



PLATAFORMA
TECNOLÓGICA
ESPAÑOLA DEL AGUA

REVISTA

IDIAGUA

REVISTA SOBRE TENDENCIAS EN LA I+D+I DE LA
PLATAFORMA TECNOLÓGICA ESPAÑOLA DEL AGUA (PTEA)

7ª EDICIÓN. 2025.

INFRAESTRUCTURAS
DEL AGUA



EDICIÓN, DISEÑO Y MAQUETACIÓN

Dña. Paula Menéndez

Executive Manager de Plataforma Tecnológica Española del Agua (PTEA)

pmenendez@ptea.es

+34 671 475 721

Secretaria Técnica de PTEA

secretariatecnica@ptea.es

www.ptea.es

REVISORES COLABORADORES

Dña. Alicia Andreu (ITC)- Secretaria General de PTEA

D. Félix Francés (IIAMA-UPV)- Vicepresidente de PTEA

D. Jordi Cros (ADASA)- Vocal de la Junta Directiva de PTEA

D. Jorge García (AINIA)- Vocal de la Junta Directiva de PTEA

D. Juan Sobreira (ITG)- Vocal de la Junta Directiva de PTEA

Dña. Marián Serrano (GLOBAL OMNIUM)- Presidenta de PTEA

Dña. Raquel López (CARTIF)- Vocal de la Junta Directiva de PTEA



REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

CARTA DE LA PRESIDENTA DE LA PTEA

Estimada comunidad de la PTEA,

Es para mí un honor y una responsabilidad que asumo con gran entusiasmo dirigirme a vosotros por primera vez desde las páginas de nuestra revista IDiAGUA. Como nueva Presidenta de la Plataforma Tecnológica Española del Agua (PTEA), quiero comenzar estas líneas expresando mi más sincero agradecimiento a todas las entidades asociadas y colaboradoras: universidades, centros de investigación, empresas y administraciones públicas. Vuestra contribución diaria y vuestro compromiso con la innovación son los cimientos que permiten a esta red de cooperación público-privada ser el referente en el fomento de la I+D+i en el sector del agua en España.

Esta edición de la revista coincide con un hito significativo en la historia de nuestra organización, siendo la primera vez que una mujer asume la presidencia de la PTEA. Este hecho converge con el lanzamiento de este número que en el marco de la celebración del **22 de marzo, Día Mundial del Agua 2026**, bajo el lema **“Donde fluye el agua, crece la igualdad”**.



Marián Serrano Sánchez
Presidenta de la PTEA

En este año la comunidad internacional pone el foco en el acceso al agua potable y al saneamiento no solo como servicios básicos, sino como derechos humanos inalienables y factores determinantes para alcanzar la igualdad de género y la justicia social. Me gustaría destacar esta confluencia de circunstancias en este año para reforzar nuestro propósito: trabajar para que la ciencia y la tecnología sea, ante todo, herramientas de equidad.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Nos encontramos en un momento histórico de una complejidad sin precedentes. El contexto actual nos obliga a repensar la gestión de las **Infraestructuras del Agua** bajo una óptica multidimensional donde lo geopolítico, lo medioambiental y lo socioeconómico se entrelazan. El agua se ha consolidado como un activo estratégico y un factor de seguridad nacional. La creciente inestabilidad global y la necesidad de soberanía tecnológica nos exigen infraestructuras resilientes y autónomas.

Como se está viendo en diferentes foros del sector, la protección de nuestras instalaciones críticas frente a amenazas híbridas y la integración de tecnologías duales —civil y defensa— son ya una prioridad estratégica para garantizar la continuidad del suministro en cualquier escenario. Por otro lado el cambio climático ya no es una amenaza lejana, sino una realidad que se manifiesta en fenómenos hidroclimáticos extremos, desde sequías prolongadas hasta inundaciones devastadoras.

Nuestras infraestructuras deben evolucionar desde modelos rígidos hacia sistemas flexibles y circulares que permitan la regeneración y el máximo aprovechamiento de cada gota. En el contexto económico y social, la inflación, la crisis de suministros y las nuevas exigencias regulatorias en materia de sostenibilidad imponen una presión adicional sobre los costes de operación y mantenimiento.

En este escenario, la digitalización y la eficiencia no son opciones, sino, requisitos imprescindibles para nuestro sector. Socialmente, la gestión del agua debe responder a la demanda de transparencia y participación ciudadana, asegurando que la innovación mejore realmente la vida de las personas.

En este contexto, este número de IDiAGUA ha sido diseñado para reflejar precisamente cómo nuestra comunidad investigadora y empresarial está respondiendo a estos desafíos.

A través de los artículos seleccionados para esta edición, exploramos las soluciones más vanguardistas que se enmarcan en la hoja de ruta de la **Agenda Estratégica de la PTEA 2024-2026** en su pilar temático de “Infraestructuras del Agua”, tocando diferentes ámbitos.

Ante la necesidad de blindar digitalmente nuestros sistemas, contamos con marcos de trabajo esenciales como el presentado por **INCIBE** a través de **ES-ISAC Aguas**, que refuerza la ciberseguridad hídrica nacional frente a vulnerabilidades industriales y bajo el cumplimiento de la Directiva NIS2. En esta misma línea de integridad digital, **Global Omnium** nos muestra cómo asegurar la calidad del dato mediante modelos IFC en el marco de los **PERTE**, una pieza esencial para la digitalización de las infraestructuras. Igualmente **ADASA Sistemas** aborda la ciberseguridad integral de sistemas IT y OT, mientras que el **Catalan Water Partnership (CWP)** presenta **FLUENT 2.0**, una plataforma data-driven para priorizar inversiones en redes de abastecimiento.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

La adaptación física de nuestras redes también cobra protagonismo. Mientras **ADASA Sistemas** explora la transición hacia un alcantarillado inteligente mediante gemelos digitales, entidades como la **Confederación Hidrográfica del Júcar** y **Global Omnium** comparten la valiosa experiencia técnica de emergencia tras la DANA de 2024 para restablecer el Canal Júcar-Turia. La resiliencia se manifiesta también en la gestión de nuestros recursos subterráneos, como demuestra la innovadora experiencia de recarga gestionada de acuíferos en el **Sondeo Arnachos**, promovida por **TRAGSA**.

La sostenibilidad y la economía circular son, por supuesto, pilares de este número. Proyectos como **AQUACYCLE**, donde participa **el CIEMAT**, o la histórica experiencia de **Can Cabanyes** de la **UPC**, evidencian el potencial de las Soluciones Basadas en la Naturaleza para la regeneración de aguas. Estos avances se complementan con herramientas de decisión para la reutilización agrícola desarrolladas por **el CIDE**, y con la apuesta de **ICATALIST** a través del proyecto **PRIMA TRUST** para combatir la escasez en el Mediterráneo.

Finalmente, la seguridad integral se aborda desde la monitorización avanzada, como el sistema de fibra óptica para balsas de **Tecnalia**, o la plataforma de gestión de esorrentías urbanas de **ITG**. Todo ello, sin olvidar la cohesión social en el ámbito rural, donde la **Universidad de Salamanca** con el proyecto **SID_AQUARURAL** aportan herramientas predictivas y modelos de digitalización para asegurar que la innovación llegue a cada municipio.

Todo este contenido se integra plenamente con la Agenda Estratégica de I+D+i de la PTEA. Nuestra misión para el periodo 2024-2026 es clara: promover la adopción de soluciones tecnológicas avanzadas que nos permitan enfrentar los desafíos del agua con determinación y visión de futuro.

Porque la gestión de las infraestructuras del agua requiere de conocimientos en diferentes ámbitos y ninguna organización, por potente que sea, puede abarcar por sí sola ese abanico de conocimientos. De ahí la importancia de contar con espacios sectoriales como la Plataforma Tecnológica Española del Agua (PTEA) que faciliten el diálogo técnico, la transferencia de experiencias y la identificación de necesidades comunes, especialmente en un momento en el que la regulación europea y la inversión pública están redefiniendo prioridades.

Nos enfrentamos a un nuevo ciclo que exigirá una planificación estratégica más sólida y una mayor capacidad de adaptación y respuesta, por ello, debemos estar preparados para un entorno donde la excelencia científica, la colaboración y el impacto social serán los criterios que definan el éxito de nuestros proyectos e iniciativas de innovación.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Os invito a leer estos artículos no solo como piezas de conocimiento técnico, sino como testimonios de nuestra capacidad de resiliencia y adaptación. Juntos, seguiremos trabajando para que España mantenga su liderazgo en el ecosistema europeo de innovación hídrica, convirtiendo cada reto en una oportunidad de progreso para nuestra sociedad.

Atentamente,

Marián Serrano Sánchez Presidenta de la PTEA

Artículo invitado
Pag 9- Pag 13

ES-ISAC Aguas, marco de trabajo en ciberseguridad hídrica liderado por INCIBE

D. Enrique Redondo Martínez

Responsable de los sectores Aguas, Energía, Industria Nuclear e Industria Química en el área de sectores estratégicos de INCIBE (Instituto Nacional de Ciberseguridad)

Pag 14- Pag 60

1

Adaptación de las infraestructuras hidráulicas existentes a los nuevos retos

Adaptación de las infraestructuras hidráulicas de alcantarillado a los nuevos retos de la digitalización.

Actuaciones para el restablecimiento del servicio en el Canal Júcar-Turia en respuesta a los daños provocados por la DANA (29 octubre 2024).

Evaluación de un nuevo tratamiento secuencial combinando sistemas basados en la naturaleza y de bajo coste para la recuperación de aguas residuales a escala demostrativa: Proyecto AQUACYCLE

Adaptación de las plantas de tratamiento de agua para la reutilización en agricultura. Perspectivas a partir de un caso de estudio

Innovación y Economía Circular en la reutilización de aguas residuales textiles y farmacéuticas (Proyecto PRIMA TRUST)

Innovative Standards for Using Nature-Based Solutions in Water Reuse. TARGET – INTERREG SUDOE

Pag 61- Pag 91

2

Resiliencia de las infraestructuras del agua

De la seguridad a la resiliencia: proteger las infraestructuras críticas del agua ante las amenazas digitales

FLUENT 2.0, un ejemplo de plataforma para la toma de decisiones data-driven en la renovación de redes de abastecimiento a través del uso compartido de datos

Reduciendo el impacto en infraestructuras de saneamiento: digitalización de soluciones verdes de depuración (HE- D4RUNOFF)

3 *Seguridad de las infraestructuras del agua*

Pag 92- Pag 115

SID_AQUARURAL©: Sistema Inteligente y Predictivo para la mejora de la gestión del agua urbana en entornos rurales

Asegurando el dato en el ciclo del agua: Validación automática de modelos IFC mediante IDS en el marco de los PERTE.

Una experiencia de drenaje vertical, recarga gestionada profunda de acuíferos y seguridad hídrica. El sondeo Arnachos (Lliria, Valencia).

Pag 116- Pag 120

CONOCE LA PTEA

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

Junta Directiva y Personal PTEA

Objetivos Estratégicos y Actividades

Grupos de Trabajo

Cómo hacerte socio

ES-ISAC AGUAS, MARCO DE TRABAJO EN CIBERSEGURIDAD HÍDRICA LIDERADO POR INCIBE

“

La **planta de tratamiento de agua de Oldsmar**, es una instalación que **distribuye agua potable segura** para los residentes y negocios dentro del área municipal de Oldsmar, en el condado de Pinellas, Florida (EE. UU.). Extrae agua subterránea de dos acuíferos de agua salobre. Antes de entregar el agua a la red de distribución, incluye **desgasificación, estabilización del pH y desinfección**. Abastece de agua a unos 15.000 habitantes, cubriendo también las necesidades en este sentido de los propios negocios de la ciudad de Oldsmar.

A primera hora del viernes 5 de febrero de 2021, nada hacía presagiar que esta tranquila localidad viviera un episodio que la iba a convertir por momentos en el **epicentro de la ciberseguridad**, por **supuestamente haber sido objeto de un ciberataque a una de sus infraestructuras críticas**.



INSTITUTO NACIONAL DE CIBERSEGURIDAD



Enrique Redondo Martínez, es actualmente responsable de los sectores Aguas, Energía, Industria Nuclear e Industria Química en el área de sectores estratégicos de INCIBE.

Enrique lleva trabajando en proyectos de ciberseguridad desde el año 2000. Dispone de amplia experiencia en el diseño y despliegue de servicios de seguridad, evaluaciones, bastionado y cumplimiento normativo.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua



Ilustración 1: Desalinización de agua de mar en la bahía de Tampa (<https://www.tampabaywater.org/>)

La Oficina del Sheriff del Condado de Pinellas (Florida) comunicó ese mismo día que el **sistema informático de la planta industrial para el tratamiento de agua potable de la ciudad de Oldsmar había sido comprometida por ciberdelincuentes** que alteraron la concentración de hidróxido de sodio (NaOH), coloquialmente conocido como lejía, en el agua. Un componente químico muy peligroso en altas concentraciones.

Este supuesto ciberincidente tuvo una duración entre tres y cinco minutos, y se anunció que había sido debido a un acceso, remoto y no autorizado, al sistema de control de supervisión y adquisición de datos (SCADA).

Por si le faltara algo a este suceso, surgieron informes y declaraciones posteriores que pusieron en duda que el ciberincidente fuera realmente un ciberataque externo malicioso, sugiriendo que podría haber sido causado por un error humano o por cuestiones de operación interna.

Afortunadamente, según declaraciones del propio Sheriff Gualtieri, el ciberincidente no supuso un efecto significativo en el agua ya que fue detectado por un operario que revirtió de inmediato los niveles de concentración y denegó el acceso remoto al sistema.

Asimismo, se confirmó que la población nunca estuvo en riesgo gracias a la presencia de equipos de alerta redundantes en la medición de la composición química y por el hecho de que el agua no alcanzase el sistema de suministro.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

El exgerente de la planta declaró, de hecho en una conferencia, que el episodio fue más bien un error interno y no un ataque cibernético típico. El empleado que “detectó” el incidente pudo haber operado de forma incorrecta o cometido un error en el teclado que fue interpretado como intrusión. Según él, la investigación del FBI también concluyó que no había evidencia clara de acceso externo malicioso.

Incluso el Water-ISAC (Water Information Sharing and Analysis) llegó a discutir si la variación en los valores químicos podía ser una modificación intencional o simplemente un error de digitación (por ejemplo, escribir 110 en vez de 11100), aunque esto no fue confirmado formalmente.

Oldsmar es un caso sin duda paradigmático porque, incluso si no hubiera sido un ciberataque, el sistema se comportó como si lo hubiera permitido. Esto lo convierte en un caso de estudio clave en ciberseguridad, y nos lleva a reflexionar sobre las siguientes conclusiones, que bien pudieran ser las lecciones aprendidas de esta planta de aguas:

- La **ciberseguridad** en las tecnologías de operación no descansa solo en la intencionalidad. Un ciberincidente puede venir motivado por un actor malicioso, pero también por prácticas no adecuadas de protección, la inexistencia de las anteriores, o incluso por errores humanos.
- El **impacto potencial del riesgo** es el mismo, independientemente de la intencionalidad, en este caso, una afectación grave en la salud pública.
- Lo que no se puede medir, no se puede mejorar. La **monitorización continua y el registro** de acciones que se llevan a cabo en los procesos hídricos es esencial. Si no disponemos de logs fiables nunca podremos atribuir un ciberincidente, aprender de los errores o, en definitiva, mejorar.
- La **ciberseguridad es crítica en el mundo industrial**. El caso Oldsmar no fue solo un posible ciberincidente debido a un acceso remoto, o un error humano, este caso ha evidenciado que se cumple el principio de la cadena. La ciberseguridad depende de el eslabón más débil a la hora de proteger una infraestructura crítica como lo es una planta de agua.

DIRECTIVA NIS2

La Directiva NIS2 (UE 2022/2555) es la normativa europea de ciberseguridad que pretende elevar el nivel de ciberseguridad en infraestructuras críticas y sectores esenciales/importantes. Esta normativa, una vez traspuesta al ordenamiento jurídico nacional, ampliará el alcance a medianas y grandes empresas respecto al alcance de su predecesora (NIS1). Además, exigirá **notificación de ciberincidentes** en una determinada ventana de tiempo, **gestión de riesgos** adecuada y establecerá severas **sanciones** económicas y responsabilidad directa a directivos.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

NIS2 incluye expresamente al sector del agua como sector dentro de su alcance, cubriendo servicios como el abastecimiento de agua potable, tratamiento, distribución y saneamiento y aguas residuales. Esto podrá afectar a operadores públicos (municipales, consorcios), empresas privadas concesionarias y operadores supramunicipales y autonómicos.

Volviendo al caso Oldsmar, bajo el criterio de NIS2, no distinguiría entre ciberataque y error humano: exige que ninguno pueda causar un impacto crítico. El **caso Oldsmar evidenciaría una falta de controles técnicos** y organizativos, así como **ausencia de responsabilidad de gestión**. Cuestiones que precisamente **NIS2 pretende reforzar**.

ES-ISAC Aguas

El ES-ISAC Aguas se constituyó en mayo de 2024 para reforzar la ciberseguridad del sector hídrico español mediante la cooperación, intercambio de información y desarrollo de capacidades específicas del sector.

No es un organismo regulador ni una autoridad, sino un mecanismo de colaboración voluntaria basado en el modelo internacional ISAC (Information Sharing and Analysis Center).



Los miembros fundacionales del ES-ISAC Aguas son:



REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Durante el 2025, el ES-ISAC Aguas ha consolidado su papel como marco de trabajo colaborativo esencial para la mejora de la ciberseguridad del sector hídrico en España. Las actividades clave llevadas a cabo han sido:

- Divulgación sectorial de la iniciativa.
- Formación y puesta a disposición del sector de herramientas específicas de compartición de ciberamenazas.
- Primer análisis estructurado del estado de la ciberseguridad
- Compartición de casos prácticos de éxito.
- Primeros pasos para hacer aportaciones ante ciberincidentes de cierto impacto

Esto ha creado sin duda **las bases para una mayor ciberresiliencia compartida y cumplimiento normativo, especialmente de cara a la transposición de la Directiva NIS2.**

Para 2026, la ciberseguridad en el sector hídrico español estará muy probablemente marcada por la madurez de la digitalización impulsada por los fondos europeos y la obligación legal de cumplir con marcos normativos más estrictos.

Los operadores que anticipen este cambio reducirán riesgos operativos y regulatorios, estarán mejor posicionados ante obligaciones derivadas de la NIS2 y protegerán mejor a ciudadanos, empleados y a la propia organización ante ciberamenazas.





SUBTEMÁTICA 1.

— ADAPTACIÓN DE LAS INFRAESTRUCTURAS HIDRÁULICAS A LOS NUEVOS RETOS

ARTÍCULO 1

Adaptación de las infraestructuras hidráulicas existentes a los nuevos retos

ADAPTACIÓN DE LAS INFRAESTRUCTURAS HIDRÁULICAS DE ALCANTARILLADO A LOS NUEVOS RETOS DE LA DIGITALIZACIÓN

La **digitalización del saneamiento urbano se ha consolidado como un eje transformador** para garantizar la sostenibilidad, resiliencia y eficiencia en la gestión del ciclo integral del agua. Las redes de alcantarillado, tradicionalmente concebidas como infraestructuras pasivas, afrontan hoy un escenario marcado por tres grandes condicionantes: el envejecimiento estructural, los episodios meteorológicos extremos derivados del cambio climático y el endurecimiento de las normativas sobre vertidos y desbordamientos. En este contexto, las tecnologías digitales se convierten en un aliado imprescindible, tal y como señalan los nuevos marcos regulatorios como la Directiva TARU (UE 2024/3019) y los desarrollos derivados del PERTE de Digitalización del Ciclo del Agua.

La transición hacia Sistemas Inteligentes de Saneamiento (SIS) implica la integración de sensores distribuidos, automatización, plataformas IoT, modelos predictivos, inteligencia artificial y gemelos digitales.

Estos sistemas permiten monitorizar en continuo la cantidad y calidad del agua, anticipar episodios de inundación o alivio y optimizar la operación de estaciones de bombeo y depuradoras. La sensorización de parámetros hidráulicos —nivel, caudal, velocidad o presencia de obstrucciones— se combina con la monitorización avanzada de la calidad del agua —pH, conductividad, turbidez, nutrientes o contaminantes—, posibilitando un control más fiable, robusto y alineado con los requisitos normativos.



Palabras clave

DIGITALIZACIÓN DEL AGUA, SANEAMIENTO INTELIGENTE, AUTOMATIZACIÓN DE REDES, GESTIÓN PREDICTIVA DEL AGUA, RESILIENCIA HÍDRICA

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Los proyectos financiados por el PERTE han demostrado que la modernización es viable incluso en sistemas con baja preparación digital inicial. Casos como las digitalizaciones y sensorizaciones en Comunidad Valenciana, Burgos o la Rioja integran sensores, sistemas de comunicación híbridos, plataformas abiertas y herramientas de control avanzado, incluyendo modelos predictivos y módulos. Estas iniciativas permiten anticipar desbordamientos, detectar vertidos industriales, reducir tiempos de respuesta operativa y establecer una gobernanza del dato trazable y auditable.

La experiencia demuestra que los beneficios van más allá del cumplimiento normativo: mejora de la eficiencia energética, reducción de costes operativos, prolongación de la vida útil de los activos y posibilidad de evolucionar hacia modelos de operación inteligente. Esta transformación se acompaña de retos significativos, como la integración tecnológica entre entornos IT y OT, la necesidad de interoperabilidad entre fabricantes y plataformas, la ciberseguridad o el desarrollo de nuevas capacidades en las organizaciones gestoras.

En el caso del proyecto del Consorcio de Aguas y Residuos de La Rioja se ha implantado sensorización masiva, integración multiprotocolo y comunicaciones cifradas mediante equipos industriales, así como una arquitectura IoT escalable. La solución permite gestionar vertidos industriales, monitorizar EDAR y EBAR, consolidar gemelos digitales y garantizar la ciberseguridad conforme al ENS y la directiva NIS2.

En conjunto, la digitalización del saneamiento supone una redefinición del modelo de gestión pública del agua. La adaptación de las infraestructuras hidráulicas al entorno digital permitirá a las ciudades afrontar con mayores garantías los desafíos climáticos, regulatorios y sociales de la próxima década, avanzando hacia un sistema de alcantarillado más robusto, eficiente y sostenible.

Introducción

La gestión del saneamiento urbano ha experimentado una transformación sin precedentes en los últimos años. La aparición de nuevas normativas, como el RD 665/2023 sobre control de vertidos y el marco europeo de la Directiva TARU, junto con los efectos del cambio climático, han obligado a las administraciones y operadores a repensar la forma en que gestionan las redes de alcantarillado y las estaciones depuradoras. A ello se suma un fuerte impulso económico y estratégico a través del PERTE de Digitalización del Ciclo del Agua.

El saneamiento ya no puede limitarse a transportar y depurar aguas residuales: debe hacerlo anticipando episodios de lluvia intensa, minimizando vertidos al medio natural, garantizando la calidad del efluente y optimizando el uso energético. Para lograrlo, resulta esencial disponer de sistemas de medida fiables y continuos, así como de herramientas digitales capaces de procesar grandes volúmenes de datos y transformarlos en información útil para la toma de decisiones, ya que como indico Lord Kelvin “lo que no se puede medir, no se puede controlar; lo que no se puede controlar, no se puede gestionar; lo que no se puede gestionar, no se puede mejorar”.

Metodología

La adaptación de infraestructuras hidráulicas al entorno digital requiere una metodología integral que abarque desde la sensorización hasta la operación inteligente.

1. Diagnóstico y planificación digital

El primer paso consiste en evaluar el grado de madurez digital de las redes y plantas. Este diagnóstico identifica:

- el estado de la instrumentación existente,
- la cobertura de comunicaciones,
- la criticidad de los activos,
- las necesidades normativas de control de vertidos y desbordamientos.

2. Sensorización y mediciones en continuo

La implantación de sistemas de sensorización constituye uno de los pilares fundamentales de la digitalización de las infraestructuras del ciclo del agua. En función de los objetivos operativos y de la clasificación técnica, se emplean distintos tipos de sensores: sensores físicos (nivel, caudal, turbidez), sensores químicos (pH, nutrientes, metales) y, en entornos más avanzados, sensores biológicos o analizadores multiparamétricos capaces de ofrecer una visión integrada del estado del sistema.

La experiencia de proyectos PERTE demuestra la importancia de combinar:

- Sensores de cantidad (nivel, caudal, velocidad)
- Sensores de calidad (pH, conductividad, DQO, NH₄⁺, nitratos)
- Cámaras inteligentes para detección de vertidos
- Pluviómetros y radar meteorológico para anticipación de eventos.



Ilustración 1. Instalación de sensores de nivel y calidad en EDAR (izquierda) y en punto de desbordamiento (derecha).

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

3. Integración IT/OT y comunicaciones

La comunicación de datos requiere arquitecturas híbridas que combinen tecnologías cableadas (Modbus, Profibus, Ethernet/IP) con tecnologías inalámbricas (LoRaWAN, 4G/5G) para cubrir zonas remotas o dispersas. Los proyectos DIGAR-CV[1] y DIGITAGUABUR[2] son ejemplos de esta interoperabilidad compleja, integrando cientos de sensores en una plataforma única.

4. Plataformas digitales y modelos avanzados

Los datos se integran en plataformas IoT y sistemas SCADA, desde los que se aplican modelos de:

- predicción hidrológica,
- simulación del comportamiento de la red (gemelos digitales),
- clasificación automática de medidas,
- detección de focos de contaminación,
- gestión del programa de calibración,
- predicción de episodios de alivio.

Estas herramientas permiten pasar de la simple monitorización a la operación inteligente.

5. Gobernanza del dato y ciberseguridad

Un elemento crítico es asegurar la calidad, trazabilidad y validez legal del dato, especialmente en controles de vertido. La plataforma EDiP de la Comunitat Valenciana incorpora registros auditables, gestión de permisos, autenticación de dispositivos y cifrado extremo a extremo, cumpliendo con el Esquema Nacional de Seguridad en entornos IT y OT.

6. Explotación y mantenimiento predictivo

La digitalización habilita estrategias basadas en IA para:

- detectar patrones de envejecimiento,
- priorizar actuaciones según criticidad,
- reducir costes operativos,
- optimizar energía y consumos.

La explotación deja de ser reactiva y pasa a ser un proceso de mejora continua basado en datos.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

El modelo es además replicable y ya se ha extendido a otros proyectos autonómicos. De esta forma, **los resultados obtenidos** en los proyectos de digitalización del ciclo del agua ejecutados por Adasa se pueden resumir en:

Incremento de la capacidad de monitorización en redes y EDAR. Los proyectos PERTE ejecutados por ADASA han permitido desplegar cientos de sensores y puntos de control: más de 4.100 sensores, 750 puntos de desbordamiento monitorizados, 530 EDAR digitalizadas y más de 60 estaciones de bombeo integradas en plataformas digitales, según las cifras consolidadas de Adasa Sistemas.

Mejora de la anticipación y la resiliencia climática. Los modelos predictivos han demostrado capacidad para anticipar episodios de lluvia y adaptar dinámicamente la operación:

- activación preventiva de bombeos,
- retención en tanques de tormenta,
- minimización de alivios,
- planificación optimizada de personal en episodios críticos.

Control de vertidos y cumplimiento normativo. La sensorización continua permite detectar vertidos industriales irregulares, controlar parámetros obligatorios en tiempo real y disponer de un registro auditable. Esto facilita el cumplimiento de la Directiva TARU y de los nuevos requisitos autonómicos de control de vertidos.

Optimización operativa y eficiencia energética. Gracias a la digitalización se obtienen reducciones en:

- el consumo energético de bombeos,
- los desplazamientos por falsas alarmas,
- la frecuencia de mantenimiento correctivo,
- el tiempo de respuesta ante incidencias.

Impulso a la gobernanza del dato. Los operadores han podido consolidar una única visión del sistema mediante plataformas que integran sensórica, SCADA, modelos y GMAO. Esto facilita decisiones estratégicas basadas en datos fiables y comparables.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Conclusiones

La digitalización del saneamiento constituye una oportunidad histórica para transformar infraestructuras envejecidas en sistemas resilientes, inteligentes y sostenibles. Los casos desarrollados bajo el PERTE han demostrado que esta transición es viable tanto técnica como económicamente, incluso en redes con baja preparación inicial. La sensorización masiva, la integración de plataformas IoT, los modelos predictivos y la operación inteligente permiten anticipar episodios extremos, optimizar los recursos disponibles y garantizar un mayor cumplimiento normativo.

Sin embargo, esta transformación no debe entenderse únicamente como un proceso tecnológico. Requiere abordar retos estructurales: integración entre sistemas IT y OT, estándares de interoperabilidad, robustez de las comunicaciones, gobernanza del dato, ciberseguridad y capacitación del personal. La digitalización exige un cambio cultural profundo en las organizaciones gestoras, así como una visión estratégica que vaya más allá del cumplimiento regulatorio para centrarse en la generación de valor a largo plazo.

Las infraestructuras hidráulicas adaptadas al entorno digital permiten:

- Mejorar la planificación y la resiliencia ante el cambio climático;
- Avanzar hacia modelos operativos predictivos y no reactivos;
- Reducir los costes energéticos y operativos;
- Garantizar la trazabilidad y fiabilidad del dato;
- Evolucionar hacia escenarios de economía circular y reutilización de aguas.

El saneamiento inteligente ya no es una opción, sino una necesidad para garantizar un servicio público eficiente y sostenible. La inversión realizada en los proyectos PERTE marca un punto de inflexión y sitúa al sector en una posición sólida para afrontar los desafíos de la próxima década.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Referencias

PERTE DIGAR-CV:

Digitalización de las Infraestructuras de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales y de las Operaciones de Control de Vertidos en el ámbito de la Comunitat Valenciana (DIGAR-CV). Este proyecto está financiado por la Unión Europea en el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR). <https://www.epsar.gva.es/digar-cv>



DIGITAGUABUR:

Sociedad Municipal de Aguas de Burgos: Digitalización del ciclo urbano del agua en Burgos. Proyecto de Digitalización del Ciclo del Agua de Burgos. Este proyecto está financiado por la Unión Europea en el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR). <https://aguasdeburgos.com/fondos-europeos/>



DigiCARE:

El Consorcio de Aguas y Residuos de La Rioja participa en PERTE de digitalización del ciclo del agua. Este proyecto está financiado por la Unión Europea en el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR).



ARTÍCULO 2

Adaptación de las infraestructuras hidráulicas existentes a los nuevos retos

ACTUACIONES PARA EL RESTABLECIMIENTO DEL SERVICIO EN EL CANAL JÚCAR- TURIA EN RESPUESTA A LOS DAÑOS PROVOCADOS POR LA DANA (29 OCTUBRE 2024)



El **Canal Júcar-Turia (CJT)**, operativo desde finales de los años 70 y con una longitud de 60 km, es una infraestructura hidráulica vital que parte del embalse de Tous, en el tramo bajo del río Júcar. Su principal función es el abastecimiento urbano a la ciudad de Valencia, su área metropolitana y las comarcas de la Ribera y Camp de Morvedre, además de garantizar el riego agrícola de 25.000 hectáreas. Esta obra lineal, que atraviesa 14 municipios e incluye túneles, sifones y 17 acueductos, da servicio a una población cercana a los dos millones de habitantes, consolidándolo como un eje estratégico para la región.

El **29 de octubre de 2024**, las intensas precipitaciones asociadas a una **Depresión Aislada en Niveles Altos (DANA)** causaron una grave pérdida de funcionalidad y servicio del CJT. Los daños más críticos fueron de naturaleza estructural, registrándose serios desperfectos en el acueducto del río Magro y la rotura total de los acueductos sobre los barrancos de La Horteta y del Poio. Estos fallos comprometieron directamente el caudal de agua bruta suministrado a la Planta Potabilizadora de La Presa, ubicada en Manises.

