

# INFORME DIVULGATIVO

## ESTUDIO SOBRE EL PAPEL DE LA DIGITALIZACION Y EL MACHINE LEARNING EN LA GESTIÓN DE LAS INSTALACIONES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA COMUNITAT VALENCIANA

Vicent Hernández Chover  
Lledó Castellet Viciano  
Agueda Bellver Domingo  
Francesc Hernández Sancho



Càtedra de  
Transformació del  
Model Econòmic  
Economia Circular  
en el Sector de l'Aigua



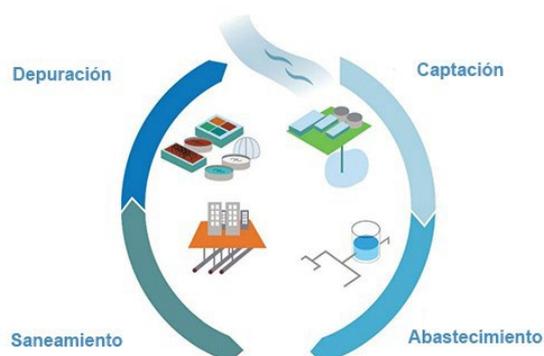
## INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los recursos básicos y esenciales para la vida y también es un componente estratégico de las economías de los distintos países del planeta. El sector del agua en el marco de la transición ecológica y la economía circular presenta un enorme potencial económico. Según los planes hidrológicos de cuenca, la demanda estimada en España para el año 2021 fue del orden de 32.000 hm<sup>3</sup>/año. En cuanto a los usos, el principal es el regadío y usos agrarios, que supone aproximadamente el 80,5% de esta demanda, a continuación, el abastecimiento urbano representa el 15,5% y el resto recae en el uso industrial. En cuanto al origen de los recursos hídricos destinados a abastecer las distintas demandas de agua, cerca del 97% proviene de recursos superficiales y los subterráneos y, únicamente el 2,8% del total proviene de recursos no convencionales (aproximadamente 815 hm<sup>3</sup> anuales).

En este sentido, los recursos hídricos presentes en un territorio son muy limitados en muchos casos y su disponibilidad resulta cada vez más restringida. La demanda tiene un crecimiento progresivo debido principalmente, no solo al crecimiento de la población, sino también al desarrollo socioeconómico y a los patrones de consumo. En consecuencia, se espera que la demanda continúe aumentando, con una tasa del 1% hasta 2050, lo que representa un incremento del 20% hasta algo más del 30% sobre el nivel actual.

En este contexto, optimizar los usos de agua, así como aprovechar los recursos hídricos que somos capaces de generar supone, más que una oportunidad, una necesidad presente y futura para garantizar la sostenibilidad económica y social. Por consiguiente, un análisis pormenorizado del ciclo urbano del agua puede ayudar a alcanzar los objetivos propuestos en materia hídrica, es decir, optimizar los consumos y redirigir los excedentes que somos capaces de generar a los usos o sectores estratégicos que garanticen la sostenibilidad presente y futura del país.

### Ilustración 1 Ciclo urbano del agua



El ciclo urbano del agua y la protección del agua están estrechamente relacionados en la gestión sostenible de los recursos hídricos en entornos urbanos, y ambos son fundamentales para garantizar el acceso a agua limpia y segura para las comunidades. El ciclo urbano del agua lo forman todas las infraestructuras necesarias para el proceso de tratamiento del agua, distribución, recogida mediante sistemas de alcantarillado y posterior tratamiento de depuración antes de su vertido al medio. Este último punto, el sector de la depuración y reutilización de aguas residuales supone una oportunidad debida precisamente a los recursos de agua no convencionales que son capaces de generar.

