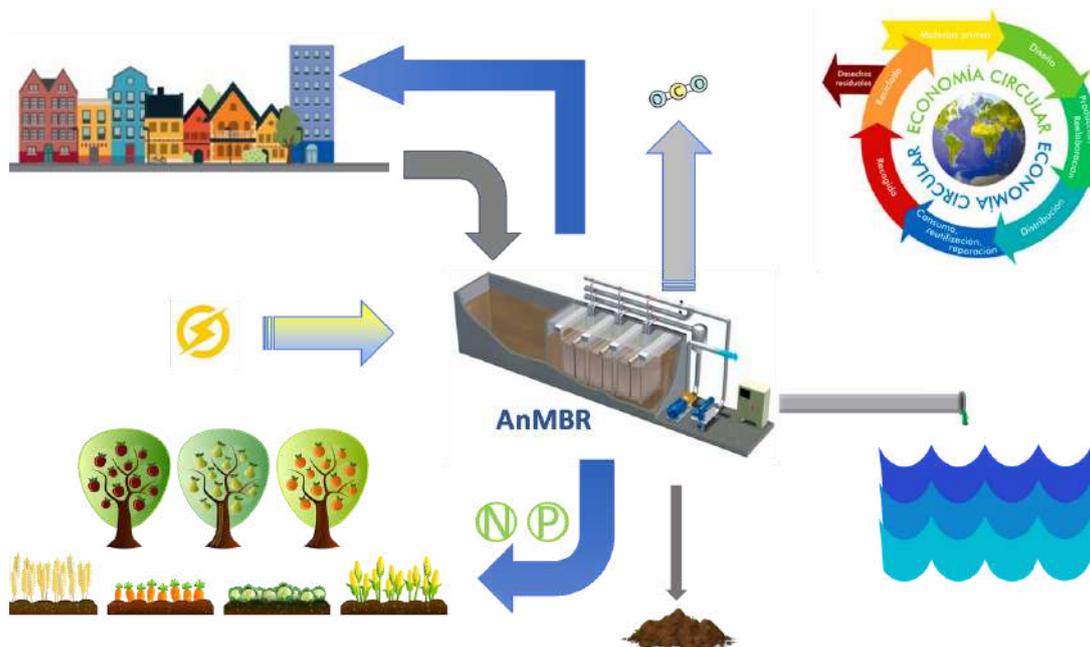


Figura 2.4\_1 Esquema de la nueva concepción del tratamiento de aguas basado en tecnología AnMBR y recuperación de recursos

La Figura 2.4\_2a) muestra los requerimientos de nutrientes de 582 ha de naranjos situados en las inmediaciones de la EDAR. Bajo el escenario 1 (depuración y riego convencionales, sin reutilización), todo el fósforo y un 80% de nitrógeno necesario es provisto mediante fertilizantes minerales. En el escenario 2 (depuración convencional con reutilización), los aportes de fósforo desde el efluente de la depuradora reducen sus necesidades, aunque el 80% del nitrógeno y el 75% del fósforo sigue siendo de origen industrial. Por el contrario, en el escenario 3 (AnMBR junto con reutilización) los aportes de nitrógeno y fósforo del efluente son capaces de cubrir un 70% y un 36% de las necesidades respectivamente.

En la Figura 2.4\_2b) puede observarse la disminución del 70% de las emisiones netas de CO<sub>2</sub> para el escenario 3 por la generación de metano y los ahorros en el uso de los abonos nitrogenados, cuya fabricación es muy intensiva en energía. Por último, el coste del sistema calculado en el escenario 1 asciende a 480.9 k€·año<sup>-1</sup>, mientras que en el escenario 3 es de 149.4 k€·año<sup>-1</sup> gracias a los beneficios del aprovechamiento energético y de nutrientes. Este ahorro podría destinarse al Plan de Gestión del Riesgo.

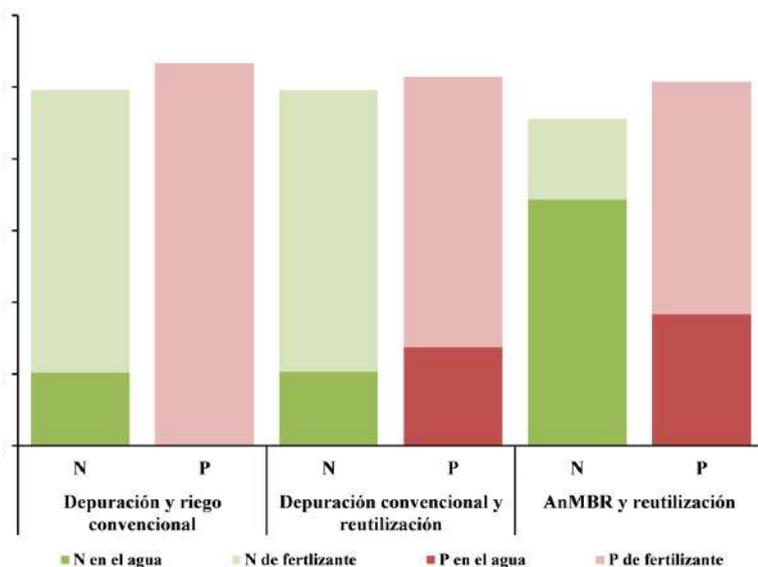


Figura 2.4\_2 a) Necesidades de nutrientes aportadas por agua de riego y fertilizantes añadidos

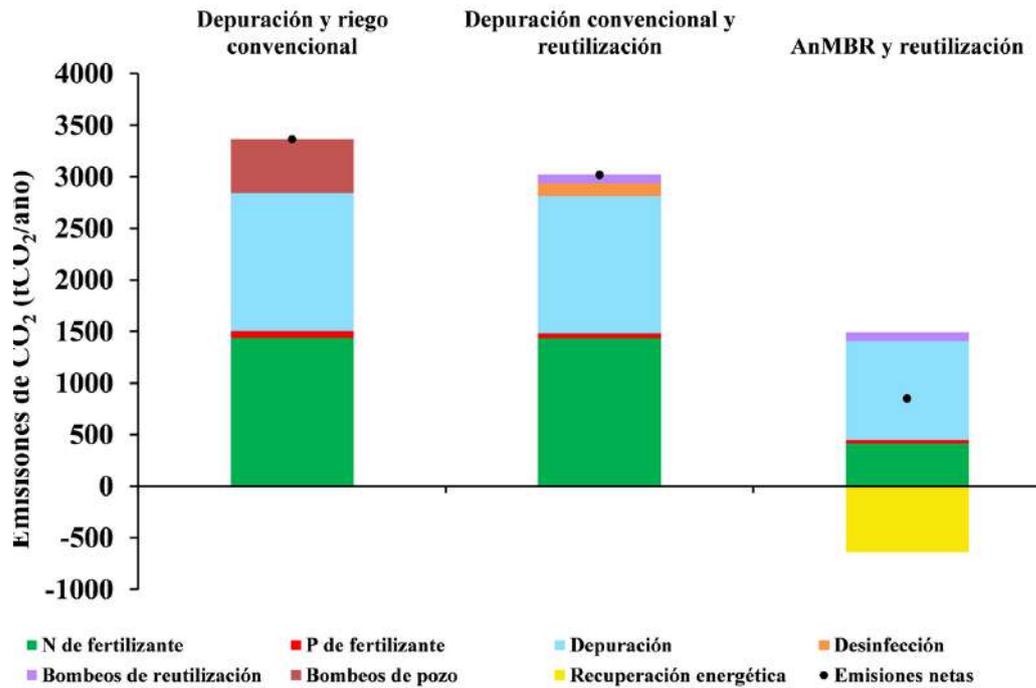


Figura 2.4\_2 b) emisiones de CO2 para cada escenario.

## Conclusiones

Por tanto, la combinación de AnMBR y fertirrigación es un ejemplo de la aplicación de los principios de sostenibilidad y Economía Circular en el sector del agua, presentando elevados beneficios ambientales y económicos. No obstante, la implementación de esta tecnología como único proceso sólo es posible hoy en día en zonas declaradas como no sensibles. En las zonas sensibles, sería necesario considerar un postratamiento o combinar el AnMBR con un tratamiento convencional en paralelo. Esta última solución es la elegida para la construcción de una nueva planta depuradora en Oliva.

Para superar las barreras legales del esquema propuesto, sería necesario que la futura legislación contemple la reutilización agrícola como parte del tratamiento de las aguas residuales, lo cual supone una reinterpretación del concepto de "vertido".

# 3

## PROYECTOS ESPECÍFICOS DE REÚSO DEL AGUA

Con participación de miembros de  
la PTEA.



# ARTÍCULO 3.1

## PROYECTO EUROPEO BUSCA REDUCCIÓN DEL CONSUMO DE AGUA INDUSTRIAL DE HASTA 60%



### Introducción

Un proyecto Europeo -llamado iWAYS- trabaja para proporcionar a la industria tecnologías y diseños de procesos que lleven a la reducción del consumo de agua de entre 30% y 64%, a través de la recuperación y reutilización del agua en los gases de escape -que actualmente son descartados a través de las chimeneas industriales.

Los resultados que obtenga el proyecto serían de gran impacto para la industria europea, ya que las actividades de este sector utilizan una media de 243 mil hectómetros cúbicos de recursos hídricos al año y, según la Agencia Europea de Medio Ambiente, unos 140 mil hectómetros cúbicos son devueltos al medio ambiente, pero con impurezas o contaminantes.

De acuerdo con Hussam Jouhara, director técnico de iWAYS, "hay algunos componentes vitales, como los Economizador tipo Heat Pipe y los sistemas de tratamiento de agua. La simple condensación del agua de los gases de combustión no permitirá que se recicle directamente. Esto se debe a que el escape puede estar contaminado por varios ácidos, partículas u otros agentes químicos que se mezclan con el agua condensada. Por lo tanto, a menos que esta agua se filtre, no se puede reutilizar. En iWAYS, las tecnologías de filtración de agua involucradas son reactores de nano filtración fotocatalítica, ultrafiltración, ósmosis inversa, destilación por membranas y sistemas de evaporación-cristalización".

Un proyecto Europeo -llamado iWAYS- trabaja para proporcionar a la industria tecnologías y diseños de procesos que lleven a la reducción del consumo de agua, a través de la recuperación en los gases de escape -que actualmente son descartados a través de las chimeneas industriales. Los resultados que obtenga serían de gran impacto para la industria europea, ya que las actividades de este sector utilizan una media de 243 mil hectómetros cúbicos al medio ambiente, pero con impurezas o contaminantes.

# PALABRAS CLAVE:

**ECONOMÍA CIRCULAR  
REDUCCIÓN DEL AGUA  
EFICIENCIA DEL AGUA  
RECUPERACIÓN DE ENERGÍA  
TRATAMIENTO DE AGUA**

## **Eficiencia en la utilización del agua**

Las industrias son grandes usuarios de agua. La emplean para procesar, lavar, diluir, calentar, enfriar y transportar productos. La reducción del consumo de agua se hace cada vez más necesaria porque, a pesar de la relativa abundancia de recursos de agua en algunas partes de Europa, existen importantes diferencias en los niveles de estrés hídrico a lo largo de las estaciones y entre regiones. Durante los últimos 50 años, ha habido una disminución general del 24% en los recursos hídricos renovables per cápita en toda Europa, especialmente en el sur de Europa, causada principalmente por menores niveles de lluvia. Son necesarias innovaciones radicales para disminuir su consumo. Y esto es exactamente lo que hace iWAYS.

La eficiencia se obtendrá a través de tres medidas: la reducción del consumo de agua y su recuperación; el tratamiento del agua condensada; y el estudio de fuentes alternativas y modificaciones a los procesos productivos. Las tecnologías y soluciones serán aplicadas en tres casos de uso o sitios de demostración: una industrial de productos químicos, otra de tubos de acero y otra cerámica.

En cuanto a la reducción del consumo de agua y su recuperación, en la industria cerámica, se espera ahorrar hasta el 50% del agua. En el proceso de el uso de agua tiene diferentes aplicaciones. En particular, se emplea una gran cantidad de agua para el proceso de trituración de la materia prima. El agua se libera a la atmósfera durante el proceso de secado por pulverización que produce el polvo cerámico mientras se forma el material para la baldosa. El agua empleada en los procesos de molienda-secado por pulverización se elimina a través de la corriente de escape. Las tecnologías de iWAYS permitirán recuperar, tratar y reciclar el contenido de agua de esos gases de escape.

Con respecto a la segunda medida para incrementar la eficiencia, el tratamiento del agua condensada y su reciclado, como comentó Jouhara, se utilizarán diferentes tecnologías: reactores de nano filtración fotocatalítica, ultrafiltración, ósmosis inversa, destilación por membranas y sistemas de evaporación-cristalización. En estas nuevas formas de tratamiento se utilizará el calor residual como principal fuente energética, lo cual a su vez reducirá el consumo de energía eléctrica.



# PROYECTO iWAYS

María Teresa López Bertani  
<https://www.iways.eu/>  
[mtl@esci.eu](mailto:mtl@esci.eu)\*

Figura 3.1\_1 Las chimeneas industriales son para los investigadores de iWAYS una fuente de agua, calor y materias que pueden ser reinsertados en el proceso productivo

En relación con la tercera medida, el estudio de fuentes alternativas de agua y modificaciones a los procesos productivos, iWAYS integrará y adaptará a cada caso de uso fuentes alternativas de agua, como la escorrentía superficial, y también implementará reservorios de balanceo. Además, iWAYS proporcionará un análisis extenso de los sitios de producción industrial, así como como cambios operativos en la refrigeración, como aumento de la temperatura del agua. Esos cambios en la temperatura del agua reducirán ulteriormente el uso de energía eléctrica.

Además de trabajar en la reducción del consumo de agua, iWAYS también busca la eficiencia energética a través de la recuperación de calor y la recuperación de materiales en los mismos gases de escape.

La innovación es la herramienta más importante para desarrollar procesos sostenibles. Al lograr la eficiencia energética y disminuir el consumo de agua dulce, iWAYS reducirá el costo total de los procesos productivos. Por lo tanto, las plantas se beneficiarían no sólo al obtener una ventaja competitiva – con la reacción de costo- sino también en la adhesión a las directivas de eficiencia energética y el cumplimiento de los objetivos del Pacto Verde Europeo.

El consorcio de instituciones que componen iWAYS incluye 6 socios de España: el Instituto de Tecnología Cerámica, Innovación y Consulting Tecnológico de Barcelona (INCOTEC), EURECAT, Institut Catala de Recerca de L'Aigua (ICRA), Tubacex Tubos Inoxidables y Krean.

# ARTÍCULO 3.2

## LIFE CONQUER: CERRANDO EL CICLO DEL AGUA, NUTRIENTES Y GESTIÓN DE RECURSOS PARA RIEGO

**CETAQUA**  
CENTRO TECNOLÓGICO DEL AGUA



**conquer**  
Water reuse for irrigation

### Introducción

La reutilización de agua es una alternativa sostenible al uso de fuentes de agua dulce en términos de coste e impacto ambiental. Sin embargo, en las zonas costeras, donde hay una gran actividad agrícola y una sobreexplotación de las aguas subterráneas, pueden sufrir altas concentraciones de nutrientes y sales en las aguas residuales debido a la escorrentía agrícola y a la intrusión marina. La salinidad de las aguas residuales es un reto para las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDARs) y Estaciones Regeneradoras de Aguas Residuales (ERAs) ya que los tratamientos convencionales no están diseñados para su reducción limitando la producción de agua regenerada.

