



PROYECTOS I+D+i AQLARA CICLO INTEGRAL DEL AGUA S.A.U





TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. OPTIMIZACIÓN DEL CONTROL DEL PROCESO DE LA EDAR ALMODÓVAR DEL CAMPO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS BIOLÓGICO AVANZADO Y MULTIVARIANTE	3
2.1. ANTECEDENTES.....	3
2.2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO	4
2.2.1. OBJETIVO GENERAL	4
2.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
2.3. METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO	5
2.3.1. EDAR ALMODÓVAR DEL CAMPO	5
2.3.2. METODOLOGÍAS POR OBJETIVOS	6
2.4. ALCANCES DEL PROYECTO	7
3. SISTEMA DE SOPORTE A LA DECISIÓN BASADO EN VISIÓN ARTIFICIAL E INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA DETECCIÓN DE VERTIDOS INDUSTRIALES EN LA EDAR DE ZUERA-SAN MATEO	9
3.1. ANTECEDENTES.....	9
3.2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO	9
3.2.1. OBJETIVOS GENERALES.....	9
3.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
3.3. METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO	9
3.3.1. EDAR ZUERA-SAN MATEO DE GÁLLEGO	10
3.3.2. ETAPAS DEL PROYECTO	10
3.4. RESULTADOS INICIALES Y ALCANCES DEL PROYECTO	12
4. CARACTERIZACIÓN DE LOS RETORNOS DE CENTRÍFUGAS DE LA EDAR CALAHORRA Y SIMULACIÓN WEST®. ESTUDIO PREVIO PARA LA IMPLANTACIÓN DE UN SISTEMA DE ELIMINACIÓN DE NITRÓGENO EN LOS RETORNOS DE CENTRÍFUGAS DE CALAHORRA.....	14
4.1. ANTECEDENTES.....	14
4.2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO	14
4.3. METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO	14
4.3.1. EDAR DE CALAHORRA	14
4.3.2. METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE CAUDALES.....	15
4.3.3. EQUIPOS Y MÉTODOS ANALÍTICOS.....	16
4.3.4. SIMULACIÓN MEDIANTE SOFTWARE WEST®.....	16
4.4. RESULTADOS.....	16
4.4.1. CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE CAUDALES.....	16
4.4.2. EVALUACIÓN DE POSIBLES TRATAMIENTOS.....	18
4.4.3. RESULTADOS SIMULACIÓN	19
4.5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	21



5. AQUA2VAL. DESARROLLO DE SOLUCIONES NOVEDOSAS QUE FOMENTEN LA ECONOMÍA CIRCULAR Y SOSTENIBLE EN LOS SECTORES INDUSTRIALES ESTRATÉGICOS VALENCIANOS CONSUMIDORES DE AGUA Y GENERADORES DE AGUAS RESIDUALES.22

5.1. ANTECEDENTES.....22

5.2. OBJETIVOS22

5.3. METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO23

6. I3WATERS26

1. INTRODUCCIÓN

Durante el presente año 2025, Aqlara Ciclo Integral del Agua se encuentra realizando lo siguientes proyectos de I+D+i, algunos de ellos iniciados en 2024.

El presente documento se ha dividido en:

- Proyectos iniciados:
 - Optimización del control de proceso de la EDAR Almodóvar del Campo mediante aplicación de herramientas de análisis biológico avanzado y multivariante
 - Sistema de soporte a la decisión basado en visión artificial e inteligencia artificial para la detección de vertidos industriales en la EDAR Zuera-San Mateo de Gállego
 - Caracterización de los retornos de centrífugas de la EDAR calahorra y simulación WEST®: Estudio previo para la implantación de un sistema de eliminación de nitrógeno en los retornos de centrífugas de calahorra.
- Proyectos pendientes de inicio:
 - Aqua2val.
 - I3WATERS

A continuación, se desarrolla cada uno de los proyectos.

2. OPTIMIZACIÓN DEL CONTROL DEL PROCESO DE LA EDAR ALMODÓVAR DEL CAMPO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS BIOLÓGICO AVANZADO Y MULTIVARIANTE

2.1. Antecedentes

Aqlara Ciclo Integral del Agua en colaboración con le empresa H2OCities con dilatada reputación y con personal investigador de alta cualificación con referencias de gran prestigio en el campo de I+D+i de la I+D+i en el sector de las aguas residuales, está desarrollando y ejecutando el proyecto “Optimización del control del proceso de la EDAR mediante la aplicación de herramientas de análisis biológico avanzado y multivariante”.

Este proyecto se plantea para un periodo inicial de 24 meses, momento a partir del cual se plantearán nuevas líneas de investigación de forma conjunta con el Ayuntamiento de Almodóvar. Aqlara Ciclo Integral del Agua dispone de personal propio en su Departamento de I+D+i que gestiona habitualmente ayudas públicas y subvenciones para la realización de proyectos de optimización energética, valorización de residuos, mejora de procesos, etc. todo ello con el objetivo de hacer una transición gradual hacia un modelo de economía circular.