Palabras clave

AFECCIÓN CANAL JÚCAR- TURIA, DANA 29 DE OCTUBRE, RESTABLECIMIENTO SERVICIO CANAL TRAS ROTURA

Emilio Carrilero Aroca

Jefe de Servicio del Área de Explotación de la Confederación Hidrográfica del Júcar

Rubén Rocafull Gimeno

Global Omnium
rurogim@globalomnium.com

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

El objetivo prioritario tras el evento fue la **restauración inmediata del suministro de agua** desde el río Júcar hacia La Presa y el mantenimiento del abastecimiento al Camp de Morvedre. Para lograrlo, se implementaron con urgencia sistemas de bombeo provisionales entre las márgenes afectadas de los barrancos.

Las labores inmediatas de emergencia incluyeron la **limpieza del canal**, la **construcción de muros de contención** para albergar las cántaras de bombeo y la **habilitación de pasos provisionales** entre las orillas de los barrancos para el tendido de las conducciones de agua. El sistema provisional se basó en el uso de motobombas con tuberías semiflexibles, lo que permitió un despliegue rápido.

El servicio se restableció en tan solo cinco días después de la rotura. El caudal se incrementó progresivamente hasta alcanzar un máximo de 14 grupos motobomba operando 24/7 en cada tramo dañado, logrando un caudal nominal de bombeo de aproximadamente 1,5 m³/s.

Introducción

El **Canal Júcar-Turia (CJT)**, puesto en servicio en 1979, es una **infraestructura hidráulica esencial diseñada para conectar las cuencas de los ríos Júcar y Turia desde el embalse de Tous**. Con una longitud de 60 km, el CJT discurre en sentido Sur-Norte a lo largo de 14 términos municipales hasta Manises.

Su diseño presenta mayoritariamente una sección trapecial, con dimensiones variables: la base oscila entre 3 m y 6 m y los calados máximos alcanzan entre 2,61 m y 3,30 m, con taludes de 3H:2V. Los caudales de diseño fueron de 32 m³/s en su tramo inicial y de 19 m³/s en su tramo final.

Una vez asegurado el caudal mínimo de emergencia, se procedió a una solución transitoria de mayor capacidad. Esta consistió en el montaje de una estructura metálica auxiliar que soportaba una tubería metálica de DN1400. Esta configuración permitió el flujo de agua por gravedad, eliminando la dependencia de los grupos motobomba e incrementando el caudal hasta los 2,0 m³/s.

Con la puesta en servicio de estas estructuras transitorias, los equipos de bombeo de emergencia fueron retirados. Actualmente, se ha iniciado la fase de construcción de un bypass definitivo en cada tramo afectado, utilizando tubería de acero de DN1400 instalada en zanja.

La entrada en operación de estos bypass permite dismantelar las estructuras transitorias y, posteriormente, dar comienzo a los trabajos para la reposición definitiva de los acueductos que sufrieron daños estructurales. Esta última etapa culminará el proceso para **el retorno a la operatividad total del sistema del Canal Júcar-Turia**.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

El trazado del CJT incorpora diversas estructuras clave para superar el relieve y cruzar cauces naturales, incluyendo:

3 tramos de túnel

Destacan el de La Escala (5 km), el de Vedat (casi 2 km) y el de Manises (más de 6 km).

17 tramos de acueducto

Sobresale el cruce sobre el río Magro con 1,3 km de longitud.

4 tramos en sección cubierta

El mayor de ellos se ubica en Picassent, con 555 metros.

Se trata de un canal mixto de alto valor estratégico, que permite garantizar tanto el abastecimiento urbano como el riego agrícola de 24.500 hectáreas mediante diversas tomas a lo largo de su recorrido.

El CJT asegura el suministro de agua bruta a la ciudad de Valencia y su área metropolitana, una población cercana a los dos millones de habitantes, la tercera más poblada de España. Este aporte se realiza a través de la estación de tratamiento de agua potable (ETAP) El Realón (Picassent) y la ETAP La Presa (Manises). Adicionalmente, abastece a las comarcas de la Ribera a través de la ETAP La Ribera (Alzira) y a la comarca del Camp de Morvedre, que también posee concesión de agua del Júcar.

Las intensas precipitaciones causadas por la Depresión Aislada en Niveles Altos (DANA) del 29 de octubre de 2024 provocaron una grave merma en la funcionalidad y capacidad de servicio del CJT.

El episodio meteorológico ocasionó **daños importantes, especialmente concentrados en los elementos estructurales de la infraestructura**. Las afecciones más críticas fueron:

- Graves desperfectos en el acueducto del río Magro (p.k. 19+500).
- Rotura total de los acueductos que cruzan los barrancos de La Horteta (p.k 49+900) y del Poio (p.k. 51+500). La rotura en La Horteta afectó un tramo de 60 metros, mientras que en El Poio el tramo afectado fue de 30 metros



Figura 1. Rotura del Canal Júcar-Turía a su paso por el barranco de Horteta

Estas incidencias comprometieron seriamente la integridad física del canal y, de manera directa, alteraron el transporte y la disponibilidad de los caudales de agua bruta destinados a la ETAP La Presa en Manises. La vulnerabilidad del sistema ante eventos meteorológicos extremos quedó de manifiesto, al verse seriamente comprometido el suministro habitual a la planta potabilizadora.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Metodología

Tras la DANA del 29 de octubre de 2024, las primeras inspecciones aéreas (imprescindibles ante la imposibilidad de acceso terrestre) identificaron la rotura del CJT en los acueductos de La Horteta y El Poio. Las actuaciones se focalizaron de inmediato en estos puntos para restablecer el servicio.

El primer paso consistió en asegurar el acceso a las zonas de trabajo para permitir el tránsito de personal y vehículos, algo fundamental para la instalación de cualquier solución. En La Horteta, se reacondicionó el camino de servicio preexistente. En El Poio, se construyó un badén provisional con pasos transversales de tubería para garantizar la continuidad del caudal del barranco en esos momentos.

Dada la necesidad imperiosa de restablecer el suministro a la ETAP La Presa, se optó por la instalación de grupos motobomba en paralelo como solución de emergencia. Esta medida ofrecía la rapidez y modularidad necesarias para trasvasar caudales de forma inmediata. A los tres días de la tragedia, se inició el primer bombeo con un caudal inicial de 100 l/s.

El 4 de noviembre ya llegaba caudal a la ETAP La Presa. El caudal se incrementó progresivamente conforme se instalaban más equipos, alcanzando un total de 14 grupos motobomba en cada acueducto roto. Esta solución de emergencia permitió el trasiego continuo de hasta 1,5 m³/s a la ETAP. Para mantener la operatividad ininterrumpida (24 horas al día, 7 días a la semana), se establecieron depósitos de combustible, se acondicionaron los accesos para el suministro diario y se dispuso de una brigada específica para el mantenimiento de los equipos.

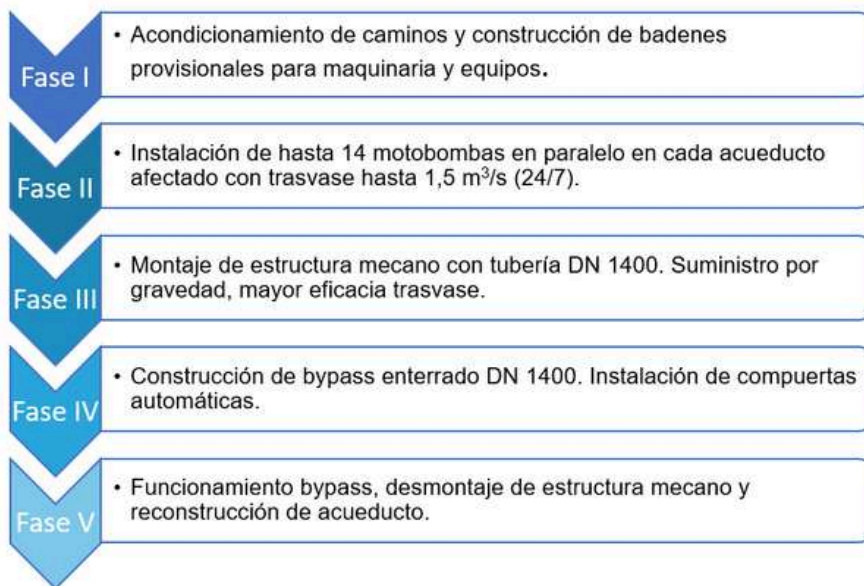
Figura 2. Solución de emergencia mediante grupos motobomba acueducto de Poio



La magnitud de la tragedia supuso una compleja logística para el aprovisionamiento de equipos. Se logró conseguir hasta diez motobombas desde los Países Bajos, dada la alta demanda nacional.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua



Una vez estabilizada la continuidad del servicio con los equipos de bombeo, se avanzó a una solución transitoria de mayor garantía y eficiencia que eliminaba el consumo energético.

Tras analizar diversas opciones (fabricación de estructuras, puentes militares, etc.), se seleccionó un sistema de estructura metálica tipo

mecano de montaje in situ debido a su disponibilidad y rapidez de ejecución apoyada sobre los tramos de acueducto que no habían quedado afectados.

Sobre esta estructura se instaló un tubo metálico de DN 1.400 mm que conectaba ambos márgenes del canal. Esta configuración permitió un trasiego de caudal de hasta 2,0 m³/s por gravedad, mejorando la garantía de suministro y permitiendo el desmontaje de los grupos motobomba. En La Horteta, se requirió un apoyo intermedio utilizando una de las pilas existentes del acueducto que quedó en buen estado.



Figura 3. Solución transitoria mediante la construcción de una estructura metálica y conducción por gravedad en acueducto de Poio



Figura 4. Solución transitoria mediante la construcción de una estructura metálica y conducción por gravedad en acueducto de Horteta

Con la solución transitoria en funcionamiento, se inició la fase de ejecución de la solución definitiva y permanente: un bypass en cada acueducto afectado. Este bypass consiste en una tubería metálica de DN 1.400 mm enterrada.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua



Esta solución no solo facilita la reconstrucción posterior de los acueductos originales (una vez desmontada la estructura metálica transitoria), sino que también reduce significativamente la vulnerabilidad de estos tramos ante futuros eventos y permite realizar futuras labores de mantenimiento sin interrumpir el servicio.

Para mejorar aún más la garantía y reducir la vulnerabilidad, se han previsto la instalación de compuertas automáticas en las entradas y salidas de los bypass, así como compuertas transversales en el propio CJT aguas arriba y abajo de los acueductos afectados.

Figura 5. Solución definitiva mediante bypass enterrado

Resultados

La aplicación secuencial de las soluciones y fases permitió alcanzar con éxito los objetivos propuestos, transitando de una situación de emergencia crítica a la plena funcionalidad del sistema con notable diligencia.

Conclusiones

Dadas las características singulares y la criticidad de la infraestructura hidráulica, y ante situaciones extraordinarias como la reciente DANA, la experiencia ha arrojado conclusiones fundamentales para mejorar la gestión y la resiliencia del sistema.

En primer lugar, es primordial establecer un sistema ágil de toma de decisiones que permita minimizar la incertidumbre y a su vez, un análisis rápido para reconducir los trabajos. La base para las mejores decisiones es disponer de la mayor cantidad de información posible en tiempo real. Esto permite sustentar las acciones en escenarios con menor incertidumbre.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

La disponibilidad de información precisa facilita la monitorización de la consecución de objetivos. En caso de desviación de los resultados parciales, permite la detección temprana y la adopción inmediata de medidas correctoras para reencauzar la respuesta hacia los objetivos esperados.

Además, **la eficacia de la respuesta de emergencia demostró la necesidad de contar con soluciones de rápida implementación y diseño modular.** Este tipo de medidas permite (1) restablecer el servicio con rapidez ante cualquier incidencia futura en la infraestructura, (2) facilitan la transición y el análisis de soluciones más robustas y con mayores garantías y (3) reducir drásticamente los tiempos de respuesta gracias a la facilidad y velocidad en el montaje y desmontaje.

En tercer lugar, cabe recordar la necesidad de disponer de alternativas de funcionamiento y operatividad permanentes en infraestructuras críticas. La existencia previa de un bypass en el acueducto del río Magro garantizó su continuidad, minimizando el impacto de la DANA y permitiendo labores de mantenimiento rutinario. Disponer de estos elementos en los acueductos afectados habría garantizado su continuidad, reduciendo drásticamente las consecuencias del evento meteorológico.

De igual manera, es recomendable disponer de protocolos de actuación detallados para situaciones extraordinarias. Estos protocolos deben contemplar y plantear diferentes escenarios con medidas predefinidas a adoptar, con el objetivo último de reducir la vulnerabilidad y mejorar la garantía de suministro frente a cualquier eventualidad.

Agradecimientos

La efectiva gestión de esta emergencia y la rápida recuperación de la operatividad del Canal Júcar-Turia han sido el resultado de una coordinación y esfuerzo sin precedentes. Por ello, los autores extendemos nuestro más sincero agradecimiento a la Confederación Hidrográfica del Júcar, al Ayuntamiento de Valencia, a la Entidad Metropolitana de Servicios Hidráulicos (EMSHI), a la Comunidad General de Usuarios del Canal Júcar-Turia (CGUCJT), al Centro de Coordinación Operativa Integrada (CECOPI) y al Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico.

ARTÍCULO 3

Adaptación de las infraestructuras hidráulicas existentes a los nuevos retos

AQUACYCLE

Evaluación de un nuevo tratamiento secuencial combinando sistemas basados en la naturaleza y solar de bajo coste para la recuperación de aguas residuales a escala demostrativa

Palabras clave

AGUA RESIDUAL URBANA; DIGESTIÓN ANAEROBIA; HUMEDALES CONSTRUÍDOS; PROCESOS FOTOQUÍMICOS SOLARES; REACTOR DE ESTANQUE RACEWAY; RADIACIÓN SOLAR



El proyecto **AQUACYCLE** financiado por la **ENI CBCMED** y finalizado en 2024, ha propuesto e implementado, a escala demostrativa y TRL7, una innovadora línea de tratamiento de aguas residuales urbanas (ARU) mediante la integración de tres tecnologías, digestión biológica anaerobia (DA), un sistema híbrido de humedales (CW, por sus siglas en inglés) y procesos fotoquímicos solares (PFS) basados en el uso de peroximonosulfato (PMS) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) en un fotorreactor solar abierto tipo raceway con recirculación (RPR, por sus siglas en inglés). Los tres procesos se consideran tecnologías económicas y eficientes para el tratamiento y la recuperación de ARU. Esta línea de tratamiento secuencial se ha propuesto como una posible solución para mejorar la calidad del agua y cumplir con la normativa europea vigente sobre regeneración y reutilización de ARU.

Se ha evaluado la eficiencia del tratamiento combinado DA+CW+PFS, en un entorno real, en una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) de Blanca (Murcia, España), para la inactivación de indicadores microbianos regulados presentes de manera natural en el agua (*E. coli*, esporas de bacterias sulfato-reductoras y colifagos somáticos), la eliminación de 16S rRNA y varios genes de resistencia a antibióticos (GRA) seleccionados (*int11*, *sul1*, *qnrS*, *bla_{TEM}*, *tetM*), la degradación de microcontaminantes (MC) (230, incluidos 11 de la nueva Directiva) y la reducción de parámetros fisicoquímicos regulados (carbono orgánico disuelto, turbidez, demanda química de oxígeno, demanda biológica de oxígeno, sólidos suspendidos totales y especies de nitrógeno).

Alba Hernández Zanoletty
PDI en Universidad de Almería

Ilaria Beruti
PDI en Universidad de Almería

Isabel Oller
OPI en Universidad de Almería

M. Inmaculada Polo López

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Los resultados muestran que la línea de tratamiento cumple con ambas regulaciones de la Unión Europea (Reglamento (UE) 2020/741 y Directiva (UE) 2024/3019), alcanzando valores por debajo de los límites para todos los parámetros fisicoquímicos, la inactivación del indicador microbiano que cumple con la Clase A, valores de concentración microbiana que cumplen también con los requisitos de validación de la tecnología y la eliminación de más del 80 % de los MCs contemplados en la nueva regulación europea. También logra la eliminación de GRA, alcanzando el límite de cuantificación de 3 de los 4 GRA detectados (int11, sul1 y qnrS) y una reducción significativa en la concentración inicial de 16S rRNA.

El coste de operación total de la línea DA+CW+PMS/Solar es de aproximadamente 0,65 €/m³, lo que demuestra que este sistema combinado podría ser una alternativa atractiva, eficiente, eco-sostenible y rentable para regenerar los efluentes secundarios de la EDAR, combinando soluciones basadas en la naturaleza y la radiación solar natural como energía renovable, por lo que podría recomendarse para la implementación de tratamientos descentralizados de ARU, principalmente a escala comunitaria, especialmente en áreas con alta disponibilidad del recurso solar.

Introducción

Las regiones áridas y semiáridas se caracterizan por sufrir un severo estrés y escasez hídricos debido al cambio climático y al crecimiento exponencial de la población. Por tanto, la reutilización de aguas residuales urbanas (ARU) tratadas se considera actualmente una fuente alternativa de agua prometedora para mitigar parcialmente estos problemas.

Para garantizar la salud y la protección ambiental asociadas con esta práctica, las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) deben implementar tecnologías que garanticen los requisitos mínimos de calidad del agua para su reutilización o descarga, en cumplimiento con las nuevas regulaciones de la Unión Europea (Regulación (UE) 2020/741 y Directiva (UE) 2024/3019).

Las soluciones basadas en la naturaleza, como son los humedales artificiales (CW, por sus siglas en inglés) han ganado atención por considerarse una tecnología relativamente simple, sostenible y económica, en la que la purificación del agua se logra mediante procesos naturales (físicos, químicos y biológicos).

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Además, numerosos estudios confirman que la combinación de diferentes tipos de CW conectados en serie (CW híbridos), mejora notablemente los resultados de purificación de ARU. No obstante, a pesar del buen rendimiento de los CW, no pueden ser utilizados como tratamiento único para la regeneración de ARU debido a la eficiencia limitada para reducir altas cargas orgánicas y contaminantes persistentes. Por tanto, generalmente se consideran dentro de una línea integrada de tratamiento.

En este sentido, los procesos fotoquímicos solares (PFS) basados en el uso de oxidantes como H_2O_2 y peroximonosulfato (PMS) combinados con radiación solar (recurso energético abundante y renovable) han surgido en los últimos años como una opción prometedora y sostenible para el tratamiento de ARU, recibiendo más atención por su bajo coste, simplicidad operacional y fácil implementación a gran escala. Estos tratamientos pueden realizarse en reactores de bajo coste y fácil operación y mantenimiento, como los Raceway Pond Reactor (RPR), que permiten tratar grandes volúmenes de agua, siendo una opción viable y sostenible para su combinación con sistemas basados en la naturaleza.

El proyecto **AQUACYCLE** ha tenido como objetivo diseñar, implementar y evaluar una tecnología eco-innovadora basada en la combinación secuencial de un tratamiento secundario mediante digestión anaerobia (DA), un sistema híbrido de CW y un PFS, a nivel demostrativo (TRL 7) para la regeneración de ARU cumpliendo con las nuevas regulaciones europeas.

Metodología

La tecnología propuesta en este proyecto se ha implementado en la EDAR “Blanca” (Murcia, España), como línea alternativa a la consolidada en la propia EDAR, para poder evaluar un análisis multi-paramétrico de los indicadores regulados por la UE.

La línea de tratamiento consolidada consiste en un tratamiento secundario aerobio basado en lodos activados, seguido de decantación lamelar, filtración de arena y finalmente radiación UV-C y cloración. El agua recuperada se utiliza para el riego de cultivos. Por otro lado, la línea de tratamiento alternativa propuesta y demostrada en el proyecto AQUACYCLE está compuesta por una DA, cuyo efluente se dirige al sistema de CW híbrido de flujo sub-superficial (CW-Vertical de 124 m² y CW-Horizontal de 32 m²), y finalmente, el efluente del CW híbrido se bombea a un RPR (13 m², 1800 L) para afinar el tratamiento mediante PFS (**Figura 1**), añadiendo 3 mM de H_2O_2 o 1 mM de PMS, de acuerdo con los resultados obtenidos en un estudio previo dentro de este mismo proyecto a escala piloto en las instalaciones de la Plataforma Solar de Almería (CIEMAT, Tabernas, Almería).

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

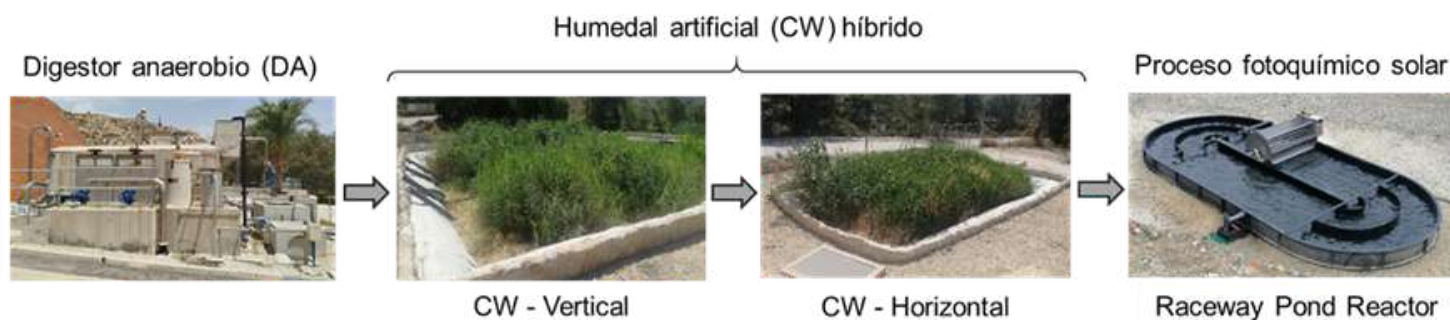


Figura 1. Sistema demostrativo en la EDAR "Blanca" (Murcia, España): DA, CW híbrido (CW-Vertical + CW-Horizontal) y PFS en RPR.

La evaluación de esta tecnología durante la ejecución del proyecto se realizó primero determinando las mejores condiciones de operación de cada unidad del sistema combinado, y a continuación, a través de una campaña de monitoreo durante un año (02/2023-03/2024).

Todas las muestras se tomaron en botellas de vidrio estériles para analizar los siguientes parámetros fisicoquímicos: concentración de iones, carbono orgánico disuelto (COD), turbidez, demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO5) y sólidos suspendidos totales (SST), y cuantificar los patógenos microbiológicos presentes de manera natural (*E. coli*, esporas de bacterias sulfato-reductoras y colifagos somáticos), los microcontaminantes (MCs) (230, incluidos 11 de la nueva Directiva) y los genes de resistencia a antibióticos (GRA) seleccionados (16S rRNA, *int11*, *sul1*, *qnrS*, *blaTEM*, *tetM*). Finalmente, se realizó un análisis tecno-económico preliminar.

Resultados

Se analizaron los parámetros fisicoquímicos contemplados en la nueva Regulación y Directiva de la UE. **Los resultados mostraron que se cumplen todos los requisitos mínimos** después del tratamiento en los CW para la Clase A (condiciones más restrictivas), establecida para todos los métodos de riego, incluyendo todos los cultivos de alimentos que se consumen crudos en los que la parte comestible está en contacto directo con las aguas regeneradas y los tubérculos que se consumen crudos.

En cuanto a los indicadores microbianos, el sistema híbrido de CW alcanza una inactivación entre 2,3 y 4,1 valores de reducción logarítmica de todos los patógenos analizados, pero sin llegar a cumplir con los límites contemplados en la Regulación, sin embargo, en la última etapa, ambos PFS permiten alcanzar el límite de detección en todos los casos, siendo el PMS/Solar más efectivo en cuanto al tiempo de tratamiento que el H_2O_2 /Solar, 5 min y 120 min, respectivamente.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

A pesar de que los GRA no están regulados a nivel europeo, son responsables de más de diez millones de muertes al año, por lo que existe una gran preocupación por su eliminación y deben tenerse en cuenta como parámetro clave en cualquier tratamiento de regeneración de ARU. De los 4 genes detectados, el *qnrS* no se detecta después del CWs, sin embargo, al resto resulta difícil eliminarlos. Tan solo el proceso PMS/Solar (1 mM) fue capaz de lograr una gran reducción de estos genes, alcanzando incluso el límite de cuantificación en dos de ellos (*intl1* y *sul1*).

En cuanto a los MCs, se detectaron 61 (7 de la Directiva) de los 230 analizados (11 de la Directiva), y los resultados mostraron que, de la sumatoria de los 61, se obtuvo un gran porcentaje de degradación a la salida del CW-Vertical (95 %). Sin embargo, la reducción de los 7 MC que aparecen en la Directiva solo se logró combinando con la etapa final del PFS, alcanzándose degradaciones superiores al 80% desde la entrada al DA en al menos 6 de ellos, tal y como exige la Directiva.

La Tabla 1 muestra los parámetros donde difieren ambos PFS en cuanto a degradación de GRA y MCs.

Parámetros	H ₂ O ₂ /Solar (3 mM)	PMS/Solar (1 mM)
16S rRNA	1.1·10 ⁹	4.2·10 ⁶
<i>intl1</i>	4.5·10 ⁷	QL
<i>sul1</i>	3.5·10 ⁶	QL
<i>qnrS</i>	QL	QL
∑ 61 MPs (ng/L)	11717±7589 (99 %)	2174±1060 (99 %)
Amisulpride	> 99 %	> 99 %
Carbamazepine	27 %	> 99 %
Diclofenac	96 %	> 99 %
Hydrochlorothiazide	99 %	> 99 %
Venlafaxine	75 %	> 99 %
Benzotriazole	71 %	57 %
Irbesartan	> 99 %	> 99 %

Tabla 1. Concentración de GRA y degradación de MCs con ambos PFS evaluados, H₂O₂/Solar y PMS/Solar

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Finalmente, considerando las condiciones de tratamiento con PMS/Solar (1 mM), se pudo estimar el coste de operación en aproximadamente 0,65 €/m³ desde la entrada al DA hasta la salida del RPR, similar al coste estimado de un tratamiento convencional como la cloración (0,60 €/m³), pero este último no cumpliría con la nueva Directiva de la UE, por lo que la línea de tratamiento que se propone en este proyecto se considera una alternativa prometedora y sostenible para la regeneración de ARU.

Resultados

La tecnología combinada propuesta en el proyecto AQUACYCLE (financiado por la ENI CBCMED) consiste en una línea integrada de tratamiento de ARU (TRL 7) compuesta por tres procesos: DA, CW híbrido (Vertical + Horizontal) y PFS utilizando PMS/Solar (1 mM) como tratamiento cuaternario.

Este sistema logró alcanzar una calidad del agua que cumple con los estándares más exigentes para su reutilización en agricultura, cumpliendo con el Reglamento (UE) 2020/741 en términos de inactivación microbiana (*E. coli* <10 UFC/100 mL y, para esporas de bacterias sulfato-reductoras y colifagos somáticos, también se cumplieron los requisitos de validación), y logró valores de los parámetros fisicoquímicos por debajo de los máximos permitidos tanto por el Reglamento (UE) 2020/741 (SST, DBO₅ y turbidez) como por la Directiva (UE) 2024/3019 (COD, DQO y SST).

Este trabajo se ha realizado gracias a la financiación recibida por parte de la Unión Europea a través del Programa ENI CBC de la Cuenca del Mediterráneo para la ejecución del proyecto AQUACYCLE (A_B 4 1_0027).

Por otro lado, se observó una diferencia significativa en la eliminación de MCs y GRA al comparar las líneas de tratamiento convencional y la alternativa. En el caso de los MCs regulados, el efluente de la línea de tratamiento alternativa cumplió con la nueva Directiva (UE) 2024/3019, alcanzando una eliminación superior al 80 % en al menos seis de las sustancias reguladas. En el caso de los GRA, aunque la legislación vigente no establece límites, la línea alternativa alcanzó el límite de cuantificación de 3 de los 4 GRA detectados (*intl1*, *sul1* y *qnrS*) y una reducción significativa en la concentración inicial de 16S rRNA.

Considerando el coste de los reactivos, el tiempo de tratamiento y el volumen de agua que se puede tratar al día, el coste estimado del tratamiento de la línea de tratamiento alternativa propuesta por el proyecto AQUACYCLE, fue de aproximadamente 0,65 €/m³. Por tanto, se puede concluir que este sistema combinado podría considerarse ecológico, sostenible, eficiente y rentable, al basarse en sistemas naturales y energías renovables (radiación solar), resultando prometedor su implementación en sistemas de tratamientos de agua descentralizados, principalmente a escala comunitaria, especialmente en zonas con alta disponibilidad de radiación solar.

ARTÍCULO 4

Adaptación de las infraestructuras hidráulicas existentes a los nuevos retos

ADAPTACIÓN DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA PARA LA REUTILIZACIÓN EN AGRICULTURA. PERSPECTIVAS A PARTIR DE UN CASO DE ESTUDIO

Palabras clave

TRATAMIENTO DE AGUAS, RIEGO, MANEJO INTEGRAL DEL AGUA.



En la cuenca mediterránea, el déficit hídrico al cual pueden verse sometidos los cultivos en secano se está convirtiendo en un problema preocupante. El uso de aguas residuales tratadas podría ser una estrategia de gestión alternativa para satisfacer estas necesidades crecientes. A menudo, estas aproximaciones se basan en la idea generalizada de que el agua residual tratada es “gratuita” y puede servir como una nueva fuente de agua adicional. Sin embargo, desviar este recurso del agua natural puede alterar el ciclo hidrológico local, lo que podría afectar a los ecosistemas aguas abajo y a la disponibilidad de agua para otros usuarios.

En **este trabajo se detalla el diseño de un protocolo de evaluación de los posibles efectos de la reasignación de aguas residuales tratadas** que se aplicó a nivel teórico para una pequeña población del interior de la provincia de Valencia (Fontanars del Alforins) en la cual el cultivo de la vid en secano es el mayoritario.

Se crearon **tres escenarios para este caso de estudio** proyectado para el año 2050:

- Continuar con las prácticas actuales (el agua depurada, tras un tratamiento secundario, se vierte a un barranco).
- Implementar un tratamiento terciario y hacer un uso directo del agua para el riego.
- La recarga de acuíferos.

Julia de Ruiter¹, Jari de Dooij¹, Juul Smets¹, Mikail Tatlidede¹, Pien Wismans¹, Gerardo van Halsema¹, Raffaele Vignola¹, Juan Miguel Ramirez-Cuesta² y Diego S. Intrigliolo^{2*}

¹ Wageningen University and Research

² Centro de Investigaciones sobre Desertificación (CIDE) (CSIC-UV-GVA) *

diego.intrigliolo@csic.es

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Los **resultados obtenidos** indican que, en el escenario de riego directo, se espera que el balance hídrico cambie moderadamente, ya que el agua se reasignará principalmente durante un breve periodo de tiempo de riego del viñedo. Por otro lado, en el escenario de recarga del acuífero, las aguas residuales tratadas se bombearán directamente al acuífero, lo que dará lugar a que no se descargue agua en el barranco de la zona de estudio.

Este posible cambio en la reasignación de las aguas residuales tratadas tiene repercusiones directas en el medio ambiente, entre ellas la reducción del caudal de los cauces superficiales y su posible contaminación. Además, podrían surgir conflictos entre las partes interesadas en relación con los derechos de agua, los pagos y el acceso.

Se concluye que **las aguas residuales no deben considerarse simplemente como un recurso gratuito, sino como agua que ya forma parte del ciclo hidrológico local**. Estudiar de forma integral los efectos de la reasignación de las aguas residuales tratadas ayudará a evaluar las ventajas y los inconvenientes y a tomar decisiones de forma integral y sostenible socio-económicamente en el tiempo.

Introducción

La escasez de agua es un desafío creciente, especialmente en la cuenca mediterránea.

La utilización de aguas residuales convenientemente depuradas (ARD) es una alternativa para incrementar la fuente de recursos hídricos para la agricultura y España lidera la reutilización de aguas residuales, principalmente para riego agrícola.