Esto conlleva a consumir fuentes de agua dulce para usos no potables en lugar de alternativas más sostenibles, así como el vertido de aguas residuales tratadas con presencia de nutrientes en masas de aguas naturales. La reutilización de esta agua reduciría el riesgo de eutrofización al desviar los nutrientes al riego, aplicación que sería asimilada por las plantas y reduciría el estrés hídrico en la zona.

LIFE Conquer, tiene como objetivo demostrar un proceso de desalación de aguas residuales como alternativa rentable y sostenible a los sistemas convencionales de desalinización. Mediante un enfoque de economía circular cambiará el paradigma de la eliminación de la salinidad y los nitratos, pasando de concentrar el problema (como salmueras) a maximizar la eficiencia de los recursos mediante su valorización.

La demostración tendrá lugar en la antigua Estación Depuradora de Zarandona, gestionada por EMUASA, donde se estima producir durante el proyecto 500.000 m<sup>3</sup> anuales de agua regenerada que serán inyectados en la red urbana de regadío de la ciudad de Murcia.

El proyecto está liderado por Cetaqua y en colaboración con EMUASA AQUATEC.

## Antecedentes

Los sistemas convencionales de desalinización como la Ósmosis Inversa (OI) han demostrado ser procesos eficientes para eliminar sales y nutrientes concentrándolos en salmueras que, convencionalmente, se tratan como residuo o se derivan a masas de agua aumentando el riesgo de eutrofización. Además, sus costes de operación y mantenimiento son más elevados que los de otras membranas de desalinización como las de nanofiltración, cuyo principal inconveniente es que el perfil de rechazo no es constante en función de la composición del agua bruta, del punto isoeléctrico de la membrana, de las propiedades de la superficie de la membrana y de las condiciones de operación. Por tanto, existe la necesidad de desarrollar procesos que permitan la desalación del agua regenerada a un bajo coste y que traten de forma sostenible la salmuera generada.

### El proyecto LIFE Conquer

LIFE Conquer tiene como objetivo demostrar una solución innovadora y rentable para disponer de un recurso hídrico alternativo en aquellas zonas donde la salinidad del agua residual es una limitación para su reutilización. Este proceso consiste, en un primer paso, en el uso de membranas de nanofiltración que se acoplarán a un algoritmo para conocer su perfil de rechazo en tiempo real. Estas producirán un agua parcialmente desalinizada rica en nitratos que será asimilada por las plantas en el riego. Las sales se concentrarán en la salmuera, que se valoriza mediante un proceso electroquímico en dos pasos en el que se producirá hipoclorito sódico in-situ, que podrá ser utilizado en las instalaciones del ciclo del agua de EMUASA.

LIFE Conquer está liderado por Cetaqua en colaboración con EMUASA y AQUATEC.

## PALABRAS CLAVE:

REUTILIZACIÓN  
RIEGO  
SALINIDAD  
NITRATOS  
EUTROFIZACIÓN



Figura 3.2\_1 Parque en la ciudad de Murcia que será regado con agua regenerada durante el proyecto LIFE CONQUER



Figura 3.2\_2 Parque en la ciudad de Murcia que será regado con agua regenerada durante el proyecto LIFE CONQUER

# PROYECTO LIFE CONQUER

**Mateo Pastur Romay**  
Responsable de proyectos  
[m.pastur@suez.com](mailto:m.pastur@suez.com)\*

## Resultados preliminares

Tras un año de proyecto, se ha finalizado el diseño de las plantas piloto que actualmente se encuentran en fase de construcción. La fase demostrativa comenzará en el segundo cuatrimestre de 2022 en la Estación depuradora de Zarandona, Murcia.

En la fase de diseño, se ha estudiado la eliminación de sales con membranas de nanofiltración mediante ensayos en laboratorio y el uso de un software para el diseño de sistemas de membranas. La nanofiltración alcanza un rechazo de cloruros de más del 25%, un rechazo de sulfatos mayor al 95% y un bajo rechazo de nitratos, menor al 4%, que permitirá la producción de agua regenerada rica en nutrientes con una baja concentración de sales. Las membranas de nanofiltración tratarán un caudal de 20 m<sup>3</sup>/h con una conversión mayor al 75%, produciendo un permeado de más de 15 m<sup>3</sup>/h con una baja concentración en sales, y un concentrado de 5 m<sup>3</sup>/h con una alta concentración en sales. El permeado se mezclará con parte del efluente de la ERA para ser inyectado en la red urbana de riego. Esta agua regenerada cumplirá con los requerimientos del Real Decreto 1620/2007.

El concentrado o salmuera producido contiene una alta concentración de sales, tanto divalantes como monovalantes, que primero se tratará con un tratamiento electroquímico que concentrará hasta 10 veces los iones monovalantes, como el cloruro, de forma selectiva. Esta corriente rica en cloruros será utilizada para alimentar el electroclorador, que, aplicando una corriente eléctrica, producirá hipoclorito sódico con una concentración superior a los 8 g/L de cloro activo. Por otra parte, se producirá una corriente rica en sales divalantes que se mezclará con el permeado de la nanofiltración para aumentar la producción de agua regenerada.

Con todo esto, se estima una producción de 500.000 m<sup>3</sup>/año de agua regenerada que se inyectará en la red urbana de regadío de Murcia para el riego de parques y jardines como el de la Figura 3.2\_2. Esto representa una reducción de un 27% de la huella hídrica del sistema urbana de regadío. Adicionalmente, la valorización de la salmuera producirá 26 ton/año de hipoclorito sódico, que representa un 19% de su consumo en EMUASA, evitando la descarga de 1.3 ton/año de nitrógeno equivalente al medio. Este hipoclorito sódico, podrá utilizarse en las instalaciones de EMUASA para realizar limpiezas como puede ser la de las membranas de ultrafiltración, reduciendo el uso de productos químicos comerciales.

Todo esto hace que el proceso propuesto sea una mejor alternativa, técnica y ambientalmente, a los actuales sistemas de desalación de aguas regeneradas. Mediante un enfoque basado en la economía circular, se cambia el paradigma de la eliminación de salinidad y nitratos, pasando de concentrar el problema en salmueras a maximizar su eficiencia mediante la valorización.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo en este trabajo al Programa LIFE bajo la responsabilidad de la Dirección General de Medio Ambiente de la Comisión Europea (proyecto LIFE19 ENV/ES/000226 – LIFE CONQUER).



Figura 3.2\_3 Parque en la ciudad de Murcia que será regado con agua regenerada durante el proyecto LIFE CONQUER

# ARTÍCULO 3.3

## PROYECTO WALNUT: CERRANDO LOS CICLOS DE AGUAS RESIDUALES PARA LA RECUPERACIÓN DE NUTRIENTES



### Introducción

Las proyecciones de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) estiman que la población mundial alcanzará los 8.600 millones en 2030 y los 9.800 millones en 2050 (United Nations, 2017). Entonces, dicha población y el consumo generado por ésta, añadirán una enorme presión a la industria alimentaria para que aumente su producción. Satisfacer esta demanda adicional requiere un aumento de las prácticas agrícolas intensivas, lo que conlleva un elevado uso de tierra, agua, energía y fertilizantes. Por lo tanto, se espera un importante aumento de la demanda de nutrientes para los cultivos. Los fertilizantes minerales no renovables, formados por N, P, K y Mg, son la base del sistema agrícola actual. Desde el punto de vista agronómico, los cultivos toman hasta el 31-49% del N y el 35% del P suministrado. Las ineficiencias en el uso de nutrientes, generan fenómenos como la desnitrificación, la volatilización, la lixiviación, las pérdidas por escorrentía y la mineralización, dando lugar a la acumulación de nutrientes en el suelo y en las fuentes de agua y contribuyendo a la acidificación y a la eutrofización de los ecosistemas. Además, las emisiones resultantes de NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> y NH<sub>3</sub>, etc., suponen graves amenazas medioambientales como el calentamiento global y la formación de ozono troposférico. Por otra parte, el vertido de grandes cantidades de nutrientes provoca la eutrofización de las masas de agua, lo que elimina el oxígeno de ésta y provoca la muerte de la fauna y flora acuática. Por último, las aguas residuales también contienen mercurio, plomo, contaminantes emergentes y otro tipo de elementos tóxicos que de no ser tratados correctamente antes de su vertido, contaminarían los acuíferos.

Las aguas residuales se consideran un recurso prometedor para recuperar nutrientes con fines de fertilización de las plantas. La recuperación de nutrientes a gran escala a partir de estos flujos y su procesamiento como biofertilizantes (BFs) ofrecerán un nuevo modelo circular y sostenible que abordará el desafío tanto de las limitadas reservas de nutrientes-minerales como sus cruciales problemas medioambientales. Las plantas de tratamiento de aguas residuales convencionales consumen grandes cantidades de energía para la eliminación de nutrientes mediante lodos activados aeróbicos, nitrificación-desnitrificación, eliminación química de fósforo y coagulación-sedimentación. Este modelo representa un enfoque lineal, y es necesario cambiarlo urgentemente por uno circular (Figura 3.4\_1). La recuperación de nutrientes es una alternativa más valiosa para tratar las aguas residuales a partir de nutrientes porque (i) produce fertilizantes basados en nutrientes que garantizan la seguridad alimentaria (la nueva revisión de la UE 2019/1009 sobre fertilizantes incluye el uso de fertilizantes recuperados a partir de varios flujos de residuos); (ii) minimiza la huella de carbono ambiental del tratamiento de las aguas residuales (menos lodos y eutrofización); (iii) utiliza los nutrientes como recursos secundarios para preservar las reservas naturales y ahorrar costes asociados a la fijación de N.

El proyecto WALNUT pretende crear y difundir un nuevo cambio de paradigma en el tratamiento de aguas residuales y salmueras al desarrollar los conceptos y soluciones tecnológicas necesarias para rediseñar las cadenas de valor y suministro de nutrientes a partir de aguas residuales y salmueras, manteniéndose en línea con la filosofía de la Economía Circular. El desarrollo del proyecto proporciona una excelente oportunidad para mostrar todo el potencial de las aguas residuales y las salmueras como materia prima para la producción de biofertilizantes.

# PALABRAS CLAVE:

## REUTILIZACIÓN AGRÍCOLA REACTORES ANAEROBIOS DE MEMBRANAS VALORIZACIÓN ENERGÉTICA NUTRIENTES

Centrándonos en las tecnologías de recuperación de nutrientes, las variables a tener en cuenta son: el origen de la corriente de entrada, la eficiencia de la recuperación, el coste, la pureza de los productos finales, las condiciones geográficas y los factores sociales, económicos y medioambientales. Su identificación y cuantificación son el elemento clave para identificar bloqueos y barreras en la implantación de tecnologías dirigidas a la síntesis de biofertilizantes.

### Objetivos

El objetivo general del proyecto WaINUT es desarrollar, evaluar y probar nuevas soluciones tecnológicas integradas sostenibles y altamente eficientes para la recuperación de nutrientes a partir de distintos flujos de aguas residuales (urbanas, industriales, alimentarias, lodos de depuradora, salmueras de plantas de desalinización y desmineralización).

En el marco de trabajo del proyecto, se investigan 12 tecnologías a escala de laboratorio de las cuales se seleccionarán las más prometedoras desde el punto de vista técnico, económico y ambiental, para construir 5 plantas piloto y validar esas tecnologías en ambientes reales (EDARs y plantas desaladoras). CARTIF con la colaboración de VEOLIA está desarrollando dos tecnologías innovadoras para este fin.

### Líneas de acción

Pila de combustible microbiana  
(Microbial Fuel Cell o MFC).

La MFC utiliza microorganismos para convertir compuestos orgánicos en energía eléctrica. La MFC se considera actualmente una tecnología prometedora en el tratamiento de las aguas residuales debido a su producción de electricidad y a la purificación de las mismas. Generalmente, la MFC consiste en una cámara anódica y otra catódica con una membrana de intercambio catiónico (CEM) que se instala para separarlas. En la cámara anódica, la energía química almacenada en la materia orgánica es convertida directamente en electricidad por los microorganismos anaerobios. Los iones de amonio pueden ser transferidos desde el ánodo a la cámara catódica a través de la CEM mediante la difusión causada por el gradiente de concentración y la migración impulsada por la corriente. Además, los iones de fosfato pueden recuperarse mediante precipitación química, dichos precipitados suelen encontrarse a menudo en la superficie del electrodo catódico.

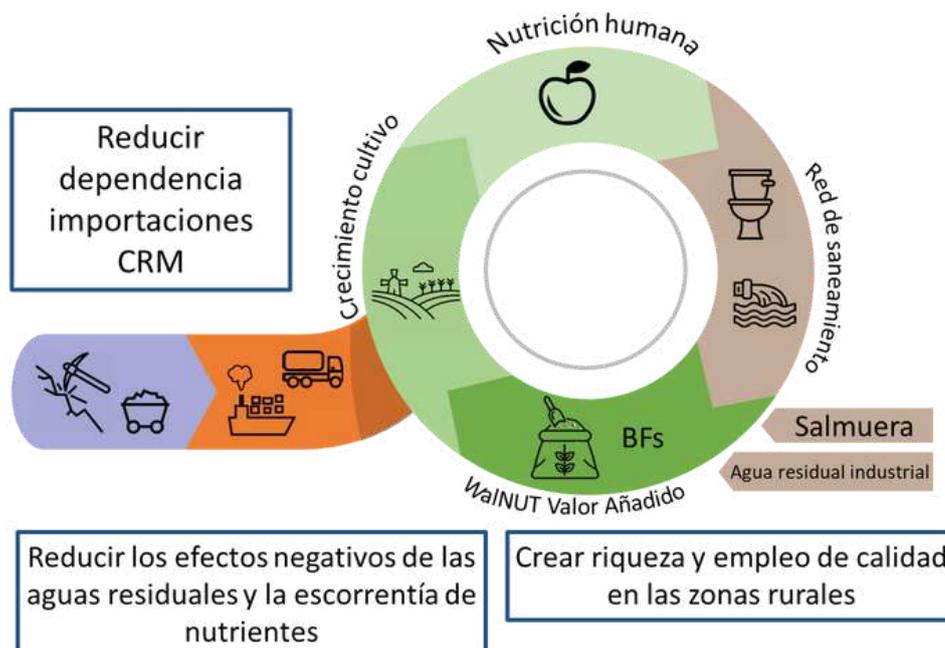


Figura 3.3\_1 Hoja de ruta del proyecto WaINUT

Sistema híbrido de cultivo de microalgas fotoautotróficas y heterotróficas.

El tratamiento de las aguas residuales mediante la combinación de estos dos tipos de cultivo de microalgas es una tecnología prometedora de biorrefinería con el doble beneficio de la recuperación de nutrientes y de la producción de una biomasa de valor añadido. El sistema híbrido presenta un efecto sinérgico que minimizará los inconvenientes inherentes a los fotobiorreactores (PBR) y a los biorreactores heterotróficos (HBR), a la vez que aprovecha las ventajas como la superación del efecto de inhibición con el suministro suficiente de luz solar y nutrientes en el PBR y el ahorro de superficie y tiempo, así como la obtención de una mayor tasa de crecimiento y producción de biomasa en cualquier fermentador como el HBR.