El proceso de fangos activos es el sistema de tratamiento biológico más común en la depuración de las aguas residuales urbanas e industriales, siendo este un proceso biotecnológico creado por el hombre donde interaccionan multitud de variables biológicas, fisicoquímicas y operacionales, en condiciones extremas, para la eliminación de contaminantes. Como en cualquier otro sistema biológico, la biocenosis que se establece en los tanques de aireación de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) se caracteriza por una compleja estructura (componentes y factores) y una dinámica (en el tiempo y en el espacio).

El desarrollo y puesta a punto de técnicas moleculares, como la técnica de hibridación in situ con sondas 16S/23S rDNA marcadas con fluoróforos (FISH), ha permitido dar un paso importante en el conocimiento de la diversidad de bacterias presentes en los sistemas de depuración. Sin embargo, el reciente desarrollo de

técnicas de análisis biológico avanzado de secuenciación masiva, como el análisis metagenómico, están permitiendo investigar la compleja estructura de los sistemas biológicos de depuración, caracterizados por un importante número de organismos. Debido al elevado número de variables biológicas y al interés creciente en el campo de la ecología microbiana en los últimos años, se ha producido un gran avance en el desarrollo de nuevas técnicas estadísticas multivariantes.

Caracterizar los procesos biológicos, así como las eficiencias de las EDAR, es una tarea compleja debido a la elevada cantidad y diversidad de datos que se registran durante la explotación de las instalaciones; fisicoquímicos y microbiológicos, y que deben ser considerados. Incluso si todos estos datos fueran considerados, los responsables de planta aún tendrían dificultades para tomar decisiones, debido a las complejas interrelaciones que tienen lugar entre las distintas variables. Por lo tanto, existe la necesidad de desarrollar indicadores apropiados para describir mejor la calidad de las aguas residuales y evaluar la eficiencia de los sistemas de tratamiento. Por ello, las técnicas estadísticas multivariantes podrían usarse para obtener mejores resultados espaciales y relaciones temporales, proporcionando una excelente estrategia para entender y cuantificar mejor los procesos de tratamiento y calidad de las aguas residuales, al establecer las relaciones entre los diferentes tipos de variables.

En resumen, la mayoría de las instalaciones depuradoras registran cada vez más grandes conjuntos de datos durante su explotación, sin ser procesados estadísticamente, lo que origina una pérdida de información sobre su funcionamiento, optimización y capacidad de predicción. Además, los procesos biológicos no se encuentran en equilibrio, interaccionando multitud de variables biológicas, fisicoquímicas y operacionales para la eliminación de contaminantes, siendo por ello necesario un enfoque multivariante del sistema. Por otro lado, son pocos los estudios sobre calidad de las aguas residuales y eficiencia de las EDAR que han utilizado herramientas numéricas avanzadas de análisis multivariante y análisis biológico avanzado (metagenómico), siendo muy reducido el número de variables fisicoquímicas y operacionales utilizadas.

A partir de todo lo anteriormente expuesto, los resultados esperados del presente estudio de investigación supondrán un mayor conocimiento del proceso biológico de la EDAR, permitiendo optimizar su control para el cumplimiento de los límites de vertido y mejora en la reducción de costes de explotación.

2.2. Objetivos del estudio

En la actualidad, los principales retos en el sector del tratamiento de las aguas residuales implican la necesidad de avanzar en el control y optimización de los procesos, que permitan encontrar nuevas estrategias y/o nuevos sistemas de tratamiento para el ahorro de los costes de explotación y el cumplimiento de los objetivos de eficiencia energética y calidad en las EDAR. Las restricciones impuestas por la normativa en el vertido de ciertos contaminantes, cómo son el nitrógeno y el fósforo, obliga a las empresas del sector a realizar importantes cambios en el diseño de la planta. En este sentido, la política de ahorro de costes de energía en la eliminación de nutrientes obliga a los responsables de planta a adoptar diferentes estrategias durante la explotación. Esta nueva situación origina multitud de escenarios y un incremento significativo de nuevas variables y factores abióticos, cuya comprensión requiere un enfoque multivariante con el empleo de herramientas de análisis biológico avanzado y estadístico.

2.2.1. Objetivo general

El objetivo principal es la optimización de procesos, operación y explotación de la EDAR mediante el empleo de las técnicas estadísticas más avanzadas de ordenación multivariante para la exploración e interpretación EDAR de los datos biológicos y ambientales de la EDAR.