Sin embargo, los impactos que puede tener la reutilización sobre acuíferos, ecosistemas y balances hídricos no están quizás suficientemente considerados en los análisis y planes hidrológicos.

Bajo este contexto, se emprendió una colaboración entre el Centro de Investigaciones sobre Desertificación (CIDE) (CSIC-UV-GVA) y varios estudiantes del Master “International Land and Water Management” de la Universidad de Wageningen (Países Bajos) que realizaron una estancia formativa de un mes en el interior de la provincia de Valencia.

El objetivo fue establecer un protocolo y evaluar, a nivel teórico, los efectos potenciales de reasignar ARD en áreas rurales de regiones semiáridas, donde las fuentes de agua superficial son escasas y una planta de tratamiento de aguas está fácilmente accesible.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Metodología

Se eligió el municipio de Fontanars dels Alforins que se localiza en la comarca de Vall d'Albaida, en el interior de la provincia de Valencia (Figura 1).

Situado en un paisaje rural, el municipio forma parte de la cuenca del río Júcar, con una extensión aproximada de 75 km² y una población de unos 1.000 habitantes.



Figura 1. Localización geográfica de la Vall d'Albaida y Fontanars dels Alforins en el interior de la provincia de Valencia.

En dicha población existe una planta de tratamiento de aguas que incluye hasta un tratamiento secundario (Figura 2).

Todos los detalles sobre las características de la planta pueden encontrarse en la url: <https://www.epsar.gva.es/fontanars-dels-alforins-0> pudiendo destacar que el volumen de agua tratada varió en la última década entre 57,445 y 114,875 (m³/año).

Figura 2. Fotografías de la planta de tratamiento de aguas en la población de Fontanars dels Alforins (Valencia).

El clima en la zona de estudio se considera de tipo mediterráneo-semiárido, con una precipitación media anual de 515 mm que se concentra mayoritariamente en otoño y primavera.

La agricultura es el sector principal de esta zona, ocupando aproximadamente la mitad del territorio municipal, la mayoría en secano. La viticultura es la práctica agrícola más común, cubriendo aproximadamente una cuarta parte del área total.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Se diseñó un **protocolo sistemático de apoyo a la toma de decisiones** para evaluar las oportunidades de reasignación de ARD teniendo en cuenta las condiciones locales y las prioridades de los potenciales usuarios finales y otros actores relevantes. El **protocolo de siete pasos** proporciona un marco sistemático para evaluar la viabilidad, la rentabilidad económica y las implicaciones ambientales.

1

Situación actual e identificación del problema.

Se examinan los desafíos hídricos locales y se evalúa si la reutilización de ART podría ser una solución viable. Se incluye la evaluación de tendencias climáticas, demanda agrícola de agua y balance hídrico.

2

Evaluación de la planta de tratamiento de aguas residuales.

Se analiza la capacidad de la planta existente, el nivel de tratamiento y si la infraestructura puede soportar un uso agrícola seguro.

3

Viabilidad técnica y diseño.

Se consideran las opciones técnicas para implementar escenarios de reutilización: riego directo, recarga de acuíferos o continuar prácticas actuales.

4

Planificación del uso del agua.

Se cuantifican los impactos sobre los balances hídricos de los diferentes escenarios tanto en la oferta como la demanda hídrica.

5

Viabilidad socioeconómica.

Se examinan las implicaciones sociales y económicas, incluyendo percepción pública y consideraciones sobre el desarrollo rural de la zona.

6

Evaluación del impacto ambiental.

Se analiza cómo la desviación del ART afecta a los ecosistemas y se identifican beneficios y riesgos.

7

Decisión final e implementación.

Se integran los hallazgos para evaluar la idoneidad de cada escenario.

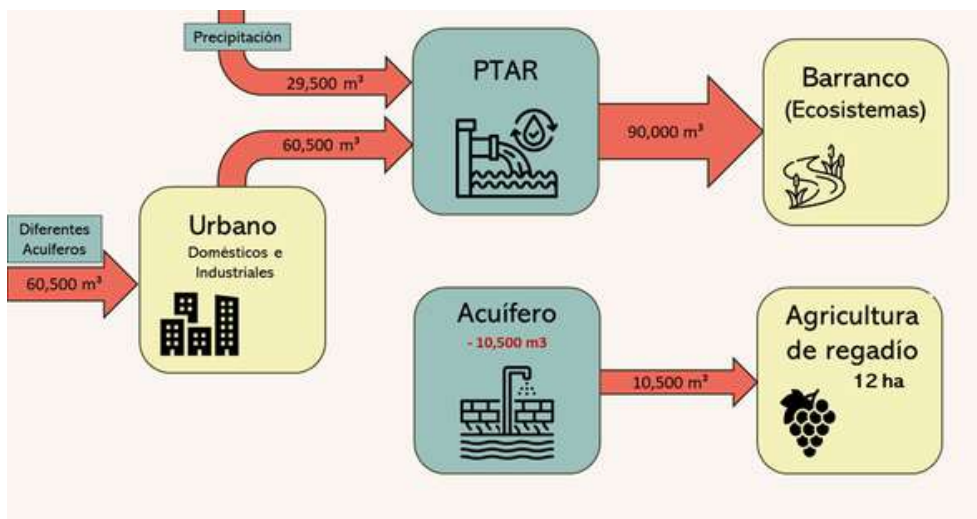
REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Resultados

Parte 1. Análisis de escenarios.

El protocolo diseñado se estableció para **tres escenarios** para este caso de estudio proyectado para el año 2050:



Escenario 1.

Continuar con las prácticas actuales (el agua depurada, tras un tratamiento secundario, se vierte a un barranco) cuyo balance hídrico estimado se muestra en la Figura 3 en la que se cuantifican los componentes del balance.

Figura 3. Resumen esquemático del balance hídrico en la zona de estudio bajo el escenario existente en la actualidad

Escenario 2.

Implementar un tratamiento terciario en la estación de depuración y hacer un uso directo del agua para el riego de los viñedos colindantes. Bajo este escenario se prevé el uso de una tercera parte del agua proveniente de la depuradora, que podría emplearse para el riego adicional de 34 ha de viñedo (Figura 4).

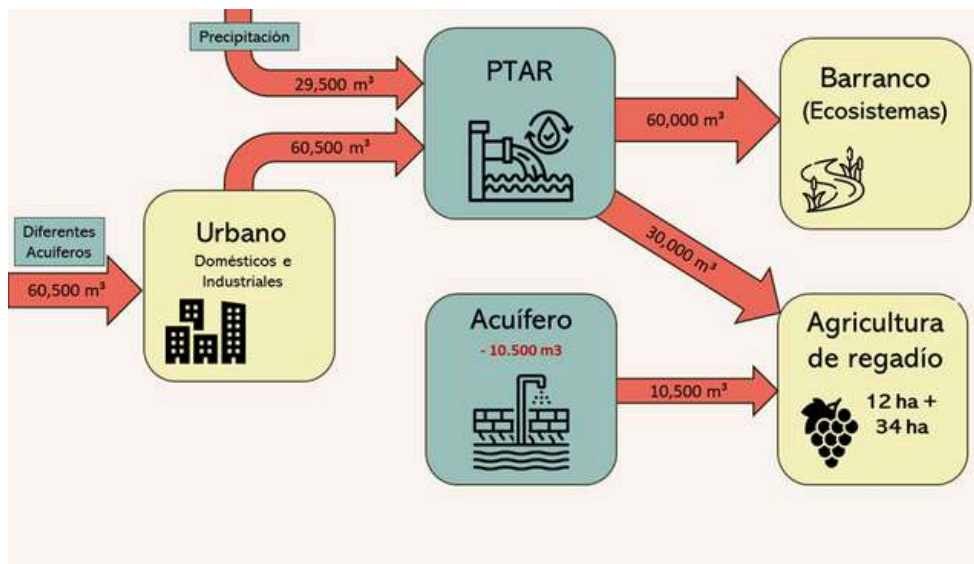
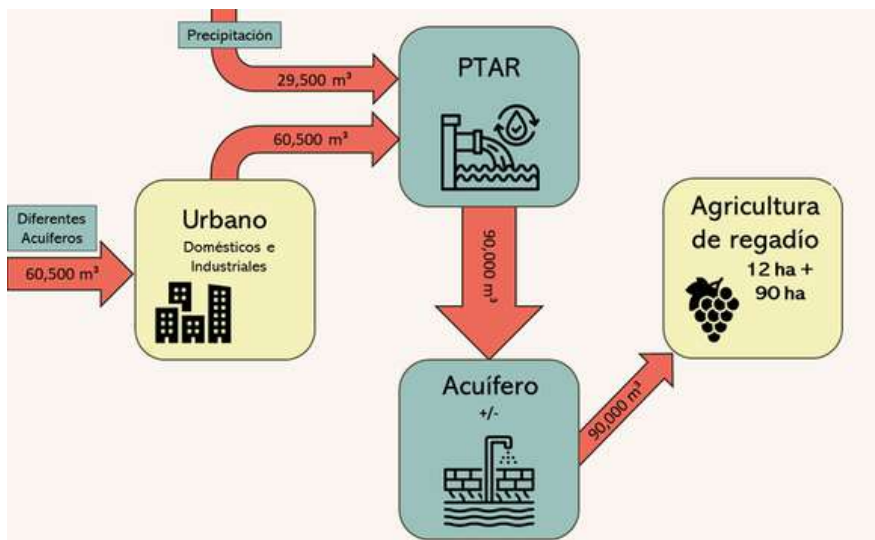


Figura 4. Resumen esquemático del balance hídrico en la zona de estudio bajo el escenario de aprovechamiento directo del agua depurada para el riego.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua



Escenario 3.

Utilizar el agua depurada para la recarga de los acuíferos y un posterior bombeo para el riego. En este caso, al poderse aprovechar el agua tratada por la depuradora generada durante todo el año para el riego de los viñedos durante el periodo de demanda hídrica, se podrían regar hasta 90 ha de viñedo adicionales a las ya existentes (Figura 5).

Figura 5. Resumen esquemático del balance hídrico en la zona de estudio bajo el escenario de aprovechamiento del agua para el riego tras una recarga en el acuífero.

A modo de resumen en la Tabla 1 se indican los **resultados de la aplicación del protocolo para los 3 escenarios** en la zona de estudio destacando los impactos que pueden derivarse de los tres escenarios.

IMPACTOS	E1. Prácticas Actuales	E2. Riego Directo	E3. Recarga del acuífero
Nivel de Tratamiento	Secundario	Terciario para riego	Terciario para inyección al acuífero
Uso del agua	Servicio ambiental en el barranco	Uso directo agrícola	Uso indirecto tras almacenamiento en acuífero
Cambio en el balance hídrico	Bajo	Moderado	Moderado/alto
Cambios técnicos	Ninguno	Moderados	Altos
Inversiones económicas	Bajas	Moderadas/altas	Altas
Implicaciones sociales	Bajas	Moderadas	Moderadas
Ambiental	Moderado	Moderado-alto	Moderado

Tabla 1. Resumen esquemático de los impactos esperados bajo los tres escenarios evaluados.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Parte 2. Extrapolación y escalado.

Por otra parte, cabe destacar que la metodología puesta a punto se puede extrapolar a otras localidades y en este caso se analizó el área de la Vall d'Albaida (Valencia) que es una comarca que tiene una superficie de 722,2 km² y alberga 34 municipios, con una población de 91.200 habitantes. Se trata de una zona rural, caracterizada por pequeñas localidades. La agricultura de secano es el sector principal. Al aplicar el protocolo de extrapolación se establecen una serie de criterios que ayudan a identificar si una ubicación tiene las condiciones necesarias para utilizar el protocolo con éxito.

Las secciones siguientes detallan los criterios identificados:

Radio de 8 km

Un criterio económico es la distancia máxima para la cual se puede reasignar el agua residual tratada. En este informe, se asume un radio de 8 km. Según Pedrero et al. (2011) esta sería la distancia máxima económicamente viable para el transporte, considerando los costos de transferencia desde la planta de tratamiento de aguas residuales hasta los puntos de infiltración para la recarga del acuífero. Este radio de 8 km también se define como el área en la que se puede aplicar riego directo, asumiendo que se mantiene la misma distancia económicamente viable para el transporte.

Disponibilidad de acuífero.

Para poder implementar la recarga de acuíferos, debe existir un acuífero ubicado debajo de la planta de tratamiento de agua. Como criterio, dentro de esta distancia de 8 km, debe haber un acuífero presente y accesible para evaluar la posibilidad de recarga artificial.

Tratamiento secundario o terciario.

Para aplicar el protocolo, la presencia o viabilidad de un tratamiento terciario de aguas residuales es un requisito importante. El tratamiento terciario garantiza que la calidad del agua cumpla con los estándares necesarios para muchas opciones de reasignación, incluyendo riego y recarga de acuíferos, ya que elimina nutrientes, patógenos y contaminantes. Para las ubicaciones que actualmente cuentan con una planta con tratamiento secundario, se asume que una actualización a tratamiento terciario es necesaria y considerada técnica y económicamente viable. Las plantas de depuración que sólo tienen tratamiento primario se consideran inadecuadas para la aplicación del protocolo, ya que las inversiones en nuevos sistemas de tratamiento e infraestructura para actualizar a tratamiento terciario se consideran demasiado costosas e irreales. Por lo tanto, solo las plantas con sistemas de tratamiento secundario y terciario se etiquetan como adecuadas.

Área agrícola disponible para riego.

Dado que el objetivo del protocolo es investigar los efectos de reasignar la ARD para fines agrícolas en la Vall d'Albaida, un criterio para implementar el protocolo es la disponibilidad de área agrícola. Vall d'Albaida es una región rural donde la mayoría del territorio se utiliza para fines agrícolas. En este caso, se asume que dentro del radio de 8 km alrededor de cada planta de tratamiento de agua en la región, existe suficiente área agrícola disponible para potencialmente irrigar con ARD.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Ausencia de otras fuentes de agua superficial (lago/embalse).

Otro criterio importante para aplicar el protocolo es la ausencia de otras fuentes de agua superficial disponibles, como lagos y embalses. Se mencionan específicamente lagos y embalses, ya que la definición de río es muy amplia, especialmente cuando se incluyen barrancos. Cuando existen fuentes alternativas de agua superficial accesibles, es probable que ofrezcan una opción más rentable y técnicamente menos complicada para el riego en comparación con la reutilización de ART. El agua superficial suele requerir menos tratamiento e implica una infraestructura más sencilla. Por lo tanto, el protocolo se considera más relevante en contextos donde el agua superficial no está disponible o es muy limitada, ya que en estas ubicaciones el ART ofrece una oportunidad valiosa como fuente de agua que puede utilizarse, entre otros, para riego y recarga de acuíferos. Por esta razón, para la extrapolación GIS, se ha utilizado una zona de amortiguamiento de 500 m alrededor de lagos y embalses, según Pedrero et al. (2011).

En este sentido, una extrapolación del protocolo diseñado a toda la comarca, identifica hasta 24 localizaciones de las 27 potenciales en las que sería técnicamente posible reutilizar el agua depurada para el riego.

Conclusiones

Se concluye que, en aquellas estaciones de depuración en las que el agua tratada no se esté utilizando para la agricultura, tanto el escenario de riego directo como el de recarga del acuífero requieren cambios e inversiones significativas. Ambos requieren mejoras en el tratamiento terciario, así como la construcción de pozos e infraestructura de riego. Este cambio en la reasignación del ARD tiene impactos ambientales directos, incluyendo la reducción del caudal en el barranco de la zona y los posibles efectos sobre la composición y calidad de las aguas. Además, podrían surgir conflictos sobre derechos de agua, pagos y acceso entre las partes interesadas.

Finalmente, los resultados del estudio de caso indican que tanto el escenario de riego directo como el de recarga del acuífero probablemente no sean viables en localidades pequeñas y remotas como Fontanars dels Alforins, debido a las inversiones económicas y técnicas requeridas. Sin embargo, en otras ubicaciones con infraestructura de riego ya existente y una mayor producción de agua depurada, el uso de ARD para riego podría ser una estrategia más sostenible económicamente.

De todos modos, el protocolo diseñado enfatiza que las aguas residuales no deben considerarse simplemente como un recurso gratuito para “reutilizar”, sino como agua que ya forma parte del ciclo hídrico local.

Por lo tanto, cada región debe evaluarse cuidadosamente dentro de sus condiciones ambientales y socioeconómicas locales. Comprender completamente los efectos de reasignar ARD ayudará a evaluar los beneficios y desventajas y a tomar decisiones responsables.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Agradecimientos

Este trabajo se enmarca dentro de las actividades de transferencia y valorización de resultados del equipo de investigación Agua & Cultivos del CIDE financiado por el IVACE+i Proyecto TRAGUA INNACC/2024/17.

Referencias

Pedrero, F., Albuquerque, A., Do Monte, H. M., Cavaleiro, V., & Alarcón, J. J. (2011). Application of GIS-based multi-criteria analysis for site selection of aquifer recharge with reclaimed water. Resources, conservation and recycling <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.08.003>

ARTÍCULO 5

Adaptación de las infraestructuras hidráulicas existentes a los nuevos retos

PRIMA TRUST

Innovación y Economía Circular en la reutilización de aguas residuales textiles y farmacéuticas

Palabras clave

REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES, ESCASEZ HÍDRICA, CAMBIO CLIMÁTICO, INFRAESTRUCTURAS DEL AGUA, RESILIENCIA HÍDRICA, ECONOMÍA CIRCULAR, MEMBRANAS, DSS (DECISION SUPPORT SYSTEM), PLANIFICACIÓN PARTICIPATIVA, INDUSTRIA TEXTIL Y FARMACÉUTICA



La **gestión sostenible del agua se ha convertido en un desafío crítico en el Mediterráneo**, donde la sobreexplotación de los recursos hídricos, combinada con el cambio climático, incrementa el riesgo de escasez hídrica en numerosas regiones, entre ellas las de la región mediterránea en la cual nos encontramos.

Para asegurar la resiliencia y la seguridad de las infraestructuras del agua frente a estos retos, el proyecto TRUST (Management of industrial Treated wastewater ReUse as mitigation measures to water Scarcity in climate change context in two Mediterranean regions) propone y valida soluciones técnicas integradas y estrategias de gestión adaptativa.

Sara Ros Cardoso

Investigadora y consultora en ICATALIST

Elena López Gunn

Directora y CEO de ICATALIST

Catia Algieri

Investigadora en el Instituto de Tecnología de Membranas, Consejo Nacional de Investigación de Italia (ITM-CNR)

Marc Héran

Profesor de ingeniería química en el Instituto Europeo de Membranas (IEM), en la Universidad de Montpellier, en Francia.

Issam Nouri

Profesor de gestión de recursos hídricos en el Instituto Agronómico de Túnez (INAT)

Francesc Hernández

Catedrático de economía aplicada y coordinador del Grupo de Economía del Agua de la Universitat de València (UV)

Malika Ghazi

Consultora en TERIVA Environment

Vincenza Calbro

Profesora de ingeniería química en la Universidad de Calabria (UNICAL) en Italia

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

TRUST se centró en dos casos de estudio de reutilización de aguas residuales tratadas en las industrias textil y farmacéutica en dos regiones piloto: Monastir (Túnez) y Esmirna (Turquía) para el análisis de tecnologías innovadoras para la recuperación de agua y sustancias útiles, y el ahorro de energía bajo el principio de la economía circular.

Los resultados de TRUST demuestran que **existe viabilidad de modernizar la infraestructura de tratamiento existente mediante procesos de membranas integradas** (como la oxidación tipo foto-Fenton, la ultrafiltración, la adsorción híbrida, reactores fotocatalíticos de membrana y la ósmosis inversa). La innovación consiste en el desarrollo de unas membranas fotocatalíticas compuestas que incorporan novedosos nanocompuestos fotocatalizadores, los cuales presentan una mayor eficiencia catalítica y son capaces de funcionar bajo la luz solar. Estas tecnologías avanzadas pueden permitir también alcanzar altos niveles de recuperación de agua que cumpla a su vez con los criterios de calidad para irrigación y otros usos.

Introducción

Las regiones mediterráneas se enfrentan a una crisis hídrica agravada por la combinación de una demanda creciente de agua y los efectos acelerados del cambio climático. En este contexto, las infraestructuras hidráulicas existentes, diseñadas bajo condiciones climáticas anteriores y actualmente cambiantes, se encuentran a menudo obsoletas o son insuficientes para responder a los nuevos retos de escasez y variabilidad extrema. La adaptación a las nuevas condiciones no implica únicamente la construcción de nuevas infraestructuras, sino la transformación inteligente de las plantas de tratamiento de aguas existentes basadas en modelos de economía circular que permitan cerrar el ciclo del agua.

Más allá de la innovación técnica, **TRUST incluyó una Planificación Adaptativa Participativa (PAP)** para mejorar la confianza y la aceptación social de la reutilización de aguas residuales, **y el uso de un Sistema de Soporte a la Decisión (DSS)** integrado (con modelos SWAT-WEAP-MODFLOW) para simular el impacto de diferentes escenarios de mitigación, demostrando que las estrategias combinadas son las más resilientes frente al escenario climático más severo. Por ejemplo, aplicando las tecnologías estudiadas para el ahorro de agua en ciudades, reutilización de agua en industrias y uso del agua residual tratada para la recarga de acuíferos.

La implementación de estas soluciones podría traducirse en un impacto socioeconómico significativo, asegurando la estabilidad del suministro para las industrias y ofreciendo beneficios cuantificados en la microescala (una sola empresa) que varían entre 745 millones de euros y 22,5 mil millones de euros en un período de 30 años en el sector textil de Túnez y Turquía, respectivamente, mientras que en el sector farmacéutico de Turquía variaría entre 174 millones de euros y mil millones de euros en el mismo periodo, 30 años. TRUST, proyecto finalizado en 2025, ha proporcionado una base para el plan de acción en estas regiones para fortalecer la infraestructura hídrica, haciéndola más segura, sostenible y adaptada a las condiciones climáticas futuras.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

El proyecto TRUST (Management of industrial Treated wastewater ReUse as mitigation measures to water Scarcity in climate change context), financiado por el programa PRIMA, nace como un caso de estudio en esta transición. Siendo su objetivo principal demostrar cómo la integración de tecnologías avanzadas en instalaciones industriales y urbanas ya operativas puede mitigar la escasez de agua en regiones críticas como Túnez y Turquía.

La necesidad de esta adaptación es urgente, confirmado por modelos climáticos que proyectan que, bajo escenarios de altas emisiones de gases de efecto invernadero, la disponibilidad de agua subterránea y los caudales superficiales sufrirán reducciones drásticas, poniendo en riesgo tanto la agricultura como la industria de las regiones mediterráneas. Por tanto, la infraestructura hidráulica debe evolucionar para convertirse en centros de recuperación de recursos (agua, sales y subproductos), integrando soluciones técnicas además de una gobernanza participativa que asegure la aceptación social de la reutilización de aguas residuales.

Metodología

Para abordar la adaptación de las infraestructuras hidráulicas, el proyecto TRUST se centró en el estudio de la innovación tecnológica ("upgrading" de plantas existentes principalmente).

En primer lugar, se procedió a la **validación y prueba de tecnologías de tratamiento con aguas residuales obtenidas de industrias voluntarias**. En lugar de buscar construir desde cero, la investigación se centró en la mejora de plantas de tratamiento en industrias textiles y farmacéuticas clave en Turquía y en Túnez ya operativas. La metodología técnica se centró en alcanzar un nivel de madurez tecnológica (TRL) de 6, integrando procesos de biorreactores de membrana (MBR), oxidación tipo foto-Fenton, ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF), adsorción usando arcilla y carbón activo, reactores fotocatalíticos de membrana y la ósmosis inversa (RO). El objetivo fue tratar efluentes complejos para alcanzar estándares de calidad de agua que permitieran su reutilización interna o agrícola.

En segundo lugar, se desarrolló un **Sistema de Soporte a la Decisión (DSS) basado en la integración de modelos hidrológicos y de gestión** (SWAT, WEAP y MODFLOW). Esta herramienta permitió simular el comportamiento de las cuencas y acuíferos bajo diferentes escenarios climáticos (RCP 4.5 y 8.5) y de gestión hasta el año 2050. La metodología DSS no sólo evaluó la disponibilidad física del agua, sino que integró variables socioeconómicas para comparar el impacto de diferentes estrategias, como la recarga de acuíferos o el reúso industrial.

Finalmente, y como elemento diferenciador, se implementó un **marco de Planificación Adaptativa Participativa (PAP)**. A través de una serie de talleres de co-creación estructurados durante el proyecto, se involucró a autoridades del agua, industrias, agricultores y a la sociedad civil para identificar barreras y diseñar planes de acción basados en la opinión de los actores involucrados en las actividades participativas, asegurando que las soluciones técnicas fueran también institucional y socialmente viables.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Resultados

La aplicación de esta metodología ha arrojado **resultados concluyentes sobre la viabilidad de adaptar las infraestructuras existentes**, así como sobre la urgencia de actuar frente a los escenarios climáticos modelados.

En el ámbito tecnológico, las pruebas piloto demostraron que la actualización de plantas mediante sistemas híbridos de membranas y oxidación permite recuperar recursos de alto valor.

En la industria textil turca, se logró un hito significativo al demostrar, en la instalación semi-piloto, que sería posible reciclar y reutilizar hasta el 95% del agua del proceso con la integración de tecnologías de membrana, consiguiendo la recuperación de sales y la valorización de sólidos, cerrando efectivamente el ciclo del agua industrial. En Túnez, las configuraciones optimizadas combinadas con tecnologías de membranas (ej.: MBR + NF/RO) permitieron alcanzar calidades de agua aptas para su reutilización y para el riego, superando las limitaciones de los sistemas convencionales frente a la salinidad y los contaminantes persistentes.

Desde la perspectiva de la modelización de escenarios, los resultados subrayan la insuficiencia de las medidas actuales. Las simulaciones bajo el escenario de cambio climático severo (RCP 8.5) para la región de Monastir (Túnez) indicaron que, sin intervención (escenario de referencia), el almacenamiento de agua subterránea disminuiría un 73% para 2050 (Figura 1).

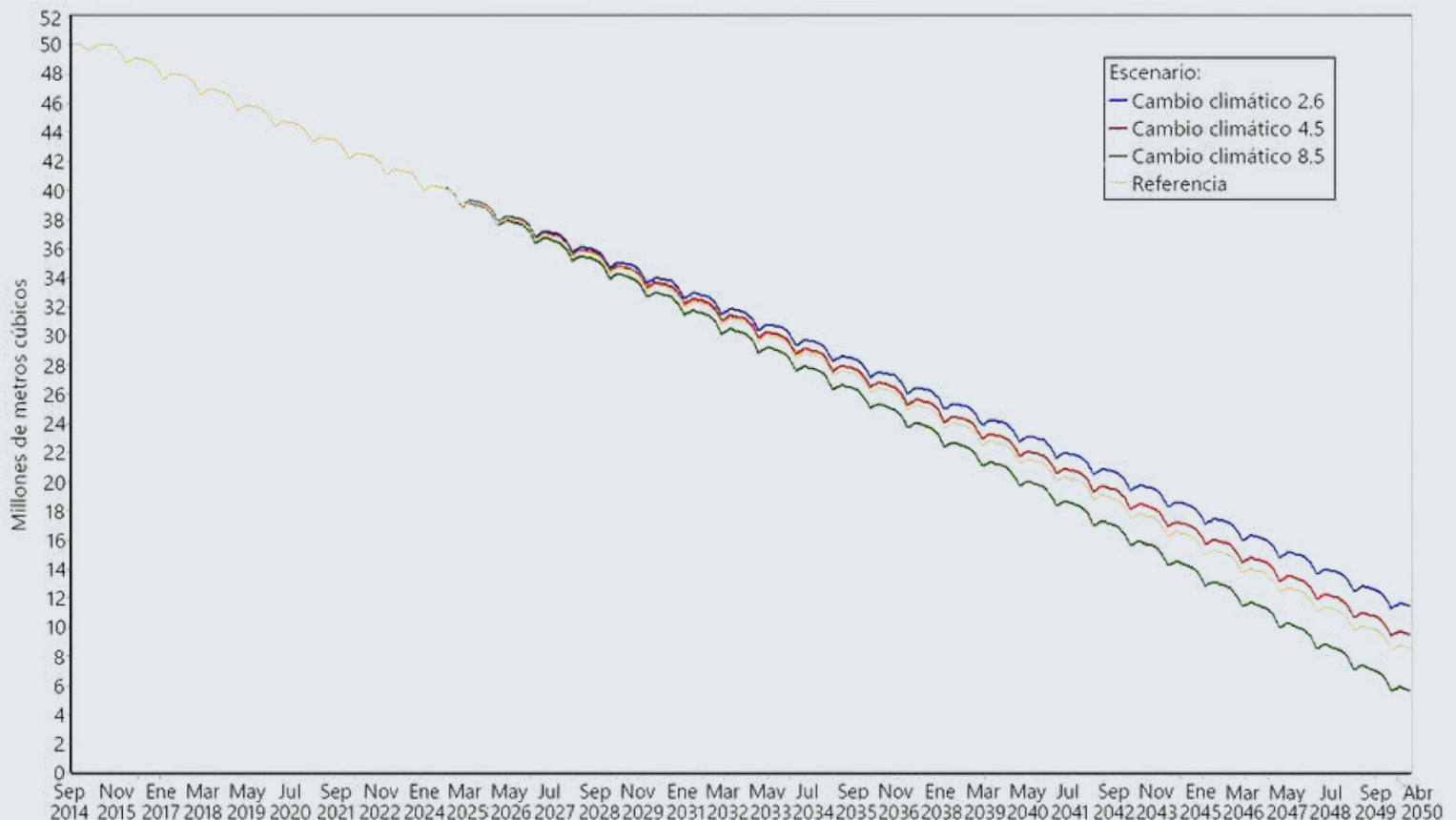


Figura 1. Cambio en el almacenamiento de aguas subterráneas de Monastir (Túnez) según el escenario de referencia, RCP4.5 y RCP8.5.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

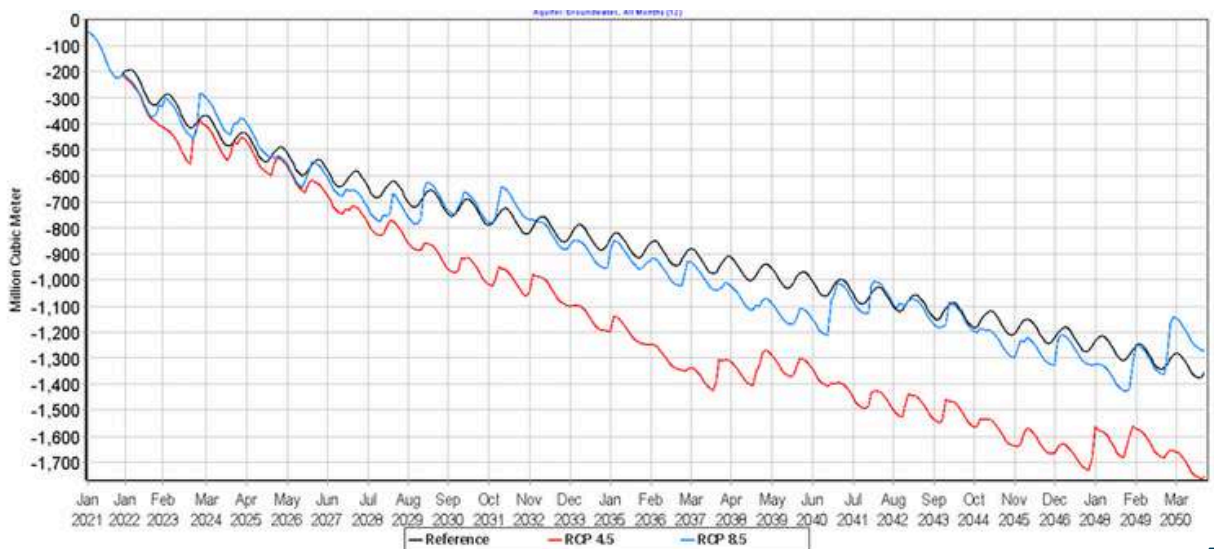
Sin embargo, la implementación de estrategias combinadas de adaptación revierte dramáticamente esta tendencia. La estrategia holística seleccionada, que combina todas las medidas presentadas (Tabla 1) en el taller de co-creación (el ahorro de agua potable, el reúso de aguas residuales urbanas e industriales, la desalinización y la recarga de acuíferos) logra estabilizar el déficit hídrico y ofrece un Retorno de la Inversión (ROI) superior al 26%.