La tecnología de la que disponemos actualmente en materia de depuración y regeneración permite alcanzar un nivel de calidad de los efluentes acorde con los criterios de un gran número de usos, sin embargo, este excedente hídrico que producimos en la actualidad no ha alcanzado los niveles que económicamente señalaríamos como óptimos. La siguiente tabla muestra el volumen de aguas residuales tratadas y la reutilizada y, tal y como se observa el porcentaje aprovechado se sitúa en torno al 10%. (Tabla 1).

*Tabla 1 Volúmenes de aguas residuales tratadas (hm<sup>3</sup>), España. Fte: Instituto Nacional de Estadística 2023.*

	2020	2018	2016	2014
Volumen de aguas residuales tratadas	13.404.418	13.726.524	12.989.934	13.585.619
Volumen total de agua reutilizada	1.457.620	1.534.123	1.350.536	1.454.466

Además, las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) son capaces de recuperar recursos del agua residual como, por ejemplo; los nutrientes (nitrógeno y fósforo) para la posterior producción de fertilizantes, generar biogás y energía a partir de los residuos

orgánicos, producir bioplásticos, materiales de construcción (vidrio), e incluso recuperar adsorbentes, enzimas y proteínas del agua residual. En este contexto, **las tecnologías digitales** ofrecen un gran potencial. Permiten optimizar la gestión, monitorizar los procesos de tratamiento y distribución del ciclo urbano del agua lo cual supone una oportunidad para modernizar la gestión del agua, avanzar hacia una gestión más eficiente y sostenible, mejorando la gobernanza de la gestión y redundando en importantes ahorros y aprovechamiento del recurso.

La digitalización del ciclo urbano del agua, y más concretamente en el aprovechamiento y reutilización del agua tratada es un claro ejemplo de modelo de ciudad inteligente “Smart city”, un modelo en el que el desarrollo urbano se basa en la sostenibilidad y es capaz de responder adecuadamente a las necesidades básicas de instituciones, empresas y de los propios habitantes. En el ámbito de la gestión de las EDARs, la combinación de tecnologías de depuración con modelos numéricos y sistemas de ayuda a la decisión permite la gestión inteligente de estas instalaciones, monitorizar la recuperación de aguas residuales y su reutilización en el marco de la Economía digital, gemelos digitales y el telecontrol de los vertidos permiten desarrollar ciclos de agua con modelos empresariales innovadores y regenerativos. Otro aspecto en el que la digitalización ofrece numerosas ventajas es la gestión centralizada de los activos físicos de estas instalaciones. Su monitorización constante y la aplicación de algoritmos permiten reducir el riesgo de averías y los costes asociados al ciclo de vida en base a datos históricos, así como una mejor planificación de las tareas de mantenimiento más efectivas y el establecimiento de un plan de renovación e inversión en nuevos equipos e infraestructura.

## Bio-factorías y economía circular

Más allá de la gestión de los procesos y tratamiento de depuración de aguas residuales, en el marco de la economía circular, el concepto de EDAR experimenta un avance significativo en su definición, entendiendo estas infraestructuras como bio-factorías que, además de producir agua en cantidad y calidad adecuada, son capaces de recuperar un gran número de recursos; bioplásticos, enzimas, energía, fertilizantes (nutrientes) y fangos para abono agrícola, entre otros ejemplos. Toda una serie de recursos que además de aportar sostenibilidad permiten ser generados de manera continua, pudiendo

reemplazar parte de los recursos naturales usados. Por ejemplo, en el caso del fósforo, en mayo de 2014, la Comisión Europea lo catalogó como materia prima crítica, por lo que las fuentes alternativas han ganado importancia. Estimaciones recientes en cuanto al consumo de fósforo, muestran que usando tecnologías disponibles podemos recuperar hasta el 30% del mineral utilizado actualmente en la agricultura para el 2030.