2.2.2. Objetivos específicos

Para el desarrollo del objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- OBJETIVO 1: Análisis bioestadístico y filogenético de las comunidades bacterianas identificadas mediante secuenciación masiva del DNA (análisis metagenómico), prestando especial atención en las comunidades de bacterias oxidantes de amonio (BOA), bacterias oxidantes de nitritos (BON), desnitrificantes, bacterias acumuladoras de fósforo (PAO), bacterias acumuladoras de glucógeno (GAO) y bacterias filamentosas.
- OBJETIVO 2: Análisis descriptivo y exploratorio de las variables biológicas y ambientales (de control de explotación de la EDAR) (rendimientos del proceso, operacionales, fisicoquímicas del afluente, efluente, licor mezcla y consumos de energía en el reactor biológico).
- OBJETIVO 3: Verificación del estado del proceso biológico, mediante identificación de organismos microeucariotas bioindicadores (protistas y metazoos) y bacterias filamentosas (mediante análisis convencional), análisis macroscópico de la V30 y microscópico del flóculo.
- OBJETIVO 4: Determinación de la biomasa activa mediante medida del ATP celular.
- OBJETIVO 5: Análisis de interpretación ambiental (análisis multivariante), relacionando: variables de control de planta (ambientales) con las comunidades de bacterias, variables de control de planta con rendimientos del proceso, comunidades de bacterias con rendimientos del proceso. Estudio del ciclo del nitrógeno y fósforo.

2.3. Metodología y plan de trabajo

Para el cumplimiento de los objetivos se llevará a cabo una campaña de muestreo del licor mezcla del reactor biológico durante 24 meses de la EDAR de Almodóvar del Campo, con una frecuencia mensual (24 muestras). Las muestras serán enviadas por la EDAR al laboratorio del Grupo de Química y Microbiología del Agua, en la Universidad Politécnica de Valencia. De esta investigación, se generará la transferencia de conocimiento y know-How necesaria, que permitirá fortalecer y continuar la línea de I+D+i de AQLARA, que será fundamental durante el período de la explotación de la EDAR de Almodóvar del Campo.

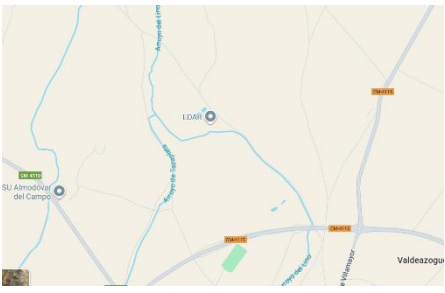
2.3.1. EDAR Almodóvar del Campo

La EDAR tiene un caudal de proyecto de 1.400 m³/d para una población de 3.733 habitantes equivalentes, la cual se compone de los siguientes sistemas de tratamiento:

- La línea de agua que consta de las siguientes fases/ elementos: Obra de llegada, tanque de tormentas, pretratamiento compacto, medición de caudal a tratamiento biológico, cámara anaerobia, reactor biológico, decantador secundario, obra de salida, cloración y medición de caudal.
- La línea de fangos consta de: Recirculación de fangos, Purga, espesador y deshidratación mecánica mediante tornillo, acondicionamiento químico de los lodos y tolva.



En las siguiente Tabla se indican los parámetros de diseño de la EDAR puesta en marcha en 2023.

Parámetro	PARÁMETROS DE DISEÑO		Ubicación
	Ud	Valor	
Población (Hab. Equivalentes)	h-eq	3.733	 
Caudal Medio Diario	m ³ /d	1.400,00	
Caudal Medio Diario	m ³ /h	58,33	
Caudal Punta biológico (Qpb)	m ³ /h	140,00	
Factor punta	s.u	2,4	
Caudal Máximo (pretratamiento)	m ³ /h	291,67	
Factor punta	s.u	5,0	
Caudal Máximo a EDAR	m ³ /h	542,16	
Factor punta	s.u	9,29	
DBO ₅ Agua Bruta	mg/L	160	
Carga contaminante DBO ₅	Kg/día	224	
DQO Agua Bruta	mg/L	368	
Carga contaminante DQO	Kg/día	515,20	
S.S Agua Bruta	mg/L	123,0	
Carga contaminante SS	Kg/día	172,20	
NTK	mg/L	44,20	
Carga contaminante NTK	Kg/día	61,88	
Fósforo	mg/L	6,70	
Carga contaminante P	Kg/día	9,38	
DBO ₅ Agua Tratada	mg/L	<25	
DQO Agua Tratada	mg/L	<125	
SS Agua Tratada	mg/L	<35	
P _T	mg/L	<2	
NTK	mg/L	<15	
Sequedad Fango tratado	% en peso MS	22	
Estabilidad Fango tratado	% reducción peso SV	40	

A continuación, se definen las principales tareas para cada uno de los objetivos propuestos.

2.3.2. Metodologías por objetivos

A continuación, se indican las tareas a desarrollar por cada uno de los objetivos específicos planteados:

- **Objetivo 1:** Se realizará la extracción del DNA para su posterior secuenciación masiva (análisis metagenómico). Se llevará a cabo un análisis bioinformático, utilizando diferentes bases de datos especializadas. Se obtendrán los índices de diversidad de las bases de datos obtenidas mediante secuenciación masiva. Diversidad alfa: número de ASVs detectadas, índice de Shannon e índice de diversidad filogenética (Faith_PD). Diversidad beta: Unifrac (weighted y unweighted) y Bray-Curtis. Además, se realizará un estudio filogenético a partir de los diferentes niveles taxonómicos.
- **Objetivo 2:** Se prepararán las matrices madre de las bases de datos biológicos y ambientales (variables de control de planta), organizando todas las variables en tablas Excel, categorizadas y calculando todas las variables operacionales. La tabla de variables de planta se facilitará al responsable del proceso al inicio del estudio, para que la cumplimente con los datos recogidos durante el periodo de estudio. Se factorizarán las unidades experimentales (muestras) aplicando factores abióticos, como el temporal (estaciones, mes, día de la semana, año), etc. Para las variables biológicas, se aplicarán indicadores de taxonomía, agrupando los microorganismos, mientras que, para las variables ambientales, se utilizarán agrupaciones según el tipo de variable. Se realizarán análisis para la detección de anómalos.