# PROYECTO WALNUT

**Francisco Corona Encinas**  
Investigador del Área de  
Economía Circular  
fraenc@cartif.es

**Sergio Sanz Bedate**  
Investigador del Área de  
Economía Circular  
serbed@cartif.es

**M<sup>a</sup> Dolores Hidalgo Barrio**  
Directora del Área de Economía  
Circular  
dolhid@cartif.es

**Jesús M<sup>a</sup> Martín Marroquín**  
Investigador del Área de  
Economía Circular  
jesmar@cartif.es



Figura 3.3\_2 Recuperación de nutrientes

## Metodología y resultados preliminares

El tratamiento de las aguas residuales mediante la combinación de estos dos tipos de cultivo de microalgas es una tecnología prometedora de biorrefinería con el doble beneficio de la recuperación de nutrientes y de la producción de una biomasa de valor añadido. El sistema híbrido presenta un efecto sinérgico que minimizará los inconvenientes inherentes a los fotobiorreactores (PBR) y a los biorreactores heterotróficos (HBR), a la vez que aprovecha las ventajas como la superación del efecto de inhibición con el suministro suficiente de luz solar y nutrientes en el PBR y el ahorro de superficie y tiempo, así como la obtención de una mayor tasa de crecimiento y producción de biomasa en cualquier fermentador como el HBR.

De este modo, se conseguirá reducir el consumo de fertilizantes de origen mineral no renovables. Según las experiencias previas de los participantes del proyecto, aplicando el modelo propuesto por WaINUT en el 95% de las plantas de tratamiento será posible recuperar hasta el 90% del N, el 95% del P y más del 80% del K.

En cuanto al impacto medioambiental de las plantas piloto, WaINUT espera reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 30-70 % y el consumo energético en un 35-75 %, aplicando soluciones innovadoras para la recuperación.

Concretamente, con las tecnologías desarrolladas por CARTIF se estima una recuperación del 90 %N y el 85 %P de las aguas residuales, un 35-50% de ahorro de emisiones de CO<sub>2</sub> (0,53 kg CO<sub>2</sub> eq/kWh) (Proyecto LIFE ALGAECAN, 2020) y en cuanto al consumo energético, a escala industrial, el proceso es energéticamente autosuficiente.

## Conclusiones

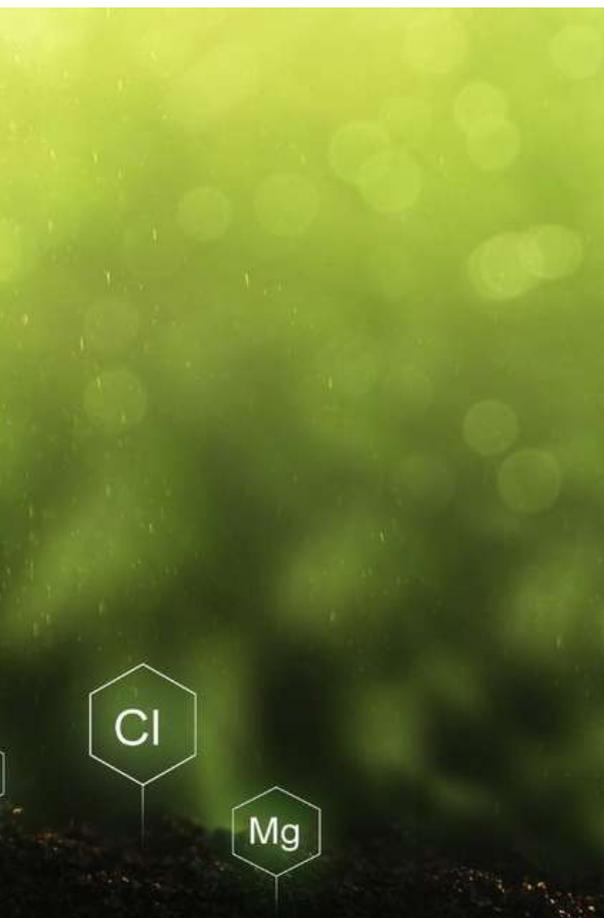
En conclusión, los novedosos modelos de soluciones integradas para la recuperación de nutrientes en los sistemas de tratamiento de aguas residuales y desalinización del agua desarrollados en WaINUT, promueven una nueva estrategia circular en el sector del tratamiento de aguas residuales, gracias a lo cual se convertirá en una industria más sostenible y ayudará a prevenir la contaminación de las grandes masas de agua y el desarrollo de nuevos biofertilizantes con el objetivo de crear una economía más verde y eficiente en cuanto a recursos, en sintonía con los postulados de la Economía Circular y las políticas actuales (el Pacto Verde Europeo, la estrategia Crecimiento Europeo o los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU).

## Agradecimientos

El trabajo ha recibido financiación del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención nº 101000752 (Proyecto WaINUT).

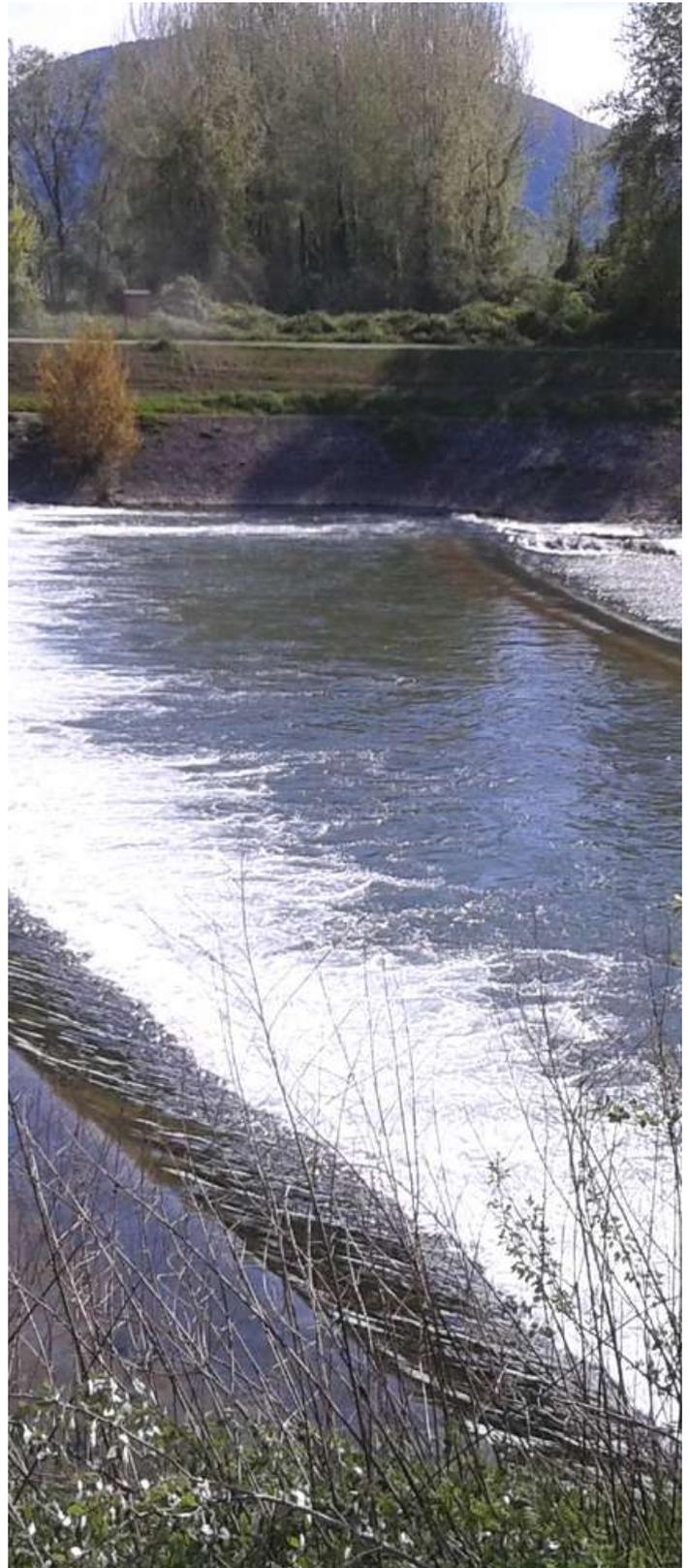
## Referencias

- Proyecto LIFE ALGAECAN (2020). Disponible en: <https://www.lifealgaecan.eu/en/>
- United Nations, (2017). World population prospects: the 2017 revision, key findings and advance tables. United Nations, New York.



# 4

**SEGURIDAD HÍDRICA  
Y REÚSO**



# ARTÍCULO 4.1

## PROYECTO H2020 NEXTGEN: HACIA UNA PRÓXIMA GENERACIÓN DE SISTEMAS Y SERVICIOS DE AGUA PARA LA ECONOMÍA CIRCULAR



El proyecto de I+D+i NextGen ([www.nextgenwater.eu](http://www.nextgenwater.eu)) pretende evaluar y promover soluciones y sistemas transformadores de economía circular en torno al uso de recursos en el sector del agua, como, por ejemplo, sistemas de tratamiento para la reutilización del agua. Con este objetivo, NextGen ofrecerá soluciones tecnológicas, comerciales y de gobernanza para el agua en diez casos de demostración de alto perfil en Europa y mediante tres casos asociados en el resto del mundo.

### Introducción

El agua, los minerales, y la energía son tres de nuestros recursos más preciados y vitales, esenciales para la vida y nuestro día a día. Nuestra demanda y consumo de los tres está creciendo rápidamente, gastando más de lo que la tierra puede producir. En el caso del agua, por ejemplo, se prevé que en 2030 el consumo mundial de agua superará el suministro en un 40%, y aproximadamente la mitad de la población mundial sufrirá estrés hídrico. En Europa esto no solo afectará a países como España o Grecia, sino que Bélgica, Portugal, Italia, Francia o Alemania deberán enfrentarse también a un estrés hídrico alto o muy alto.

Uno de los 10 casos de demostración europeos se ha implementado en Tossa de Mar (Girona) para la recuperación y reutilización de agua para usos de riego en jardines privados y recarga natural de acuíferos. En este caso de estudio se está realizando la validación de un sistema de regeneración avanzado basado en el uso de membranas de ósmosis de desalación regeneradas al final de su vida útil, y se está validando un DSS para la optimización integrada del ciclo del agua urbano / regional.



Figura 4.1\_1 Planta depuradora de Tossa de Mar (Fuente: CCB)

## Desbloqueando el potencial oculto en el ciclo del agua

El proyecto NextGen de la convocatoria CIRC-02-2016-2017 impulsa una gestión y un uso más sostenible del agua que puede contribuir a evitar que las crisis hídricas y el estrés se conviertan en un desafío diario, trabajando en formas innovadoras de utilizar y reutilizar el agua y sus recursos, y probando los desarrollos en 10 demostradores en toda Europa.

Varios de estos procesos se vinculan con interdependencias cruciales, lo que denominamos NEXUS: una solución solo puede ser posible gracias a otra. Las tecnologías NextGen actúan sobre partes críticas del nexo agua-materiales-energía y optimizan todo el sistema, haciendo la gestión del agua más eficiente.

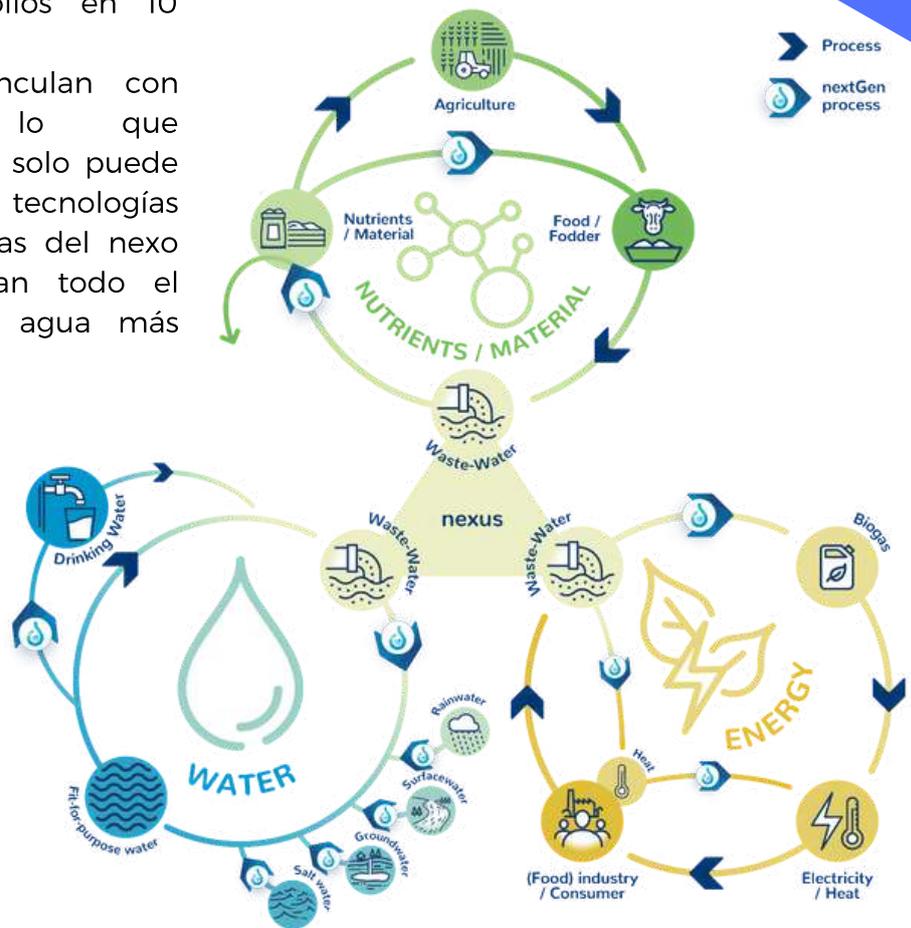


Figura 4.1\_2 Nexus Agua - Recursos - Energía

## Dar vida a la economía circular

Una economía circular mantiene los recursos en uso durante el mayor tiempo posible, extrayéndoles el máximo valor. En NextGen se trabaja para recuperar y regenerar productos y materiales en lugar de desecharlos después de su uso, definiendo y cultivando las condiciones marco para el éxito:

- Involucrar a los ciudadanos y otras partes interesadas, dando retroalimentación sobre el desarrollo tecnológico, aumentando el aprendizaje colectivo y dando forma a soluciones y cambios de comportamiento utilizando comunidades de práctica y living-labs, serious games y realidad aumentada.
- Abordar los desafíos sociales y de gobernanza, garantizando la adopción y el apoyo a largo plazo de las soluciones de la economía circular, incluidas las pruebas de aceptabilidad social, el apoyo a las políticas, y la regulación y el desarrollo de una hoja de ruta europea para el agua en la economía circular.

NextGen explora también nuevos modelos comerciales y apoya la creación de mercado con tres iniciativas clave:

- Un apoyo comercial y de marketing para aprovechar las nuevas y amplias oportunidades reveladas al adoptar un enfoque de economía circular.
- Un análisis exhaustivo, elaboración de perfiles e intercambio de modelos de negocio y servicios para soluciones de agua en la economía circular.
- Un mercado en línea que permite a los usuarios explorar vitrinas NextGen y tecnologías de casos de demostración.

### Los demostradores

NextGen está demostrando las soluciones tecnológicas, comerciales y de gobernanza innovadoras para el agua en diez ubicaciones de alto perfil y a gran escala en toda Europa, desarrollando los enfoques, herramientas y asociaciones necesarios para la transferencia y su mejora.