El nitrógeno es otro nutriente de elevada importancia en la agricultura, al igual que el fósforo puede ser recuperado del agua residual, aportando de este modo una materia prima inagotable. Por supuesto, el agua que son capaces de generar en un contexto de cambio climático supone autosuficiencia, fiabilidad y garantía de suministro. En este sentido, entornos industriales con elevada dependencia del agua pueden garantizar su sostenibilidad empleando agua regenerada en sus procesos industriales, como puede ser el caso del sector cerámico en la región mediterránea. En definitiva, el uso de agua regenerada supone liberar recursos de mejor calidad para usos más restrictivos en relación con la calidad requerida.

La digitalización permite proyectar los volúmenes de agua que las infraestructuras van a recibir con demandas de agua y calidades asociadas, ya sea para uso agrícola o industrial. Conectar la oferta de agua regenerada con la demanda permite adecuar la calidad del agua residual a los criterios exigidos, pudiendo de este modo ofertar distintas calidades (a, b, c, etc.). La distribución de distintas calidades de agua regenerada permite optimizar su uso a la par que regenerar únicamente los volúmenes de cada calidad que van a ser suministrados. Gracias a la digitalización y posterior análisis de datos, los consumos, así como los precios asociados al agua pueden tener un comportamiento dinámico, adaptándose de este modo la oferta y la demanda en tiempo real.

En cuanto a la recuperación del nitrógeno y el fósforo del agua residual, sabemos que su liberación en exceso en cuerpos de agua naturales puede causar problemas de eutrofización. A la par, en el sector agrícola el fósforo y el nitrógeno son los principales nutrientes empleados como fertilizantes, en este sentido, la ONU reclama medidas para usar mejor este fertilizante y producirlo de forma sostenible, extrayéndolo de las aguas residuales. De acuerdo con la ONU, la roca fosfórica es la principal fuente de fósforo que existe en el mundo para la producción de fertilizantes sintéticos. Sin embargo, su disponibilidad es cada vez más limitada y, con una población en aumento, es posible que

sea insuficiente para satisfacer las demandas agrícolas y, en definitiva, alimentarias. Las estaciones depuradoras son capaces de extraer ambos minerales (estruvita); un mineral con altas concentraciones de nitrógeno y fósforo, además de magnesio. Ya son numerosos los países que lo utilizan como fertilizante para los campos de cultivo por sus ventajas (lenta disolución), además de que disminuye el riesgo de contaminación del agua.

Si atendemos al mercado actual de fertilizantes, los precios de referencia internacionales han ido aumentando a lo largo de todo 2021, y muchas cotizaciones han alcanzado sus máximos históricos. Los precios de los fertilizantes vienen determinados por la interacción de la oferta y la demanda. Por lo que respecta a la oferta, i) los elevados y cada vez mayores precios de la energía y ii) las perturbaciones en el comercio y los elevados costes del transporte, mientras que por lo que respecta a la demanda, iii) los elevados precios de los cultivos y, por lo tanto, un nivel de asequibilidad alto. El uso de técnicas de análisis de datos permite conocer las cotizaciones diarias de los fertilizantes y, en consecuencia, ajustar el precio de los fertilizantes producidos en las EDARs con tal de optimizar su distribución a nivel agrícola. Esta información puede venir definida en etapas anteriores del proceso de tratamiento de aguas residuales, conocer las características y el volumen de agua que entra en la planta permite proyectar las cantidades de fertilizantes que podremos ofrecer al mercado, permitiendo planificar y abastecer la demanda de éstos.

Otro recurso que son capaces de generar son los fangos, se definen como subproductos sólidos resultantes del tratamiento de aguas residuales y pueden ser empleados como fertilizantes orgánicos en la agricultura gracias a contener nutrientes. Su uso en el sector agrícola contribuye a aliviar la salud de los suelos deficitarios de materia orgánica, mejorando sus características y dotándolos de una mayor capacidad para protegerse de la erosión, y en último término de la desertificación. Implementar la digitalización permite optimizar el canal de distribución del fango.