INVESTISSEMENT	SC Increased water resources (Water desalination plant) -Seawater desalination capacity 50,000 m3/day KPI-1 : Volume added : 2050 : 6.7Mm3 KPI-2 : Investment cost: €600 Million KPI-3 : Return on investment: 2.23%	S2+SC KPI-1 : Volume added: 2050 : 12.6 Mm3 KPI-2 : Investment cost: € 664 Million KPI-3 : Return on investment: 20.67%	S3+SC KPI-1 : Volume added: 2050 : 12.7 Mm3 KPI-2 : Investment cost: €680 Million KPI-3 : Return on investment: 17.23%
	SB Self-recycling and reuse of industrial water -80% reduction in water consumption by textile industry KPI-1 : Volume added: 2050 : 7.5 Mm3 KPI-2 : Investment cost: €180 Million KPI-3 : Return on investment: 8.33%	S2+SB KPI-1 : Volume added: 2050 : 13.4 Mm3 KPI-2 : Investment cost: €244 Million KPI-3 : Return on investment: 26.77%	S3+SB KPI-1 : Volume added: 2050 : 13.5 Mm3 KPI-2 : Investment cost: €260 Million KPI-3 : Return on investment: 23.33%
	S1A Drinking water saving -50% decrease in water consumption per subscriber -75% leak management, resulting in 95% network efficiency KPI-1 : Volume added: 2050 : 4 Mm3 KPI-2 : Investment cost: €160 Million KPI-3 : Return on investment: 5%	S2 Agricultural Wastewater Reuse (Domestic Wastewater treatment plant) -Capacity to treat 40,000 m3/d of domestic wastewater KI-1 : Volume added: 2050 : 5.9 Mm3 KPI-2 : Investment cost: €64 Million KPI-3 : Return on investment: 18.4%	S3 Increased Aquifer Recharge (Infiltration Wells) -Increased Aquifer recharge From industrial return KPI-1 : Volume added: 2050 : 6 Mm3 KPI-2 : Investment cost: €80 Million KPI-3 : Return on investment: 15%
	MANAGEMENT		

Tabla 1. Estrategias propuestas en el taller final de co-creación, junto a sus KPIs estudiados.

En el caso de estudio de Esmirna (Turquía), los modelos mostraron que la variabilidad del flujo fluvial aumentará drásticamente bajo el escenario RCP 8.5 (Figura 2). La estrategia co-creada, que integra el ahorro de agua potable (S1), el uso de agua urbana tratada para agricultura (S2) y la recarga de acuíferos (S3), medidas presentadas en el taller de co-creación (Tabla 1), se identificó como la estrategia preferida para estabilizar el almacenamiento subterráneo y mantener la seguridad hídrica.

Figura 2. Cambio en el almacenamiento de agua subterránea de Esmirna (Turquía) en relación con un almacenamiento inicial arbitrario de cero para los escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5



REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Finalmente, el proceso participativo derivó en unas primeras versiones de Planes de Acción basados en las preferencias de estrategias de los actores locales. Durante el mismo, un hallazgo clave fue la identificación de barreras no técnicas, por ejemplo, en Monastir, la reticencia de los agricultores al uso de agua regenerada obligó a incluir la desalinización en la estrategia final, a pesar de su mayor coste, demostrando que la adaptación de infraestructuras debe alinearse con la aceptación social. Estos planes definen roles claros, estableciendo una hoja de ruta a 5 años para la implementación de estas infraestructuras resilientes.

Resultados

La experiencia del proyecto TRUST, finalizado en 2025, confirma que la resiliencia hídrica futura depende de la transformación de las actuales plantas de tratamiento de aguas residuales en instalaciones de recuperación de recursos, integrando principios de economía circular y gobernanza participativa.

Desde una perspectiva técnica y económica, los resultados validan que la modernización de instalaciones industriales y de plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas mediante tecnologías híbridas, como la combinación de biorreactores de membrana (MBR), oxidación avanzada y ósmosis inversa, es una estrategia viable para la paliación del impacto en el sector del agua y sus recursos. Estas intervenciones no solo permiten cerrar el ciclo del agua con estándares de calidad aptos para el riego y procesos industriales, sino que también demuestran que pueden ser económicamente sostenibles.

Sin embargo, una conclusión crítica de este estudio es que la tecnología, por sí sola, no garantiza el éxito de la adaptación. La infraestructura gris debe ir acompañada de una "infraestructura social" robusta. Los procesos de Planificación Adaptativa Participativa (PAP) revelaron que barreras no técnicas, como la reticencia de los agricultores al uso de aguas regeneradas o la fragmentación institucional, pueden bloquear la implementación de estas soluciones. Por tanto, la adaptación de las infraestructuras requiere una gobernanza inclusiva que alinee las soluciones técnicas con la aceptación social y los marcos regulatorios.

Finalmente, frente a escenarios de cambio climático severo, la inacción conlleva costes ambientales y económicos importantes, como el agotamiento irreversible de acuíferos y la pérdida de competitividad industrial. La estrategia ganadora no reside en una única solución, sino en un enfoque holístico que combine la reducción de pérdidas en la red, la reutilización de aguas residuales tratadas y la recarga gestionada de acuíferos. El modelo validado en Túnez y Turquía puede ser una hoja de ruta replicable para otras regiones con estrés hídrico, demostrando que es posible compatibilizar el desarrollo industrial y una buena gestión del agua mediante la innovación en las infraestructuras existentes.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Agradecimientos

La implementación y el éxito del proyecto TRUST no habrían sido posibles sin la colaboración y la experiencia de todos los socios del consorcio, quienes trabajaron conjuntamente en esta investigación junto a nosotros.

Finalmente, agradecemos a la Fundación PRIMA por la financiación y el seguimiento que hicieron realidad esta iniciativa de innovación para la gestión sostenible del agua en el Mediterráneo.

ARTÍCULO 6

Adaptación de las infraestructuras hidráulicas existentes a los nuevos retos

HACIA SISTEMAS HÍBRIDOS DE REUTILIZACIÓN DE AGUA: APRENDIZAJES TRAS 20 AÑOS DE OPERACIÓN EN CAN CABANYES (GRANOLLERS)

Palabras clave

REUTILIZACIÓN DE AGUA; SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA; HUMEDALES CONSTRUIDOS; SISTEMAS HÍBRIDOS; GOBERNANZA DEL AGUA; INFRAESTRUCTURAS VERDES



La reutilización de agua se ha convertido en un elemento estratégico fundamental para aumentar la resiliencia hídrica y reducir la presión sobre los recursos convencionales, especialmente en regiones sometidas a estrés hídrico recurrente. En este contexto, las Soluciones Basadas en la Naturaleza (NBS) ofrecen un enfoque complementario y sostenible a las tecnologías de tratamiento terciario convencionales. El caso del parque periurbano de Can Cabanyes (Granollers, Cataluña) constituye un ejemplo pionero de sistema híbrido de reutilización de agua con más de veinte años de funcionamiento continuo.

El sistema integra un humedal construido de flujo superficial, un tratamiento terciario con filtración y desinfección, y una red municipal de distribución de agua regenerada destinada a usos urbanos, como el riego de zonas verdes y la limpieza viaria.

El humedal, con una superficie aproximada de 1 hectárea y alimentado por el efluente secundario de la EDAR de Granollers, ha mostrado una elevada estabilidad operativa en la reducción de sólidos en suspensión, materia orgánica y bacterias indicadoras fecales.

Aunque la eliminación de amonio presenta variaciones estacionales asociadas a la temperatura, el rendimiento global se mantiene dentro de los objetivos de diseño.

Joan García

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

joan.garcia@upc.edu

Xavier Romero

Consorci Besòs-Tordera

xromero@besos-tordera.cat

Eva González-Flo

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

eva.gonzalez.flo@upc.edu

Antonio Ortiz-Ruiz

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

Antonio.ortiz.ruiz@upc.edu

Guillermo Iglesias

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

Guillermo.iglesias@upc.edu

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

La evaluación del sistema se ha basado en una monitorización continua de parámetros fisicoquímicos, microbiológicos, contaminantes emergentes y virus, combinada con un seguimiento ecológico y una valoración económica y social a largo plazo. Los resultados evidencian la capacidad del humedal para reducir significativamente contaminantes emergentes comunes, actuando como un pretratamiento eficaz que refuerza la seguridad sanitaria del sistema de reutilización.

Desde una perspectiva ecológica y social, Can Cabanyes ha evolucionado de un espacio degradado a un enclave clave dentro del corredor fluvial del río Congost, favoreciendo la biodiversidad, la conectividad ecológica y el uso recreativo y educativo por parte de la ciudadanía. El análisis económico confirma que las externalidades positivas generadas superan ampliamente los costes privados de operación.

En conjunto, la experiencia de **Can Cabanyes demuestra que los sistemas híbridos basados en NBS son soluciones fiables, escalables y socialmente aceptadas para la reutilización de agua**, ofreciendo un modelo replicable alineado con los principios de sostenibilidad, economía circular y gestión integrada de los recursos hídricos.

Introducción

La reutilización de agua se presenta en la actualidad como una responsabilidad ineludible dentro de la estrategia por aumentar la resiliencia hídrica y reducir la presión sobre los recursos convencionales. En regiones sometidas a estrés hídrico recurrente la implementación de dicha práctica se vuelve especialmente crítica. Sin embargo, su aplicación todavía afronta desafíos. En este contexto, **las Soluciones Basadas en la Naturaleza (NBS) ofrecen un enfoque complementario a las tecnologías convencionales de tratamiento terciario** (Sowińska-Świerkosz & García, 2022).

Tras más de veinte años de funcionamiento, el parque periurbano de Can Cabanyes (Granollers, Catalunya) constituye un ejemplo pionero de sistema híbrido de reutilización de agua que combina un humedal construido de flujo superficial, una planta de tratamiento terciario de filtración desinfección y una red municipal de distribución de agua regenerada (Gonzalez-Flo et al., 2023).

El humedal, con una superficie de 1 ha, está alimentado por el efluente secundario de la EDAR de Granollers. El sistema ha demostrado una elevada estabilidad operativa, especialmente en la reducción de sólidos en suspensión, materia orgánica y bacterias indicadoras y, pese a que la eliminación de amonio presenta variaciones estacionales asociadas a la temperatura, ésta se mantiene dentro de los objetivos de diseño. El seguimiento realizado por técnicos e investigadores ha permitido evaluar

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

El seguimiento realizado por técnicos e investigadores ha permitido evaluar el rendimiento de estos sistemas híbridos y su evolución, así como sus beneficios.



Imagen 1: Vista aérea del parque periurbano de Can Cabanyes, con el humedal a la izquierda del río Congost.

Además de su capacidad para mejorar la calidad del agua que trata, ha generado mejoras ambientales significativas como el aumento de biodiversidad, la recuperación de hábitats ribereños y la creación de un espacio recreativo valorado y utilizado por la ciudadanía.

Estas externalidades positivas, valoradas económicamente, superan ampliamente los costes privados de operación, convirtiendo el proyecto en un ejemplo de retorno social y ambiental alineado con los criterios de la Directiva Marco del Agua (Romero, 2023).

La experiencia de Can Cabanyes demuestra que los sistemas híbridos basados en NBS pueden ofrecer soluciones fiables, escalables y socialmente aceptadas para la reutilización de agua, proporcionando un modelo replicable para municipios y regiones que buscan fortalecer su seguridad hídrica y su transición hacia una economía circular del agua.

Fruto de esta experiencia, se proponen estándares innovadores para el diseño y gestión de sistemas híbridos de reutilización.

Metodología

La actuación en Can Cabanyes comenzó a principios de los años 2000 con un proyecto integral de restauración fluvial del río Congost. Este incluía la recuperación de bosques de ribera, la creación de zonas de transición ecológica y la construcción de un humedal de flujo superficial diseñado para tratar parte del efluente secundario de la EDAR de Granollers. El humedal, de aproximadamente 1 ha, se estructuró con zonas de poca profundidad plantadas con *Phragmites australis* y *Typha latifolia*, áreas más profundas sin vegetación y una isla central destinada a favorecer la avifauna (García & Domingo, 2006).

El sistema evolucionó técnicamente entre 2008 y 2010 con la mejora de la EDAR, cuyo efluente recibe el humedal, que incorporó procesos biológicos de nitrificación y desnitrificación. También se construyó la planta de regeneración, posterior al humedal, y equipada inicialmente con filtros de discos y desinfección por hipoclorito sódico y posteriormente mejorada con filtración rápida de arena. En la puesta en práctica de la regeneración, la logística también juega un papel clave. La red de distribución del agua regenerada de Can Cabanyes incluye más de 8 km de tuberías destinadas al riego de zonas verdes, limpieza viaria y otros usos municipales.

Para la evaluación del sistema durante todos estos años, han sido fundamentales **tres aspectos**:

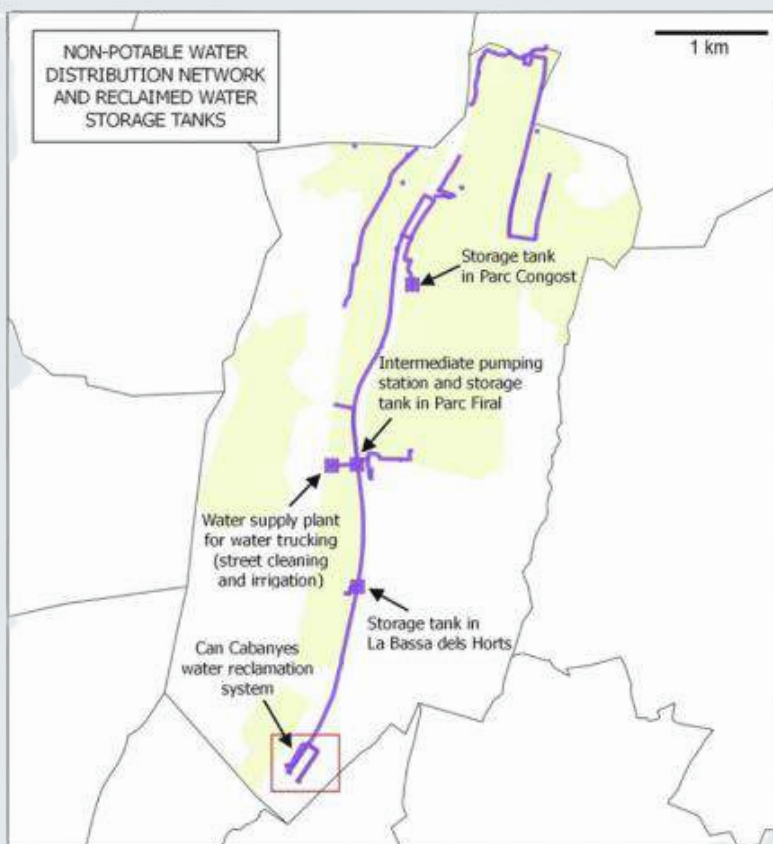


Figura 1. Sistema de reutilización en Granollers mostrando la distribución de agua no potable y los depósitos de almacenamiento (Gonzalez-Flo et al., 2023).

Monitorización continua y análisis de datos:

durante dos décadas, se han monitorizado parámetros fisicoquímicos (COD, TSS, amonio), microbiológicos (Coliformes, E. coli, Enterococos), contaminantes emergentes y virus.

Seguimiento ecológico del entorno:

desde técnicos del ayuntamiento hasta investigadores han hecho el seguimiento de la evolución de la biodiversidad, detectando procesos de recolonización y asentamiento de especies protegidas.

Evaluación económica y social:

Gracias el seguimiento de las operaciones de tratamiento, que incluyen desde el bombeo de las aguas hasta la dosificación de cloro en el sistema, se puede evaluar el coste real de operación y compararlo con la valoración económica de las externalidades positivas y percepción ciudadana, integrando criterios de la Directiva Marco del Agua y metodologías de coste-beneficio.

Resultados

A lo largo de su funcionamiento, el humedal ha demostrado una notable estabilidad en parámetros clave de calidad de agua, con concentraciones de materia orgánica y sólidos en suspensión que se mantienen dentro de los rangos esperados, entre 50 y 65 mg/L y alrededor de los 10 mg/L, respectivamente.

Durante la fase inicial de puesta en marcha (2003), se observaron concentraciones efluentes elevadas de sólidos en suspensión (TSS), DQO y amonio, atribuibles principalmente al proceso de estabilización ecológica del sistema y al desarrollo inicial de la vegetación y del biofilm. En los primeros meses, las concentraciones de TSS y DQO en el efluente incluso llegaron a superar puntualmente las del influente, fenómeno asociado a condiciones eutróficas y a la resuspensión de materia orgánica propia del sistema (García & Domingo, 2006; Llorens et al., 2009).

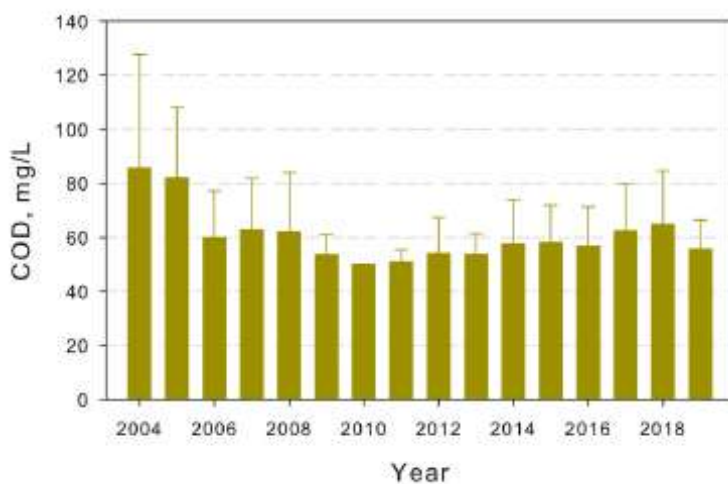


Figura 2. Concentraciones medias anuales de DQO en el efluente del humedal. También se muestran las desviaciones estándar. (Gonzalez-Flo et al., 2023).

Una vez alcanzada la madurez ecológica del humedal, la calidad del efluente mejoró de forma significativa y el sistema mostró una elevada fiabilidad operativa. Con unas concentraciones medias del influente procedente de la EDAR situadas en torno a 35 mg/L de TSS, 150 mg/L de COD y 30 mg N/L de amonio (Llorens et al., 2009), el humedal presenta eficiencias de eliminación de amonio entre el 64% y el 87%, con una clara dependencia estacional relacionada con la temperatura y la actividad biológica del sistema (Llorens et al., 2009).

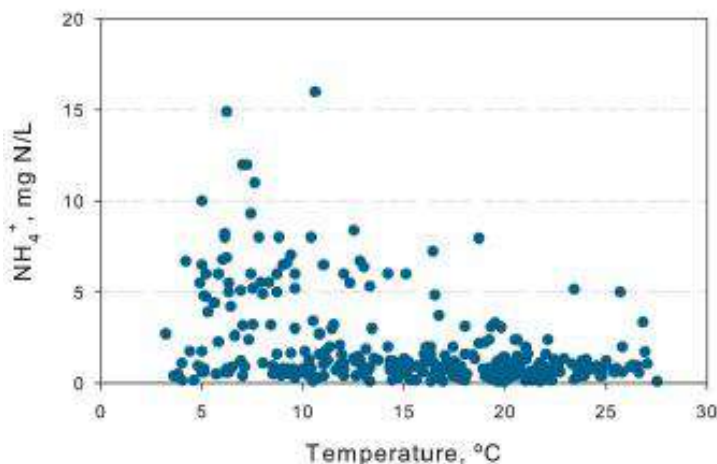


Figura 3. Relación entre la concentración de amonio y la temperatura del agua. Gráfico elaborado con datos únicamente del periodo 2010–2019 debido a la ausencia de mediciones de temperatura anteriores a 2010. $n = 45$ por año. (Gonzalez-Flo et al., 2023).

En cuanto a la nitrificación, es menos eficiente durante los meses fríos (Figura 3), confirmando el papel de los procesos microbiológicos dependientes de la temperatura en los humedales de flujo superficial (González-Flo et al., 2023).

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Sobre la calidad microbiológica, el sistema consigue una reducción aproximada de 2 unidades logarítmicas (Tabla 1) en coliformes fecales, consolidando el papel del humedal como etapa de pretratamiento antes de la regeneración convencional (Llorens et al., 2009).

Parámetro	Efluente secundario	Humedal	Planta de regeneración	Red
<i>E. coli</i> , log MPN/100 mL	4.8 ± 0.6 (3.7–5.8)	1.7 ± 0.9 (0–2.7)	0.2 ± 0.7 (0–2.4)	1.1 ± 1.2 (0.3–2.2)
Enterococos, log MPN/100 mL	4.1 ± 0.7 (2.9–5)	1.3 ± 0.5 (0–2)	0.3 ± 0.7 (0–1.9)	0.8 ± 0.9 (0–2.4)
HAdV, log GC/100 mL	3.3 ± 0.9 (1.5–5)	0.7 ± 1 (0–2.9)	0	0

Tabla 1. Valores medios ± desviación estándar, junto con los valores mínimo y máximo registrados (entre paréntesis), de los parámetros microbiológicos medidos en el estudio realizado entre 2016 y 2017 (Rusiñol et al., 2020)

Pese a que los indicadores microbiológicos muestran el potencial del humedal para reducir notablemente la concentración de coliformes y enterococos, aunque debe estar respaldado por un tratamiento terciario posterior para reforzar y garantizar la seguridad para usos municipales. En cuanto a los virus, los estudios llevados a cabo también han aportado evidencias de la relevancia del humedal como componente de seguridad sanitaria y no únicamente como depurador convencional (Rusiñol et al., 2020).

En cuanto a contaminantes emergentes, un asunto de actualidad y preocupación, también se han constatado la alta eficiencia en la degradación de fármacos ampliamente presentes en aguas residuales, como ibuprofeno o ketoprofeno, mientras que otros compuestos más persistentes, como la carbamazepina, evidencian la limitación común de estos sistemas naturales (Matamoros et al., 2008). Los procesos de fotodegradación, biodegradación aerobia y retención prolongada explican en gran medida los buenos resultados observados, y refuerzan la idea de que las NBS pueden actuar como un pretratamiento para agua regenerada.

En conclusión, si hablamos de depuración, el conjunto humedal-planta de regeneración constituye un eficaz sistema híbrido que produce agua regenerada de muy alta calidad de forma fiable durante todo el año, independientemente de variaciones estacionales y de cambios en caudales (Gonzalez-Flo et al., 2023).

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

A nivel ecológico Can Cabanyes ha evolucionado desde un espacio degradado a un espacio clave dentro del corredor fluvial del Congost. La presencia continuada y el buen estado de conservación de especies de interés, como la tortuga de agua ibérica (*Mauremys leprosa*), así como la consolidación de comunidades de aves y vegetación ribereña, evidencian la calidad y funcionalidad del ecosistema. Este proceso de renaturalización no solo ha recuperado biodiversidad, sino que ha incrementado la conectividad ecológica entre distintos tramos del río, facilitando el desplazamiento y la recolonización de fauna (Romero, 2023).

Desde la perspectiva social, el humedal se ha integrado de forma natural en el tejido urbano como espacio de visita, paseo y educación ambiental. Encuestas realizadas en 2022 por el Ayuntamiento de Granollers muestran una alta valoración por parte de la ciudadanía, que reconoce tanto su valor ecológico como su papel en la mejora del paisaje urbano.



Imagen 2. Punto de observación de fauna en el humedal de Can Cabanyes (Ayuntamiento de Granollers)

La visibilidad pública del proyecto ha contribuido además a comunicar el uso del agua regenerada y a educar sobre los intereses de ésta.

En el ámbito económico, los análisis realizados demuestran que las externalidades positivas asociadas al proyecto como la mejora del paisaje, el aumento del bienestar social o la recuperación ecológica superan ampliamente los costes privados de operación.

La escasa inversión inicial, unida a unos costes de mantenimiento moderados, convierte al sistema en un ejemplo de solución rentable y

eficiente dentro de la planificación hídrica municipal (Alfranca et al., 2011).

El análisis económico del sistema de Can Cabanyes muestra que el valor del agua regenerada producida se sitúa aproximadamente entre 0,71 y 0,75 €/m³, mientras que los costes privados de operación del humedal se estiman entre 0,50 y 0,54 €/m³ (Alfranca et al., 2011).

Cuando se incorporan las externalidades positivas, especialmente el valor recreativo, ambiental y educativo del parque periurbano, el valor económico total alcanza aproximadamente 1,25 €/m³, superando claramente los costes privados del sistema (Alfranca et al., 2011).

La experiencia municipal de Granollers refuerza esta interpretación, ya que la apuesta por el sistema de reutilización ha producido alrededor de 1,4 hm³ de agua regenerada hasta 2020, contribuyendo a reducir el consumo de agua potable en usos urbanos como riego de jardines y limpieza viaria (Ajuntament de Granollers, 2021).

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Conclusiones

La experiencia acumulada en Can Cabanyes demuestra que los sistemas híbridos basados en humedales construidos pueden desempeñar un papel central en la transición hacia modelos de reutilización de agua más sostenibles, resilientes y socialmente aceptados.

Su capacidad para integrar objetivos ambientales, económicos y sociales los convierte en herramientas estratégicas para municipios que enfrentan desafíos de escasez y presión sobre los recursos hídricos.

A partir de los aprendizajes del caso de estudio, pueden definirse **cinco estándares innovadores clave para su replicación:**

- 1. Integración de infraestructuras verdes y grises.** Los humedales pueden actuar como pretratamientos robustos que simplifican los tratamientos terciarios y aumentan la calidad del agua y la seguridad sanitaria.
- 2. Diseño y gestión adaptativos.** Los sistemas deben acomodarse a las condiciones locales, variaciones estacionales y posibles mejoras futuras de las EDAR.
- 3. Monitorización continua y digitalización.** El uso de sensores, SCADA y análisis de largo plazo incrementa la fiabilidad y permite anticipar ajustes operativos.
- 4. Valoración económica basada en externalidades.** La inclusión de beneficios sociales y ecológicos ofrece una visión más realista del retorno de la inversión.
- 5. Gobernanza colaborativa y participación pública.** La aceptación social mejora cuando el proyecto se integra en un espacio comunitario y se comunica de manera transparente.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo y la colaboración de los proyectos europeos TARGET (Interreg Sudoe S1/2.5/F0041), NBS4DROUGHT (Horizon Europe, 101181351) y DECIRE-WATER (Horizon Europe, 101182154), cuyas contribuciones han sido clave para el desarrollo de este trabajo en el ámbito de los recursos hídricos y las soluciones sostenibles. JG agradece el apoyo del programa ICREA Academia.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Referencias

Alfranca, O., García, J. & Varela, H. (2011). Economic valuation of a created wetland fed with treated wastewater located in a peri-urban park in Catalonia, Spain. *Water Science and Technology* 63 (5):891-898. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.267>

García, J. & Domingo, V. (2006). Reutilización de aguas depuradas para usos ambientales en Granollers. *Tecnología del Agua* 263: 62–68

Gonzalez-Flo, E., Romero, X. & García, J. (2023). Nature based-solutions for water reuse: 20 years of performance evaluation of a full-scale constructed wetland system. *Ecol. Eng*, 188: 106876. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106876>

Matamoros, V., García, J. & Bayona, J.M. (2008). Organic micropollutant removal in a full-scale surface flow constructed wetland fed with secondary effluent. *Water Res* 42: 653-660. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.08.016>

Romero, X, (2023). Nature-based solutions in Granollers: From ecosystem restoration to the circular economy. *Nature-Based Solutions* 3: 100072. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2023.100072>

Rusiñol, M., Hundesa, A., Cárdenas-Youngs, Y., et al. (2020). Microbiological contamination of conventional and reclaimed irrigation water: Evaluation and management measures. *Science of The Total Environment* 710: 136298. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136298>

Sowińska-Świerkosz, B. & García, J. (2022). What are Nature-based solutions (NBS)? Setting core ideas for concept clarification. *Nature-Based Solutions* 2: 100009. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2022.100009>



SUBTEMÁTICA 2.

RESILIENCIA DE LAS INFRAESTRUCTURAS DEL AGUA

ARTÍCULO 7

Resiliencia de las infraestructuras del agua

DE LA SEGURIDAD A LA RESILIENCIA: PROTEGER LAS INFRAESTRUCTURAS HÍDRICAS ANTE LAS AMENAZAS DIGITALES

La situación geopolítica actual demuestra que los conflictos también se desarrollan en el ciberespacio. Los episodios recientes en Ucrania, Oriente Medio y los ataques a infraestructuras civiles en Europa han puesto de manifiesto que los servicios esenciales, entre ellos el suministro de agua, se consideran objetivos estratégicos. La digitalización ha permitido mejorar la eficiencia y la capacidad de gestión, pero también ha incrementado la exposición a ciberamenazas. **Riesgos como el sabotaje, el espionaje o el ransomware ya no son escenarios teóricos**, sino amenazas reales con posibles impactos ambientales, sanitarios y económicos.

El ciclo integral del agua —desde la captación hasta la depuración— constituye una infraestructura esencial para la sociedad.

Su gestión se apoya en herramientas propias de la operación, diseñadas para optimizar el control y el funcionamiento de las infraestructuras. Cualquier incidente en estos sistemas puede afectar a la calidad del agua, provocar interrupciones del servicio o generar daños ambientales. Por este motivo abordamos la ciberseguridad de forma integral, combinando la protección de la tecnología operativa (OT), directamente vinculada a los procesos de control y automatización, y de los sistemas de información (IT). La creciente interconexión de sistemas SCADA, redes IoT y entornos de telemetría amplía la superficie de exposición y refuerza la necesidad de medidas avanzadas. El objetivo ya no es únicamente prevenir ataques, sino garantizar la resiliencia y la continuidad del servicio incluso en situaciones adversas.



Palabras clave

CIBERSEGURIDAD, AGUA, RESILIENCIA, INFRAESTRUCTURAS CRÍTICAS, ENS, NIS2, CAPTACIÓN, TRATAMIENTO, DISTRIBUCIÓN, SANEAMIENTO, DEPURACIÓN

David Bruguera Quero

Responsable de seguridad de la información

ADASA Sistemas

www.linkedin.com/in/david-bruguera-a71a9282

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

En este contexto, el marco normativo se ha convertido en una referencia clave. Las normas no solo establecen obligaciones legales, sino criterios técnicos y organizativos para desarrollar sistemas seguros y coordinados. En España, el Esquema Nacional de Seguridad (Real Decreto 311/2022) define los requisitos mínimos de protección y gestión del riesgo. A nivel europeo, la Directiva NIS2 (UE 2022/2555) amplía su alcance a los servicios de agua potable y residual, imponiendo medidas de prevención, gestión y notificación de incidentes.

La aplicación de estos marcos normativos se traduce en acciones concretas que fortalecen la resiliencia, entendida como la capacidad de anticipar, resistir, responder y recuperarse de incidentes manteniendo la continuidad del servicio. Esto se apoya en una gobernanza clara, una defensa en profundidad que integra seguridad física, perimetral y lógica, y medidas técnicas como el hardening de sistemas, la gestión de parches y la validación de software. Son igualmente esenciales la protección de datos mediante copias inmutables, las comunicaciones seguras, la gestión de proveedores y accesos remotos, y la monitorización continua con planes de respuesta probados. Todo ello requiere una cultura de ciberseguridad basada en la formación y concienciación del personal.