# PROYECTO NEXTGEN

**Jordi Cros Herrero**  
Director de Innovación. ADASA  
jcros@adasasistemas.com\*

**Iñaki Barrondo Benito**  
Project Manager. ADASA  
ibarrondo@adasasistemas.com



Uno de los casos está ubicado en Tossa de Mar (España), en la zona turística de la Costa Brava, caracterizada por una alta demanda estacional y frecuentes episodios de escasez de agua que provocan también la intrusión de agua salada. Es una de las áreas pioneras en la implementación de reutilización de agua en Europa con 14 tratamientos terciarios a gran escala que aportan 4 hm<sup>3</sup> / año (2016) para riego agrícola, usos ambientales y usos urbanos.

Figura 4.1\_3 Ubicaciones de los demostradores



Figura 4.1\_4 Planta depuradora de Tossa de Mar (Fuente: CCB)

En este demostrador, coordinado por EURECAT, se están regenerando membranas de ósmosis inversa al final de su vida útil hasta obtener una porosidad de nanofiltración. Se están utilizando en un sistema de recuperación multipropósito de 2 m<sup>3</sup>/h de capacidad y con un 80% de recuperación, que ha estado funcionando en continuo desde noviembre 2020 produciendo agua de calidad para extender el uso de agua regenerada en el área (por ejemplo, reutilización potable indirecta a través de la recarga de acuíferos, y el riego de jardines privados). También se está realizando una prueba de optimización integrada del ciclo del agua urbano / regional mediante la herramienta Hydroptim (desarrollada por ADASA) que permite la minimización de los gastos energéticos de las redes de distribución, proponiendo una explotación óptima en términos cuantitativos (mínimo consumo y coste) y cualitativos (mayor protección del medio).

## Resultados

Algunos de los resultados ya obtenidos en el marco global del proyecto NEXTGEN son:

- Incremento del 25% en la producción de energía en Braunschweig, incremento del 80% del agua en la Costa Brava, producción de carbón activado a partir de lodos de depuración en Alterheim.
- Aplicación de Realidad Virtual Aumentada y Serious Games para la concienciación y transferencia de resultados.
- Creación de 4 posibles spin-offs: reactor MNR, tecnología de extracción de recursos del alcantarillado, recuperación de calcita de minerales acuáticos, y creación de un marketplace.
- Más de 1.500 personas participaron en la encuesta de aceptación pública. Los visitantes de los demostradores (por ejemplo, La Trappe) superaron los 150.000 antes de la llegada de la Covid-19.
- Participación de ciudadanos locales en las actividades de NextGen y el intercambio de conocimientos a través de las actividades de las comunidades de práctica. Solo en Gotland ya se han involucrado 150 personas.

## Conclusiones

Ahora que el proyecto NextGen encara su último año, ya están disponibles varias tecnologías y más de 10 soluciones en diferentes países europeos, y ya se están obteniendo muy buenos resultados.

## Agradecimientos

Se agradece especialmente la colaboración y apoyo a la ejecución del proyecto del Ajuntament de Tossa, del Consorci d'Aigües Costa Brava Girona, y de la Agència de Salut Pública de Catalunya.

El consorcio ha recibido financiación del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención n° 776541 (GA).



Figura 4.1\_5 Sistema de nanofiltración  
(Fuente: Eurecat)

# ARTÍCULO 4.2

## MONITORIZACIÓN EN TIEMPO REAL DE LA ACTIVIDAD DE E. COLI EN AGUA REGENERADA COMO HERRAMIENTA PARA LA GESTIÓN DE RIESGOS MICROBIOLÓGICOS

### Introducción

Con la finalidad de poder utilizar el agua regenerada de forma segura, es necesario evaluar y controlar los riesgos microbiológicos. Los Planes de Seguridad Sanitaria (SSP, del inglés Sanitation Safety Plans) cobran importancia en este marco junto con nuevas tecnologías emergentes, como los analizadores microbiológicos en línea, que ayudan a mejorarlos.

En este contexto, con el objetivo de mejorar la gestión de riesgos microbiológicos durante la producción de agua regenerada, se evaluó un analizador en línea de E. coli (BACTcontrol de MicroLAN) en el marco del proyecto Regireu (proyecto cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) de la Unión Europea, en el marco del Programa Operativo FEDER 2014-2020 Cataluña. Bajo el Objetivo de Inversión para el Crecimiento y el Empleo).

### Características del equipo evaluado

El analizador BACTcontrol analiza la actividad enzimática de las células vivas de E. coli mediante detección de fluorescencia cada 2 horas. BACTcontrol tiene un sistema de autolimpieza, para evitar el recrecimiento y la contaminación cruzada, y un sistema de concentración de muestras para mejorar la sensibilidad. El equipo se configuró para filtrar volúmenes de muestra de 1000mL con el fin de aumentar la sensibilidad, por lo que el equipo expresa los resultados en pmol/min /1000mL.

La validación de los resultados se realizó mediante el método Colilert® (NMP/100mL).



**REGIREU**<sup>©</sup>  
COMUNITAT AIGUA

**CETAQUA**  
CENTRO TECNOLÓGICO DEL AGUA



**Aigües de  
Barcelona**

Con el objetivo de mejorar la gestión de riesgos microbiológicos durante la producción de agua regenerada, se evaluó un analizador en línea de E. coli (BACTcontrol, MicroLAN).

La evaluación se llevó a cabo en la EDAR de Gavà-Viladecans instalando el equipo después del Reactor Biológico de Membrana (MBR) durante 6 meses. Para evaluar los datos obtenidos se utilizó el método Colilert®, parámetros fisicoquímicos en línea y eventos en la operación de la planta.

Tras esta evaluación, los principales resultados a presentar son el límite de detección de BACTcontrol, rangos de valores de actividad de E. coli en agua regenerada y se muestra también el potencial que el equipo tiene en la gestión preventiva del riesgo.

## Trabajos realizados

Antes de su uso en la Estación de Regeneración de Aguas (ERA) de Gavà, el instrumento fue sometido a unas pruebas en la plataforma de sensores que Aigües de Barcelona con sede de Collblanc (ver Figura 4.2\_1).

El equipo estuvo durante un par de meses en esta ubicación y se conectó a la red de agua potable para conocer la respuesta en estas condiciones. Posteriormente, en la misma plataforma de sensores, se realizó un diseño experimental, pasando agua regenerada, depositada en un contenedor, a parte de la red. Se midió la respuesta del equipo con agua regenerada libre de *E. coli* y con diferentes fortificaciones del mismo.

La evaluación online del analizador BACTcontrol se llevó a cabo en el período comprendido entre mayo y diciembre 2019 en la salida del reactor de membranas biológico (MBR, del inglés Membrane Biological Reactor) de la EDAR Gavà-Viladecans, Barcelona. El equipo se instaló en la salida del MBR para que analizara en continuo (ver Figura 4.2\_2) y sus resultados se comparaban con verificaciones diarias de laboratorio con el método Colilert®. Además, se estudiaron correlaciones de los resultados con los analizadores online de la salida MBR (amonio, turbidez, nitratos y caudal de salida MBR, temperatura MBR y conductividad de la entrada), parámetros medidos en el laboratorio (conductividad, turbidez, pH y carbono orgánico total) y datos meteorológicos de la zona (pluviometría y temperatura ambiente).

Finalmente, debido a la bondad del tratamiento (no se observó ningún evento ya que los resultados de verificación mostraron ausencia de *E. coli*), se simularon posibles episodios de contaminación para ver la respuesta del equipo. Para ello, se prepararon muestras dopadas con agua de salida de primario con la finalidad de simular posibles eventos en la salida del tratamiento y así poder determinar la magnitud de episodios de contaminación que el analizador era capaz de detectar.



Figura 4.2\_1 Analizador BACTcontrol instalado en la plataforma de sensores de Collblanc



Figura 4.2\_2 Analizador BACTcontrol instalado en la salida del MBR de la EDAR Gavà-Viladecans

# PALABRAS CLAVE:

E. COLI  
MICROORGANISMOS  
AGUA REGENERADA  
RIESGO  
SSP  
EDAR

## Resultados

En la plataforma de sensores, el equipo demostró tener un comportamiento robusto por lo que se refiere a la medición en agua potable. Cuando se pasó el agua regenerada a diferentes concentraciones de E.coli, se verificó un límite de detección de 102 NMP/100mL (ver Figura 4.2\_3).

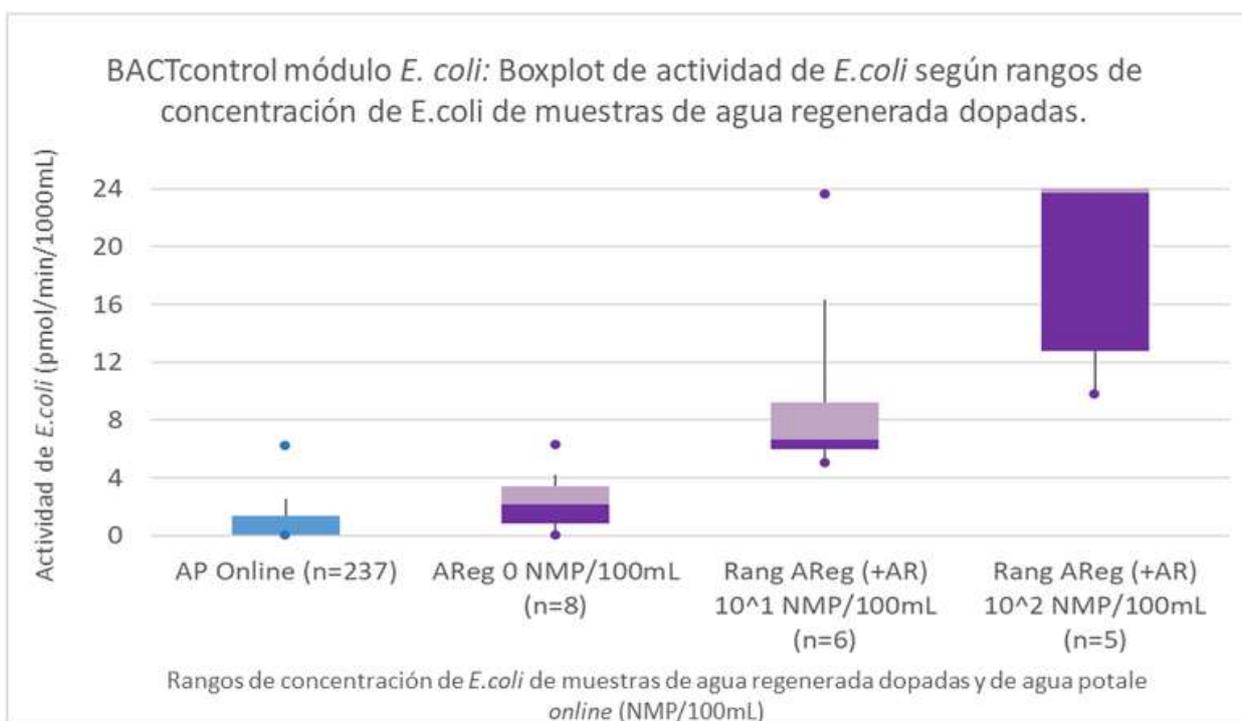


Figura 4.2\_3 Valores de actividad de BACTcontrol según rangos de concentración de E.coli, obtenidos en la plataforma de sensores.

Por lo que se refiere a las mediciones en la ubicación definitiva de la EDAR Gavà-Viladecans, no se detectó correlación entre los datos de actividad y concentración de *E. coli* con los datos de los analizadores online, los parámetros medidos en laboratorio y los datos meteorológicos.

Resultados con muestras dopadas en la EDAR Gavà-Viladecans (ver Figura 4.2\_4): se detectaron con éxito muestras de concentración del orden de 10<sup>2</sup> NMP/100mL, con una media alrededor de 20 pmol/min/1000mL, y 10<sup>3</sup> NMP/100mL, con una media alrededor de 145 pmol/min/1000mL. Por otra parte, no se detectaron muestras del orden de 10<sup>1</sup> NMP/100mL. Se concluyó que el límite de detección del equipo corresponde a concentraciones de 10<sup>2</sup> NMP / 100mL y corresponde con el LD que se obtuvo en la verificación previa.

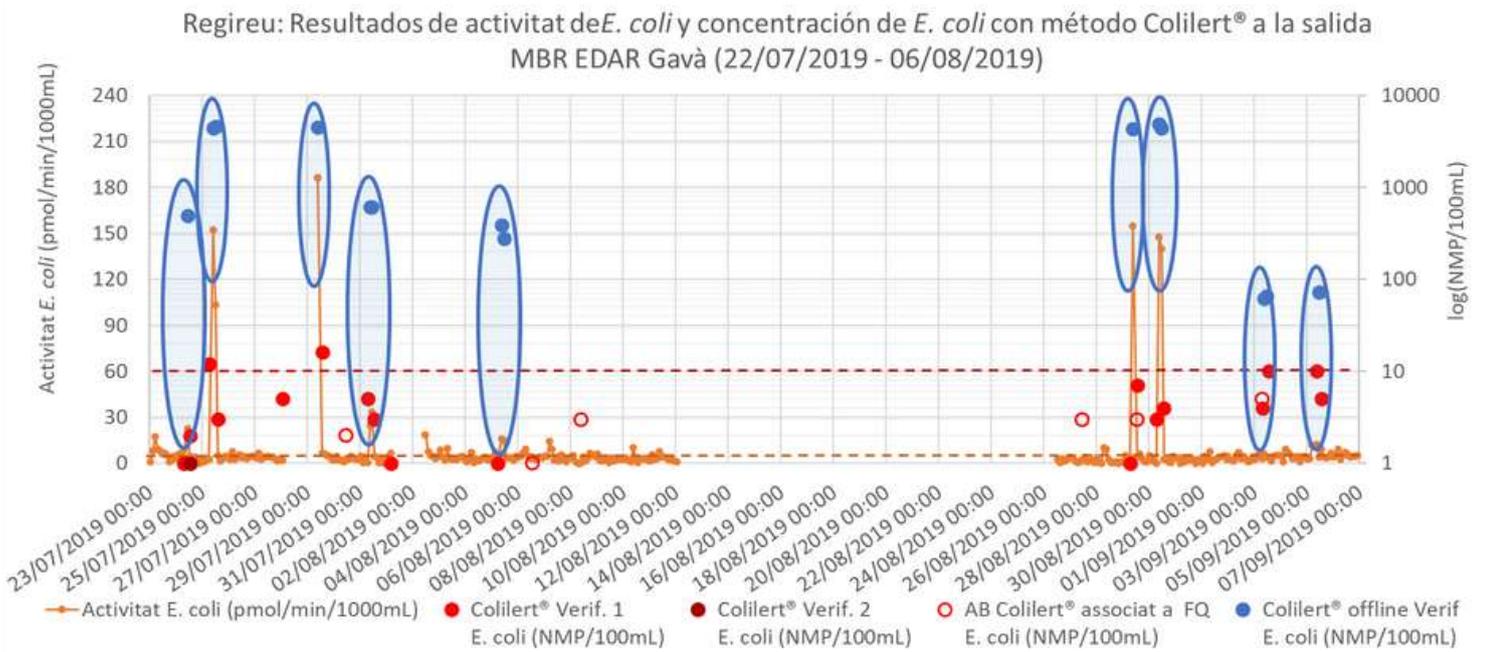


Figura 4.2\_4 Valores de actividad y concentración de *E. coli* de las muestras offline dopadas en comparación con los valores online de los mismos parámetros

# PROYECTO REGIREU

**Claudia Puigdomènech**  
Project Manager en Cetaqua  
cpuigdomenech@cetaqua.com\*

**Susana González**  
Responsable del área Gestión de Infraestructuras Críticas  
y Resiliencia en Cetaqua  
sgonzalez@cetaqua.com

**Belén Galofré. Responsable Área microbiología**  
en Aguas de Barcelona  
bgalofre@aiguesdebarcelona.cat

**Carles Vilaró. Técnico Área microbiología en**  
Aguas de Barcelona  
cvilaro@aiguesdebarcelona.catm

# 5

**DEPURACIÓN Y  
DESALACIÓN**



# ARTÍCULO 5.1

## NUEVAS TECNOLOGÍAS PARA LA ELIMINACIÓN Y DETECCIÓN IN-SITU DE CONTAMINANTES PRIORITARIOS EN AGUAS RESIDUALES



El proyecto coordinado por la empresa DAM cuenta con la participación del centro tecnológico CETIM y la fundación IMDEA Energía.