Existen diferentes variables que pueden ser monitorizadas para automatizar los envíos, ajustando las cantidades y calidades al terreno agrícola. Además, la localización geográfica puede ser de gran ayuda para optimizar las rutas de transporte, minimizando los tiempos totales de transporte y en consecuencia costes económicos y emisiones asociadas. Por otro lado, los precios asociados al fango pueden variar y adaptarse a las condiciones del

mercado, de modo que una mayor demanda de fangos puede generar leves aumentos de precio y viceversa, entre otros aspectos.

Por último, la energía generada en los procesos de tratamiento de aguas residuales es una práctica que puede ser beneficiosa tanto desde el punto de vista medioambiental como económico. En general, la energía generada en una EDAR proviene de fuentes renovables, como la digestión anaerobia de lodos y la captura de biogás. Una vez generada existen distintas opciones de distribución; autoconsumo, alimentación energética de instalaciones cercanas como edificios públicos, parques o incluso comunidades.

## Digitalización y su aplicación a los canales de comercialización y distribución

Un proceso adecuado de digitalización de los flujos de información permite un control más exhaustivo de los procesos a todos los niveles, desde predecir la demanda de agua hasta supervisar los diversos contaminantes presentes en el agua residual para planificar los tratamientos necesarios y garantizar su reutilización en los canales apropiados. La digitalización facilita el análisis de datos en varios sistemas informáticos, lo que permite el análisis en tiempo real de grandes volúmenes de datos, proporcionando una amplia gama de indicadores que contribuyen a optimizar la gestión de estas infraestructuras. Además, la digitalización permite evaluar la eficiencia de los tratamientos, incluyendo el consumo de energía y reactivos, y al agregar otras variables relacionadas con los activos de estas infraestructuras, se puede crear un gemelo digital del proceso completo. Los gemelos digitales son usados para simular múltiples escenarios como; variaciones de caudales, precipitaciones y cargas orgánicas, entre otros aspectos.

En el marco de la economía circular y los beneficios de la digitalización aplicados a las EDARs podemos entender dos aspectos fundamentales, en primer lugar, los beneficios que representa su aplicación en la gestión de estas instalaciones. Tal y como se ha explicado anteriormente, facilita la optimización de los procesos y aumenta la eficiencia de los tratamientos.

En segundo lugar, estas instalaciones pueden ser entendidas como bio-factorías, en lo que a generadoras de recursos se refiere. En este sentido pasan a formar parte del mercado,

jugando un papel de agente económico capaz de generar recursos con un valor económico y satisfacer una demanda determinada. Más allá de los aspectos sociales y ambientales, las bio-factorías como cualquier otra industria están sujetas a restricciones que vienen definidas por la propia oferta de recursos que son capaces de generar y aspectos básicos de la demanda. Nos encontramos ante un ejercicio de maximización del beneficio, en el que estos agentes económicos deben equilibrar las funciones de oferta y demanda con el objetivo de asegurar la sostenibilidad del proceso. Este último aspecto resulta de elevada importancia y por este motivo el presente caso de ejemplo evalúa la circularidad aplicando una óptica económica que analiza la potencialidad de la tecnología en lo que respecta a la oferta y demanda de los recursos generados.

La búsqueda del equilibrio de mercado implica igualar las cantidades y precios ofrecidos entre diferentes agentes económicos, en este caso particular los agentes económicos que intervienen son estaciones depuradoras como oferentes y los consumidores de estos recursos, como demandantes (agricultores, industrias, servicios públicos...). Los agricultores pueden usar el agua previamente regenerada para el riego de los cultivos y/o los fertilizantes (nitrógeno y fósforo) en sustitución de los actuales fertilizantes industriales. Por otro lado, algunas industrias, como la cerámica, papel o textil, requieren elevadas cantidades de agua para sus procesos industriales, por lo que esta fuente de agua no convencional representa un recurso estratégico en algunas zonas con estrés hídrico o lugares donde el agua tiene una elevada concentración de contaminantes.