Los operadores de agua, como responsables directos de infraestructuras esenciales para la sociedad, afrontan el reto de adaptarse a un entorno normativo y de amenazas cada vez más exigente. En este proceso, desde Adasa Sistemas los acompañamos en la transición hacia modelos operativos más seguros y resilientes, aportando soluciones tecnológicas orientadas a la operación, alineadas con estándares internacionales de seguridad, y colaborando con entidades públicas y privadas para contribuir a un suministro de agua seguro, sostenible y confiable.

Introducción



Imagen 1. Incidentes y ataques de ciberseguridad en 2024 según el informe ENISA threat Landscape

El creciente nivel de dependencia digital de los servicios esenciales está obligando a replantear los enfoques tradicionales de protección de las infraestructuras del ciclo integral del agua. En un contexto marcado por amenazas cada vez más frecuentes y sofisticadas, la seguridad entendida únicamente como prevención resulta insuficiente y debe evolucionar hacia un concepto más amplio de resiliencia, entendida como la capacidad de anticipar, resistir, responder y recuperarse ante incidentes que puedan comprometer la continuidad del servicio.

Este cambio de paradigma adquiere una relevancia especial en las infraestructuras hídricas, cuya protección frente a riesgos digitales es determinante para garantizar el suministro y la confianza de la sociedad

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Desde esta perspectiva, la situación geopolítica actual refuerza la necesidad de enfoques basados en resiliencia. Los conflictos recientes han evidenciado que el ciberespacio se ha consolidado como un ámbito más de confrontación, como demuestran los episodios en Ucrania, Oriente Medio y los ataques a infraestructuras civiles en Europa. Estos acontecimientos confirman que los servicios esenciales, entre ellos el suministro de agua, son considerados objetivos estratégicos. Aunque la digitalización ha mejorado la eficiencia y la capacidad de gestión de las infraestructuras hídricas, también ha incrementado de forma significativa su exposición a ciberamenazas, como el sabotaje, el espionaje o el ransomware, con impactos potenciales ambientales, sanitarios y económicos.



Imagen 2. Monitoreo de ciberseguridad

En este contexto, el ciclo integral del agua — desde la captación hasta la depuración— se configura como una infraestructura esencial cuya gestión se apoya en sistemas diseñados para optimizar el control y la operación. Cualquier incidente que afecte a estas herramientas puede comprometer la calidad del agua, provocar interrupciones del servicio o generar daños medioambientales.

Por este motivo, la ciberseguridad debe abordarse de forma integral, combinando la protección de la tecnología operativa (OT), vinculada a los procesos de control y automatización, y de los sistemas de información (IT). La interconexión de sistemas SCADA, redes IoT y plataformas de telemetría amplía la superficie de exposición y refuerza la necesidad de medidas avanzadas orientadas a garantizar la continuidad del servicio incluso en situaciones adversas.

La digitalización del ciclo del agua ha aportado mejoras significativas en eficiencia, sostenibilidad y control de procesos, pero también ha ampliado la superficie de ataque. Según el Informe IA-04/24 Ciberamenazas y Tendencias del CCN-CERT, el ransomware se consolida como una de las principales amenazas por su capacidad para provocar interrupciones operativas graves, mientras que la actividad de actores externos avanzados incrementa el riesgo de ciberespionaje y accesos persistentes con fines de sabotaje.

A estas amenazas se suma la explotación acelerada de vulnerabilidades conocidas y de día cero, especialmente crítica en entornos OT con sistemas heredados y limitaciones para el parcheo. Asimismo, se observa un uso creciente de técnicas basadas en inteligencia artificial por parte de los atacantes, lo que incrementa la complejidad del escenario de riesgo. Ante este contexto, la ciberseguridad del sector del agua debe orientarse a garantizar la resiliencia y la continuidad del servicio, integrando de forma coherente la protección de los entornos IT y OT frente a un escenario de amenazas dinámico y en constante evolución.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Metodología

La metodología propuesta se fundamenta en un enfoque integrado de gestión del riesgo, resiliencia operativa y cumplimiento normativo, alineado con la realidad tecnológica y regulatoria del sector. Desde esta perspectiva, se consideran de forma conjunta los sistemas IT y OT, reconociendo su interdependencia y la necesidad de aplicar medidas diferenciadas y adaptadas a la criticidad de los servicios prestados.

El marco de referencia nacional es el Esquema Nacional de Seguridad (ENS), regulado por el Real Decreto 311/2022, que establece la obligación de aplicar una gestión continua del riesgo basada en el análisis de amenazas, vulnerabilidades e impactos, así como en la implantación de medidas técnicas y organizativas proporcionadas. Este marco resulta especialmente relevante para el sector del agua, al tratarse de un servicio esencial cuya indisponibilidad puede tener consecuencias graves para la sociedad.



Imagen 3. Marco regulatorio de ciberseguridad en infraestructuras del ciclo del agua

De forma complementaria, la metodología integra las exigencias de la Directiva (UE) 2022/2555 (NIS2), que clasifica a los operadores de agua potable y residual como entidades esenciales e impone requisitos reforzados en materia de gobernanza de la ciberseguridad, gestión de riesgos, continuidad de negocio y notificación de incidentes, reforzando un enfoque europeo común basado en la resiliencia.

En el plano técnico, se adopta como referencia la familia de normas ISA/IEC 62443, específica para entornos industriales, que introduce principios como la segmentación en zonas y conductos, la defensa en profundidad y la definición de niveles de seguridad adaptados a la criticidad de los procesos. Este enfoque se ve reforzado por las recomendaciones de organismos oficiales como ENISA y el CCN-CERT.

REVISTA IDIAGUA 2025

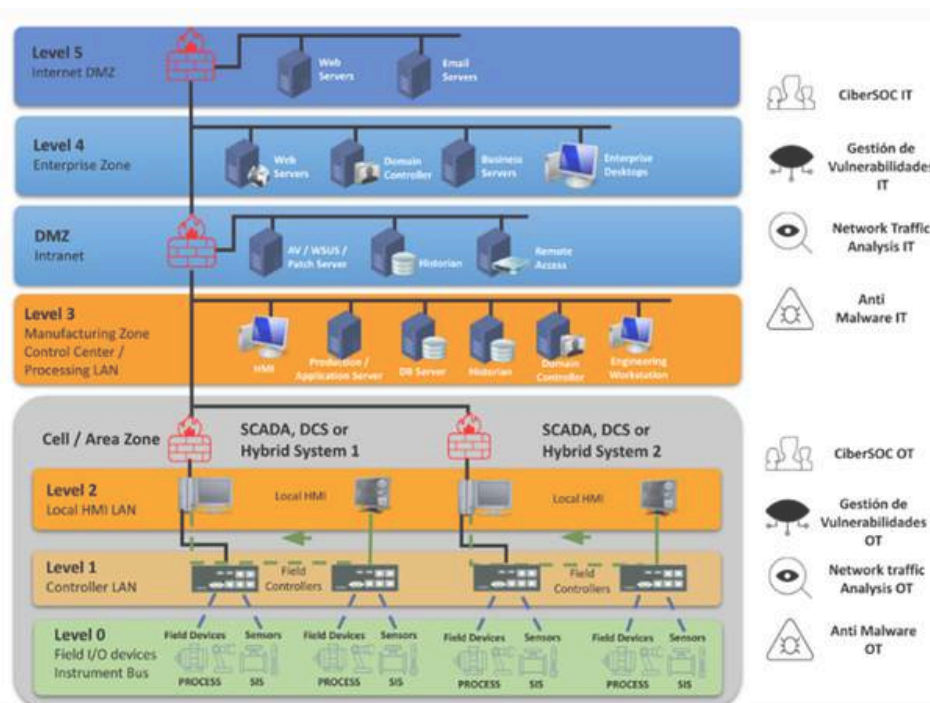
Infraestructuras del Agua

Resultados

La aplicación de este enfoque metodológico se traduce en un conjunto de medidas prácticas orientadas a reforzar la ciberresiliencia del ciclo integral del agua, garantizando la continuidad del servicio. Los resultados ponen de manifiesto la necesidad de diferenciar claramente las medidas aplicables a IT y OT, reconociendo que en los entornos OT la prioridad absoluta es la operación segura y continua de los procesos.

Desde el punto de vista organizativo, se establece una gobernanza unificada de la ciberseguridad que integra IT y OT en la gestión global del riesgo, pero con criterios diferenciados. Mientras que en IT se prioriza la confidencialidad, integridad y disponibilidad de la información, en OT las decisiones de seguridad deben subordinarse a la estabilidad operativa y a la seguridad del proceso, alineándose con los requisitos del ENS y NIS2.

En el ámbito técnico, se implanta una arquitectura diferenciada. En IT se priorizan controles tradicionales como firewalls, sistemas de detección de intrusiones, gestión de identidades y protección avanzada de sistemas. En OT se adoptan medidas específicas orientadas a preservar la operación, como la segmentación en zonas basada en el modelo Purdue, el uso de DMZ industriales y el control estricto de las interconexiones, requiriendo software y hardware especializado.



La gestión de accesos se adapta a la naturaleza de cada entorno. En IT se refuerza la autenticación fuerte y el control basado en roles, mientras que en OT se prioriza el control de accesos a SCADA, PLC y equipos de campo, la gestión de cuentas técnicas y la trazabilidad, garantizando que los controles no interfieran en la operación.

Imagen 4. Propuesta de arquitectura típica Scada basada en modelo Purdue

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

La monitorización se articula mediante capacidades diferenciadas pero coordinadas. En IT se emplean herramientas avanzadas de detección y análisis, mientras que en OT la monitorización se orienta a la detección de anomalías sin técnicas intrusivas. Ambas convergen en un SOC 24x7, clave para la detección temprana y la respuesta coordinada, respetando la prioridad operativa del entorno OT.

Asimismo, se establece una gestión de vulnerabilidades diferenciada, con parcheo regular en IT y un enfoque basado en el riesgo en OT, complementado con medidas compensatorias. Este enfoque se refuerza con estrategias de continuidad y recuperación, que incluyen backups verificados, restauración de configuraciones y planes de operación manual.

Finalmente, se refuerza la gestión de terceros y la cadena de suministro, así como la formación y concienciación del personal. La implantación efectiva de todas estas medidas requiere un incremento sostenido del presupuesto y de los recursos destinados a ciberseguridad, imprescindible para proteger los sistemas IT y, de forma prioritaria, garantizar la operación segura y continua de las infraestructuras OT que sustentan el ciclo integral del agua.

Conclusiones

El análisis realizado pone de manifiesto que la ciberseguridad del ciclo integral del agua debe abordarse desde una visión integral y estratégica, coherente con el contexto geopolítico actual y con el papel del agua como servicio esencial.

Los conflictos recientes y el incremento de ataques a infraestructuras críticas confirman que el ciberespacio se ha consolidado como un ámbito de confrontación y guerras híbridas, donde los sistemas que soportan la captación, tratamiento y distribución de agua se convierten en objetivos prioritarios.

A este escenario se suma la irrupción de la inteligencia artificial, que está transformando tanto las capacidades defensivas como las técnicas de ataque, incrementando la velocidad, sofisticación y alcance de las ciberamenazas.

En este contexto, la resiliencia se consolida como el eje central de la ciberseguridad del sector, superando los enfoques tradicionales basados únicamente en la prevención. Garantizar la continuidad del servicio exige combinar medidas organizativas, técnicas y humanas que permitan anticipar, resistir, responder y recuperarse ante incidentes, incluso en situaciones de alta presión operativa.

La integración efectiva de los entornos IT y OT, junto con la protección de sistemas SCADA, redes IoT y plataformas de telemetría, resulta imprescindible para reducir la superficie de ataque y limitar el impacto de posibles incidentes, especialmente ante amenazas automatizadas y persistentes apoyadas en tecnologías de inteligencia artificial.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Desde un punto de vista operativo, estas conclusiones se concretan en un modelo basado en ocho pilares que trasladan la resiliencia a la gestión diaria del ciclo del agua. El primer pilar, la gobernanza y el enfoque estratégico, integra la ciberseguridad OT en la gestión del riesgo con implicación de la dirección. El segundo pilar, la segmentación y arquitectura segura IT/OT, limita la propagación de incidentes mediante separación de redes, DMZ industriales y controles de tráfico adaptados a entornos críticos. El tercer pilar, la gestión de accesos e identidades, aplica el principio de mínimo privilegio y el control de cuentas técnicas. El cuarto pilar, la visibilidad y monitorización continua, se apoya en capacidades avanzadas y en la operación de un SOC 24x7 para la detección inmediata de incidentes tanto IT como OT. El quinto pilar, la gestión de activos y vulnerabilidades, y el sexto, las copias de seguridad y continuidad, refuerzan la capacidad de recuperación. Completan el modelo el séptimo pilar, la gestión de terceros, y el octavo, la capacitación y concienciación del personal.

La implantación efectiva de este modelo requiere, además, un incremento sostenido de los recursos y del presupuesto destinado a los departamentos de seguridad, condición indispensable para desplegar tecnologías avanzadas, operar SOC especializados, formar al personal y cumplir con los requisitos normativos y técnicos exigidos. En conjunto, la adopción de estos ocho pilares, alineados con el ENS, la Directiva NIS2 y estándares como ISA/IEC 62443, permite avanzar hacia un modelo de ciberresiliencia real y sostenible, garantizando un suministro de agua seguro, confiable y preparado para un entorno de amenazas cada vez más complejo y dinámico

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro agradecimiento a todos los profesionales, entidades y organismos que trabajan diariamente en la protección y mejora de las infraestructuras del ciclo integral del agua. Su compromiso con la seguridad, la resiliencia y la continuidad del servicio resulta esencial para garantizar un suministro fiable y sostenible.

Asimismo, agradecemos la colaboración y el intercambio de conocimiento que hacen posible avanzar hacia un sector del agua más seguro y preparado frente a los retos actuales.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Referencias

Sistema de Alerta Temprana para Sistemas de Control Industrial aplicado específicamente al sector de las infraestructuras del ciclo integral del agua

<https://www.ccn-cert.cni.es/es/pdf/documentos-publicos/6489-sat-ics-sector-infraestructuras-del-ciclo-integral-del-agua/file.html>

Informe CCN-CERT IA-04/24 – Ciberamenazas y Tendencias. Edición 2024 (Centro Criptológico Nacional, organismo oficial)

<https://www.ccn-cert.cni.es/es/informes/informes-ccn-cert-publicos/7274-ccn-cert-ia-04-24-ciberamenazas-y-tendencias-edicion-2024/file.html>

Directiva (UE) 2022/2555 — NIS2

<https://www.enisa.europa.eu/publications/nis2-technical-implementation-guidance>

CISA – Cybersecurity for Water and Wastewater Systems (EE. UU.)

<https://www.cisa.gov/water>

ENISA Threat Landscape 2024

<https://www.enisa.europa.eu/publications/enisa-threat-landscape-2024>

ARTÍCULO 8

Resiliencia de las infraestructuras del agua

FLUENT 2.0

Un ejemplo de plataforma para la toma de decisiones data-driven en la renovación de redes de abastecimiento a través del uso compartido de datos

Palabras clave

TUBERÍA, AVERÍA, PLANIFICACIÓN, INVERSIONES, REDES, ABASTECIMIENTO, DATA-DRIVEN

Muchas de las redes urbanas de distribución de agua se encuentran en un momento crítico debido a la convergencia de diversos factores: el envejecimiento de las infraestructuras, la presión creciente sobre el recurso hídrico derivada del aumento de la demanda y los escenarios de sequía cada vez más frecuentes que alteran su comportamiento hidráulico. En este contexto, el disponer de herramientas avanzadas que permitan anticipar averías, priorizar inversiones y mejorar la eficiencia global de dichas redes, se hace imprescindible y se ha convertido en una necesidad estratégica para operadores y administraciones.

El **proyecto FLUENT 2.0**, continuación directa del proyecto FLUENT financiado en la convocatoria Iniciatives de Reforç a la Competitivitat de ACCIÓ, responde precisamente a este reto de manera colaborativa, mediante la creación de una plataforma de uso abierto y orientada a datos que va a permitir mejorar la toma de decisiones en la renovación de redes de abastecimiento y la asignación de recursos.

Adrián Oliva Granados

Jefe de distribución (Taigua)

adrian.oliva@taigua.cat**Anna Cussó Torner**

Desarrolladora full stack (AVENTEC)

acusso@aventec.cat**Claudia Dragoste**

Project manager GIS (Aigües de Manresa)

cdragoste@aiguesmanresa.cat**David Lianes Palomino**

Jefe de estudios técnicos (Aigües de Mataró)

dlianes@aiguesmataro.com**María Guzmán Nieto**

Analista GIS-Giswater i Coordinadora RDI (B'GEO Open GIS)

mguzman@bgeo.es**Enric Corbella Reventós**

Director de operaciones (Aigües de Mataró)

ecorbella@aiguesmataro.com**Ramón Pérez Magrané**

Profesor asociado (Univ. Politècnica de Catalunya)

Ramon.perez@upc.edu**Sergi Compte Port**

R&D area manager (Catalan Water Partnership)

sergi.compte@cwpp.cat**Sergi Grau Torrent**

Subdirector técnico y jefe de dpto de innovación (Aigües de Manresa)

sgrau@aiguesmanresa.cat**Xavier Torret Requena**

Socio director (B'GEO Open GIS)

xtorret@bgeo.es

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

FLUENT 2.0 trabaja sobre el algoritmo predictivo, ya desarrollado en la primera fase del proyecto, ampliando sus capacidades técnicas, incorporando nuevas fuentes de datos y estableciendo un marco metodológico más robusto para evaluar el riesgo asociado a las averías.

La principal innovación es la compartición de datos de averías entre diferentes operadoras con el objetivo de aumentar la muestra estadística, y como consecuencia, definir un modelo de datos de averías común. También se ha realizado la integración explícita del concepto común de riesgo, entendido como la combinación entre la probabilidad de fallo y sus consecuencias potenciales en diversos ámbitos como pueden ser el económico, social o medioambiental. Para ello, se han desarrollado sistemas de aprendizaje automático capaces de trabajar con múltiples series temporales y distintos niveles de precisión en la segmentación de red, integrando, a su vez información económica, ambiental y social. Este enfoque permite no solo identificar los puntos más vulnerables de una red, sino también cuantificar el impacto que tendría una avería en cada tramo, ofreciendo un criterio de priorización mucho más completo y alineado con las necesidades reales de planificación.

Paralelamente, FLUENT 2.0 ha mejorado la plataforma de datos, incorporando funcionalidades como la sectorización automática, y la definición de sectores mínimos que permitan obtener resultados más concretos. También se ha desarrollado un visor interactivo que facilita la interpretación de resultados y permite a los operadores explorar escenarios, comparar periodos y visualizar los tramos críticos de manera intuitiva.

El proyecto se ha desarrollado bajo la coordinación del Catalan Water Partnership, con la participación de operadores de redes de diversos perfiles —Aigües de Manresa, Aigües de Mataró, Taigua y Aigües de Vic— junto con entidades tecnológicas como AVENTEC y BGEO y la Universitat Politècnica de Catalunya. Esta colaboración ha permitido construir un modelo escalable y replicable, que será especialmente útil para municipios pequeños y medianos que tradicionalmente no disponen de herramientas avanzadas de apoyo a la decisión.

Introducción

Las redes urbanas de distribución de agua atraviesan en la actualidad un periodo marcado por una creciente complejidad operativa. El envejecimiento de las infraestructuras, la presión progresiva sobre el recurso hídrico derivada del aumento de la demanda urbana e industrial y de la población (tanto permanente como estacional) y la recurrencia de episodios de sequía prolongada, que alteran el funcionamiento hidráulico de las infraestructuras, configuran un escenario donde la fiabilidad y la eficiencia de la red se ven y se verán cada vez más comprometidas. La combinación de estos factores impacta tanto en la capacidad de mantener un servicio continuo como en la sostenibilidad física del sistema a medio y largo plazo.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Las recientes situaciones de sequía, principalmente fuertes en Cataluña y Andalucía, han evidenciado la necesidad de reducir pérdidas, minimizar averías e intensificar y priorizar inversiones con criterios objetivos y fundamentados en datos.

El proyecto FLUENT 2.0, financiado en el marco de la convocatoria Iniciatives de Reforç a la Competitivitat de ACCIÓ, nace como respuesta a estas necesidades. Su objetivo ha sido construir una plataforma colaborativa, abierta y basada en datos que incorpore técnicas avanzadas de aprendizaje automático, integre nuevas fuentes y tipologías de información y establezca un marco metodológico más robusto para evaluar el riesgo asociado a cada tramo de red.

La participación de operadores como Aigües de Manresa, Aigües de Mataró, Aigües de Terrassa (Taigua) y Aigües de Vic, combinada con el conocimiento tecnológico de AVENTEC y BGEO y el soporte científico de la Universitat Politècnica de Catalunya, ha permitido desarrollar una solución versátil, replicable y alineada con los retos reales del ciclo urbano del agua.

Metodología

La **metodología de FLUENT 2.0 se ha construido sobre la base de los aprendizajes de la primera fase del proyecto, con el propósito de generar un modelo más preciso, comprensible y operativo.** En primer lugar, se ha llevado a cabo una ampliación sustancial de la base de datos, incorporando información procedente de distintos operadores con redes de características diversas. Este incremento en la representatividad ha requerido la estandarización de formatos y la consolidación de un marco común para la definición de averías y atributos de red.

El proyecto ha definido sectores de cierre que permiten segmentar la red con un nivel de detalle que mejora la sensibilidad del modelo predictivo. Esta mayor resolución espacial permite segmentar la red con criterios de consecuencias operativas.

El tratamiento e integración de los datos han sido elementos centrales de la metodología. BGEO y AVENTEC han desarrollado una plataforma que actúa como repositorio centralizado y que incorpora procesos automatizados de limpieza, filtrado y enriquecimiento de datos.

Esta infraestructura, estructurada como un datawarehouse, permite no solo integrar información procedente de distintas fuentes, sino también segmentarla por periodos, sectores o tipologías de variables con el fin de entrenar modelos específicos o escenarios de análisis diferenciados.

Aunque se ha trabajado con información de las operadoras Aigües de Manresa, Aigües de Mataró, Taigua y Aigües de Vic, la automatización de los flujos de entrada de datos habilita un sistema flexible y preparado para incorporar progresivamente a nuevos operadores, con la visión de futuro de poder ampliar así la masa crítica sobre la cual se sustenta el modelo predictivo.



BGEO y AVENTEC han desarrollado una plataforma que actúa como repositorio centralizado y que incorpora procesos automatizados de limpieza, filtrado y enriquecimiento de datos.

Para ello, se han desarrollado algoritmos de aprendizaje automático capaces de trabajar con múltiples series temporales y de analizar variaciones relacionadas con la antigüedad de la infraestructura, los materiales, los parámetros hidráulicos y otros factores que condicionan el comportamiento de la red. Concretamente se han usado la regresión logística, bosques aleatorios y redes neuronales artificiales.

Estos modelos predictivos se han entrenado de forma iterativa, permitiendo ajustar la sensibilidad y el peso de las variables en función del comportamiento específico de cada red. Esto dota al sistema de una gran flexibilidad y favorece que pueda ser replicado en entornos con características distintas, manteniendo un equilibrio entre precisión y generalización.

Para la comparativa de los resultados se ha usado la validación cruzada [2]. También se ha aplicado como metodología para la interpretación de los modelos la evaluación de los valores shap [1] basada en la teoría de juegos cooperativa.

Uno de los avances metodológicos más significativos introducidos en FLUENT 2.0 ha sido la integración del concepto de riesgo como eje central del análisis.

A diferencia de los modelos puramente probabilísticos, que se limitan a estimar la probabilidad de fallo de un tramo de red, la aproximación adoptada en este proyecto bajo el liderazgo de la Universitat Politècnica de Catalunya entiende el riesgo como el resultado de combinar dicha probabilidad con las consecuencias potenciales asociadas a una avería. Estas consecuencias se han evaluado en dimensiones económicas, sociales y ambientales, construyendo un indicador que recoge de forma integrada la criticidad de cada tramo.

Paralelamente, el proyecto ha desarrollado un visor interactivo que facilita la interpretación de los resultados y permite explorar visualmente los tramos críticos, comparar periodos de análisis o analizar escenarios de inversión alternativos.

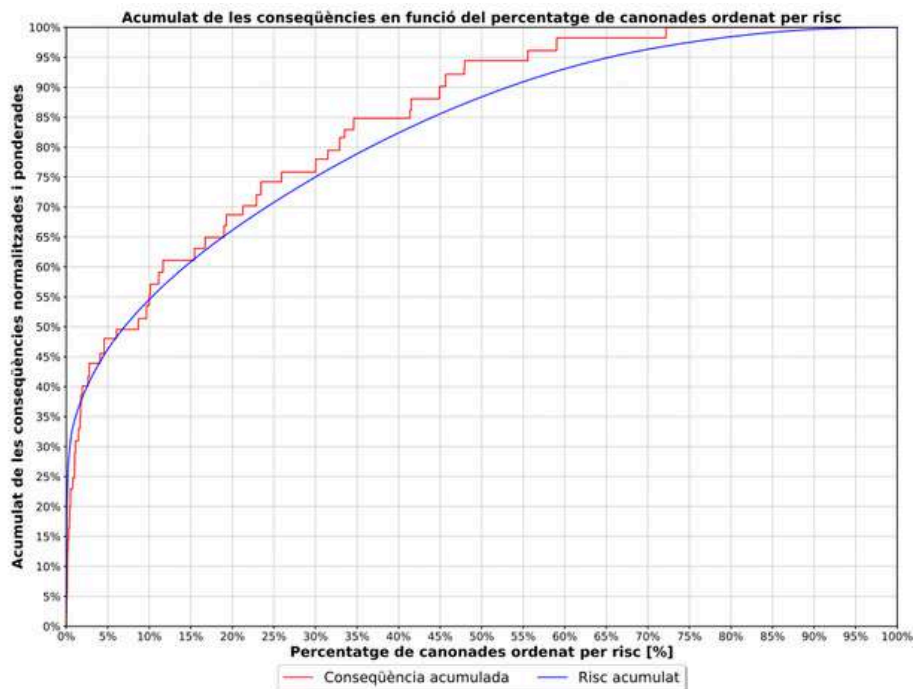
Esta herramienta constituye un puente entre el modelado avanzado y las necesidades operativas de los técnicos de explotación, que deben tomar decisiones basadas tanto en criterios técnicos como económicos.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Resultados

Los resultados de FLUENT 2.0 muestran un avance notable respecto a la primera fase del proyecto y consolidan la utilidad práctica de la plataforma desarrollada. La mejora en la calidad y diversidad de los datos ha permitido generar un modelo predictivo más robusto, capaz de identificar con mayor precisión los tramos más vulnerables de la red. La segmentación avanzada ha proporcionado un nivel de detalle que permite detectar patrones locales que anteriormente pasaban desapercibidos, facilitando una interpretación más afinada del riesgo de avería. Este avance es especialmente relevante en contextos donde las redes presentan heterogeneidades marcadas, tanto en antigüedad como en materiales o características hidráulicas.



La integración del análisis del riesgo ha transformado profundamente la capacidad de priorización dentro de las estrategias de renovación. Al evaluar simultáneamente la probabilidad de fallo y las consecuencias asociadas, los operadores disponen ahora de una herramienta que les permite justificar decisiones de inversión de forma más objetiva, transparente y alineada con la realidad operativa.

Figura 1 . Curva de las consecuencias acumuladas evitadas en función del porcentaje de sustitución basado en el riesgo. La curva roja representa las consecuencias reales mientras que la azul son las estimadas a partir de la integral del riesgo.

Este enfoque basado en la criticidad ofrece un marco claro para planificar actuaciones de renovación, apoyar la toma de decisiones presupuestarias y optimizar la asignación de recursos, especialmente en un contexto de limitaciones económicas y creciente exigencia social. **La Fig. 1 presenta las consecuencias evitadas para un conjunto de validación cuando se usa el riesgo como factor de ordenación en la sustitución de tuberías.**

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

El proyecto ha concebido como una solución abierta, interoperable y escalable. Esto facilita que operadores de distintos tamaños, especialmente los municipios pequeños y medianos, puedan incorporar sus datos y beneficiarse del modelo sin necesidad de infraestructuras tecnológicas complejas ni elevados costes. La naturaleza colaborativa del proyecto permite construir de manera progresiva una base de datos más rica, en la que cada nuevo operador contribuye a mejorar la capacidad predictiva global del sistema. Este enfoque colectivo representa un cambio de paradigma en la gestión del ciclo urbano del agua y abre la puerta a iniciativas similares en otros territorios.

El visor interactivo constituye uno de los elementos más valiosos desde el punto de vista operativo. Su capacidad para representar visualmente los resultados del modelo, mostrar mapas de riesgo, explorar tramos críticos y analizar patrones históricos transforma el conocimiento generado por el algoritmo en información accionable para los técnicos responsables de la explotación de la red. La validación realizada por los operadores participantes ha permitido ajustar funcionalidades, mejorar la usabilidad y garantizar que el sistema responda a las necesidades reales del día a día.

Conclusiones

FLUENT 2.0 se consolida como un ejemplo de cómo la colaboración sectorial, el intercambio de datos y la aplicación de técnicas avanzadas de análisis pueden transformar la gestión de las redes de distribución de agua. El proyecto ha demostrado que, cuando operadores, entidades tecnológicas y empresas trabajan bajo un marco común, es posible superar limitaciones históricas relacionadas con la disponibilidad de información, la heterogeneidad de las redes y la dificultad de anticipar fallos con criterios objetivos.

Esta cooperación ha permitido desarrollar un modelo predictivo más robusto, transparente y adaptable, hecho a medida de los retos reales del sector. La introducción de la metodología de análisis de riesgo, ofreciendo un enfoque mucho más completo que los modelos tradicionales basados únicamente en las probabilidades. Este cambio metodológico facilita una planificación más eficiente y alineada con los objetivos de sostenibilidad, resiliencia y optimización de recursos que demandan tanto las administraciones como la ciudadanía.



FLUENT 2.0 se consolida como un ejemplo de cómo la colaboración sectorial, el intercambio de datos y la aplicación de técnicas avanzadas de análisis pueden transformar la gestión de las redes de distribución de agua

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

El desarrollo y mejora de la plataforma de datos y del visor interactivo han permitido traducir el conocimiento generado por los algoritmos en una herramienta práctica para los equipos técnicos. La capacidad de visualizar escenarios, explorar historiales, comparar periodos o detectar patrones locales dota a los operadores de una comprensión más profunda del comportamiento de sus redes.

Esta accesibilidad al conocimiento técnico contribuye a reducir la toma de decisiones en base de enfoques reactivos y favorece un modelo de gestión preventiva, donde las actuaciones se justifican con evidencias claras y cuantificables. Cabe destacar que una solución escalable y replicable será especialmente valiosa para municipios pequeños y medianos que suelen disponer de menos recursos para adquirir o desarrollar herramientas avanzadas.

La arquitectura abierta del sistema es un aspecto importante, ya que permite que nuevos operadores se incorporen progresivamente, enriqueciendo la base de datos común y potenciando la robustez y capacidad predictiva del modelo. FLUENT2.0 pretende ser también una estructura colaborativa que seguirá creciendo y mejorando con el tiempo.

Referencias

[1] Christoph Molnar. Interpretable Machine Learning. A Guide for Making Black Box Models Explainable. 3a ed. Christoph Molnar, 2025.

[2] Shamsuddin Daulat et al. "Evaluating the generalizability and transferability of water distribution deterioration models". A: Reliability Engineering & System Safety 241 (2024), pàg. 109611.

D4RUNOFF



Reduciendo el impacto en infraestructuras de saneamiento: digitalización de soluciones verdes de depuración (HE D4RUNOFF)



El objetivo de este artículo es exponer los resultados alcanzados mediante la digitalización intensiva de las soluciones verdes de depuración, que incluyen las perspectiva técnica, política y social, y que han sido desarrollados en el marco del proyecto Horizonte Europe, **D4RUNOFF**, “**Data driven implementation of hybrid nature based solutions for preventing and managing diffuse pollution from urban water runoff**”.