Su objetivo es investigar nuevas tecnologías para la detección in-situ de contaminantes emergentes prioritarios y el desarrollo de nuevos procesos de eliminación de los mismos.

En concreto aborda la síntesis y desarrollo de MIPs (Molecularly Imprinted Polymers) y MOFs (Metal-Organic Frameworks) capaces de enlazar selectiva y específicamente contaminantes emergentes (CEs). En el caso de los MIPs, además se van a utilizar como sensores fotónicos. Por último, se realizará el estudio del sistema integrado de MOFs y MIPs para la eliminación e identificación de CEs en agua residual urbana real.

(<https://www.dam-aguas.es/portfolio-posts/esence/>)

### Problemática actual

El nuevo Reglamento Europeo 2020/741 establece los requisitos mínimos de calidad y control para la utilización de aguas regeneradas en aplicaciones de riego agrícola desde una gestión integrada, analizando especialmente la presencia de contaminantes y patógenos, para asegurar un alto nivel de protección del medio ambiente y de la salud humana. Además, hace mención a la relevancia del impacto de los contaminantes emergentes (CEs) y se adquiere el compromiso de evaluar la repercusión de estas sustancias en la próxima revisión de la norma en 2028. Tras la aprobación del citado reglamento, se hace necesaria la adecuación de la normativa nacional vigente (RD 1620/2007) que establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.

De acuerdo con el Borrador de Fomento para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2020) entre los elementos novedosos del Reglamento Europeo destaca la obligación de considerar en la evaluación de riesgos la posible presencia de sustancias de preocupación emergentes (microplásticos y microcontaminantes).

Esto es especialmente relevante si se tiene en cuenta que las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDARs) no son capaces en la actualidad de eliminar los CE eficazmente.

Los CEs tienen diverso origen y naturaleza química ya que incluyen pesticidas, productos farmacéuticos, drogas ilícitas, compuestos de "estilo de vida" (cafeína, nicotina, etc.) y de cuidado personal, entre otros.

Una acumulación de estos contaminantes puede causar a largo plazo grandes impactos en la sociedad y el medioambiente que van desde la aparición de problemas endocrinos que ponen en riesgo la salud de las personas hasta la detección de contaminantes en acuíferos y ríos que afectan al equilibrio de los ecosistemas naturales.

ESENCE, nace con el objetivo de aportar soluciones a través de la investigación de nuevas tecnologías para la detección in-situ de contaminantes emergentes y el desarrollo de nuevos procesos para su eliminación.

Para ello se desarrollarán, sintetizarán y evaluarán nuevos sensores de captación e identificación de los contaminantes de interés mediante el empleo de nuevos materiales, como polímeros de impresión molecular (MIPs) y materiales porosos orgánicos (MOFs) que sean capaces de adsorber y degradar moléculas complejas presentes en aguas residuales tratadas. De manera secuencial, el proyecto estudiará la integración de MIPs y MOFs a escala piloto para la detección, identificación y eliminación de CEs en un entorno real.

### El proyecto ESENCE

ESENCE comenzó en septiembre de 2020 y está previsto que finalice en diciembre de 2023, distribuyéndose en cuatro bloques temáticos principales: (i) Estudios preliminares; (ii) Tecnologías de detección de MIPs fotónica; (iii) Tecnología de eliminación de CEs: MIPs y MOFs; y (iv) Validación de resultados con aguas residuales reales.

Actualmente, los tres socios del proyecto se encuentran investigando los CEs de interés, desarrollando materiales (MIPs y MOFs) más selectivos para su recuperación o eliminación y estudiando las técnicas de detección fotónica.

La empresa Depuración de Aguas del Mediterráneo (DAM) ha estudiado y caracterizado corrientes residuales procedentes de la EDAR de la Pobla de Farnals enfocadas a la búsqueda de CE y prioritarios. Durante el estudio se recolectaron 6 muestras a la salida del desarenador (agua influente a la depuradora) y del tratamiento secundario que fueron integradas durante 24 horas y 7 días según se establece en metodología para la recolecta de muestras propuesta por la IUPA.

Los análisis detectaron la presencia de CEs destacándose grupos de drogas de abuso, plaguicidas y fármacos. Se emplearon tres metodologías analíticas basadas en el acoplamiento cromatografía líquida-espectrometría de masas en tándem (LC-MS/MS) para la cuantificación de 6 drogas de abuso, 32 plaguicidas y productos de transformación (TP) y 36 fármacos. Para la detección de fármacos se siguió el procedimiento analítico de inyección directa de la muestra,

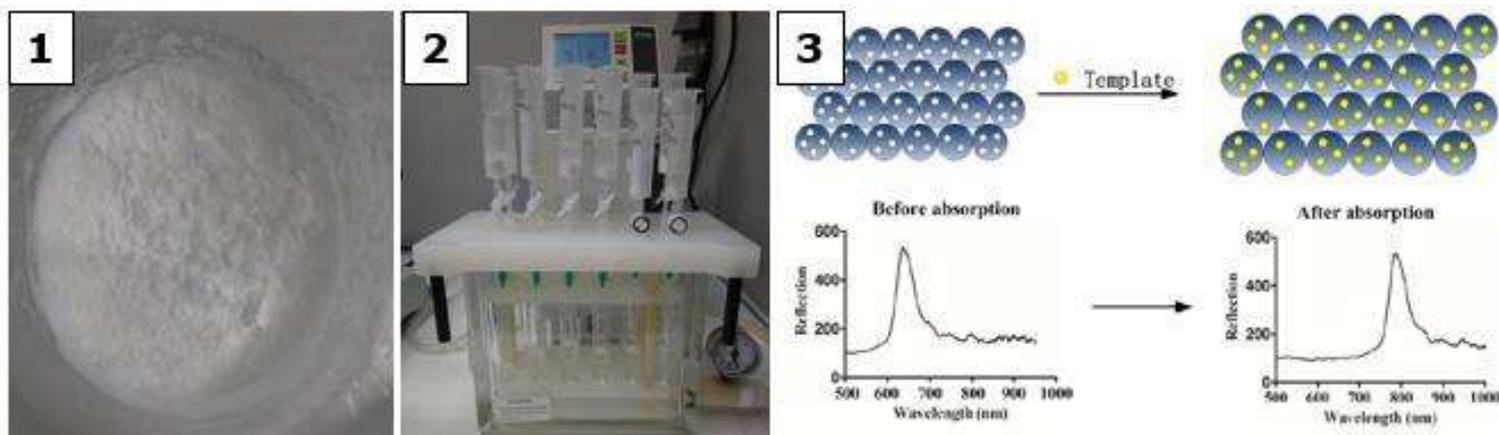


Figura 5.1\_1) Aspecto de un MIP tras la polimerización y secado (aspecto polvo); 2) montaje del sistema para lavado-reenlace-lixiviado de MIPs; 3) principio de funcionamiento de los sensores basados en MIPs

**PALABRAS CLAVE:**  
**CONTAMINANTES EMERGENTES**  
**MIPs**  
**MOFs**  
**SENSORES FOTÓNICOS**

# PROYECTO ESENCIA

con aplicación de una centrífuga y dilución con agua ultrapura tipo Milli Q (dil x4 para muestras de entrada y dil x2 para muestras de salida), y una posterior determinación mediante LC-MS/MS analítico (Botero-Coy et al., 2018; Fonseca et al., 2020).

En plaguicidas se estableció la inyección directa de la muestra, aplicando simplemente una centrifugación y dilución con agua ultrapura tipo Milli Q (dil x4 para muestras de entrada y dil x2 para muestras de salida) y en drogas de abuso se empleó la metodología desarrollada y validada en el IUPA (Bijlsma et al., 2014).

CETIM han desarrollado diferentes formulaciones de MIPs, diseñados para los contaminantes de interés, por polimerización a temperatura, tras combinar los 5 componentes principales de los que se forma un MIP. Para generar las formulaciones adecuadas, se han empleado diferentes combinaciones de reactivos seleccionando siempre: (1) un template o plantilla, siendo este el contaminante de interés (carbamazepina, venlafaxina o tiabendazol); (2) un monómero funcional (ácido metacrílico o acrilamida), (3) un porogen o disolvente (acetónitrilo o tolueno), (4) un entrecruzador (divinilbenceno (DVB) o dimetilacrilato de etilenglicol (EGDMA)) y (5) un iniciador (AIBN o AIMN). Además, se han estudiado diferentes temperaturas de polimerización y relaciones entre plantilla: monómero: entrecruzador.

Tras síntesis y proceso de secado, los MIPs son sometidos a etapas de lavado para extraer el contaminante empleado en la síntesis, y obtener así un MIP capaz de adsorber los contaminantes de interés. Para evaluar su capacidad de adsorción/desorción, se somete a ensayos de reenlace y lixiviado. Por otro lado, las capacidades que tienen los MIPs para captar estos contaminantes, pueden ser aprovechadas para el desarrollo de sensores fotónicos que permitan determinar la concentración de estas sustancias en las aguas residuales.

**Silvia Doñate Hernández**  
Responsable Departamento  
Innovación de DAM  
Silvia.donate@dam-aguas.es\*

**Alicia Bañón Goiriz**  
Investigadora en Centro  
Tecnológico de Investigación  
Sectorial (CETIM)

**Patricia Horcajada**  
Investigadora en la Unidad de  
Materiales Porosos Avanzados de  
IMDEA

En el proyecto se están estudiando tanto la elaboración de sensores basados en MIPs combinados con cristales fotónicos, como los que se basan en el fenómeno de la resonancia del plasmón superficial. Ambos sensores cambiarían su respuesta óptica dependiendo de la cantidad de CEs que capten los MIPs adheridos a ellos.

IMDEA ha centrado la investigación en polímeros de coordinación porosos o MOFs, materiales formados por la unión de unidades inorgánicas (cationes, clústeres, cadenas, planos o incluso estructuras 3D; a priori cualquier catión de la tabla periódica) y ligandos orgánicos polidentados (carboxilatos, fosfonatos, nitrogenados, etc.), dando lugar a estructuras porosas cristalinas mono-, di- o tridimensionales (Lee et al., 2019; Kumar et al., 2020).

Entre las propiedades que presentan estos materiales destacan: i) su elevada porosidad, pudiendo alcanzar superficies de 7000 m<sup>2</sup>/g con diámetros de poro entre 3 y 90 Å, haciéndolos accesibles a diferentes tipos moléculas huésped, incluyendo los CEs; ii) su amplia variabilidad estructural (Vilela & Horcajada, 2018); y iii) la estabilidad en medio acuoso de algunos de ellos (Liu, B. et al., 2020).

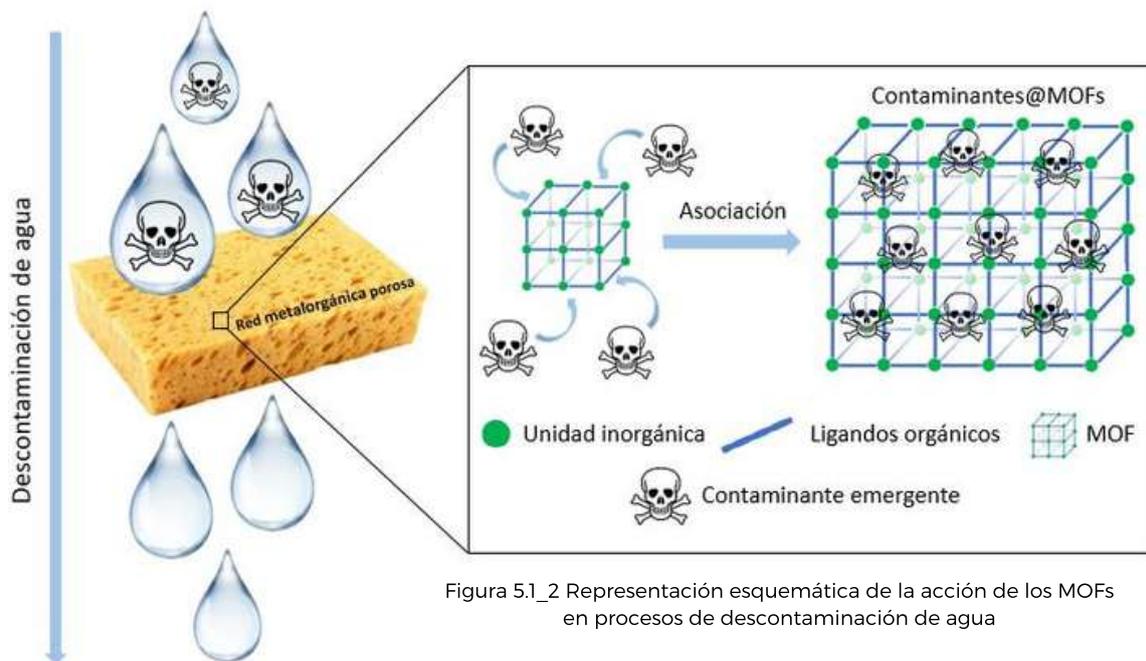


Figura 5.1\_2 Representación esquemática de la acción de los MOFs en procesos de descontaminación de agua

## Resultados y conclusiones

De los análisis realizados en la EDAR de la Poble de Farnals se destaca la presencia de 9 CE's incluidos en la de Lista de Observación 2018 y de 2020, entre ellos los plaguicidas diuron, imazalil, tebuconazol y terbustrina y los fármacos ciprofloxacina, sulfametoxazol, trimetoprima, venlafaxina y tetraciclina.

En general, se observó una disminución en la concentración de dichos contaminantes a la salida de la EDAR, pero su presencia persistía.

Tras el estudio, se seleccionaron venlafaxina, carbamazepina y gabapentina (dentro de la familia de los fármacos), tiabendazol (pesticidas) y benzoilecgonina (drogas de abuso) como CE's de mayor relevancia para el estudio. De manera coherente con los CE detectados se ha comenzado el estudio con la síntesis de MIPs específicos que han mostrado una adsorción elevada para el tiabendazol (81 - 95 %) y la carbamazepina (75 - 85 %) con mínimas pérdidas por lixiviado para el tiabendazol (1 - 5%) y algo superiores para el resto de contaminantes (>10%).