Por otro lado, se estudiarán las mejores transformaciones de los datos biológicos. Además, se normalizarán y estandarizarán los datos ambientales. A continuación, se construirán las matrices distancia de ambas bases de datos, previa exploración. Por último, se realizará un análisis descriptivo y exploratorio multivariante temporal de los datos biológicos y ambientales, a partir de técnicas como el NMDS, clúster, SIMPER, PERMANOVA, ANOSIM, SIMPROF, PCA, PCoA, etc., con el paquete estadístico PRIMER v7+PERMANOVA.

- **Objetivo 3:** Para el control de la marcha del proceso se realizará una verificación de su estado biológico, mediante el análisis macroscópico del fango (V5, V30, turbidez, flóculos en suspensión, capa ccrea, aspecto algodonoso, etc.) y microscópico del flóculo (tamaño, estructura, puentes interfoculares, etc.). Además, se complementará con la valoración de los microorganismos bioindicadores (protistas y metazoos) del proceso, junto con la identificación de bacterias filamentosas, para el control de los episodios de bulking y foaming. Ambas comunidades serán identificadas mediante técnicas convencionales de microscopía de contraste de fases, empleando además las técnicas de tinción diferenciales para bacterias filamentosas.
- **Objetivo 4:** Para el estudio de la actividad de la biomasa en el fango activo, se determinará el ATP intracelular (ATP contenido en los microorganismos vivos), el ATP extracelular (ATP libre o combinado procedente de microorganismos lisados), el ATP total, así como suma del ATP intracelular y extracelular. Además, se calculará el índice de estrés de la biomasa, que representa el nivel de estrés al que está sometida esta, así como la estimación de los sólidos suspendidos volátiles activos, para el cálculo de la carga másica, y la determinación de la relación de la biomasa activa en los SSLM, para estimar el grado de autooxidación del sistema (respiración endógena).
- **Objetivo 5:** Para el cumplimiento de la comprensión del proceso biológico, mediante análisis multivariante de interpretación ambiental, se utilizarán herramientas numéricas avanzadas, como LINKTREE, CAP, RELATE, BioEnv, DISTLM, dbRDA, CCA, CA, RDA, etc. Previamente, se realizará un pretratamiento de las matrices, como estandarización y normalización, y posteriormente se construirán modelos de predicción de los rendimientos del proceso y dinámica de las poblaciones (especialmente del ciclo del nitrógeno y fósforo), a partir de las variables predictoras (variables de control del proceso).

2.4. Alcances del proyecto

Los resultados derivados del proyecto tendrán un impacto científico y técnico (práctico) en la explotación de la EDAR. A continuación, se detallan las principales líneas de alcance:

- El empleo del análisis biológico avanzado (análisis metagenómico) permitirá el conocimiento de la diversidad de bacterias oxidantes de amonio, bacterias oxidantes de nitrito, bacterias acumuladoras de fósforo y bacterias acumuladoras de glucógeno. Además, permitirá la detección temprana de bacterias filamentosas formadoras de espumas y con capacidad de abultar el fango.
- El análisis exploratorio de las variables biológicas va a permitir una mejor comprensión de la dinámica de los procesos biológicos que tienen lugar en la EDAR. Se determinará si el factor tiempo y estacional influyen en dicha dinámica. El análisis exploratorio de las variables de control del proceso (ambientales: rendimientos del proceso, variables operacionales y fisicoquímicas) permitirá el conocimiento de sus fluctuaciones temporales y estacionales. Al finalizar el estudio, el responsable de la instalación dispondrá de una adecuada matriz de gestión de los datos de planta, de forma que le proporcionará herramientas para su control rutinario.
- La verificación del estado del proceso biológico, mediante el análisis macroscópico y microscópico convencional, proporcionará herramientas rápidas para la monitorización de la EDAR, evaluando la estabilidad del sistema, y así para prevenir problemas de explotación.