El resultado final ha sido un sistema GIS-WEB que integra información técnica, modelizado numérico, información IoT y modelos de inteligencia artificial, y facilita, además, la experiencia de los usuarios con técnicas de procesamiento de lenguaje natural.

Palabras clave

NBS, RESILIENCIA, DIGITALIZACIÓN, IA, MODELOS HIDRÁULICOS, NLP, RECOMENDACIÓN, RIESGOS MEDIOAMBIENTALES, POLÍTICAS PÚBLICAS, GOBERNANZA

Juan Luis Sobreira Seoane

Director de División en ITG

jsobreira@itg.es

Jesús Fernández Águila

Ingeniero I+D – PhD en ITG

jfernandez@itg.es

Paolo Santinello

Director de Desarrollo en KLINK

p.santinello@klink.it

Jorge Rodríguez Hernández

Profesor Titular del GITECO (UC)

jorge.rodriguez@unican.es

Federica Guerrini

Científica de datos en MITIGA

federica.guerrini@mitigasolutions.com

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Este entorno tecnológico ha permitido facilitar respuesta a los retos de gestión de las soluciones basadas en la naturaleza (NBS, por sus siglas en inglés) desde el punto de técnico, político y social a través de **cinco bloques funcionales, tal y como recoge la Imagen 1.**



***Imagen 1.-** Estructura funcional de la plataforma, integrada por cinco componentes orientados a la gestión del agua urbana y NBS desde diferentes perspectivas. Los tres primeros módulos (“Integración de datos”, “Operativo y Estratégico” y “Evaluación de riesgos”) abordan principalmente el análisis técnico e ingenieril, mientras que los dos restantes adoptan un enfoque político (“Formulación de Políticas”) y de concienciación del ciudadano (“Social”).*

En relación con el soporte técnico e ingenieril, la solución, en adelante D4RUNOFF, permite mejorar el conocimiento y la toma de decisiones en los siguientes ámbitos:

- Selección de la tipología de NBS a implementar y su ubicación en entornos urbanos mediante análisis multicriterio y evaluación de riesgos.
- Seguimiento del desempeño de la NBS, a través de la monitorización de variables cuantitativas o cualitativas, sean recopiladas en línea o no.
- Análisis del impacto de las NBS tanto desde el punto de vista de hidrológico como de calidad del agua.

La perspectiva política se cubre mediante el Módulo de Formulación de Políticas (Policy Making Module - PoMM) el cual, mediante el uso de inteligencia artificial simula la complejidad socioeconómica y normativa de la gestión del agua; en concreto, el PoMM permite a los gestores evaluar escenarios de intervención política y sus efectos en la infraestructura antes de llevarlos a cabo.

El enfoque social se ha orientado a involucrar y sensibilizar a la ciudadanía a través de juegos en línea (Serious Game) que permiten no sólo mejorar el conocimiento sobre NBS y su impacto medioambiental, sino también fomentar la participación mediante un formato competitivo que permite comparar los resultados obtenidos entre los usuarios.

El resultado ha sido la solución D4RUNOFF, que incorpora módulos técnicos orientados al soporte operativo, de soporte a la definición de políticas públicas y sociales orientados a la sensibilización de la ciudadanía.

Finalmente, el soporte para la demostración de la solución ha sido su despliegue en tres casos de estudio en las ciudades de Odense (Dinamarca), Santander (España) y Pontedera (Italia).

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Introducción

La plataforma desarrollada en D4RUNOFF permite disponer, sobre un soporte GIS-WEB, de un conjunto de funcionalidades que dan respuesta a las necesidades de distintos actores clave en la gestión del ciclo del agua, tanto desde el punto de vista técnico-operativo, político como social.

Para facilitar la comprensión de los trabajos desarrollados, el apartado metodológico resalta los aspectos más relevantes considerados, mientras que, para ofrecer una visión completa del alcance de los resultados, se describen las funcionalidades que dan soporte a cada una de las tres dimensiones mencionadas.

Para finalizar, el apartado de conclusiones se centra en las líneas de mejora encontradas, y en las propuestas de incorporación a la gestión del ciclo del agua urbana y, en concreto, al uso y generalización de las NBS dando lugar a sistemas de saneamiento híbridos.

Metodología

El trabajo desarrollado durante el proyecto se ha llevado a cabo considerando dos necesidades:

- Avanzar en el conocimiento del desempeño de las NBS para la prevención de escorrentías en entornos urbanos.
- Considerar las necesidades de los distintos actores clave desde el punto de vista técnico, político y social.

Con estas dos grandes consideraciones, la obtención de los resultados ha seguido el siguiente ciclo de vida:

1. Definición de los límites del sistema.
2. Conocimiento de las necesidades y expectativas de los actores clave.
3. Definición de requisitos funcionales y especificaciones técnicas.
4. Desarrollo y validación.
5. Demostración.

Desde el punto de vista metodológico el proyecto se ha desarrollado combinando, por un lado, un proceso de co-creación con los actores clave — a través de sesiones de tormenta de ideas, talleres de prototipado y entrevistas — con metodologías de diseño y desarrollo orientadas a la eficiencia y robustez del sistema. Como principales metodologías se emplearon UML^[1] para la definición y diseño del sistema y Agile para facilitar entregas incrementales y maximizar la productividad.

En el caso específico del módulo PoMM de Políticas, la metodología expuesta se ha complementado con la selección de herramientas específicas para su desarrollo funcional, como el modelado de procesos de negocio (BPM^[2]), Mapas Cognitivos Difusos (FCM^[3]) y Modelos Basados en Agentes (ABM^[4]).

Resultados



El resultado que se presenta en este artículo es un sistema GIS-WEB de información asistido mediante técnicas de inteligencia artificial, diseñado para mejorar la gestión del agua de escorrentía y NBS en entornos urbanos desde una perspectiva técnico-operativa, política y social, a través de los cinco módulos funcionales.

La Imagen 2 muestra visualizaciones de varias de las funcionalidades disponibles en cada uno de estos bloques funcionales.

Imagen 2. Visualizaciones de los cinco bloques funcionales de la plataforma D4RUNOFF para dar respuesta a los retos de la gestión del agua urbana y de las NBS, desde una perspectiva técnica, política y social

1. Soporte Operativo: Integración de Datos, Soporte Operativo y Evaluación de Riesgos

Este bloque de funcionalidades está orientado a dar respuesta a las siguientes necesidades:

- ¿Qué NBS existen y cuáles son sus características?
- Para un determinado problema y/o ubicación ¿qué NBS es la más adecuada?
- Para una NBS implantada, ¿cómo hacer un seguimiento y evaluar su desempeño?
- Desde el punto de vista medioambiental, identificar qué zonas tienen mayor riesgo debido al impacto de las escorrentías y su contaminación, de tal modo que facilite, posteriormente, analizar cómo las NBS contribuirán a su mitigación.
- Para la mejora medioambiental mediante NBS, ¿se puede hacer un análisis de escenarios que facilite su impacto tanto de vista de la cantidad y la calidad del agua?

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Para poder dar respuesta a cada una de esas necesidades, **D4RUNOFF** dispone de tres módulos principales:



- 1) Integración de Datos
- 2) Análisis de Riesgos
- 3) Soporte Operativo.

- 1 El **módulo de integración** está orientado a la recopilación de datos suministrados por dispositivos IoT, análisis de laboratorio, estaciones de medida o servicios de información externos, como los meteorológicos.
- 2 El **módulo de evaluación de riesgos** integra resultados derivados de una metodología desarrollada para generar mapas de riesgo de contaminación difusa en escenarios presentes y futuros, considerando distintos escenarios de cambio climático, a partir de información meteorológica o de las características del suelo.
- 3 El **módulo operativo y estratégico** permite, en primer lugar:
 - Acceder a un catálogo multiparamétrico de NBS, enriquecido además con técnicas de procesamiento de lenguaje natural (NLP), facilitando la comprensión de los usuarios, incluso sin experiencia previa en estas tecnologías. El catálogo incluye tipologías de NBS y sus características técnicas, tanto hidráulicas como de eliminación de contaminantes.
 - Facilitar la selección de la NBS más adecuada para mitigar o eliminar un determinado riesgo medioambiental; para ello, el sistema parte de las utilidades del catálogo y clasifica los tipos de NBS de mayor a menor idoneidad mediante un análisis multicriterio.
 - Dimensionar una NBS específica una vez seleccionada.

Una vez que **la NBS está implementada**, el módulo de operación permite:

- Definir los puntos de medición de variables relevantes.
- Asociar equipos de medición, ya sea in situ o de laboratorio.
- Integrar los datos obtenidos de forma automática o mediante la carga manual de ficheros.
- Facilitar la generación de modelos de inteligencia artificial basado en los datos obtenidos, o integrar modelos elaborados externamente, y analizar escenarios de simulación sobre los mismos.

Por último, este módulo **permite dar soporte a procesos de planificación urbana orientados al despliegue de NBS**, mediante las siguientes funcionalidades:

- Asistir en la identificación y priorización de ubicaciones potenciales en entornos urbanos donde las NBS puedan ser instaladas desde un punto de vista técnico/ingenieril.
- Analizar el impacto de una o varias NBS sobre las infraestructuras de saneamiento existentes (redes), mediante la integración de resultados obtenidos a través de herramientas de cálculo numérico.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

La Imagen 3 ejemplifica algunas de las principales funcionalidades del módulo Operacional y Estratégico del sistema.

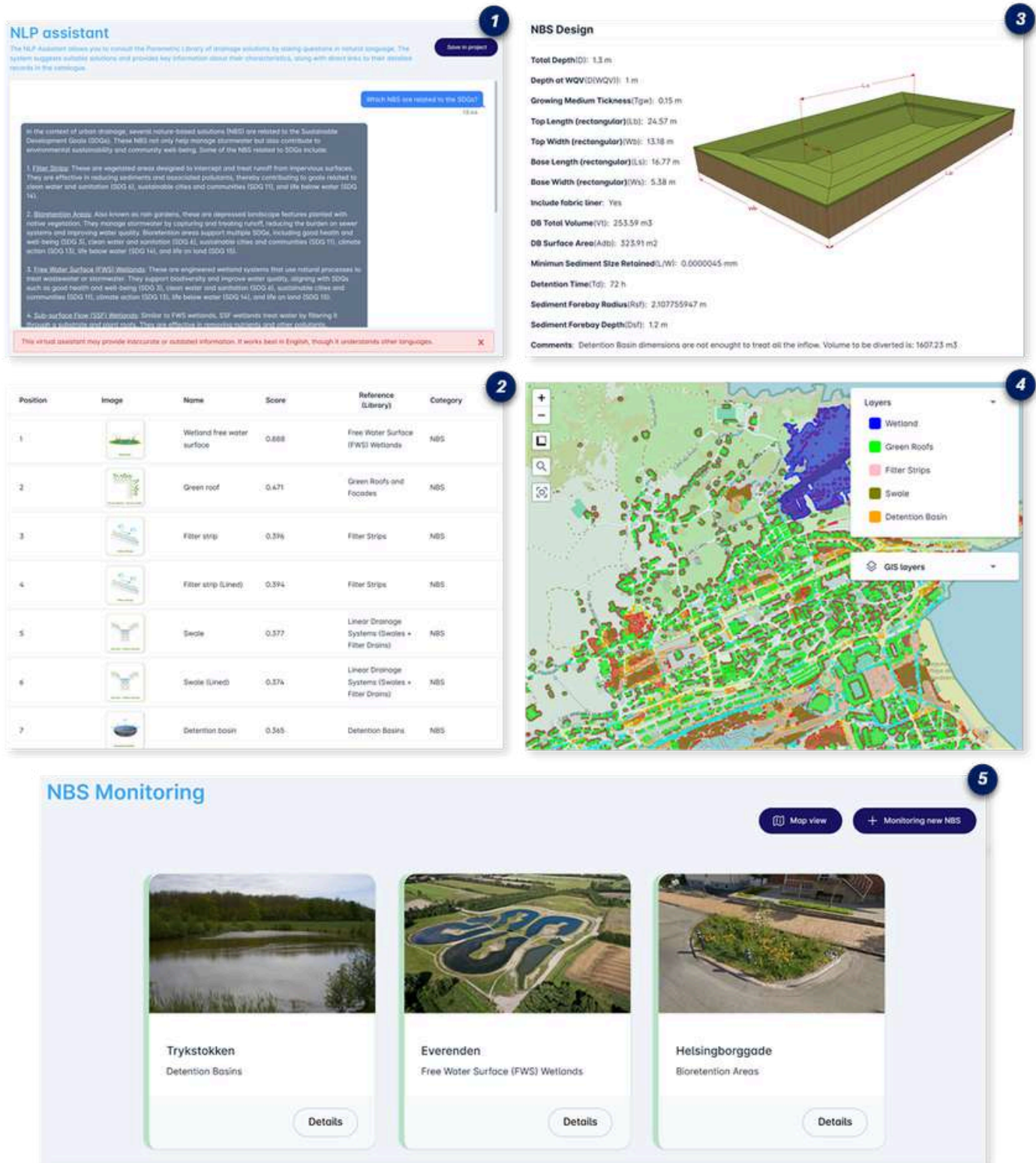


Imagen 3.- Ejemplos de algunas de las funcionalidades del módulo Operacional y Estratégico de la plataforma, en las que los usuarios pueden: 1) consultar información sobre tipologías de NBS mediante un asistente NLP; 2) obtener un ranking de NBS a partir de análisis multicriterio según sus necesidades; 3) realizar un dimensionamiento preliminar de distintas NBS; 4) identificar ubicaciones técnicamente viables para su implantación, priorizadas mediante análisis multicriterio; y 5) monitorizar las NBS desde la plataforma conectando sensores y comparando el funcionamiento teórico con el real.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

2. Soporte en la formulación de Políticas (PoMM)

El PoMM está orientado a facilitar los procesos de toma de decisión desde el punto de vista político, permitiendo analizar el impacto de cambios en las políticas relacionadas con la adopción de NBS antes de llevarlos a cabo y facilitando el diseño de estrategias de mitigación más efectivas.

Para comprobar que las políticas propuestas funcionan, el PoMM usa dos métodos de simulación complementarios: los Mapas Cognitivos Difusos (FCM) y el Modelado Basado en Agentes (ABM). Los FCM usan un enfoque colaborativo para crear simulaciones con usuarios clave. Estas simulaciones mapean variables como el «retorno de la inversión», la «aceptación pública» o la «complejidad burocrática»; de esta manera se puede entender cómo las intervenciones regulatorias cambian la dinámica del sistema urbano.

Además, el uso de agentes (ABM) permite simular entornos urbanos específicos con comportamientos emergentes bajo presión, analizando cómo factores como el perfil de los inversores o la incidencia de alquileres a corto plazo influyen en el apoyo colectivo a las inversiones públicas relacionadas con las NBS.

3. Soporte a la concienciación y participación ciudadana

El módulo social está orientado a mejorar la concienciación y la participación ciudadana en la gestión del agua urbana y la contaminación asociada, poniendo en valor el papel de las NBS. A través de un enfoque divulgativo y accesible, el módulo permite trasladar a la ciudadanía los impactos de la escorrentía sobre la calidad de las masas de agua y los beneficios ambientales, sociales y económicos derivados de la implantación de NBS en entornos urbanos.

El núcleo del módulo social se basa en el uso de técnicas de gamificación mediante el desarrollo de Serious Games, que simulan de forma simplificada escenarios de contaminación urbana inspirados en los emplazamientos piloto del proyecto. Durante el juego, los usuarios asumen el rol de planificadores urbanos con la misión de diseñar e implementar estrategias de gestión de la escorrentía a través de la aplicación de NBS, disponiendo de una cantidad limitada de recursos. Con el objetivo de facilitar un aprendizaje progresivo, el juego se estructura en tres rondas, en las que los jugadores pueden incrementar sus recursos iniciales en función de su desempeño. Al finalizar la partida, los usuarios reciben una puntuación final y se integran en un ranking competitivo, lo que incentiva la participación.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Conclusiones

El proyecto D4RUNOFF, desarrollado como una acción de investigación e innovación (RIA[1]), ha facilitado un abanico de soluciones que cubren un amplio rango de TRL[2], permitiendo:

- Identificar líneas de mejora orientadas a profundizar en el conocimiento y el desempeño de NBS.
- Poner a disposición de los actores clave soluciones ya escalables a entornos reales que faciliten, a corto plazo, la mejora en la gestión del agua urbana mediante el uso de NBS.

Entre las principales mejoras pendientes identificadas durante el desarrollo del proyecto destaca la necesidad de avanzar en la obtención de sensores de bajo coste que permitan incrementar la cantidad y calidad de los datos, facilitando así el desarrollo de modelos matemáticos más robustos, ya sea mediante ecuaciones diferenciales, técnicas de inteligencia artificial o enfoques híbridos. Además, debería avanzarse en metodologías para unificar la monitorización y evaluación del desempeño hidráulico y la capacidad de mitigación de contaminantes de las NBS.

En relación con el escalado, el proyecto D4RUNOFF ha permitido la validación de la plataforma en tres casos de estudio (Odense, Pontedera y Santander), pero aún es necesaria la realización de Pruebas de Concepto en el ámbito del seguimiento de distintas NBS en uno o varios ayuntamientos. Estas Pruebas de Concepto deben estar lideradas por Entidades Locales, Empresas Gestoras o Autoridades de Cuenca y deben orientarse a identificar cuadros de mando adaptados a cada tipo de usuario, como paso previo a su despliegue a mayor escala.

Agradecimientos



Financiado por
la Unión Europea

El proyecto D4RUNOFF ha recibido financiación de la Unión Europea en el marco de la convocatoria HORIZON-CL6-2021-ZEROPOLLUTION-01-03, bajo el acuerdo nº101060638.

Referencias

- [1] UML, Unified Modelling Language
- [2] BPM, Business Process Modelling
- [3] FCM, Fuzzy Concept Modeling
- [4] ABM, Agent Based Modelling
- [5] RIA, Research and Innovation Action
- [6] TRL, Technology Readiness Level

<https://d4runoff.eu/>

<https://zenodo.org/communities/d4runoff/records?q=&l=list&p=1&s=10&sort=newest>

ARTÍCULO 10

Resiliencia de las infraestructuras del agua

DIGITBALSA

El proyecto presentado se enfoca en el desarrollo de un sistema de medición distribuido de bajo costo para detectar fugas en depósitos de agua como estanques de almacenamiento de líquidos (por ejemplo, agua de riego o lodos en la ganadería porcina). La solución propuesta utiliza fibras ópticas híbridas como sensores de temperatura distribuida (DTS, por sus siglas en inglés), una tecnología que permite monitorizar grandes distancias del subsuelo de manera eficiente.

El sistema DTS se basa en el efecto Raman, que permite determinar la temperatura a lo largo de la fibra óptica con una resolución espacial ajustable (entre 1 m y 10 cm) y una precisión térmica de 0.3 °C para un rango de 1 km, con mediciones cada 1 minuto.

Este enfoque se implementa mediante un interrogador DTSX200 de Yokogawa, conectado a la fibra óptica. La tecnología es especialmente útil para detectar filtraciones en diques o estructuras hidráulicas, ya que las variaciones de temperatura asociadas al flujo de agua pueden identificarse de forma precisa.

El sistema puede operar en dos modos: pasivo y activo. En el modo pasivo, se mide la temperatura ambiental sin modificar las condiciones del entorno, lo que es adecuado para estructuras con características específicas. En contraste, los sistemas activos introducen estímulos térmicos (como pulsos) para mejorar la detección. Un ejemplo práctico se describe en un estudio de Cola et al. (2021), donde se usó un interrogador DTS Oryx SR con resolución espacial de 1 m y térmica de 0.1 °C para monitorear un dique fluvial durante una crecida. Durante el evento, se registró una disminución de temperatura desde 10 °C hasta 8.4 °C en dos días, coincidiendo con la estabilidad del caudal, sin necesidad de pulsos térmicos.

Palabras clave

TUBERÍA, AVERÍA, PLANIFICACIÓN, INVERSIONES, REDES, ABASTECIMIENTO, DATA-DRIVEN

Jesús Casbas

Director de Proyectos en Tecnalía

Oscar Muñoz

Investigador - Ingeniero Electrónico en Tecnalía

Diego Antolín

Profesor Titular de Tecnología Electrónica en EUPLA

Pedro López

Profesor Titular de Ingeniería - Agua en EUPLA

Alejandro Acero

Profesor Titular de Ingeniería - Medio Ambiente en EUPLA

Javier Pérez

Profesor Titular de Informáticas y Telecom. en EUPLA

Jorge Edo

Director General de Canteras Ejea

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

El proyecto ha sido liderado por el Grupo de Ingeniería Hidráulica y Ambiental (GIHA) de la Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia (Universidad de Zaragoza) y clúster del agua ZINNAE, conjuntamente con Canteras Ejea, Ingeobras e i+porc (clúster de productores de ganado porcino). La financiación proviene del Ministerio de Industria, Comercio y Turismo de España, dentro del programa de apoyo a clústeres innovadores (expediente AEI-010500-2022b-320). La aplicación principal es la detección de fugas en estructuras de almacenamiento de agua, con un enfoque en la sostenibilidad y la eficiencia hídrica.

Este enfoque combina tecnologías avanzadas con un diseño adaptable, permitiendo su implementación en diversos contextos hidráulicos. La capacidad de monitoreo continuo y de larga distancia, junto con la precisión térmica, hace de esta solución una herramienta clave para la gestión de infraestructuras críticas, especialmente en sectores como la agricultura y la gestión de residuos ganaderos.

La contribución de Tecnalía en DIGITBALSA se enmarca concretamente en el desarrollo del sistema de detección temprana de fugas de purines basado en fibra óptica, permitiendo monitorizar en el momento que se produzca algún tipo de filtración en la balsa. Conjuntamente con GIHA (EUPLA) se han desarrollado los algoritmos de predicción basados en tiempo real que permiten generar alarmas y anticiparse a la filtración en el terreno.

Introducción

La detección temprana de fugas en balsas de purines representa un desafío clave para la sostenibilidad del sector porcino, uno de los pilares fundamentales de la producción ganadera en España. Con una producción que supera el 22% del total europeo y una concentración significativa en regiones como Aragón y Cataluña, el sector enfrenta exigencias regulatorias cada vez más estrictas en materia de gestión de residuos. Desde 2000, las normativas obligan a las granjas a contar con balsas impermeabilizadas que eviten la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, así como pérdidas por rebosamiento.

Sin embargo, las fugas en estas infraestructuras, aunque de baja magnitud, pueden tener efectos ambientales significativos a largo plazo. En este contexto, la implementación de tecnologías innovadoras para la monitorización continua y precisa se convierte en una necesidad estratégica. El proyecto DIGITBALSA, financiado por el Ministerio de Industria, Comercio y Turismo dentro del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, aborda este reto mediante el desarrollo de un sistema de detección de fugas basado en tecnología de fibra óptica distribuida (DTS).

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Esta tecnología, ya probada en otras infraestructuras como presas, permite localizar con precisión las zonas de infiltración mediante el análisis de gradientes térmicos generados por el paso del agua a través de la fibra óptica. El presente artículo describe el diseño y validación de un sistema adaptado específicamente a las condiciones de las balsas de purines, incluyendo pruebas en laboratorio y su posterior aplicación en un prototipo real, con el objetivo de contribuir a la transición digital y ambiental del sector agropecuario.



Imagen 1 . Embalse donde se realizó las pruebas tras despliegue de la sensórica

Metodología

El desarrollo del sistema de detección de fugas en balsas mediante tecnología de fibra óptica distribuida (DTS) se estructuró en tres fases principales: diseño experimental en laboratorio, implementación en un prototipo real y análisis de datos. En primer lugar, se diseñó un modelo a escala del sustrato de tierra que aloja la fibra óptica, replicando condiciones reales de humedad y compactación. Este modelo permitió realizar ensayos de humectación parcial y controlar el flujo de agua constante, simulando las condiciones de infiltración que se esperan en una balsa.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Durante estas pruebas, se aplicó un pulso térmico mediante un láser que emite un impulso óptico a lo largo de la fibra óptica (FO) instalada en el sustrato. La unidad de lectura, o interrogador, registró la evolución de la temperatura en los canales de la fibra durante el proceso de medida, permitiendo analizar los gradientes térmicos generados por la presencia de agua. La localización de la fuga se determinó mediante la identificación de descensos de temperatura, que indican la presencia de un "disipador térmico" en el sensor, con una resolución espacial de 0.5 a 1.0 metros.

Además, se desarrolló un protocolo de ensayos que incluía diferentes tiempos de aplicación del pulso térmico y condiciones de humedad del suelo, tanto en seco como en húmedo, para definir con precisión las diferencias térmicas características de una fuga. Se realizaron mediciones en campo en un prototipo real de balsa, donde la fibra óptica fue instalada siguiendo un diseño específico que incluía detalles como la zanja de drenaje y la tubería de aporte de agua.

Durante la fase de prueba, se realizaron mediciones continuas a lo largo del tiempo, registrando eventos como la apertura de grifos y cambios en el flujo de agua. Los datos obtenidos fueron procesados mediante un visor digital que permitía visualizar la temperatura en cada punto de la fibra óptica, generando gráficas que mostraban las variaciones térmicas y destacando las zonas con temperaturas superiores o inferiores a la media. Las zonas con temperaturas más altas (en rojo) se asociaron a posibles fugas, mientras que las más bajas (en azul) indicaron áreas con menor infiltración.

Finalmente, se realizó un análisis de consumo del circuito eléctrico equivalente para anticipar posibles problemas técnicos en la implementación a gran escala. Este enfoque integral permitió validar el sistema en condiciones representativas de la escala real y proporcionar una base sólida para su futura aplicación en balsas de purines.

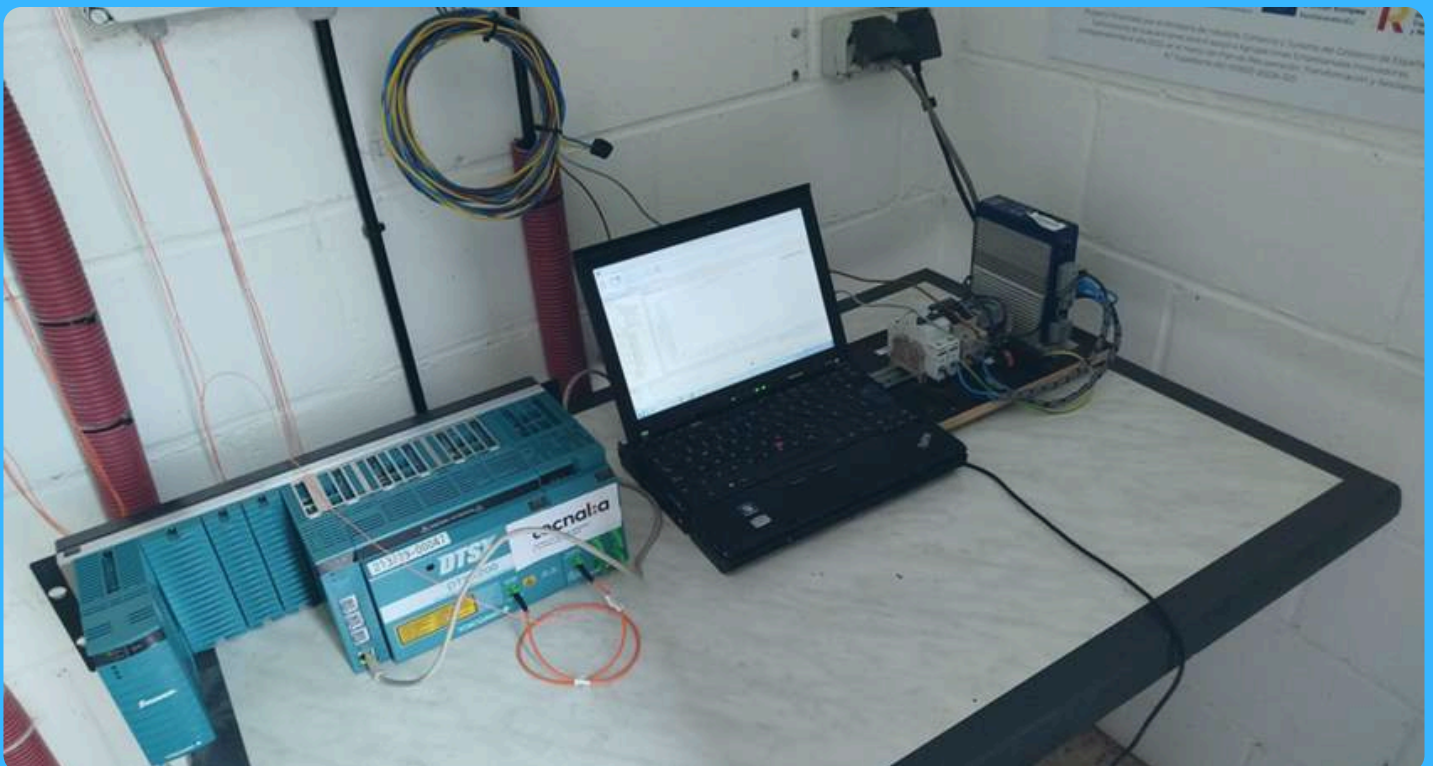


Foto 2 . Sistema de recogida y monitorización de la información del embalse



El desarrollo del sistema de detección de fugas en balsas mediante tecnología de fibra óptica distribuida (DTS) se estructuró en tres fases principales: diseño experimental en laboratorio, implementación en un prototipo real y análisis de datos.

Resultados

Los resultados obtenidos en el estudio validaron la viabilidad del sistema de detección de fugas en balsas mediante tecnología DTS con aplicación de pulso térmico.

Las pruebas de laboratorio demostraron diferencias térmicas significativas entre condiciones secas y húmedas, con descensos de temperatura en los puntos donde se aplicó humectación parcial o flujo constante de agua, lo que confirma la capacidad del sistema para identificar infiltraciones.

La resolución espacial de 0.5 a 1.0 metros permitió localizar con precisión las zonas de mayor y menor temperatura, destacando áreas con temperaturas superiores a 5 grados (en rojo) como posibles puntos de fuga. En el prototipo real, las mediciones en campo mostraron una evolución temporal clara de las variaciones térmicas, con eventos como la apertura de grifos generando cambios detectables en la temperatura de la fibra óptica.

El análisis de los datos a través del visor digital permitió generar gráficas que visualizaban las diferencias térmicas en cada tramo de la fibra, facilitando la interpretación de los resultados.

Se observó que las zonas con menor temperatura correspondían a áreas con mayor infiltración de agua, mientras que las zonas más calientes indicaban una menor humedad. Además, el análisis del consumo eléctrico del circuito permitió anticipar posibles problemas técnicos en la implementación a gran escala.

En conjunto, los resultados obtenidos, aunque aún en fase de validación a escala real, han permitido verificar las condiciones de funcionamiento del sistema, demostrando su potencial para identificar y localizar fugas en balsas de purines.

Este enfoque contribuye a la transición digital y ambiental del sector agropecuario, ofreciendo una solución innovadora, de bajo coste y alta resolución para un sector que aún carece de tecnologías digitales avanzadas.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Conclusiones

La investigación desarrollada en el marco del proyecto DIGITBALSA ha demostrado la viabilidad y el potencial de la tecnología de fibra óptica distribuida (DTS) para la detección temprana y localización precisa de fugas en balsas de purines, un reto crítico en el sector porcino español. Este sistema, basado en la aplicación de un pulso térmico y el análisis de los gradientes de temperatura generados en la fibra óptica, permite identificar con alta resolución espacial (entre 0.5 y 1.0 metros) las zonas donde se produce infiltración de agua, gracias a la creación de un "disipador térmico" que se manifiesta como un descenso de temperatura en el sensor.