Actualmente, se prosigue con la investigación de nuevas formulaciones y reevaluación de las condiciones de síntesis. Para ello, se contempla el uso de otros disolventes u otros iniciadores y modificación de las condiciones de polimerización, focalizado ello en lograr una buena polimerización y formación de huecos selectivos en los MIPs, y así lograr un alto porcentaje de adsorción del contaminante/s de interés. Por otro lado, los resultados preliminares de la aplicación de MOFs, tras un cribado con diferentes materiales y agua contaminada con CE's, muestran que algunos son capaces de eliminar de forma rápida y eficiente estos contaminantes utilizando soluciones acuosas simuladas, (ejemplo, la venlafaxina con 73-100%) lo que los convierte en una alternativa limpia y eficaz en procesos de descontaminación de aguas.

Tras las conclusiones extraídas en las primeras etapas del proyecto, los tres socios están trabajando en la propuesta de una solución integrada para ser testada en un sistema piloto con aguas residuales reales.

## Bibliografía

- Bijlsma, L., Beltrán, E. Boix, C., Sancho, J.V., Hernández, F. (2014). Improvements in analytical methodology for the determination of frequently consumed illicit drugs in urban wastewater. *Anal. Bioanal. Chem.* 406: 4261-4272
- Botero-Coy, A.M., Martínez-Pachón, D., Boix, C., Rincón, J., Castillo, N., Arias-Marín, L.P., Manrique-Losada, L., Torres-Palma, R., Moncayo-Lasso, A., Hernández F. (2018). An investigation into the occurrence and removal of pharmaceuticals in Colombian wastewaters. *Sci.Total Environ.* 642: 842-853
- Fonseca, E., Hernández, F., Ibáñez, M., Rico, A., Pitarch, E., Bijlsma, L. (2020). Occurrence and ecological risks of pharmaceuticals in a Mediterranean river in Eastern Spain. *Environ. Int.* 144, 106004
- Kumar, S., Jain, S., Nehra, M., Dilbaghi, N., Marrazza, G. & Kim, K. (2020). Green synthesis of metal-organic frameworks: A state-of-the-art review of potential environmental and medical applications. *Coordination Chemistry Reviews*, 420: 213407.
- Lee, J.H., Jeoung, S., Chung, Y.G. & Moon, H.R. (2019). Elucidation of flexible metal-organic frameworks: Research progresses and recent developments. *Coordination Chemistry Reviews*, 389: 161-188.
- Liu, B., Vikrant, K., Kim, K., Kumar, V. & Kailasa, S.K. (2020). Critical role of water stability in metal-organic frameworks and advanced modification strategies for the extension of their applicability. *Environmental Science: Nano*, 7(5): 1319-1347.
- MITECO. Dirección General del Agua. Borrador Fomento de la reutilización de las aguas residuales de Octubre de 2020. Informe complementario.
- Vilela, S.M. & Horcajada, P. (2018). MOFs as Supports of Enzymes in Biocatalysis. *Metal-Organic Frameworks: Applications in Separations and Catalysis*: 447-476.

# ARTÍCULO 5.2

## HIDRÓGENO COMO SUBPRODUCTO DEL TRATAMIENTO DE EFLUENTES RESIDUALES

### Introducción

Puede que no esté lejos en el tiempo que la generación de hidrógeno como subproducto de tratamiento de efluentes residuales sea algo habitual, al igual que lo es hoy el metano. Se conocen bien los procesos biológicos que pueden llevar a la producción de hidrógeno partiendo de una corriente residual rica en materia orgánica. Entre ellos destacan, por su novedad, expectativas e interés para la comunidad científica los procesos fermentativos, los procesos fotolíticos (directos e indirectos) y los procesos fotofermentativos [1]. Pero el gran hándicap a superar, en todos los casos, es que la eficiencia y el coste de estos procesos es aún algo a mejorar para conseguir su implantación general y a gran escala. Es por ello que se hace necesaria la investigación para conseguir que estos procesos sean viables económicamente y su integración en el sistema energético sea una realidad.



La búsqueda de alternativas para la producción sostenible de combustibles es, sin lugar a duda, una de las actividades de investigación de mayor vigencia en la actualidad a nivel mundial. Las instalaciones de tratamiento de efluentes se convierten, en este sentido, en una oportunidad de generación de vectores energéticos renovables. Hasta ahora la producción de metano era algo habitual en los procesos de tratamiento de efluentes, pero el interés que está despertando el hidrógeno, hace que la mirada se vuelva a la generación de este otro gas renovable con gran futuro. La red CYTED H2TRANSEL y la red CERVERA H24NEWAGE son ejemplos de iniciativas que están apostando por ello.



Figura 5.2\_1 Producción de hidrógeno por fermentación oscura

## Tecnologías de interés

La producción de hidrógeno por fermentación oscura tiene lugar por bacterias anaerobias que crecen en oscuridad y usan sustratos ricos en carbohidratos. El proceso de fermentación oscura para producir hidrógeno, todavía no se ha podido implantar a escala industrial y actualmente está en fase de investigación debido a que, en ocasiones, el proceso es inestable porque las bacterias implicadas son muy sensibles, especialmente a la presión parcial de hidrógeno. El foco está ahora en el desarrollo de consorcios microbianos adecuados y nuevos biorreactores para que el proceso tenga lugar de forma estable y continua. En este sentido, y tomando como base el *Clostridium* sp., dado que es el productor de bio-H<sub>2</sub> más eficiente que se conoce, un consorcio microbiano diseñado artificialmente ha llegado a producir en laboratorio 5,6 moles de H<sub>2</sub>/mol de glucosa, lo que arroja resultados muy prometedores.

Como tecnología alternativa, la fotofermentación es un proceso en el que los compuestos orgánicos se degradan en pequeñas moléculas en presencia de la luz. En este proceso los sustratos orgánicos se convierten finalmente en hidrógeno y dióxido de carbono por acción de las bacterias púrpuras, siendo la mayor dificultad del proceso, la baja penetración de la luz a las zonas más profundas del reactor. La luz solar es la fuente deseable de energía debido a su nulo coste, sin embargo, debe considerarse el efecto de los ciclos luz/oscuridad, ya que la producción de hidrógeno se detiene durante los periodos de oscuridad y reinicia cuando existen nuevamente condiciones de iluminación. Se está trabajando en la combinación de fermentación oscura y fotofermentación por su potencial de aumentar los rendimientos generales de producción de bio-H<sub>2</sub>. Los biorreactores de dos etapas han ganado mucha atención recientemente debido a que con ellos se consigue una utilización más efectiva de los sustratos carbonosos y un menor gasto de energía (hasta un 15%) para la producción de bio-H<sub>2</sub>.

En cuanto al proceso de biofotólisis, este puede ocurrir de forma directa o indirecta. La biofotólisis directa es un proceso de producción de hidrógeno y oxígeno fotosintéticamente a partir de agua y luz solar. En él están implicados algunos microorganismos, entre los que destacan las algas verdes, las cuales requieren de un tiempo de incubación anaerobia en oscuridad para inducir la síntesis o la actividad de enzimas involucradas en el metabolismo del hidrógeno. Por otro lado, la biofotólisis indirecta se lleva a cabo por cianobacterias y algas verdeazuladas donde, a partir del proceso fotosintético, el CO<sub>2</sub> es fijado a sustratos ricos en hidrógeno endógeno generando luego hidrógeno molecular cuando estos microorganismos se incuban en condiciones anaerobias. En los estudios realizados hasta el momento, destacan la *Chlamydomonas*, *Chlorella* y *Scenedesmus* como las microalgas de mayor interés dada su abundancia y su alto potencial de producción de H<sub>2</sub> en comparación con otras algas.

## PALABRAS CLAVE:

**FERMENTACIÓN OSCURA  
HIDRÓGENO RENOVABLE  
MICROALGAS  
BIOHIDRÓGENO**

## Iniciativas de investigación en marcha

Las tres tecnologías mencionadas en el apartado previo están siendo objeto de profundo estudio en el marco de la red temática H2TRANSEL, recientemente aprobada (2021) como parte del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED) y que está centrada en investigar sobre la producción a partir de múltiples fuentes y el uso del hidrógeno en la región iberoamericana, tratando de brindar un espacio en donde analizar y discutir las tecnologías actuales y futuras de producción de hidrógeno, con énfasis en procesos que utilicen materias primas renovables y no contaminantes. Otra iniciativa de interés, que ahondará también en la temática de producción de hidrógeno como subproducto del tratamiento de corrientes residuales, es la red CERVERA H24NEWAGE, que iniciará su andadura en el último trimestre de 2021 con el objetivo principal de desarrollar tecnologías avanzadas de producción, almacenamiento y distribución y distribución de hidrógeno y su transferencia industrial para potenciar el posicionamiento de las entidades españolas en la cadena de valor de este gas renovable.

# PROYECTO H2TRANSEL

**Dolores Hidalgo**  
Directora Área Economía Circular  
dolhid@cartif.es\*



Figura 5.2\_2 Tratamiento de efluentes con microalgas para generar hidrógeno

### Referencia

[1] Hidalgo, D., Martín-Marroquín, J., Díez, D. (2022, in press). Biohydrogen: Innovative technologies for biohydrogen production at industrial level. En: Organic Waste to Biohydrogen. Springer.

# ARTÍCULO 5.3

## EVALUACIÓN CIENTÍFICO-TÉCNICA DE LA VIABILIDAD Y ANÁLISIS DE COSTES DE LA TECNOLOGÍA DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA LA ELIMINACIÓN DE LA TURBIDEZ Y MATERIA ORGÁNICA DE AGUAS GRISES

### Introducción

Las aguas grises incluyen todas las fuentes de aguas residuales domésticas, tales como las descargas del baño, lavadora, lavavajilla y fregadero de la cocina, excepto los desechos humanos (orina y materia fecal) que se vierten en los inodoros (aguas negras). Los volúmenes típicos diarios de aguas grises domésticas oscilan entre 90 y 120 l por habitante (hasta el 80% de las aguas residuales) [1], por lo que su tratamiento y reutilización puede ser una solución sostenible al aumento generalizado de la demanda hídrica [2]. Además, las aguas grises contienen concentraciones más bajas de contaminantes en comparación con las aguas residuales, por lo que ha aumentado el interés por su reutilización.

La cantidad y las características de las aguas grises dependen en gran medida de la localización, de la fuente de agua gris, actividades y hábitos personales e incluso de la estructura de la población y los ingresos de los

hogares. Las aguas grises contienen detergentes, aceites y grasas y hasta otras 900 posibles sustancias, entre ellas hasta  $7.0 \cdot 10^8$  CFU/100 cm<sup>3</sup>, lo que es determinante en términos de selección del tratamiento, reutilización y eliminación [5].

Todavía no existe una directriz internacional válida general para el tratamiento y la reutilización de aguas grises. La directriz de la OMS se refiere a la reutilización agrícola para riego únicamente [6]. Muchos países han desarrollado sus propias directrices que pueden variar considerablemente [7].



El CIDTA de la Universidad de Salamanca ha llevado a cabo en los últimos meses para la empresa Indepro Consultores de Ingeniería una evaluación científico-técnica acerca de la viabilidad de la tecnología de electrocoagulación para la eliminación de la turbidez de aguas grises. El principal objetivo es la posible implementación en el prototipo DRAIN2WC de reutilización de aguas grises, desarrollado por dicha empresa y cofinanciado con fondos FEDER y del Instituto para la Competitividad Empresarial de Castilla y León. Tras llevar a cabo un análisis de sensibilidad de las principales variables y parámetros operacionales del proceso y el correspondiente balance de costes (0.3-0.4 €/m<sup>3</sup> de agua tratada), se concluye que la electrocoagulación se muestra como un proceso eficiente para eliminar turbidez, color y materia orgánica de aguas grises (en 20 min eliminación de turbidez del 97% y de materia orgánica 85%).

Se ha investigado una amplia gama de métodos de tratamiento para diferentes tipos de aguas grises y la mayoría de los métodos publicados cumplen con la normativa de la OMS para el riego agrícola. Para cumplir con las más estrictas directrices de la UE, se requiere una desinfección final además del tratamiento fisicoquímico o biológico. Esta desinfección se puede lograr mediante filtración sobre arena o fibra seguida de radiación UV, dosificación de ozono o cloro o mediante una barrera física como membranas de microfiltración o ultrafiltración [2]. De las muchas publicaciones sobre la viabilidad técnica de diferentes sistemas de tratamiento, desde muy simples hasta muy sofisticados, sólo algunos sistemas se describieron en términos de inversión y amortización de una unidad de tratamiento in situ de aguas grises.

Debido a las altas fluctuaciones en la carga contaminante y el flujo de aguas grises, su tratamiento por métodos biológicos podría verse negativamente afectado por posibles cargas de choque que podrían reducir la actividad bacteriana significativamente [3]. Por lo tanto, se recomiendan alternativas físico-químicas para el tratamiento de aguas grises.

Los métodos electroquímicos para el tratamiento de aguas residuales, si bien suponen un coste energético, son seguros y respetuosos con el medio ambiente, así como eficaces en el tratamiento de compuestos orgánicos e inorgánicos. Entre las tecnologías electroquímicas, la electrocoagulación/electroflotación (EC/EF) puede ser un sustituto eficaz de la coagulación y flotación convencionales, y ha demostrado tener éxito en el tratamiento de diferentes tipos de aguas residuales [8].

El objetivo de este estudio es llevar a cabo un análisis preliminar de sensibilidad de los principales factores operacionales (electrodos, carga orgánica e inorgánica del agua, densidad de corriente, tiempo de electrólisis, espacio y disposición de los electrodos, velocidad de agitación, conductividad iónica, pH, T, formación de espumas y sedimentos) [9] de un proceso en batch a escala laboratorio de electrocoagulación (EC) con ánodos de aluminio combinado con electroflotación (EF) directa por desprendimiento de gas hidrógeno en cátodos de grafito, cobre y aluminio. Este proceso ha sido ensayado para la eliminación eficiente de la turbidez y la materia orgánica de aguas grises domésticas, de cara a su posible reutilización para uso humano sin contacto en una vivienda. Asimismo, en este trabajo se lleva a cabo una estimación de costes del agua gris regenerada.

## Materiales y Métodos

Este estudio experimental se ha llevado a cabo en los laboratorios del CIDTA de la Universidad de Salamanca con lotes de 4.0 l de aguas grises reales en un reactor de tanque agitado (batch) (15 cm x 15 cm x 18 cm) al que se han incorporado 2 líneas de electrocoagulación monopolar en paralelo, cada línea constituida por 2 ánodos de aluminio y 2 cátodos de diferentes materiales (grafito, cobre o aluminio) y alimentada por corriente continua, a voltaje regulable a efecto de modular, así, la intensidad de corriente medida en un amperímetro que pasa por el circuito eléctrico (Figura 5.3\_1).