Otro agente económico son los servicios públicos, requieren agua para el riego de parques, jardines y baldeos de calles, por lo que este recurso puede provenir de las estaciones de depuración de aguas residuales, disminuyendo de este modo la presión sobre el recurso natural. Además, la electricidad producida por cogeneración puede ser utilizada en la propia planta o inyectada en la red para su uso en alumbrado público, energía limpia que, recordemos, evita la emisión de gases de efecto invernadero. Estos son algunos de los ejemplos de cómo la EDAR puede jugar un papel estratégico, ofreciendo toda una serie de recursos capaces de sustituir a los actuales y, por consiguiente, avanzando en la implementación de la economía circular en el sector. En este sentido, el análisis de las diversas potencialidades que la digitalización ofrece en el canal de comercialización sirve como ejemplo ilustrativo e incentivador para numerosas

empresas del sector, ofreciendo un punto de vista que logra enriquecer las potencialidades que la digitalización aporta al mercado, maximizando de este modo la utilidad de los recursos generados.

La demanda del mercado viene definida como la suma de los productos o servicios que los consumidores están dispuestos y son capaces de adquirir a un precio y en un momento dado, por lo que la producción, el precio y la disponibilidad de estos productos juega un papel relevante en la función. Conocer la demanda permite segmentar a los clientes según sus necesidades o preferencias, ajustando de este modo los precios a las diferentes variables que intervienen; precios de productos sustitutivos, factores demográficos, cantidades requeridas, cambios en las condiciones económicas y el volumen de ingresos de nuestros consumidores entre otras variables. El conjunto de aspectos que intervienen obliga en muchas ocasiones a optimizar el canal de distribución y comercialización, en el caso de ejemplo, la optimización de las rutas de distribución y comercialización de fangos, agua, fertilizantes o electricidad permite minimizar los costes maximizando de este modo el beneficio generado a la par que disminuyendo las emisiones generadas, en caso de requerir combustible para su transporte.

La digitalización permite alinear la oferta de recursos/productos y la demanda de estos por parte de otros sectores. Por ejemplo, las depuradoras generan elevadas cantidades de fango que puede ser aprovechado por los agricultores próximos a la planta, el coste del fango puede variar dependiendo de los productos sustitutivos, como pueden ser los abonos nitrogenados, cuyo coste ha incrementado estos últimos años debido precisamente a la escasez de recursos y los elevados costes energéticos que implica su transformación. En este sentido, el precio del bien sustitutivo (abonos nitrogenados) permite ajustar el precio del recurso generado (fangos), de modo que algunas metodologías, como el Machine learning, pueden anticipar tanto el precio del recurso generado, como la cantidad y calidad ofrecida.

Los resultados generados son dinámicos debido a que las variables de las que depende fluctúan continuamente. Entre las variables necesarias para la modelización se encuentran: el volumen de agua residual tratado, la concentración de contaminantes, los costes del proceso (energía, reactivos, personal), el precio del bien sustitutivo y otras variables relacionadas con la demanda (cantidad, distancia y calidad demandada). Tal y

como se puede intuir, los tomadores de decisiones conocerían con anticipación las cantidades que pueden ofrecer al mercado, así como los precios asociados, con tal de ofrecer finalmente un recurso que coincida con la demanda usando el precio como incentivo para su uso.

La recuperación de nutrientes (fertilizantes) es otro ejemplo expuesto anteriormente, conocer la calidad del agua residual a la entrada de la planta, el volumen tratado y las variables económicas asociadas tanto al recurso generado como a los fertilizantes industriales (recursos sustitutivos) permitiría ofrecer unas cantidades concretas y precios alineados con los intereses de los potenciales usuarios (principalmente agricultores). Además, la posibilidad de almacenar estos recursos permitiría ajustar las cantidades ofrecidas según los precios de mercado, maximizando en este último caso los beneficios generados.