Los ensayos realizados en laboratorio, bajo diferentes condiciones de humedad del sustrato, han permitido definir con precisión las diferencias térmicas asociadas a la presencia de agua, lo que confirma la capacidad del método para distinguir entre áreas secas y húmedas, incluso en condiciones complejas. Esta calibración inicial es fundamental para evitar interferencias causadas por variaciones térmicas naturales, como las estacionales, que podrían falsear los resultados en un entorno real.



La investigación desarrollada en el marco del proyecto DIGITBALSA ha demostrado la viabilidad y el potencial de la tecnología de fibra óptica distribuida (DTS) para la detección temprana y localización precisa de fugas en balsas de purines, un reto crítico en el sector porcino español.

La implementación del sistema en un prototipo a escala real, dentro del mismo proyecto, ha permitido validar la metodología en condiciones representativas del campo, demostrando su robustez y adaptabilidad.

Las mediciones en campo han mostrado una clara evolución temporal de las variaciones térmicas, con eventos como la apertura de grifos generando cambios detectables en la temperatura de la fibra óptica, lo que confirma la capacidad del sistema para responder a cambios dinámicos en el flujo de agua.

El desarrollo de un visor digital para la adquisición e interpretación de datos ha facilitado la visualización de los resultados, permitiendo destacar zonas con temperaturas superiores a la media (en rojo) como posibles puntos de fuga, y áreas más frías (en azul) como zonas con menor infiltración.

Este enfoque no solo mejora la detección de fugas, sino que también permite estimar las condiciones hidráulicas del subsuelo, ofreciendo una herramienta de monitoreo continuo y proactivo.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Además, el análisis del consumo eléctrico del circuito equivalente ha permitido anticipar posibles problemas técnicos en la implementación a gran escala, resolviéndolos mediante la adición de una resistencia que reduce la corriente demandada. Este tipo de consideración práctica es esencial para garantizar la sostenibilidad del sistema en aplicaciones reales. La investigación contribuye de manera directa a la transición digital y ambiental del sector agropecuario, un sector en el que, hasta ahora, la instrumentación y las tecnologías digitales avanzadas son poco empleadas. Al ofrecer una solución innovadora, de bajo coste y alta resolución, **el sistema desarrollado en DIGITBALSA representa un avance significativo en la gestión sostenible de residuos ganaderos, permitiendo la detección temprana de fugas, la prevención de contaminación de aguas superficiales y subterráneas, y el cumplimiento de la normativa ambiental.** Aunque los resultados aún requieren validación a escala real, el sistema muestra un alto potencial para ser implementado en balsas de purines, mejorando la eficiencia, la seguridad y la sostenibilidad del sector porcino.

Referencias

Sanchez, J.C.; Muñoz, O.; Russo, B.; Oliete, A.A.; Paindelli, A. DISTRIBUTED TEMPERATURE SENSORS SYSTEM. FIELD TESTS ON EARTH DAM. DYNA 2023, 98, 163–168, doi:10.6036/10418.

Antolín Cañada, D.; López Julián, P.L.; Pérez Esteras, J.; Sánchez Catalán, J.C.; Acero Oliete, A.; Russo, B. Desarrollo en laboratorio de un sistema de detección temprana de fugas en balsas mediante tecnología de fibra óptica. Ingeniería del Agua 2023, 27, 211–221, doi:10.4995/ia.2023.19991.



SUBTEMÁTICA 3.



SEGURIDAD DE LAS INFRAESTRUCTURAS DEL AGUA

SID_AQUARURAL

Sistema Inteligente y Predictivo para la mejora de la gestión del agua urbana en entornos rurales

La garantía de la disponibilidad hídrica en cantidad y calidad en entornos urbanos de territorios despoblados y rurales es esencial para mejorar la calidad de vida de los ciudadanos.

De igual manera, para impulsar el desarrollo socioeconómico y fijar población en dichos territorios es necesario el desarrollo de herramientas que sean capaces de aunar características como alta capacidad computacional, fácil manejo, automatización, mantenimiento poco costoso, actualización y aprendizaje continuo, flexibilidad y versatilidad entre otras.

En los últimos tiempos, se han empleado enfoques basados en la inteligencia artificial (IA), como las redes neuronales artificiales (RNA), los sistemas de inferencia neurodifusa adaptativa (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, ANFIS), las máquinas de vectores de soporte (Support Vector Machines, SVM) y la técnica de procesamiento del análisis de componentes principales, para predecir procesos hidrológicos como la intensidad de las precipitaciones, teniendo en cuenta las condiciones climáticas y meteorológicas de los datos de precipitaciones de diferentes períodos de tiempo (por hora, por día, por semana, por mes y por año) en diferentes lugares del mundo.

Palabras clave

**IA, GESTIÓN DEL AGUA,
PREDICCIÓN, DIGITALIZACIÓN,
CICLO INTEGRAL DEL AGUA
URBANA, PROBABILIDAD**

Molina J.L.^(1,3), García-Prieto J.C.⁽³⁾,
Zazo S.^(1,3), Patino-Alonso C.^(1,2)

(1) IGA Grupo de Investigación.
Universidad de Salamanca, Escuela
Politécnica Superior de Ávila, Av. de los
Hornos Caleros, 50, 05003 Ávila, España:
[jlmolina@usal.es](mailto:jl Molina@usal.es), szazo@usal.es

(2) IGA Grupo de Investigación.
Universidad de Salamanca,
Departamento de Estadística, Campus
Miguel de Unamuno, C/Alfonso X El
Sabio s/n, 37007, Salamanca, España:
carpatino@usal.es

(3) CIDTA. Universidad de Salamanca,
Facultad de Farmacia, Campus Miguel
de Unamuno, C/Licenciado Méndez
Nieto, 37008, Salamanca, España:
jcgarcia@usal.es

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Hasta ahora, muchos estudios se han centrado en predecir las precipitaciones utilizando algoritmos basados en la inteligencia artificial. La mayoría de los modelos de inteligencia artificial desarrollados para predecir las precipitaciones han sido de naturaleza determinista, lo que ha requerido un análisis de sensibilidad para evaluar su solidez. Además, la predicción de las precipitaciones supone un reto importante debido a la naturaleza altamente estocástica de los parámetros meteorológicos. La regla de Bayes, implementada a través de la inferencia bayesiana (Bayesian Inference, BI), puede considerarse una herramienta valiosa para abordar las incertidumbres inherentes a las predicciones meteorológicas. Sin embargo, hasta ahora no se han empleado la modelización con redes bayesianas (Bayesian Networks, BN), BI o el razonamiento causal bayesiano (Bayesian Causal Reasoning, BCR) para describir y predecir de forma probabilística los procesos de tratamiento de agua para el ciclo urbano.

Además, la incorporación de variables de decisión en la estructura de estas herramientas y el diseño, por tanto, de diagramas de influencia convierten estas herramientas en potentes sistemas de apoyo a la decisión. Esta modelización de los procesos estocásticos podría mejorar significativamente la comprensión y la capacidad de predicción de los diferentes tratamientos de las fases de potabilización, depuración y regeneración. En este trabajo se presenta el diseño preliminar de una herramienta informática basada en Inteligencia Artificial y especialmente en un algoritmo de aprendizaje automático (Machine Learning, ML) de probabilidad condicionada basado en el Teorema de Bayes. Dicha herramienta cuenta con cuatro módulos principales: uno para la potabilización, otro para la depuración, otro para la regeneración y un cuarto módulo dedicado a la evaluación estocástica de la recarga a acuíferos. El Sistema Inteligente y Predictivo para la mejora de la gestión del agua urbana en entornos rurales (SID_AQUARURAL) incorpora la incertidumbre de los procesos, así como ayuda en la toma de decisiones para el tratamiento óptimo del ciclo urbano del agua. Además, incorpora una serie de variables de decisión, que mejoran la capacidad operativa al llegar a ser un Diagrama de Influencia.

Introducción

El desarrollo conceptual del SID_AQUARURAL constituye un avance significativo en la digitalización y modernización de la gestión del ciclo urbano del agua en municipios rurales del espacio SUDOE (Suroeste Europeo). Los enfoques tradicionales de modelización, basados en esquemas deterministas, presentan dificultades para capturar la incertidumbre, variabilidad y aleatoriedad inherentes a los sistemas hídricos, lo que limita su capacidad para apoyar la toma de decisiones en contextos reales [1]. En entornos rurales con escasez de datos y limitaciones operativas, estas dificultades se acentúan, comprometiendo la gestión eficaz del recurso hídrico [2]. Además, aunque diversas técnicas de inteligencia artificial – como RNA, ANFIS o SVM - se han utilizado para predecir variables hidrológicas, la mayoría de estos enfoques siguen siendo deterministas y requieren análisis adicionales para evaluar su robustez [3].

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Ante estas limitaciones, los Sistemas Digitales Inteligentes (Digital Intelligent Systems, DIS) se han consolidado como un marco prometedor para integrar conocimiento experto, datos físicos y procesos operativos en entornos complejos [4]. En este contexto, el metamodelado ofrece una vía estructurada para representar sistemas con múltiples niveles de abstracción y facilitar su adaptación a diferentes configuraciones, tecnologías y escenarios [5]. Un ejemplo de esta aproximación es el marco conceptual Meta-Water-Modelling (Meta-WaM), que propone modelizar el ciclo urbano del agua mediante una estructura compartimental que incorpora incertidumbre, variabilidad y decisiones operativas [6].

La arquitectura propuesta para el SID_AQUARURAL se apoya en este enfoque metamodelado, integrando modelos estocásticos basados en BN y, cuando es necesario, en extensiones orientadas a objetos (Object-Oriented Bayesian Networks, OOBN), que permiten representar relaciones causales, actualizar predicciones con nueva información y capturar dependencias internas de forma coherente [7]. Asimismo, la introducción de diagramas de influencia, que incorporan explícitamente variables de decisión y criterios operativos, convierte la herramienta en un sistema capaz de evaluar alternativas tecnológicas y operativas bajo condiciones de incertidumbre [8].

El objetivo de esta investigación es presentar el diseño metodológico del SID_AQUARURAL y describir su estructura lógica, basada en un metamodelo modular y BN, orientado a mejorar la toma de decisiones en la gestión del ciclo urbano del agua en municipios rurales.

Metodología

La metodología utilizada para el diseño del SID_AQUARURAL se fundamenta en un enfoque de metamodelado denominado Meta-WaM, cuyo objetivo es estructurar el conocimiento relacionado con el ciclo urbano del agua mediante modelos compartimentales capaces de integrar incertidumbre, dependencias causales y variabilidad [6]. Este enfoque permite representar procesos complejos sin necesidad de recurrir a modelizaciones mecanicistas detalladas, lo que facilita su aplicación en entornos rurales caracterizados por una disponibilidad limitada de datos. Además, la eficacia demostrada por sistemas basados en BN para la gestión de infraestructuras hidráulicas — como el reciente StocHastlc Early Leakage Detection System (SHIELDS), aplicado a la detección estocástica de fugas en redes de distribución— refuerza la pertinencia de adoptar modelos probabilísticos en el diseño de SID_AQUARURAL [9].

El sistema se estructura en **cuatro módulos principales: prepotabilización, potabilización, depuración y regeneración/ reutilización**. Cada módulo se modeliza mediante BN que incorporan entradas, variables latentes, operaciones unitarias, decisiones operativas y salidas.

Cuando se introducen variables de decisión y funciones de utilidad, los modelos evolucionan hacia diagramas de influencia, lo que convierte la herramienta en un Sistema de Apoyo a la Decisión (SAD) [10].

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Estructura Modular

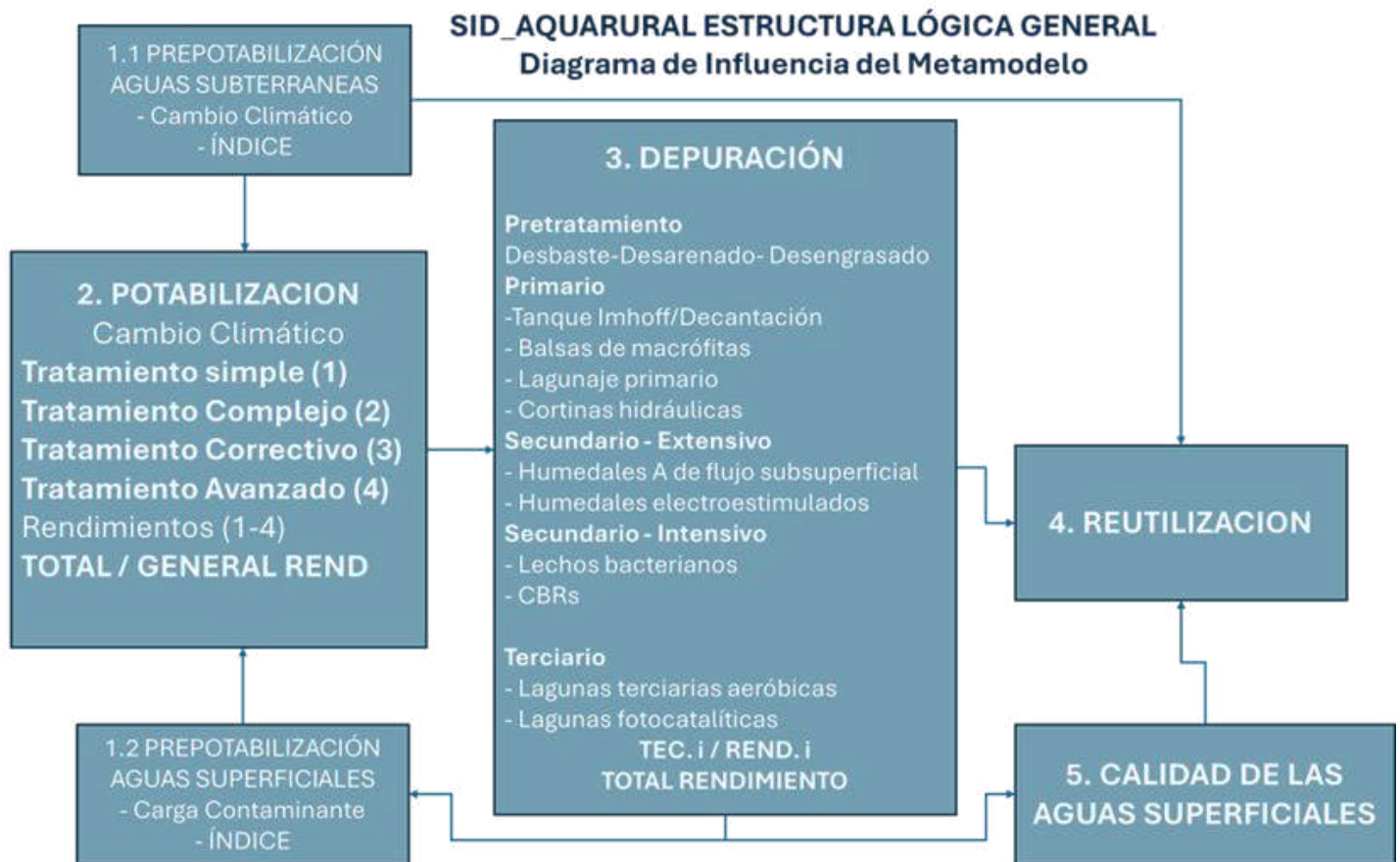


Figura 1. Hiperestructura general del SID_AQUARURAL

SID_AQUARURAL se articula mediante un enfoque modular basado en el metamodelado, lo que permite representar el ciclo urbano del agua como un conjunto de procesos independientes pero interconectados. Cada módulo - prepotabilización, potabilización, depuración y regeneración/reutilización - se estructura mediante BN capaces de integrar incertidumbre, dependencias causales y variabilidad operativa. Esta arquitectura facilita la interoperabilidad entre procesos y permite adaptar el modelo a configuraciones tecnológicas diversas.

La Figura 1 muestra la organización modular del sistema y las relaciones de entrada-salida entre módulos, representando la hiperestructura sobre la que se construyen las distintas subredes. Esta estructura garantiza que la salida de cada módulo actúe como entrada condicionada del siguiente, manteniendo coherencia probabilística en todo el ciclo urbano del agua y permitiendo una representación integrada del proceso completo.

Diferencias estructurales entre módulos

Si bien los cuatro módulos comparten una arquitectura lógica común, su estructura interna difiere de acuerdo con la naturaleza de los procesos que representan.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

1) Módulo de prepotabilización

Consiste en la inclusión de los escenarios de Cambio Climático, así como la calidad de entrada al sistema tanto de agua subterránea (Groundwater Water Quality Index, G_WQI), como de agua superficial (Surface Water Quality Index, S_WQI) como variables dependientes de la anterior. Finalmente, se introduce la variable de índice de calidad final (Water Quality Index, WQI) de entrada al módulo de potabilización (Figura 2).

2) Módulo de potabilización

El módulo de potabilización (Figura 2) adopta una lógica basada en técnicas alternativas, lo que permite construir un metamodelo tecnológico en el que cada tecnología (p. ej., membranas, electro-oxidación, adsorción) se modeliza como una rama opcional con sus rendimientos asociados. En este caso, la BN se configura como un árbol de decisión probabilístico condicionado por los índices de calidad del agua bruta, permitiendo comparar alternativas mediante variables de rendimiento y coste.

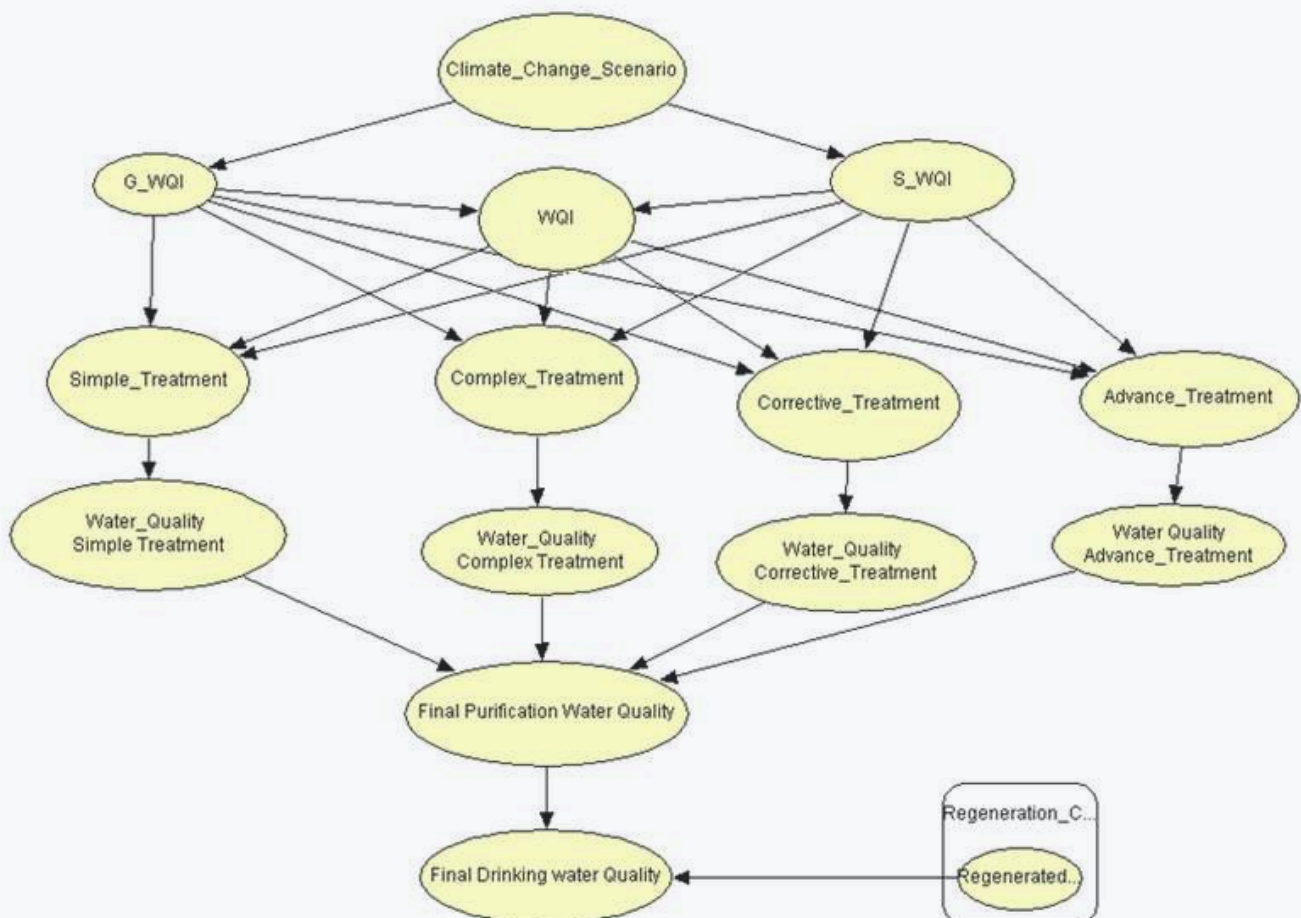


Figura 2. Estructura lógica general del módulo de potabilización

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

3) Módulo de depuración

En contraste, el módulo de depuración presenta una estructura secuencial, coherente con los procesos convencionales de tratamiento de aguas residuales (Figura 3). Por ello, su arquitectura se descompone en subfases consecutivas - pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario -, cada una representada mediante una BN independiente.

Esta estrategia modular ofrece dos ventajas metodológicas fundamentales:

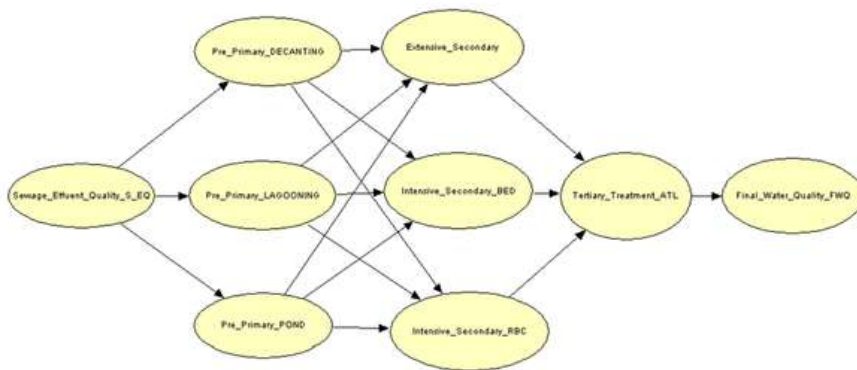


Figura 3. Red bayesiana del módulo de depuración

1. Permite capturar la variabilidad y el rendimiento propio de cada operación unitaria, evitando construir una red única excesivamente compleja.
2. Facilita la actualización parcial del modelo, dado que la recalibración de una subfase no altera la estructura probabilística del resto.

4) Módulo de regeneración/ reutilización

El módulo de depuración está conectado a este cuarto módulo mediante la variable "WQ_Tertiary" (Water Quality after Tertiary Treatment) mediante un nodo de salida. Finalmente, la variable "Regenerated Drinking Water Quality" actúa como variable de reutilización y permite hacer circular el sistema de tratamiento al estar conectada directamente con el módulo de potabilización. De esta forma se produce una mezcla de agua en el depósito a la salida de potabilización (Figura 4) antes de su distribución en baja.

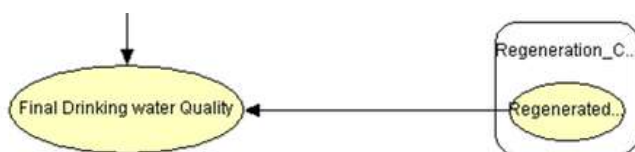


Figura 4. Solución estructural para la completa circularidad del sistema de tratamiento

Los procesos de tratamiento del agua en el módulo de regeneración (Figura 5) incluidos en la variable "Water Regeneration Treatments" son Lagunas Terciarias aeróbicas, Desinfección, Membranas de Filtración y Procesos de oxidación avanzados.

A continuación, los diferentes usos de dicha agua están incluidos en la variable "Water Regeneration Usage", en función del tratamiento previamente realizado.

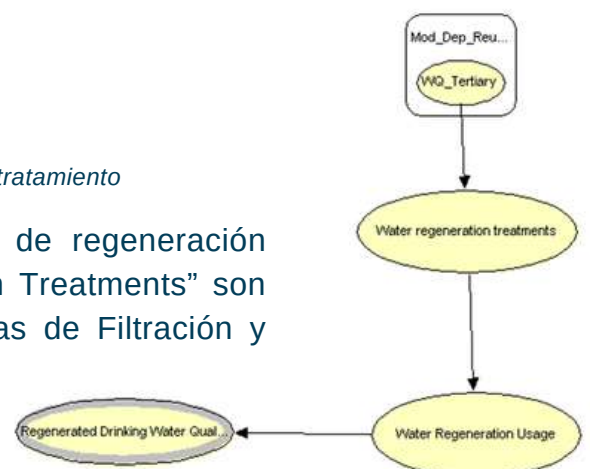


Figura 5. Red bayesiana del módulo de Regeneración/ Reutilización

El agua regenerada con la calidad final resultante se mezclará con el agua potabilizada en el depósito antes de su distribución en baja.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Resultados

Los primeros resultados del desarrollo del SID_AQUARURAL se centran en la definición y validación conceptual de su arquitectura, así como en la formalización de los procesos incluidos en cada módulo. El sistema presenta una hiperestructura jerárquica que organiza la información en tres niveles: marco general, módulos funcionales y procesos específicos. Esta organización permite integrar de forma coherente el ciclo urbano del agua y facilita la simulación bajo distintos escenarios de operación manteniendo consistencia probabilística en toda la secuencia de tratamiento.

El análisis estructural permitió identificar las variables críticas y sus interdependencias en cada módulo. En el módulo de potabilización, se incorporan operaciones como oxidación avanzada, filtración, adsorción y desinfección, cuyos rendimientos dependen de la calidad inicial del agua, de las condiciones ambientales y de las decisiones operativas seleccionadas. En el módulo de depuración, las subredes secuenciales representan la eliminación de materia orgánica, nutrientes y contaminantes específicos, integrando tanto tecnologías naturales como procesos electroasistidos.



Esta organización permite integrar de forma coherente el ciclo urbano del agua y facilita la simulación bajo distintos escenarios de operación manteniendo consistencia probabilística en toda la secuencia de tratamiento.

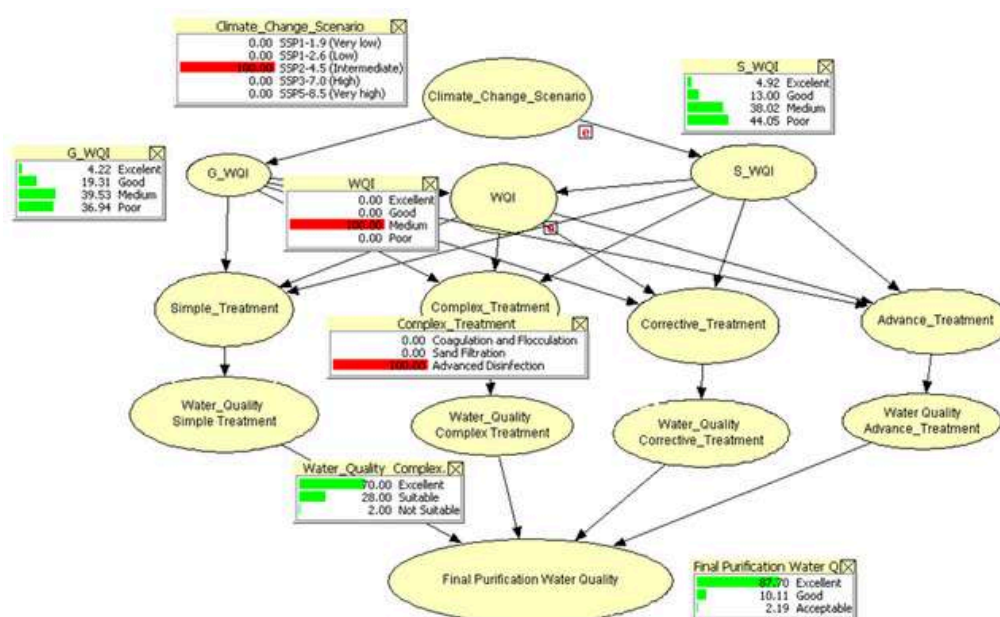


Figura 6. Resultados de la simulación del Módulo de Potabilización para el caso de Tratamiento Complejo, imponiendo un escenario de cambio climático y el origen del recurso

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

El potencial de este enfoque se pone de manifiesto a través de la capacidad de análisis del Módulo de Potabilización (Figura 6). Se observa cómo a partir de la selección de un escenario climático, el origen del recurso y el tipo de tratamiento a aplicar (estado de las variables, 100,00), SID_AQUARURAL proporciona la probabilidad de obtener una calidad concreta asociada a un tipo específico de tratamiento (en este caso "Complex Treatment"), así como la calidad final esperable de todo el proceso de potabilización.

El módulo de regeneración/reutilización se centra en la reducción de carga microbiológica y de compuestos emergentes, integrando procesos fotoelectroquímicos y de desinfección avanzada. La mezcla con el agua potabilizada provendrá casi exclusivamente del agua regenerada destinada al abastecimiento humano.

Las simulaciones preliminares realizadas con las estructuras definidas muestran que el sistema permite estimar de manera integrada la probabilidad de cumplimiento normativo, así como el rendimiento esperado de cada combinación tecnológica. Asimismo, el modelo facilita analizar el impacto de decisiones operativas - tanto en módulos individuales como en la cadena completa de tratamiento - y cuantificar su incidencia sobre la calidad final del agua.

La incorporación explícita de incertidumbre y variabilidad mejora la representatividad del comportamiento real de los procesos, especialmente en contextos caracterizados por altas fluctuaciones del caudal y de la calidad del agua, como ocurre habitualmente en municipios rurales. Estos resultados preliminares confirman la coherencia interna del modelo, su capacidad para integrar módulos heterogéneos y su potencial como herramienta de apoyo a la decisión en la gestión del ciclo urbano del agua.

Conclusiones

El desarrollo del SID_AQUARURAL ha permitido consolidar un marco metodológico innovador para la representación estocástica del ciclo urbano del agua en municipios rurales, incorporando explícitamente la incertidumbre asociada a los procesos de tratamiento y a las condiciones variables de operación. La combinación del metamodelado con BN y diagramas de influencia proporciona una arquitectura flexible y escalable, capaz de integrar tecnologías heterogéneas y de representar de forma coherente sus interdependencias.

El enfoque modular adoptado facilita la descomposición del sistema en unidades funcionales - prepotabilización, potabilización, depuración y regeneración - y permite analizar su comportamiento individual y conjunto. Esta estructura ofrece ventajas operativas relevantes, ya que posibilita la actualización parcial de cada módulo sin necesidad de reconstruir el modelo completo y admite la incorporación progresiva de nuevos procesos o tecnologías. La definición de subredes secuenciales en el módulo de depuración constituye un avance significativo para capturar la dinámica propia de los tratamientos convencionales y de las tecnologías evaluadas en el proyecto Gestión sostenible y digitalizada del agua en entornos rurales del espacio SUDOE (GestEAUr).

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Los resultados preliminares derivados de las simulaciones muestran que el modelo es capaz de representar adecuadamente la variabilidad y las dependencias causales entre procesos, lo que permite estimar probabilísticamente el cumplimiento de criterios de calidad y el rendimiento de alternativas tecnológicas bajo diferentes escenarios de operación. Esta aproximación resulta especialmente útil en entornos rurales, donde la disponibilidad de datos suele ser limitada y las condiciones de entrada presentan alta variabilidad temporal.

El potencial del SID_AQUARURAL como herramienta de apoyo a la decisión radica en su capacidad para integrar información heterogénea, evaluar distintas configuraciones de tratamiento y cuantificar la influencia de las decisiones operativas sobre la calidad final del agua. Su diseño lo convierte en un sistema adaptable a futuras ampliaciones, incluyendo la incorporación de datos en tiempo real procedentes de sensores, técnicas de monitorización avanzada y nuevos módulos de análisis.