- La determinación de la biomasa activa mediante ATP permitirá conocer el grado de actividad de la biomasa y detectar la entrada de tóxicos en el reactor. Además, proporcionará un mayor ajuste de los SSLM, a partir del cálculo de la concentración de sólidos en suspensión volátiles activos, reduciendo los consumos de oxígeno para procesos endógenos, lo que podrá repercutir en una disminución del consumo energético de los sistemas de aireación.
- Los diferentes cruces de variables (operacionales, fisicoquímicas, biológicas y rendimientos del proceso), mediante el uso de técnicas multivariante de interpretación ambiental, proporcionará un conocimiento detallado útil para la explotación de la EDAR. La construcción de modelos estadísticos de predicción permitirá determinar las mejores variables de control, y sus valores, para una adecuada monitorización y optimización de los procesos biológicos de eliminación de nutrientes, con objetivos de ahorro energético. Además, la identificación de aquellas variables fisicoquímicas que no aporten información o sean redundantes, contribuirá a la reducción de costes de material y tiempo en el laboratorio.
- De esta investigación, se generará la transferencia de conocimiento y Know How, que permitirá fortalecer y continuar la línea de I+D+i de Aqlara Ciclo Integral del Agua, que será fundamental durante el período de la explotación de la EDAR de Almodóvar del Campo.

3. SISTEMA DE SOPORTE A LA DECISIÓN BASADO EN VISIÓN ARTIFICIAL E INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA DETECCIÓN DE VERTIDOS INDUSTRIALES EN LA EDAR DE ZUERA-SAN MATEO

3.1. Antecedentes

El problema de la detección de vertidos industriales en las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) es un desafío ambiental y social que requiere de soluciones innovadoras y eficientes.

La posibilidad de detectar la presencia de determinados vertidos y anticiparse a la entrada de la planta para realizar una acción preventiva y/o correctiva, para asegurar el óptimo tratamiento y que no interfiera en el adecuado funcionamiento de la EDAR se vuelve en una necesidad fundamental para la eficiencia ambiental-económica de la EDAR.

Aqlara Ciclo Integral del Agua, en colaboración con AQUACORP está ejecutando dicho proyecto en la EDAR de Zuera-San Mateo de Gállego. En la actualidad, se ha finalizado la etapa de calibración de la tecnología de AQUACORP en el punto de monitorización seleccionado para los parámetros fisicoquímicos de interés.

3.2. Objetivos del estudio

3.2.1. Objetivos generales

El objetivo de este proyecto es desarrollar e implementar un sistema de soporte a la decisión (SSD) basado en visión artificial (VA) e inteligencia artificial (IA) integrado con sondas multiparamétricas para la detección de vertidos industriales en la EDAR.

3.2.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Seleccionar, instalar y configurar el dispositivo de VA e IA capaz de capturar, procesar y analizar imágenes de la EDAR y detectar la presencia de vertidos industriales
- Diseñar e implementar una base de datos que almacene la información proveniente de las sondas multiparamétricas y del dispositivo de VA e IA.
- Seleccionar e instalar sondas multiparamétricas que sean capaces de medir los parámetros físico-químicos del influente de la EDAR y enviar los datos a una base de datos para el SSD.
- Integrar el dispositivo de VA e IA con las sondas multiparamétricas y la base de datos para el SSD, de forma que se pueda obtener una información completa y precisa sobre el estado del agua y la presencia de vertidos industriales.
- Validar y evaluar el funcionamiento y la eficacia del SSD mediante pruebas experimentales en condiciones reales y simuladas.
- Elaborar un informe técnico con los resultados y una publicación científica con las conclusiones del proyecto.

3.3. Metodología y plan de trabajo

La metodología de este proyecto se basa en el enfoque de investigación-acción, que consiste en un proceso cíclico de planificación, acción, observación y reflexión, que permite la mejora continua y la solución de problemas.

El proyecto se divide en seis fases: fase previa, diseño, desarrollo, integración, validación y evaluación. A continuación, se describe la EDAR donde se ejecuta el proyecto y las diferentes etapas que consta el proyecto.

3.3.1. EDAR Zuera-San Mateo de Gállego

La EDAR de Zuera tiene la peculiaridad de recibir las aguas procedentes del colector del polígono industrial. Desde enero de 2021 se realizó la conexión progresiva al colector modificando las características del agua afluyente de la EDAR en determinadas épocas del año, además de los vertidos puntuales a la EDAR desde las diferentes industrias pero continuados que provocan “choques químicos” que pueden condicionar el normal desarrollo del “pool” bacteriano que desempeña los procesos de eliminación de materia orgánica, nitrificación y desnitrificación, viéndose más afectados aquellos



microorganismos cuyo crecimiento es más sensible a dichos vertidos. De estos vertidos, el 90% proceden del matadero ubicado en el polígono industrial. Desde la conexión en 2021 del colector procedente del polígono industrial cuenta con un caudal industrial de aproximadamente el 50% del caudal afluyente a la EDAR, teniendo episodios en los que se recibe un elevado porcentaje de vertidos industriales.

3.3.2. Etapas del proyecto

3.3.2.1. Fase previa

Determinar los puntos de observación óptica que aseguren la viabilidad técnica del proyecto. Además, se realizará la evaluación de los históricos diarios, horarios en cuanto a calidad y cantidad, con objeto de observar la variabilidad histórica. En la actualidad, en la evaluación previa se identifican entre 4 y 5 tipologías de vertido (sangre, fango tipo 1, sustancia blanquecina, fango tipo 2, espumas).