Por último, uno de los recursos con mayor valor que genera una EDAR es el agua, una vez depurada puede ser regenerada con tal de ajustar la calidad del recurso a distintos usos (agrícolas, industriales y servicios públicos). Con tal de adaptar el recurso a los distintos usos, es posible diferenciar dos calidades generales, en primer lugar, agua depurada sometida a un tratamiento terciario que puede ser apta para determinados usos como la limpieza de equipos o instalaciones y otros procesos que no requieren agua de alta calidad, siendo el tratamiento más económico y, en segundo lugar, agua regenerada de alta calidad obtenida a partir de un tratamiento terciario avanzado con sistema de membranas. De este modo, la EDAR puede ofrecer dos calidades y, por consiguiente, dos precios distintos ajustados a los costes generados en los procesos de tratamiento.

En este caso, las tarifas propuestas se fijan a partir de las tarifas de los suministros actuales, asegurando un margen industrial para garantizar la sostenibilidad del proyecto. En el caso de España, cada municipio diseña sus propias tarifas, que son gestionadas por los ayuntamientos, que delega o comparte con empresas privadas y que son los encargados de fijar la estructura tarifaria y los precios a cobrar a los usuarios. Esto puede provocar diferencias en los precios que pagan los usuarios en las distintas comunidades autónomas, provincias e incluso a nivel local. Siguiendo la fijación de precios basados en la competencia, las regiones y municipios donde las empresas pagan el precio más alto por el agua ( $m^3$ ) son, en términos estratégicos, usuarios potenciales para la

implementación de proyectos de reutilización del agua. Sin embargo, son los aspectos relacionados con los costes del proyecto los que finalmente determinan el precio mínimo para alcanzar la viabilidad económica.

## CONCLUSIONES

El trabajo expone la situación actual del sector del agua, así como las potencialidades que ofrece más concretamente el sector de la depuración de aguas residuales. Afronta el reto de la reutilización desde un prisma económico con el objetivo de aportar sostenibilidad en el uso de un recurso natural escaso que, debido a aspectos como el crecimiento de la población y el desarrollo económico, está experimentando un continuo crecimiento del consumo, limitando aún más si cabe su disponibilidad presente y futura. Con tal de ofrecer soluciones al sector presenta las enormes posibilidades que tiene la digitalización y las metodologías que incluye con tal de optimizar, en términos generales, los usos y beneficios económicos que son capaces de generar estas infraestructuras, las estaciones depuradoras de aguas residuales. Una de las metodologías que mayor impacto positivo está generando es el Machine learning que permite aprovechar las enormes cantidades de datos para, una vez procesados, convertirlos en información útil para la toma de decisiones.

El trabajo revisa brevemente los recursos que estas infraestructuras son capaces de generar y, en consecuencia, en el marco de la economía circular, presenta estas infraestructuras como bio-factorías. Se aborda el papel que estas infraestructuras juegan en el mercado como nuevos agentes económicos que generan una serie de recursos capaces de satisfacer una demanda específica. Los recursos generados, al igual que sucede en otras industrias tienen un valor de mercado que competirá con los productos actualmente sustitutos, en muchos de los casos. A modo de síntesis, el agua, los fangos para el abono agrícola, los fertilizantes y la energía son los vectores principales.

Más allá de los aspectos sociales y ambientales, las bio-factorías están sujetas a restricciones que vienen definidas por la propia oferta de recursos que son capaces de generar y aspectos básicos de la demanda. Por consiguiente, se presenta un ejercicio de maximización del beneficio, en el que estos agentes económicos deben de equilibrar las

funciones de oferta y demanda con el objetivo de asegurar la sostenibilidad del proceso. Este último aspecto resulta de elevada importancia y por este motivo el presente caso de estudio evalúa la circularidad aplicando una óptica económica que analiza la potencialidad de la tecnología en lo que respecta a la oferta y demanda de los recursos generados. En conclusión, el trabajo aborda la potencialidad de la digitalización aplicada a los canales de comercialización y distribución, permitiendo aportar sostenibilidad económica a estos nuevos agentes de mercado.