En conjunto, el SID_AQUARURAL constituye un paso relevante hacia la digitalización del ciclo urbano del agua en zonas rurales, proporcionando una base sólida para mejorar la planificación, operación y sostenibilidad de los sistemas de tratamiento. Los próximos trabajos se centrarán en la validación empírica del modelo mediante casos de estudio y en el desarrollo de interfaces que faciliten su uso por parte de gestores y operadores locales.

Agradecimientos

Este trabajo se ha desarrollado en el marco del proyecto europeo GestEAUr, financiado por la Unión Europea a través del programa Interreg SUDOE 2021-2027.

Referencias

- [1] Kraft, B., Jung, M., Körner, M., Koirala, S., & Reichstein, M. (2022). Towards hybrid modeling of the global hydrological cycle. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26, 1579–1614. <https://doi.org/10.5194/hess-26-1579-2022>
- [2] Macian-Sorribes, H., Molina, J. L., Zazo, S., & Pulido-Velázquez, M. (2021). Analysis of spatio-temporal dependence of inflow time series through Bayesian causal modelling. *Journal of Hydrology*, 597, 125722. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.125722>
- [3] Agbasi, J. C., & Egbueri, J. C. (2024). Prediction of potentially toxic elements in water resources using MLP-NN, RBF-NN, and ANFIS: A comprehensive review. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 30370–30398. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33350-6>
- [4] IGA Research Group – University of Salamanca (2021). SID_REDES: Intelligent and digital system for the ecological restoration of degraded reservoirs. TED2021-129478B-I00

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

- [5] Jouault, F., & Bézivin, J. (2006). KM3: A DSL for metamodel specification. In FMOODS 2006 (pp. 171–185). https://doi.org/10.1007/11768869_12
- [6] Molina, J. L., Zazo, S., & Espejo, F. (2025). Meta-water-modelling (Meta-WaM): A new framework for increasing applicability of digital water modelling. *Knowledge-Based Systems*, 318, 113543. [1] Kraft, B., Jung, M., Körner, M., Koirala, S., & Reichstein, M. (2022). [Towards hybrid modeling of the global hydrological cycle. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26, 1579–1614. https://doi.org/10.5194/hess-26-1579-2022](https://doi.org/10.5194/hess-26-1579-2022)
- [2] [Macian-Sorribes, H., Molina, J. L., Zazo, S., & Pulido-Velázquez, M. \(2021\). Analysis of spatio-temporal dependence of inflow time series through Bayesian causal modelling. *Journal of Hydrology*, 597, 125722. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.125722](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.125722)
- [3] [Agbasi, J. C., & Egbueri, J. C. \(2024\). Prediction of potentially toxic elements in water resources using MLP-NN, RBF-NN, and ANFIS: A comprehensive review. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 30370–30398. https://doi.org/10.1007/s11356-024-33350-6](https://doi.org/10.1007/s11356-024-33350-6)
- [4] [IGA Research Group – University of Salamanca \(2021\). SID_REDES: Intelligent and digital system for the ecological restoration of degraded reservoirs. TED2021-129478B-I00](https://doi.org/10.1007/978-3-030-71294-7_100)
- [7] Molina, J. L., Bromley, J., García-Aróstegui, J. L., Sullivan, C., & Benavente, J. (2010). Integrated water resources management of overexploited hydrogeological systems using object-oriented Bayesian networks. *Environmental Modelling & Software*, 25, 383–397. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.10.007>
- [8] Hosseini, F., Prieto, C., & Álvarez, C. (2024). Hyperparameter optimization of regional hydrological LSTMs by random search: A case study from Basque Country, Spain. *Journal of Hydrology*, 643, 132003. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132003>
- [9] Molina, J.-L., Patiño-Alonso, C., Wan, X., & Farmani, R. (2025). StocHastlc Early Leakage Detection System (SHIELDS) for water distribution networks. *Water Resources Management*, 39, 4189–4204. <https://doi.org/10.1007/s11269-025-03703-3>
- [10] Zazo, S., Molina, J. L., Macian-Sorribes, H., & Pulido-Velázquez, M. (2023). Assessment of the predictability of inflow to reservoirs through Bayesian causality. *Hydrological Sciences Journal*, 68, 1323–1337. <https://doi.org/10.1080/02626667.2023.2220462>

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Listado de Acrónimos

ANFIS: Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

BCR: Bayesian Causal Reasoning.

BI: Inferencia Bayesiana (Bayesian Inference).

BN: Redes Bayesianas (Bayesian Networks).

DIS: Digital Intelligent Systems.

GestEAUr: Gestión sostenible y digitalizada del agua en entornos rurales del espacio SUDOE.

G_WQI: Groundwater Water Quality Index.

IA: Inteligencia Artificial.

Meta-WaM: Meta-Water-Modelling.

ML: Machine Learning.

OoBN: Object-Oriented Bayesian Networks.

RNA: Redes Neuronales Artificiales.

SAD: Sistema de Apoyo a la Decisión.

SHIELDS: StocHastIc Early Leakage Detection System.

SID_AQUARURAL: Sistema Inteligente y Predictivo para la mejora de la gestión del agua urbana en entornos rurales.

SUDOE: Suroeste Europeo.

SVM: Support Vector Machines.

S_WQI: Surface Water Quality Index.

WQ_Tertiary: Water Quality after Tertiary Treatment.

WQI: Water Quality Index.

ASEGURANDO EL DATO EN EL CICLO DEL AGUA: VALIDACIÓN AUTOMÁTICA DE MODELOS IFC MEDIANTE IDS EN EL MARCO DE LOS PERTE.

En un mundo cada vez más urbanizado, las ciudades utilizan sistemas de información para mejorar la calidad de vida de sus habitantes. La inteligencia de una ciudad se define por su capacidad para gestionar recursos de forma eficaz, integrando soluciones tecnológicas que permitan el control y la gestión eficiente de los servicios públicos. En este contexto, la digitalización del ciclo urbano del agua es un pilar fundamental para avanzar hacia ciudades más sostenibles y resilientes.

Los proyectos PERTE de digitalización del ciclo urbano del agua impulsan la adopción de tecnologías como BIM (Building Information Modeling), que requieren modelos de datos fiables, interoperables y alineados con estándares internacionales. Sin embargo, garantizar la calidad y consistencia de los modelos IFC (Industry Foundation Classes) sigue siendo un reto crítico para la correcta implantación de estas soluciones.

Para la generación de los modelos de información, es habitual la realización de un proceso Scan to BIM en las instalaciones. Mediante el uso de tecnologías de escaneo láser y fotogrametría, se obtienen nubes de puntos de alta precisión que sirven como base para modelar los activos. Esto permite capturar la realidad geométrica de las infraestructuras, asegurando que los modelos digitales reflejen con exactitud las condiciones existentes.

Esta comunicación presenta el desarrollo de una aplicación para la validación automática de modelos IFC mediante el estándar IDS (Information Delivery Specification). La herramienta permite comprobar que los modelos cumplen con los requisitos de información definidos para su integración en entornos digitales, asegurando la coherencia y completitud de los datos.

Palabras clave

**PERTE, TECNOLOGÍA,
DIGITALIZACIÓN, BIM, IFC,
DATOS, REQUISITOS,
AUDITORIA**

César G. Ferrer

BIM Manager

cgofer@globalomnium.com

Vicente Cotino Domínguez

BIM Application Developer

vicodo@globalomnium.com

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

La aplicación fue utilizada para auditar 440 modelos correspondientes a 88 instalaciones hidráulicas, verificando aspectos clave como la correcta clasificación de elementos, la presencia de las propiedades requeridas y la consistencia de los datos.

Los resultados evidencian que la automatización del proceso de validación reduce significativamente los tiempos de revisión, minimiza errores humanos y mejora la trazabilidad de la información, contribuyendo a la eficiencia en la fase de explotación y mantenimiento.

La validación basada en IDS se posiciona como una herramienta estratégica para garantizar la interoperabilidad y la calidad de los modelos BIM en proyectos de digitalización del agua urbana.

Este enfoque no solo optimiza la implantación de gemelos digitales, sino que también fortalece la toma de decisiones y la sostenibilidad de los sistemas urbanos, gracias a la fiabilidad de los datos, alineándose con los objetivos de transformación digital y resiliencia de las ciudades inteligentes.

Introducción

La digitalización de las infraestructuras hidráulicas se ha convertido en un pilar fundamental para mejorar la eficiencia y sostenibilidad del ciclo urbano del agua. La aplicación de la metodología Building Information Modeling (BIM) en este sector permite optimizar las fases de cualquier obra pública, incluyendo la planificación, diseño, construcción, y especialmente, la gestión a largo plazo de las instalaciones y sus activos.

El artículo se enmarca en las iniciativas PERTE (Proyectos Estratégicos para la Recuperación y Transformación Económica) del Gobierno de España como “un nuevo instrumento de colaboración público-privada en los que colaboran las distintas administraciones públicas, empresas y centros de investigación.” (Gobierno de España, n.d.); en particular, el PERTE Shine-AMV (EMIMET, n.d.) y Digitamed (Global Omnium, n.d.). Este esfuerzo institucional está alineado con la Agenda 2030, contribuyendo específicamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular el ODS 6 (Agua Limpia y Saneamiento) y el ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura), al fomentar la digitalización de redes y la implementación de soluciones tecnológicas.

El enfoque propuesto es una metodología integral que combina el modelado BIM, el intercambio de información estructurada y el estricto control de calidad de los modelos. Dada la necesidad de trabajar sobre instalaciones existentes, el modelado se realiza sobre un proceso Scan to BIM, partiendo de la captura del estado actual (As-Built) de la infraestructura hasta culminar con la generación de un gemelo digital fiable. El objetivo principal de esta metodología es ofrecer una forma robusta y eficiente de digitalizar las instalaciones hidráulicas, facilitando su gestión y mantenimiento.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Una vez que la información está estructurada y validada bajo estándares BIM, esta puede ser integrada con otros sistemas de información como SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) y GMAO (Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador), permitiendo la supervisión y mantenimiento en tiempo real, aportando inteligencia operativa para la toma de decisiones.

Metodología

La metodología planteada se articula en un flujo de trabajo sistemático de Scan to BIM, diseñado para la generación del Modelo de Información del Activo (AIM), que es el conjunto de datos necesarios para la operación y mantenimiento.

Captura de la Realidad y Postproceso

La fase inicial se centra en el levantamiento detallado de la instalación. Se utiliza el escaneo láser terrestre (TLS/LS) para capturar la forma y dimensiones exactas de la infraestructura, generando una nube de puntos densa y precisa. El equipo utilizado destaca por su precisión de hasta ± 1 mm a 10 metros, ideal para entornos complejos como las instalaciones hidráulicas.

La captura se complementa con fotogrametría aérea mediante dron para obtener datos de grandes extensiones o zonas inaccesibles para la generación del Modelo Digital del Terreno (MDT).



Imagen 1. Flujo de captura de realidad: Instalación hidráulica (depósito), dron para fotogrametría aérea y escáner láser terrestre (TLS).

Se emplearon receptores GNSS para georreferenciar los puntos de apoyo y asegurar que el modelo se ubicara en coordenadas reales.

Las nubes de puntos se registran y georreferencian utilizando software especializado. Por su parte, las imágenes de dron se procesan mediante técnicas de fotogrametría para generar el MDT y la ortofoto georreferenciada.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Modelado y Estandarización BIM

El modelado se realiza sobre la base de la nube de puntos. El enfoque es construir un gemelo digital que recrea fielmente la realidad geométrica e informativa.

Para optimizar recursos, el modelado se limita a un Nivel de Desarrollo (LOD) 300, priorizando la identificación y localización precisa de los activos frente a la representación geométrica detallada.

Para la elaboración de los diferentes modelos de las 88 instalaciones, se definió una estructura de trabajo estandarizada basada en la ISO 19650 y la federación de modelos por disciplinas (Obra Civil, Hidráulica, Eléctrica y Entorno).

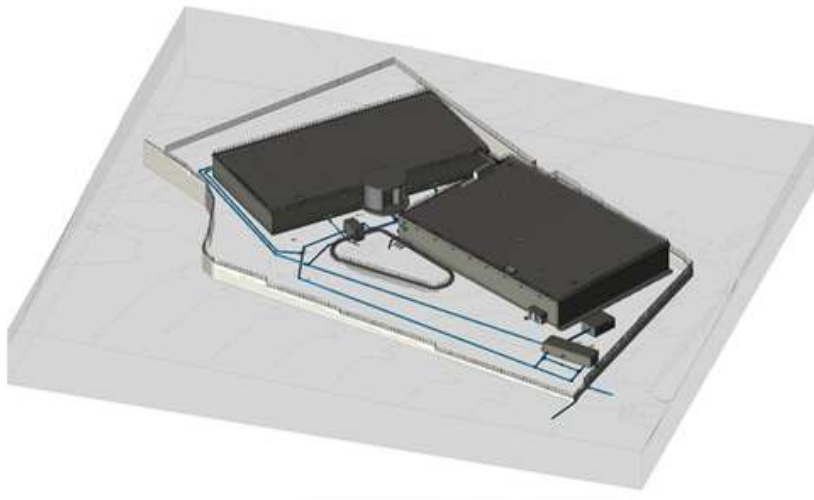


Imagen 2. Modelo de Información del Activo (AIM) con nivel de desarrollo LOD 300: Representación precisa de la infraestructura hidráulica y redes de tuberías.

La disciplina hidráulica es crucial, ya que alberga los activos (bombas, válvulas, tuberías) a los que se asigna el ObjectId, un identificador único que permite vincularlos al inventario de la infraestructura. Para la clasificación de estos elementos, se adoptó el sistema A easBIMClass (Alberto González Moreno et al., n.d.).

Interoperabilidad y Validación

Para garantizar la reutilización de la información a lo largo del ciclo de vida de las instalaciones, los modelos se exportan al formato abierto IFC (Industry Foundation Classes – ISO 16739).

El uso de este estándar abierto (BuildingSmart, n.d.) asegura que los datos del proyecto puedan ser consultados, utilizados y gestionados sin depender de un proveedor específico, evitando bloqueos tecnológicos y facilitando la interoperabilidad entre distintas plataformas.

Esto garantiza que la información mantenga su valor en el tiempo y pueda integrarse en cualquier flujo de trabajo presente o futuro.

La coordinación y el seguimiento se gestionan en un Entorno Común de Datos (CDE) multiplataforma, conectando Autodesk Construction Cloud (ACC) y Microsoft SharePoint.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Resultados

El principal resultado de la aplicación de esta metodología fue digitalizar y gestionar un gran volumen de instalaciones de forma eficaz y auditable, centrándose en la automatización del control de calidad de la información (la "I" del BIM).

Herramientas de Auditoría Automatizada

Dada la cantidad de modelos IFC generados (88 instalaciones entre ambos PERTE), se desarrollaron herramientas automatizadas para su revisión:

Dada la cantidad de modelos IFC generados (88 instalaciones entre ambos PERTE), se desarrollaron **herramientas automatizadas** para su revisión:

- **Seguimiento de avance real (IfcOpenShell):** Se implementó un script basado en la librería IfcOpenShell (IFC Addict, n.d.) para generar informes automáticos de cada disciplina. Estos informes resumen los aspectos generales del modelo. Además, para los modelos de la disciplina hidráulica, revisa adicionalmente la codificación de activos. El reporte compara los activos modelados y codificados en el modelo IFC contra el listado original de inventario, mostrando el porcentaje de avance real, identificando activos duplicados y elementos faltantes de codificar.
- **Validación del modelo de datos (IDSight):** Se creó una aplicación de escritorio, IDSight, para aplicar reglas de validación basadas en el estándar IDS (Information Delivery Specification) de buildingSMART. IDS (buildingSMART Spain, n.d.). Permite definir reglas específicas legibles por máquina que comprueban que los datos del modelo IFC están completos y organizados.



Imagen 2. Ecosistema de auditoría automatizada: Reportes de avance real mediante IfcOpenShell e interfaz de validación de requisitos IDS a través de la herramienta IDSight.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Conclusiones

Integración Operativa y Sostenibilidad

La culminación de este flujo de trabajo se materializa en la integración efectiva de los modelos BIM con otras bases de datos corporativas. Esta integración no se limita a la entrega de los modelos BIM, sino que se fundamenta en la vinculación de tres recursos críticos que garantizan la trazabilidad del proyecto: el modelo federado, que aporta el contexto espacial; el reporte del modelo de datos, que documenta la jerarquía de la información; y el informe de validación, que actúa como certificado de calidad y cumplimiento normativo.

El valor operativo de esta metodología reside en su capacidad para transformar el modelo BIM en un Gemelo Digital dinámico. La plataforma de recepción de estos modelos permite una interoperabilidad avanzada al establecer conexiones bidireccionales con señales IoT y el sistema corporativo de gestión de mantenimiento asistido por ordenador (GMAO).

El uso del ObjectID como clave primaria de conexión resulta fundamental en este esquema, ya que actúa como el puente que vincula el dato operativo en tiempo real con el componente digital correspondiente. De este modo, se logra una monitorización continua del estado de los activos, optimizando los ciclos de mantenimiento preventivo y correctivo, y transformando radicalmente la comunicación humano-máquina mediante el uso de interfaces tridimensionales intuitivas que facilitan la toma de decisiones basada en la evidencia.

Esta experiencia subraya la importancia estratégica de adoptar estándares abiertos (Open BIM), específicamente el uso de IFC e IDS. El empleo de estos estándares no solo garantiza la interoperabilidad técnica entre plataformas, sino que asegura la soberanía del dato frente al software propietario. En el contexto de la gestión de infraestructuras públicas a gran escala, esta independencia tecnológica es esencial para garantizar que la información sea accesible, auditable y útil durante todo el ciclo de vida del activo.

Agradecimientos

Expresar nuestro más sincero agradecimiento a Global Omnium por su visión estratégica y por el apoyo incondicional que permitió la implementación de esta metodología avanzada de Scan to BIM.

Un especial reconocimiento se dirige a las instituciones que han apoyado y financiado los fondos PERTE, por su firme compromiso con la innovación y la digitalización del sector de infraestructuras públicas, demostrando una decidida apuesta por soluciones tecnológicas que garantizan la eficiencia y la sostenibilidad.

Finalmente, agradecemos a BuildingSMART International y a toda la comunidad involucrada en el Open BIM, cuyo trabajo en el desarrollo y promoción de estándares abiertos como IFC e IDS ha sido fundamental para garantizar la interoperabilidad, la auditoría automatizada y el valor a largo plazo de la información generada.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Referencias

Alberto González Moreno, José Antonio Moraleda Mesa, Francisco Carmona Martínez, David Rodríguez Yagüe, Isidro Tena Díaz, & César Gómez Ferrer. (n.d.). Manual Sistema de clasificación de AEAS - A easBIMClass.v02.

BuildingSmart. (n.d.). openBIM Definition - buildingSMART International. Retrieved May 11, 2021, from <https://www.buildingsmart.org/about/openbim/openbim-definition/>

buildingSMART Spain. (n.d.). Information Delivery Specification (IDS). Retrieved January 7, 2026, from <https://www.buildingsmart.es/bim/openbim/ids/>

EMIMET. (n.d.). Proyecto SHiNE-AMV. Retrieved January 7, 2026, from <https://www.emimet.es/Empresa/Innovaci%C3%B3n/PERTE/Proyecto-PERTE/>

Global Omnium. (n.d.). DigitAMED - Digitalización del ciclo urbano del Agua en municipios del arco MEDiterráneo. Retrieved January 8, 2026, from <https://www.globalomnium.com/Page/2037>

Gobierno de España. (n.d.). ¿Qué son los PERTE? Retrieved January 7, 2026, from <https://planderecuperacion.gob.es/preguntas/que-son-los-perte>

IFC Addict. (n.d.). Dashboard IFC con IfcOpenshell. Retrieved January 7, 2026, from <https://www.youtube.com/watch?v=CdnzirpgJxc&list=PLDTFtK33UIhXZiw2SzGs3hJDHGeMzv60q>

UNA EXPERIENCIA DE DRENAJE VERTICAL, RECARGA GESTIONADA PROFUNDA DE ACUÍFEROS Y SEGURIDAD HÍDRICA. EL SONDEO ARNACHOS (LLIRIA, VALENCIA).



Palabras clave

DRENAJE VERTICAL, RECARGA ARTIFICIAL O GESTIONADA DE ACUÍFEROS, MAR, SONDEO PROFUNDO, PERCOLACIÓN, PERFORACIÓN, INFILTRACIÓN, SEGURIDAD HÍDRICA, CAMBIO CLIMÁTICO

El drenaje vertical mediante sondeos profundos de recarga intencionada de acuíferos se consolida como un elemento de seguridad hídrica, una manera de reducir el caudal punta de avenidas en zonas regables, además de constituir un elemento de combate a los efectos adversos del cambio climático. Se ha realizado una experiencia piloto en Liria (Valencia), construyendo el sondeo mecánico profundo “Balsa del Campo”, con objeto de evacuar el volumen de agua sobrante de la balsa de riego del mismo nombre cuando hay fuertes precipitaciones. Este sistema de drenaje ofrece una solución técnica experimental a la gestión de excedentes de avenidas, ya que no hay sistemas de drenaje horizontal en las inmediaciones para evacuar excedentes hídricos.

Esta comunicación pretende exponer los estudios previos del medio receptor, los criterios constructivos del sondeo y los resultados, drenando hasta 1.000 L/s por gravedad.

Introducción

La seguridad hídrica puede definirse como la provisión confiable de agua cuantitativa y cualitativamente aceptable para la salud, la producción de bienes y servicios y los medios de subsistencia, junto con un nivel aceptable de riesgos relacionados con el agua. [Grey y Sadoff 2007, en TEC n°14 (GWP 2010)].

José María Montes Vila (RIP,)
Geólogo Tragsa Valencia
(Homenaje póstumo)

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

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Se ha implementado un desarrollo experimental para conectar los excedentes hídricos, básicamente agua de lluvia, recogida por una balsa de riego construida en losa del Arzobispo (Valencia) con el acuífero kárstico infrayacente. Esta balsa, tradicionalmente, tuvo varios desbordamientos por las precipitaciones ocasionales típicas de este contexto ambiental. Con objeto de llevar parte de las aguas recogidas por la balsa al acuífero, fue construido el sondeo “Balsa del Campo”, con la finalidad de ensayar la idoneidad de este tipo de dispositivos como elementos de drenaje vertical, recarga gestionada de acuíferos, y seguridad hídrica. El fin último es experimentar con una unidad para prever si la construcción de sondeos adicionales podría resultar de utilidad para reducir el caudal punta de los picos de precipitación esporádicos. Estos asolan, con cierta frecuencia, el litoral mediterráneo en forma de DANAS o gotas frías desde el final del período terciario.

El sondeo tiene 203 metros de profundidad, y tiene un diseño telescópico específico para la recarga artificial o gestionada de acuíferos, o tecnología “MAR”, permitiendo la percolación de hasta 1000 L/s durante periodos de hasta cuatro días.

La finalidad de este artículo es dar a conocer los estudios previos a esta actuación de drenaje vertical implementada por TRAGSA, algunas de las especificaciones constructivas de este dispositivo experimental, para concluir en la importancia del drenaje vertical en la seguridad hídrica.

Metodología- Implentación del dispositivo experimental de drenaje vertical

Estudio de viabilidad

La Balsa del Campo es la última de un sistema de almacenamiento para regadío basado en el agua de lluvia, conectando cuatro balsas entre sí (Balsa de San Marcelino y Balsa de Cerro Gordo (llenadas por gravedad), y balsas de Portichuelo y del Campo, que cuentan con una estación de bombeo intermedia, siendo, por tanto y en terminología de “recargadores”, sistemas “activos”.

La balsa tiene una capacidad de 80.500 m³, ocupando una superficie cuadrangular de 1,4 ha. En caso de desbordamiento, el agua embalsada o el caudal instantáneo recibido circularía, ladera abajo, por los campos adyacentes a la misma, hasta llegar al cauce de la Rambla de Caracierzo, por donde se encauzaría hasta alcanzar el paraje de Torralba, donde termina este cauce por falta de drenaje natural, inundando una zona intensamente cultivada que cuenta además con infraestructuras, e.g., el aeródromo de Chulilla.

El sondeo permite “aliviar” hasta 50.000 m³ que, de otro modo, constituirían un caudal de escorrentía con impactos negativos dañinos para la agricultura e infraestructuras.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

X = 685744 Y = 4391256 Z = 430 m.s.n.m

Con el fin de realizar un pozo con el mayor diámetro posible, se empleó el sistema de perforación de percusión con cable, lo que permitió ejecutar un pozo de 203 m de profundidad con 660 mm de diámetro en el tramo superior, con reducción a 100 mm de profundidad a 550 mm Ø, para facilitar la infiltración de excedentes de aguas superficiales. Durante la perforación, se atravesaron tres niveles de permeabilidad muy alta, con pérdida del fluido de la perforación, aparentemente zonas fracturadas y fisuradas similares a las encontradas en el sondeo "Arnachos 1". Estos niveles se localizaron a 25, 65 y 107 m de profundidad. El nivel piezométrico se encontraba a 128,33 metros. Se entubó el sondeo con tubería filtrante troquelada de tipo puentecillo de 5 mm de luz, dejando tres tramos con tubería ciega para dotar de esbeltez a la construcción.

Terminado y aforado para limpieza en mayo de 2006, se realizaron varios ensayos de infiltración, percolando, por gravedad, un volumen de 10.000 litros de agua en 4 minutos y 10 segundos ($Q = 40$ l/s), saturando 21,74 m de la zona no saturada (primer ensayo). Las permeabilidades calculadas en ensayos sucesivos oscilaron entre 0,19 y 0,21 m/día, con una transmisividad media de 9 m²/día, y un coeficiente de almacenamiento de 0,2 (calculado por la fórmula de Jacob).

Consideraciones adicionales

En el diseño se adelantó que la carga hidráulica durante las operaciones de drenaje vertical aumentará la tasa de infiltración. Se preveía una recarga "parcialmente gestionada", cuya disponibilidad del recurso estará condicionada por la precipitación y el vínculo entre las cuatro balsas interconectadas. La entrada del agua desde la boca del sondeo hasta el nivel freático se diseñó a tubería llena, con un llenado inicial de 175 m³, para evitar la colmatación gaseosa por efecto "cascading" y golpes de ariete. No cabía prever una acumulación de procesos colmatantes físicos, al ser agua de lluvia precipitada directamente en la balsa del campo, o circulante por el canal de Benagéber procedente de las tres balsas enlazadas. En definitiva, la gestión de la recarga se centró en introducir el máximo volumen de agua posible, minimizando la entrada de aire, y evitando sobrepresiones por caída libre del agua.

Antes de su funcionamiento para el drenaje vertical, el sondeo se tuvo que emplear al menos dos veces. La primera fue debido a una avería en el equipo de bombeo situado en la Balsa de San Marcelino. En aquella ocasión, las bombas estuvieron en funcionamiento toda la noche, antes de que el personal de la Comunidad de Regantes (CCRR) detectara la avería. El sondeo de infiltración permitió recargar los 1.000 l/s de su capacidad máxima de diseño, aliviando la balsa durante unas 10 h sin desbordarse. En septiembre de 2006 estuvo infiltrando un caudal de 676 l/s, procedente del funcionamiento de cuatro de las bombas de la Balsa San Marcelino. Se infiltró un volumen de agua de 7.300 m³ en tres horas de bombeo continuo, recargando el acuífero sin contrariedades. El control posterior quedó en manos de la CCRR.

REVISTA IDIAGUA 2025

Infraestructuras del Agua

Conclusiones

Como conclusiones, cabe destacar que el sondeo de la “Balsa del Campo” funciona correctamente, permitiendo desaguar un caudal instantáneo de 1.000 l/s en drenaje vertical, evitando inundaciones accidentales en los cultivos e infraestructuras de la zona, o al menos, reduciendo su impacto potencial.



Imagen 2. Sondeo “Balsa del Campo” para drenaje vertical, recarga gestionada y seguridad hídrica

El agua evacuada de la balsa, limpia y de buena calidad, se infiltra en una zona no saturada de un acuífero desarrollado en niveles de gran permeabilidad de la Formación Villar del Arzobispo, separado del Acuífero del Medio Turia por niveles de margas y arcillas impermeables, tal como se confirmó en los ensayos de bombeo y de infiltración realizados.



Imagen 3. Bocatoma del sondeo “Balsa del Campo”, que conecta la balsa de riego con el acuífero

El sistema de drenaje mediante sondeos de infiltración se ha revelado como muy fructífero y económico, abriendo el elenco de opciones para la gestión de las aguas de avenida: sistemas de drenaje vertical que incrementen las reservas en los acuíferos y la seguridad hídrica de la zona. Hasta la fecha no se han realizado nuevas actuaciones paralelas, a pesar del buen funcionamiento de este “ensayo experimental”.

Referencias

Incluidas en el blog personal del primer autor (†): <https://speedstar71.blogspot.com/2013/>

Esta comunicación técnica constituye un homenaje póstumo al geólogo, compañero y amigo de la oficina de Tragsa de Valencia, Josemari Montes, “padre” de este proyecto.

CONOCE LA PTEA



Socios PTEA 2025



Socios observadores PTEA 2025



JUNTA DIRECTIVA DE PTEA



Marián Serrano

Presidenta
(Global Omnium)



Félix Francés

Vicepresidente
(IIAMA- UPV)



Alicia Andreu

Secretaría General
(ITC)



Juan Luis Sobreira

Vocal
(ITG)



Raquel López

Vocal
(CARTIF)



Jordi Cros

Vocal
(ADASA)



Jorge García

Vocal
(AINIA)



Stephanie Aparicio

Secretaría Técnica
(Global Omnium)

PERSONAL DE PTEA



Paula Menéndez

Executive Manager
(PTEA)

pmenendez@ptea.es
+34 671 475 721



OBJETIVOS ESTRATÉGICOS Y PRINCIPALES ACTIVIDADES DE PTEA

1

Ganar capacidad de opinión en la elaboración de las políticas de I+D+i en los niveles autonómico, nacional y europeo

2

Difundir las estrategias de I+D+i internacionales y nacionales entre los socios

3

Actualizar la Agenda Estratégica de la PTEA (última versión 2024-2026)

4

Potenciar en las empresas la inversión en I+D+i externa (especialmente nacional y autonómica) e interna.

5

Mejorar las oportunidades de colaboración y de negocio entre los socios: empresas, centros tecnológicos y administración pública

6

Alianzas/ Colaboraciones con otras plataformas como Planetic, PESI, GIEC, Vet+i, SENTIATECH...

7

Participación y colaboración en congresos, ferias, jornadas... donde damos difusión de los avances y logros alcanzados en el ámbito del sector agua; y damos visibilidad a nuestros socios y sus logros (proyectos, iniciativas, etc.)

8

Apoyo a socios en proyectos (información, apoyo en la búsqueda de socios, cartas de apoyo, difusión a través de nuestros canales de difusión)

9

Potenciar la visibilidad de nuestros socios y mantenerles siempre informados

Boletín mensual
Boletín mensual Ayudas y Financiación
Medios de comunicación tradicionales
Revista IDiAgua
Web PTEA
RRSS

GRUPOS DE TRABAJO



ECONOMÍA CIRCULAR

GT1



ECOSISTEMAS Y BIODIVERSIDAD

GT2



AGUA PARA EL FUTURO

GT3



AGUA Y SALUD

GT4



INFRAESTRUCTURAS DEL AGUA

GT5



NEXO AGUA- ENERGÍA- ALIMENTACIÓN- ECOSISTEMAS

GT6



GOBERNANZA

GT7

HAZTE SOCIO



Solicita más información mandando un correo electrónico a pmenendez@ptea.es o secretariatecnica@ptea.es



Síguenos en LinkedIn www.linkedin.com/in/PTEA



www.ptea.es



+34 671 475 721. WhatsApp disponible.