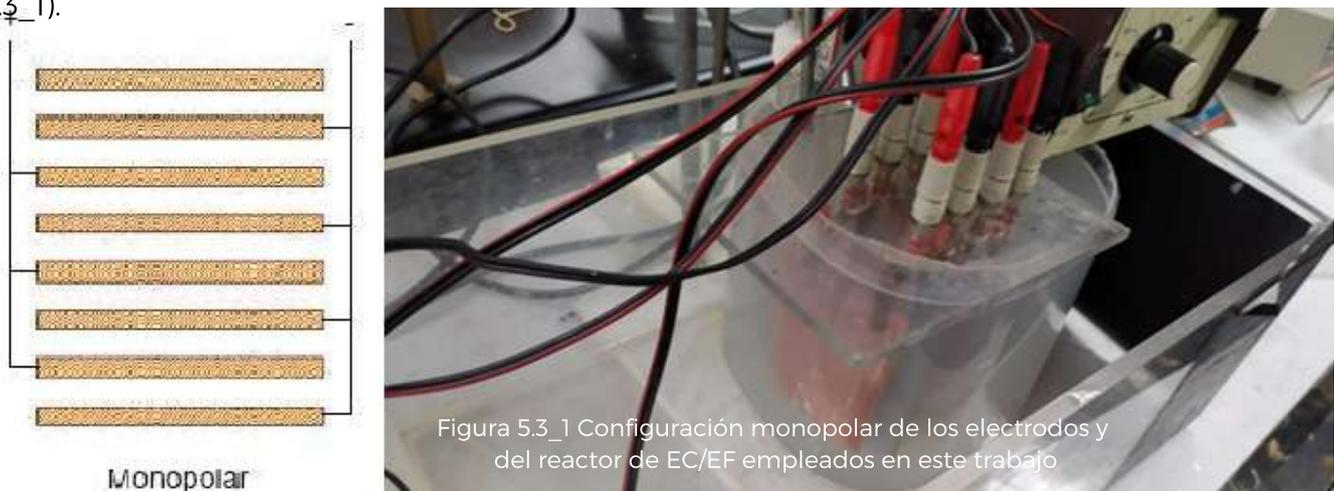


Figura 5.3\_1 Configuración monopolar de los electrodos y del reactor de EC/EF empleados en este trabajo

Las dimensiones de los electrodos han sido: Al (100 mm x 30 mm x 1 mm), Cu y C grafito (100 mm x 30 mm x 2 mm). La distancia de separación entre cada ánodo y cátodo paralelos fue 2 cm. La masa de los electrodos se midió en balanza analítica antes y después de cada experimento, tanto para comprobar la pérdida de masa del ánodo de aluminio como el pasivado. Se eligió una velocidad de agitación de las muestras de aguas grises de 100 rpm. El control de la temperatura se hizo con un equipo termostático Selecta Tectron.

En los experimentos se determinaron en las muestras de aguas los siguientes parámetros fisicoquímicos: conductividad iónica (Conductímetro Crison equipado con sonda polarizada), pH (pHmetro Crison 2002, equipado con sonda de control de temperatura CAT) y temperatura (termopar Crison 638 Pt). La intensidad de corriente en el circuito electroquímico se midió con un Amperímetro Ventus y cada 5 minutos del proceso de EC/EF se midió la turbidez (Turbidímetro HACH 2100 P), la materia orgánica (Método APHA-AWWA 5220 D) y el aluminio residual (Método APHA-AWWA 3500 D) en un espectrofotómetro HACH DR. También se midieron, a tiempo inicial y final, el color y los sólidos en suspensión totales (Método APHA-AWWA 2540 D) en rampa de filtración de los 4 litros de muestras de agua tratados.

## PALABRAS CLAVE:

**AGUAS GRISES  
REGENERACIÓN  
ELECTROCOAGULACIÓN  
ELECTROFLOCULACIÓN  
TURBIDEZ  
MATERIA ORGÁNICA  
ANÁLISIS DE COSTES**



Figura 5.3\_2 Evolución visual de la turbidez de las aguas grises y formación de una capa de espuma por electroflotación a lo largo del tiempo de EC/EF

### Resultados preliminares

#### Análisis de sensibilidad de variables

Se han llevado a cabo diferentes series de experimentos a fin de delimitar las condiciones operacionales óptimas del proceso de EC/EF para conseguir los mejores rendimientos y cinéticas de eliminación de la turbidez, de la materia orgánica y de sólidos en suspensión (SS) de las aguas grises domésticas tratadas. En este sentido, se han estudiado las variables tiempo de electrolisis (15 min - 2h), densidad de corriente (entre 76 y 198 A/m<sup>2</sup>), magnitud de carga eléctrica (76-99 y 297 - 801 C/dm<sup>3</sup>), ratio S/V de 1.6 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> (relación entre el área de superficie activa de electrodo y el volumen), tasa de dosificación de carga eléctrica en las condiciones operativas óptimas 5.1 C/dm<sup>3</sup>/min, temperatura de las muestras de aguas grises (12.5°C, 37.5°C y 50.0°C), conductividad iónica de las muestras de aguas grises (230 - 530 μS/cm), velocidad de agitación (100-200 rpm) y ánodo de Aluminio, cátodos de grafito, aluminio y cobre.

En condiciones óptimas de temperatura (37.5°C), la eliminación de la turbidez por EC (rendimiento  $\geq 97\%$  en 15-25 min) y la correspondiente formación de espumas por EF se hizo muy evidente y significativa en todos los experimentos (Figura 5.3\_2 y Figura 5.3\_3 A), comprobándose, asimismo, que no había efecto Joule y sí un aumento del pH en las muestras de agua gris al aumentar el tiempo de tratamiento (Figura 5.3\_3 D), a la vez que disminuía notablemente la materia orgánica (Figura 5.3\_3 B) y el Al disuelto remanente de la oxidación del ánodo, al asociarse con las partículas coloidales para provocar su coagulación (Figura 5.3\_3 C). El punto de ruptura en la evolución del aluminio disuelto sería indicativo de que la electrocoagulación ha finalizado. El incremento de pH durante el proceso de EC/EF depende del tipo de electrodo y del pH de la disolución inicial. Se sabe que la formación de gas H<sub>2</sub> en el cátodo y la acumulación de OH<sup>-</sup> en el medio aumentan en el pH durante el proceso de EC/EF [10]. Los sólidos en suspensión (SS) generados al final de la EC con ánodo de Al son función del cátodo utilizado. La variación de color de las aguas grises con ánodo de Al y diferentes cátodos fue: Cu de 1760 mg/l Pt-Co iniciales a 175 mg/l Pt-Co finales (90% eliminación del color) frente a 1075 a 225 mg/l Pt-Co finales del cátodo de aluminio (79% eliminación) y los 1760 mg/l Pt-Co a 83 mg/l Pt-Co del cátodo de grafito (95% eliminación).

**Juan Carlos Garcia Prieto**  
Investigador CIDTA-USAL  
jc@usal.es

**Manuel Garcia Roig**  
Catedrático USAL  
mgr@usal.es\*

**Julian Navas Herranz**  
Director Técnico INDEPRO S.L.  
jnavas@indepro.es

**José Manuel Ayuso Olmos**  
Investigador INDEPRO S.L.  
ayuso.jm@gmail.com

A modo de ejemplos ilustrativos, se presentan las cinéticas de eliminación de la turbidez y de la materia orgánica, así como la dinámica del Al disuelto y del pH, de las aguas grises tratadas en las condiciones operativas óptimas tras el correspondiente análisis de sensibilidad de las variables llevado a cabo (Figura 5.3\_3).

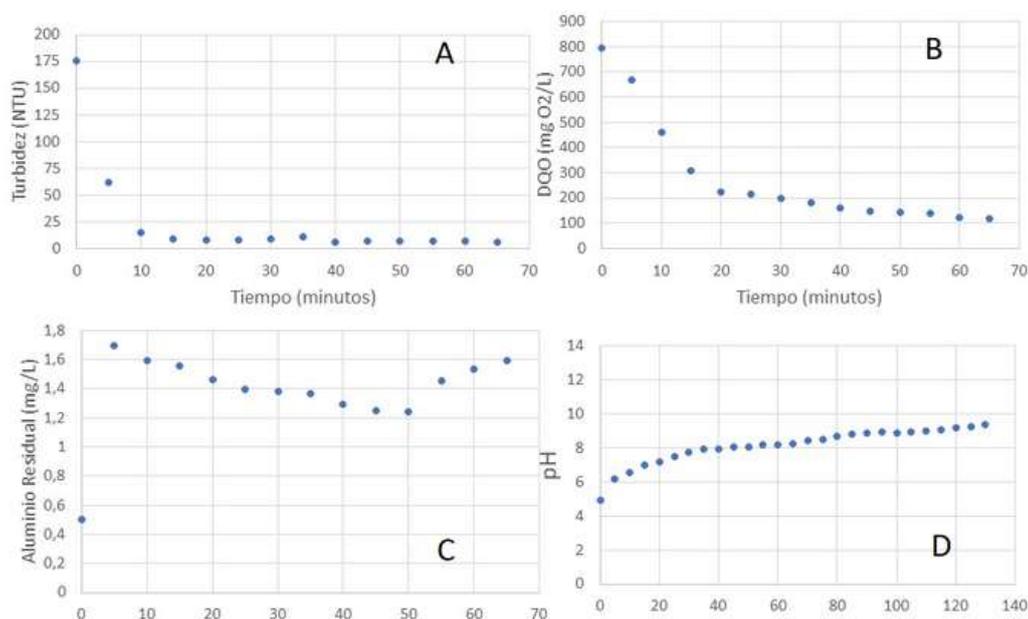


Figura 5.3\_3 Cinéticas de eliminación de la turbidez (A) y de la DQO (B) y evolución del Al remanente (C) y del pH (D) por EC/EF de aguas grises con ánodo de aluminio y cátodo de cobre, 100 rpm, 37.5 °C, intensidad de corriente (360 – 290 mA) y conductividad iónica (385 à 250  $\mu$ S/cm)

### Análisis de costes

Una evaluación económica básica, considerando los costes de los materiales de los electrodos de sacrificio (Aluminio) y la energía eléctrica consumida como principales factores, lleva a la siguiente ecuación:

$$\text{Costes operacionales} = a \text{ CElectrodo} + b \text{ CEnergía}$$

donde  $C_{\text{Electrodo}}$  se expresa como el coste de kgAl perdido/m<sup>3</sup> y  $C_{\text{Energía}}$  como el coste de los kWh/m<sup>3</sup> de agua tratada. Se introducen como parámetros a y b los costes en el mercado español antes del 1 Junio 2021 del Al  $a=1.87 \text{ €/kg Al}$  y de la energía eléctrica  $b=0.130 \text{ €/kWh}$ , respectivamente. En cuanto al consumo de los ánodos de sacrificio (Al) en promedio por experimento con una muestra de agua gris de 4.0 litros, supone 0.4492 g Al, es decir 124.8 g Al/m<sup>3</sup> lo que equivale a un coste de 0.233€/m<sup>3</sup> de agua gris tratada. Conviene indicar que se puede utilizar Aluminio de residuos de chatarra o reciclado como ánodo de sacrificio, lo cual abarataría estos costes.

Para calcular el consumo de energía eléctrica por cada línea operativa se utiliza la siguiente ecuación: Consumo de energía (kWh/m<sup>3</sup>) =  $2.77778 \cdot 10^{-7} V I t / \text{Volumen operativo}$ , siendo V el potencial en voltios, I la intensidad de corriente en amperios, t tiempo en segundos, el volumen operativo en m<sup>3</sup> y  $2.77778 \cdot 10^{-7}$  el factor de conversión de J a kWh.

Considerando un tiempo óptimo de electrocoagulación de 20 min = 1200 s:

$$\text{Consumo de energía (kWh/m}^3\text{)} = 2.77778 \cdot 10^{-7} (12)(0.354)(1200) / 0.004 = 0.354 \text{ kWh/m}^3$$

Suponiendo una franja horaria nocturna (0-8 h), a 0.11€/kWh, el consumo eléctrico por línea operativa supondría un coste de 0.039 €/m<sup>3</sup>, dado que se ha trabajado con 2 líneas operativas de electrocoagulación, el coste sería de 0.078 €/m<sup>3</sup>. En franja horaria punta, a 0.22€/kWh, el consumo eléctrico supondría un coste de 0.158 €/m<sup>3</sup>.

Por ello, los costes operacionales globales, en condiciones óptimas de operación y según la franja horaria de tarifa eléctrica, serían:

$$\text{Franja horario nocturna: Costes operacionales} = a C_{\text{Electrodo}} + b C_{\text{Energía}} = 0.233 + 0.078 = 0.311 \text{ €/m}^3$$

$$\text{Franja horaria punta: Costes operacionales} = a C_{\text{Electrodo}} + b C_{\text{Energía}} = 0.233 + 0.158 = 0.391 \text{ €/m}^3$$

Tras este estudio experimental a escala laboratorio, se confirma que la EC/EF se muestra como una metodología eficiente para eliminar turbidez, materia orgánica y color de aguas grises.

## Conclusiones

a) La turbidez de las aguas grises se eliminó desde valores de 160-170 NTU hasta valores de turbidez  $\leq 5$  NTU al cabo de 15 – 25 minutos de EC/EF, en condiciones experimentales óptimas (37.5 y 50 °C, 100 rpm).

b) La eliminación de materia orgánica en función del cátodo utilizado, y con ánodo de Aluminio, siguió la siguiente serie de rendimientos para los mismos tiempos de EC/EF (20-25 min): Cu (85.06 %) > Al (78.76 %) > C grafito (73.98 %).

c) Los SS generados al final de la EC/EF (20-25 min) utilizando ánodo de Al y diferentes cátodos fueron: cátodo de Al (699.33 mg/L) > cátodo de C grafito (544.45 mg/L) > cátodo de Cu (281.96 mg/L). d) Los costes operacionales entre 0.3 y 0.4 €/m<sup>3</sup> agua.

## Agradecimientos

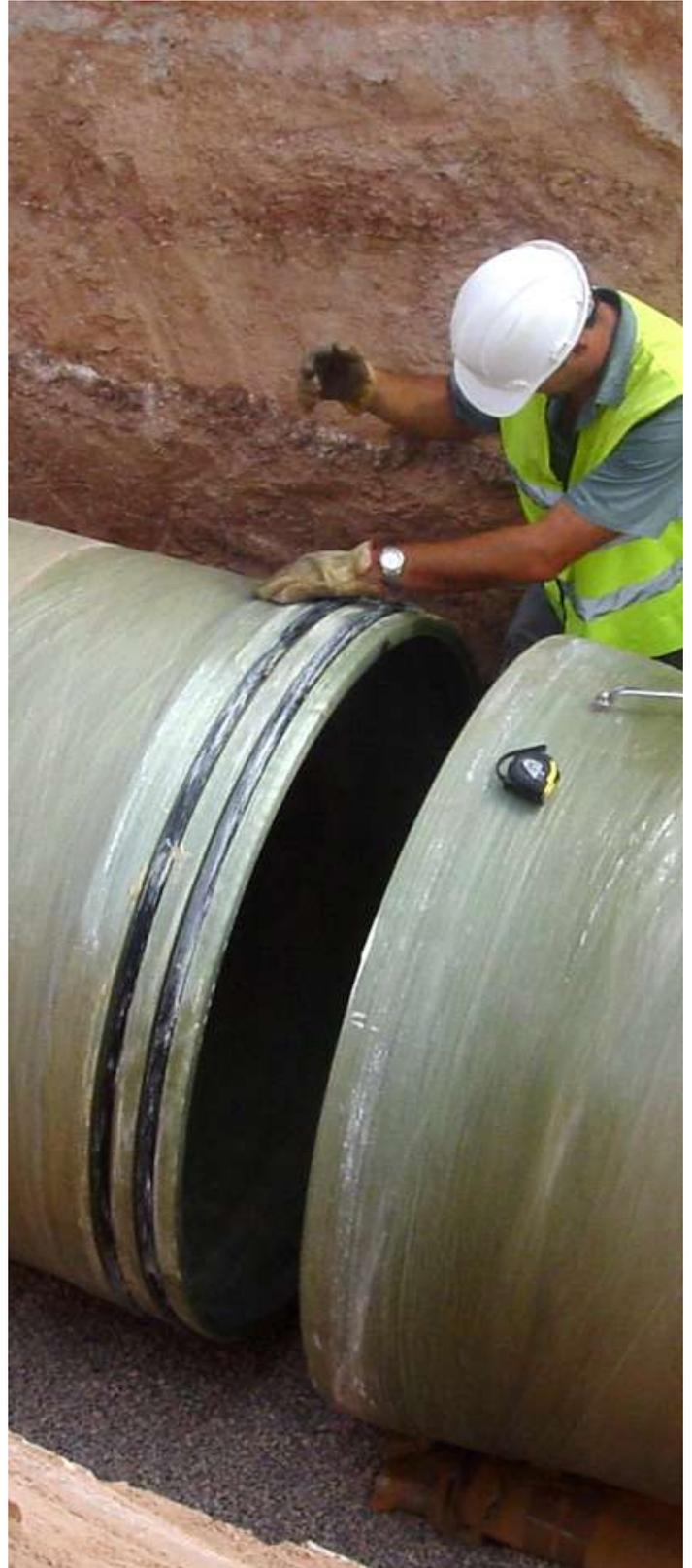
Los autores agradecen al Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) de la Unión Europea y a la Junta de Castilla y León, a través del Instituto para la Competitividad Empresarial de Castilla y León (ICE) la financiación a INDEPRO S.L. del proyecto DRAIN2WC, dispositivo sostenible de reutilización de aguas grises para utilización en inodoros, que ha dado origen a este trabajo.