3.3.2.2. Diseño

En esta fase se diseña el dispositivo de VA e IA que será capaz de capturar, procesar y analizar imágenes del influente de la EDAR y detectar la presencia de vertidos industriales. Para ello, se definen los requisitos funcionales y no funcionales del dispositivo, se seleccionan los componentes hardware y software necesarios, se eligen los algoritmos y técnicas de VA e IA más adecuados y se establecen los criterios de detección de vertidos industriales. Se elabora un diagrama de flujo que representa el funcionamiento del dispositivo y se realiza un prototipado rápido para comprobar su viabilidad.

3.3.2.3. Desarrollo

En esta fase se desarrolla el dispositivo de VA e IA siguiendo el diseño previo. Para ello, se adquieren y ensamblan los componentes hardware, se instalan y configuran los programas y librerías software, se implementan y ajustan los algoritmos y técnicas de VA e IA y se programan las funciones y los interfaces del dispositivo. Se realiza un testeo unitario y de integración para verificar el correcto funcionamiento del dispositivo y se corrigen los posibles errores o fallos detectados.

La tecnología consiste en el empleo de una cámara multispectral inteligente (Figura 1), empleando imágenes capturadas por una cámara externa colocada a 2-10 metros del agua.

Figura 1. Cámara multiespectral inteligente. (Imagen cedida por AQUACORP)



Esta etapa implica seguimiento, supervisión y verificación por parte de Aqlara Ciclo Integral del Agua para asegurar una óptima fase de calibración que asegure los resultados posteriores en validación y funcionamiento.

3.3.2.4. Integración

En esta fase se integra el dispositivo de VA e IA con las sondas existentes y la base de datos para el SSD. Para ello, se seleccionan e instalan las sondas que sean capaces de medir los parámetros físico-químicos del influente de la EDAR, se conectan las sondas al sistema de adquisición y transmisión de datos, se crea y configura la base de datos para el SSD, se establece la comunicación entre el dispositivo de VA e IA, las sondas y la base de datos y se sincroniza la información obtenida. Se realiza un testeo de sistema para comprobar la correcta integración de los elementos y se solucionan los posibles problemas o incompatibilidades encontrados.

Durante esta fase se realiza una calibración a baja, media y alta carga con objeto de asegurar que la calibración abarca todo el rango de comportamiento siendo representativa del funcionamiento de la EDAR. Esta fase se podrá realizar de forma continua o discontinua para asegurar que la calibración abarca toda la horquilla de funcionamiento de la EDAR. Además, se realizarán reuniones semanales para verificar los resultados intermedios obtenidos.

La calibración se realiza de forma individual según el punto de control y las variables de interés. Se realiza de forma semicuantitativa, en función de los distintos niveles definidos y la experiencia previa de Aqlara Ciclo Integral del Agua como operador de la instalación. Utilizando como medida de referencia las obtenidas a través de mecanismos tradicionales, como el análisis de laboratorio o equipos de sensórica con contacto.

3.3.2.5. Validación

En esta fase se valida el funcionamiento y la eficacia del SSD mediante pruebas experimentales en condiciones reales y simuladas. Esta etapa consta de prevalidación con reuniones periódicas y la validación. Para ello, se instala el SSD en el influente de la EDAR y se somete a diferentes escenarios de vertidos industriales, tanto reales como simulados, que representen la variedad y la complejidad de los casos posibles. Se registra la información proporcionada por el SSD, como las imágenes, los parámetros físico-químicos, la detección de vertidos industriales, la confiabilidad, la precisión y el tiempo de respuesta del SSD. Se comparan los resultados obtenidos con los resultados esperados y se calculan los indicadores de rendimiento del SSD, como la sensibilidad, la especificidad, la exactitud o el error. Se contrastan los resultados con los obtenidos por otros sistemas de detección de vertidos industriales y se determina el grado de cumplimiento de los objetivos del proyecto.

3.3.2.6. Evaluación

En esta fase se evalúa el impacto y la sostenibilidad del SSD mediante el análisis de los beneficios y los costes que implica su implementación y uso. Para ello, se estiman los beneficios ambientales, sociales, económicos y legales que se derivan de la mejora de la calidad del agua depurada, la reducción de los costes operativos, la optimización del proceso de depuración y la prevención de sanciones por incumplimiento de la normativa. Se calculan los costes materiales, técnicos, humanos y financieros que supone el desarrollo, la instalación, el mantenimiento y la actualización del SSD. Se realiza un análisis coste-beneficio que permita valorar la rentabilidad y la viabilidad del SSD. Se identifican los riesgos y las limitaciones que pueden afectar al funcionamiento y la eficacia del SSD y se proponen medidas de mitigación o solución.

3.4. Resultados iniciales y alcances del proyecto

El impacto esperado es mejorar la calidad del agua depurada, reducir los costes operativos y optimizar el proceso de depuración. Los métodos o técnicas que se utilizarán son el análisis de imágenes mediante algoritmos de VA e IA, la medición de parámetros físico-químicos mediante sondas multiparamétricas y/o análisis en el laboratorio de la EDAR y la integración de los datos en una base de datos para el SSD. Los productos esperados son un prototipo funcional del SSD, un informe técnico con los resultados y una publicación científica con las conclusiones.

Durante los pasados 18 meses Aqlara Ciclo Integral del Agua y Aquacorp han estado colaborando en un proyecto piloto para el control de vertidos a través de imágenes externas del agua.

Aquacorp ha desarrollado una solución de alerta temprana que permite el control continuo de la calidad del agua de forma NO INTRUSIVA, a través de datos ópticos e imágenes exteriores del agua, sin ser necesario el contacto directo con ella. Esta solución permite estimar de forma remota y en tiempo real variables físico químicas y biológicas del agua que permiten cuantificar su nivel de calidad.



Aqlara Ciclo Integral del Agua ha estado utilizando esta tecnología durante los últimos 6 meses en la entrada de la EDAR de Zuera para la detección y cualificación de vertidos provenientes un polígono industrial.

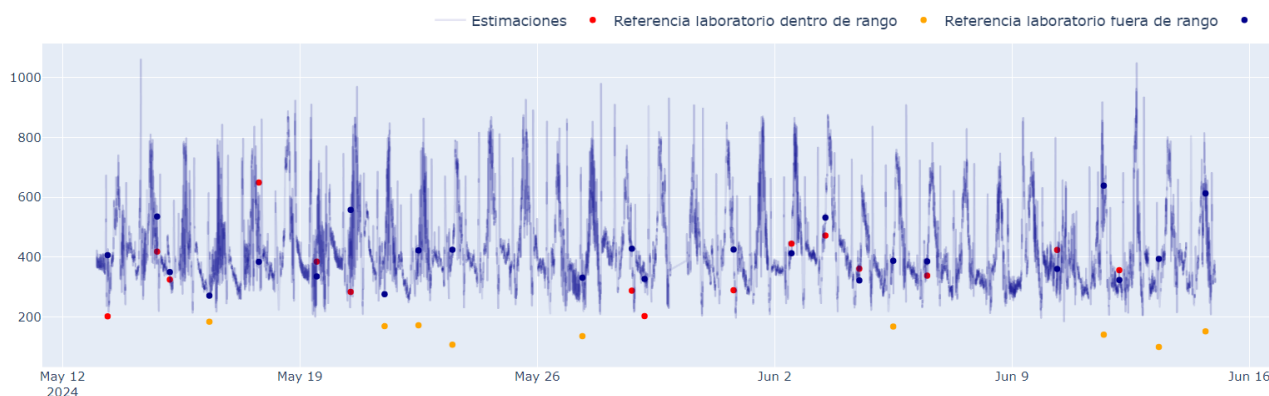
Los resultados han sido satisfactorios con niveles de acierto por encima del 90% durante los últimos 3 meses.

Tabla 1. Período de 1 de abril a 15 de julio de 2025 (106 días, 5.000 estimaciones cada 30 min)

Resultados	% precisión	% exhaustividad
Media	99	99
Afluente en condiciones normales	100	99
Vertido	77	87

Adicionalmente a la detección de vertidos, esta tecnología se ha calibrado para la cualificación y estimación de las siguientes variables físico químicas del agua de entrada: Sólidos en Suspensión, Demanda Química de Oxígeno, Conductividad, Nitrógeno y Fosforo.

En particular, para la variable **DQO**, la **desviación media** obtenida durante un periodo de más de un mes, comparando las estimaciones de la tecnología de AQUACORP con más de 20 muestras analizadas en laboratorio, es **inferior al 20%**.



Con la aplicación combinada de la tecnología de visión artificial e inteligencia artificial, se pretende:

- Obtener resultados de alta precisión y fiabilidad en la detección de vertidos
- Monitorización continua de forma no intrusiva y en tiempo real de variables que permiten cuantificar la calidad del agua
- Rápida respuesta ante la presencia de vertidos,
- Ofrecer ventajas como el bajo coste, la fácil instalación, el mínimo mantenimiento,
- Integrar con otros sistemas de control y gestión de la EDAR para optimizar la toma de decisiones para el óptimo desempeño de la EDAR.

4. CARACTERIZACIÓN DE LOS RETORNOS DE CENTRÍFUGAS DE LA EDAR CALAHORRA Y SIMULACIÓN WEST®. ESTUDIO PREVIO PARA LA IMPLANTACIÓN DE UN SISTEMA DE ELIMINACIÓN DE NITRÓGENO EN LOS RETORNOS DE CENTRÍFUGAS DE CALAHORRA.

4.1. Antecedentes

La Digestión anaerobia de los lodos de EDAR es un método eficaz de generación de energía renovable, pero la eliminación de nutrientes (N, P) en este proceso es muy limitada. Como resultado, los retornos líquidos derivados del proceso de digestión anaerobia contienen concentraciones muy elevadas de nitrógeno amoniacal (N-NH_4) y también de ortofosfatos (PO_4). Todo ello implica mayores consumos energéticos en la línea de agua para eliminar los nutrientes de forma convencional, pudiendo incluso poner en riesgo el cumplimiento de los requisitos de vertido para N y P a cauces públicos.