## Referencias

1. Li, F. y cols., 2009. Science of the Total Environment, 407, 3439-3449.
2. Jabornig, S., 2013. Urban Water Journal 1-9.
3. Pidou, M. y cols., 2008.. Chemosphere 71 (1), 147-155.
4. Cuba, M., 2020. Tesis de Master, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
5. Eriksson, E. y cols., 2002. Urban Water 4, 85 -104.
6. WHO, 2006. Geneva, Switzerland. World Health Organization.
7. Li, F. y cols., 2009. Science of the Total Environment 407, 3439- 3449.
8. Janpoor, F. y cols., 2011. J. Chem. Technol. Biotechnol. 86, 1113-1120.
9. Karichappan, T. y cols., 2014. J. Environmental Health Science & Engineering 12:29, 1-8.
10. Ghosh, D. y cols., 2008. J. Hazard. Materials 155, 135-143.

# 6

**OTROS**  
**(6.1 ARTÍCULO INVITADO SOBRE**  
**CIBERSEGURIDAD Y REUTILIZACIÓN)**



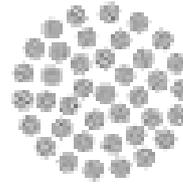
# ARTÍCULO 6.1

## SMART WATER Y CIBERSEGURIDAD, ¿ESTAMOS SEGUROS?

### Introducción

Justin Bieber tiene apenas 27 años y durante su corta vida "la humanidad ha quemado el 41% de todos los combustibles fósiles que ha consumido en su historia".

Frente a ese dato tan demoledor es necesario actuar para acabar con las emisiones y los efectos del cambio climático antes del 2050. Estos efectos y una demanda creciente forman un cóctel explosivo que afectará nuestras vidas y la disponibilidad de los recursos naturales - entre ellos los hídricos-.



**indra**

Los efectos del cambio climático, el aumento demográfico, la concentración de la población en ciudades o la intensificación de los fenómenos hidrometeorológicos extremos son un cóctel explosivo que afectará nuestras vidas y la disponibilidad de los recursos hídricos.

El uso de la tecnología no es la solución nos ayudará a gestionar con más eficiencia los recursos, y la denominada SMART WATER puede ser la solución para la gestión eficiente del agua. Ahora bien: ¿estamos seguros?

Se conocen ataques terroristas sobre las infraestructuras hídricas desde en Italia, Oriente Medio, China hasta en EEUU. El incremento de la sensorización y de la información sobre la operación (OT) es una vulnerabilidad frente a posibles ataques malintencionados, terrorismo, vandalismo, hackers, etc.

Por todos esos riesgos tanto en la parte de IT como especialmente de OT en cada uno de los principales procesos del ciclo del agua deben afrontarse con criterios de ciberseguridad en ambos ámbitos.

Afortunadamente la sociedad cuenta con una ayuda tecnológica cada día más poderosa que permite hacer frente a estas amenazas.

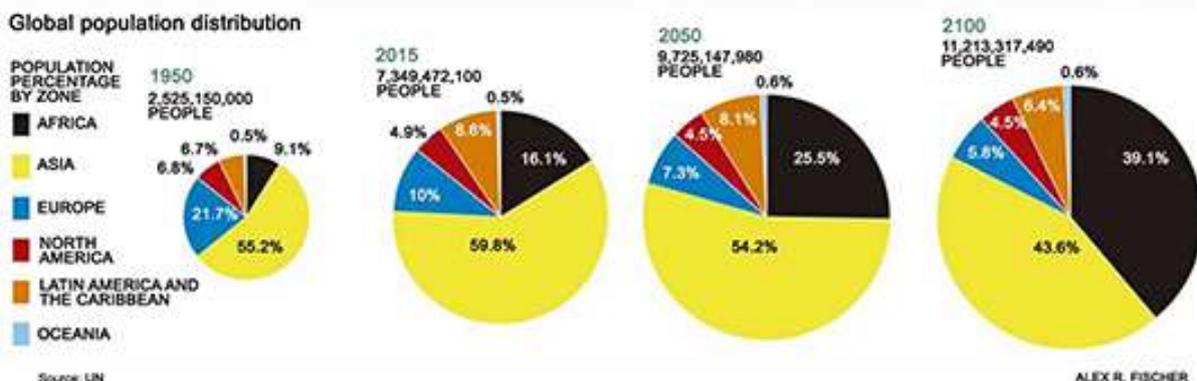


Figura 6.1\_1 Proyecciones de la población mundial (1)

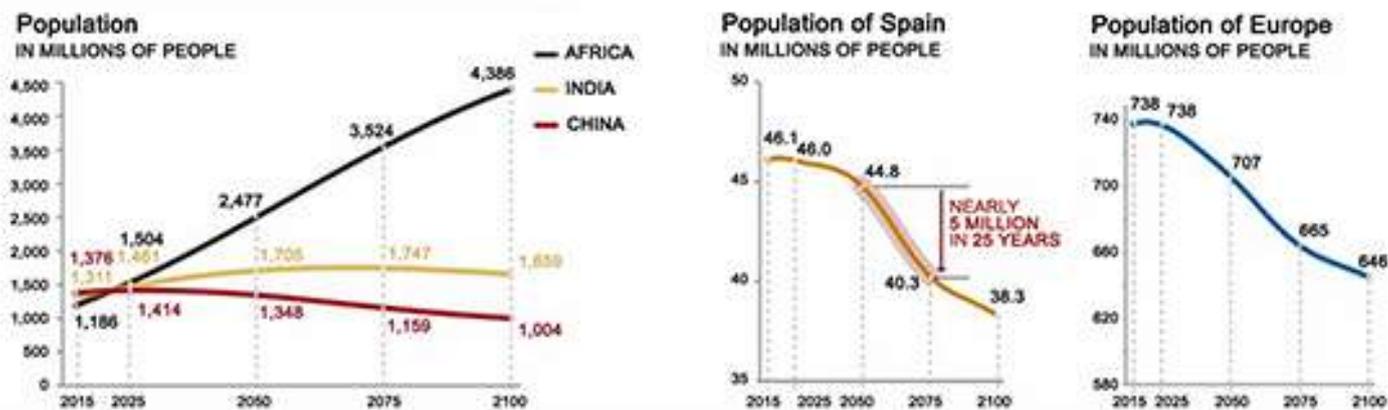


Figura 6.1\_2 Proyecciones de la población mundial (2)

## Soluciones de gestión inteligente del agua Smart Water

La tecnología no puede ser la única solución, pero su uso nos ayuda a gestionar esos recursos tan preciosos y la SMART WATER es la solución para la gestión eficiente del agua.

Las soluciones de gestión inteligente del agua (Smart Water) se pueden aplicar en múltiples ámbitos:

- En grandes cuencas hidrográficas, automatizando la medida de caudal y otros parámetros físicos. Además, pueden gestionar la apertura/cierre de diversos elementos mecánicos de las infraestructuras de control.
- En potabilización, habilitando el control y monitorización agregada y en remoto de bombas y sensores de nivel, turbidez o cloro..., ubicados en ETAP y depósitos.
- En distribución, integrándose con el Smart Metering para obtener lecturas remotas automáticas y tarificación del consumo. También pueden incorporar soluciones de detección de fugas.
- En depuración, automatizan la recolección agregada de medidas de parámetros físicos para determinar la bondad del proceso en EDAR.

Estas soluciones "Smart Water" permiten optimizar la gestión del agua gracias a la utilización de componentes clave como:

- Sensores: Miden parámetros físicos y se conectan a dispositivos IoT, capaces de almacenar, pre-procesar y enviar de manera continua la información y alertas que se van produciendo a una plataforma IoT.

## PALABRAS CLAVE:

**AGUA  
ENERGÍA  
CIBERSEGURIDAD  
SOSTENIBILIDAD  
TECNOLOGÍA**

# PROYECTO SMART-WATER

**Maurizio De Stefano**  
**Director**  
**Energy & Utilities**  
**mdestefano@indra.es\***

- Comunicaciones: M2M gestionadas para tener control automático, en remoto y tiempo real del estado de las líneas de comunicación, factor clave en entornos desatendidos.
- Plataforma IoT: Traduce en tiempo real los protocolos y lenguajes utilizados por cada tipo de dispositivo y fabricante a uno común, para después pre-procesar la información y exponerla, agregada, a las aplicaciones de visualización o consumo de los datos. Esto permite a los gestores abstraerse de la complejidad tecnológica y, a su vez, disponer de toda la información necesaria para la óptima toma de decisiones.

Dichas soluciones ayudan a las utilities de agua a ser más eficientes y tomar decisiones utilizando IoT, IA, big data, soluciones de movilidad, etc.

## Discusión y recomendaciones

Ahora bien: ¿estamos seguros?

Si hubiera un incidente en la calidad del agua, se produciría un impacto donde nos sentimos más seguros, en casa. Los principales efectos de un ataque contra las infraestructuras del agua pueden ser desde la parada del suministro, a la contaminación o la afección a terceros con inundaciones o vertidos de aguas residuales no tratadas a ecosistemas vulnerables.

Llegando incluso al extremo, se podrían plantear un atentado “virtual”, simulando la contaminación intencionada de un sistema y amenazando directamente a una ciudad. El efecto inmediato sería la paralización del consumo de agua en dicha ciudad, el suministro mediante camiones cuba durante una semana y ser el foco de la prensa internacional, con la consiguiente propaganda pretendida.

De esta forma habrían atacado al elemento más vulnerable de un sistema de abastecimiento de agua potable; esto es, a la confianza de la población en el sistema de suministro.

La confianza de la población es un intangible de enorme fragilidad. Se puede perder rápidamente y cuesta mucho tiempo y esfuerzo recuperarla, tanto es así que, después de un evento de vulneración, puede quedar “maltrecha” de forma permanente para el futuro.

A pesar de la baja difusión de estas noticias, se conocen ataques terroristas sobre las infraestructuras hídricas desde Italia, Oriente Medio, China hasta EE. UU. Lo que es más, la USEPA y el USDHS colaboran para la construcción del Banco de Pruebas de Seguridad Hídrica.

Este incremento de la sensorización y el incremento exponencial de la información sobre la operación (OT) es una vulnerabilidad frente a posibles ataques malintencionados. Por todos esos riesgos tanto en la parte de IT como especialmente de OT en cada uno de los principales procesos del ciclo del agua deben afrontarse con criterios de ciberseguridad en ambos ámbitos.

Afortunadamente la sociedad cuenta con una ayuda tecnológica cada día más poderosa que nos permite afrontar estas amenazas de manera más firme.

# SOCIOS DE LA PTEA 2021



# SOCIOS OBSERVADORES



# Ventajas de ser socio de la PTEA



## Papel nacional e internacional de la Plataforma

-  Participación en Grupos Interplataforma: Economía Circular, Ciudades Inteligentes y BigData e Inteligencia Artificial
-  Promoción en los eventos más importantes del sector
-  Movilización de fuentes de financiación pública y privada
-  Reducción de la fragmentación en las actividades de Investigación y Desarrollo
-  Efecto positivo sobre una amplia gama de políticas

### Posicionamiento como agente del sector

- Participación en el Catálogo de socios
- Publicidad en la web PTEA
- Participación en los grupos de trabajo técnico

### Por qué hacerse socio

- Integración en la mayor red de I + D + i en agua de España
- Cartas de apoyo a proyectos
- Búsqueda de socios
- Ventajas especiales y descuentos para eventos organizados por la PTEA

### Estar al día de los avances del sector

- Boletín informativo de noticias y eventos
- Información sobre cursos, seminarios, jornadas, etc.
- Información sobre convocatorias nacionales e internacionales

[www.plataformaagua.org](http://www.plataformaagua.org)

## HAZTE SOCIO Y PARTICIPA EN LA PTEA

### Impulso del sector nacional

- Apoyo al sector nacional
- Contacto con las Administraciones Públicas como referente del sector



### Difusión de sus actividades

Fomento de sus casos de éxito. Ejemplo:

- Jornadas
- Eventos
- Ferias
- Revista IDiagua



## In memoriam. Profesor Ramón Llamas

*La Plataforma Tecnológica Española del Agua (PTEA) desea reconocer la inmensa labor y despedir calurosamente al profesor Ramón Llamas, quien tristemente ha fallecido el pasado 11 de diciembre de 2021.*

*La trayectoria del profesor y su legado son tan brillantes como abrumadores, siempre empañados con un matiz disidentemente constructivo, picante y especial.*

*Desde la PTEA agradecemos al profesor su ayuda y aportaciones, pues demostró sobradamente su confianza hacia la Plataforma, intervino en alguno de nuestros foros y nos invitó a realizar presentaciones en el marco de la Fundación Botín.*

*Los alumnos del profesor agradecemos igualmente su actitud, aptitud, sabiduría compartida y legado.*

*Destacamos el artículo publicado en Hydrogeology Journal en 2017, "Professor Ramón Llamas: a founding father of hydrogeology in Spain", escrito por Pedro Martínez-Santos y Fermín Villarroya:*

*<https://eprints.ucm.es/id/eprint/47211/1/Professor%20Ram%C3%B3n%20LLamas1.pdf>*

*Un vídeo de la actividad del profesor se encuentra en: [https://youtu.be/ut\\_OwE3BKA4](https://youtu.be/ut_OwE3BKA4)*



Expresidente de la PTEA (dcha) y Secretario Técnico (izda.) junto con el profesor Llamas en un acto de iAguA. Julio de 2014



# Revista sobre tendencias en I+D+i de la Plataforma Tecnológica Española del Agua