El problema de las corrientes con elevado contenido en nitrógeno de los retornos de las centrífugas en las instalaciones de depuración es un desafío que requiere de soluciones innovadoras y eficientes. Esto implica mayores consumos energéticos para eliminar los nutrientes, pudiendo, incluso, no conseguir el cumplimiento de los límites de vertido a los cauces públicos.

La posibilidad de reducir dichas concentraciones antes de que retornen al proceso de tratamiento biológico de la EDAR permitiría optimizar el tratamiento y que no interfiera en el adecuado funcionamiento del sistema de depuración, así como mejorar la eficiencia ambiental-económica de la misma. Además del ahorro energético, la nueva legislación europea de saneamiento propone reducir los límites permitidos en el vertido, por lo que la aplicación tecnologías será imprescindible para garantizar los nuevos límites.

4.2. Objetivos del estudio

El objetivo del presente proyecto consiste:

- Caracterización de las aguas de retorno de las centrífugas de la EDAR Calahorra y en la valoración de los sistemas a implementar, en un futuro, para la eliminación de nitrógeno mediante un proceso biológico en los retornos de centrífugas de la EDAR de Calahorra
- Simular la tecnología más adecuada con objeto de definir las principales variables de control para su óptimo funcionamiento.

4.3. Metodología y plan de trabajo

4.3.1. EDAR de Calahorra

La EDAR de Calahorra se encuentra ubicada en la margen izquierda del río Cidacos. La instalación recibe las aguas residuales de Calahorra y las de las poblaciones de la cuenca baja del Cidacos, Arnedo, Quel y Autol. Está dimensionada para tratar el vertido de una población equivalente de 143.000 habitantes y las aguas residuales se conducen a la EDAR mediante un colector que discurre paralelamente al río Cidacos desde Arnedo. La Figura (Fuente: Consorcio de Aguas y Residuos La Rioja) muestra el esquema de planta de la EDAR Calahorra.



La planta dispone de dos tanques de tormentas para recoger las puntas de caudal de lluvia no admisibles por el pretratamiento y/o el tratamiento biológico de forma que una parte –la más contaminada- pueda ser tratada tras el episodio de lluvia y el resto –con baja contaminación- sea vertido previo tamizado para retirada de sólidos.

Los fangos obtenidos en el tratamiento, tanto los primarios como los secundarios, tienen un contenido elevado en materia orgánica, por lo que es necesario someterlos a un tratamiento de estabilización, que en esta instalación se consigue mediante digestión anaerobia, para evitar que puedan generar problemas al retirarlos de la planta. Los fangos una vez deshidratados se transportados a parcelas donde se utilizan como enmienda orgánica para la agricultura o se llevarán a la planta de compostaje donde el fango obtendrá un nivel mayor de estabilización.

Se ha observado que los retornos líquidos derivados del proceso de digestión contienen concentraciones muy elevadas de Nitrógeno amoniacal y Ortofosfatos, lo que implica mayores consumos energéticos en la línea de agua para conseguir eliminar estos nutrientes mediante métodos tradicionales.

4.3.2. Metodología de caracterización y evaluación de caudales

Durante el período comprendido entre enero-febrero de 2025 se realiza un análisis 3 días por semana de la calidad del agua de retorno de la deshidratación.

Se realizan muestras integradas, 3 días por semana, para un total de 24 muestras analizadas en el laboratorio de la EDAR. Adicionalmente, durante 3 días, se analizan los retornos cada 2-3 horas, tomando muestras puntuales, para poder hacer una caracterización de los retornos puntual y en función del momento de trabajo de las centrifugas. La selección de estos 3 días se realiza previo al inicio del proyecto, con objeto de que haya una distribución homogénea entre los períodos en los que se realizan estos muestreos puntuales. En la Tabla 2 se indica la frecuencia y tipología de toma muestra.

Tabla 2. Frecuencia y tipología de toma de muestra

Muestra a analizar	Frecuencia	Parámetros	Duración	Tipo de muestreo	Nº muestras/d	Tipo análisis	Nº muestreos
Escorrido centrifugas	3 d/sem	pH, Tª, DQOT, DQOS, DBO ₅ , SS, NT, PT, N-NH ₄ ⁺ , N-NO ₃ ⁻ , P-PO ₄ ³⁻ , Alcalinidad, CT, COT, TIC.	8 sem	Integrado	1	Laboratorio Interno	24
	Cada 2-3 h (mientras se deshidrate)	pH, Tª, DQOT, DQOS, DBO ₅ , SS, NT, PT, N-NH ₄ ⁺ , N-NO ₃ ⁻ , P-PO ₄ ³⁻ , Alcalinidad, CT, COT, TIC.	3 días	Puntual	5	Laboratorio Interno	15

La medición del caudal de escurrido se realizó por dos metodologías, medición directa y por estimación:

- *Aforo in-situ en el punto de descarga del escurrido* mediante probeta y cronómetro. En la Figura se muestra el punto donde se realiza el aforo in-situ..
- *Estimación a partir del caudal de entrada a la centrifuga*, teniendo en cuenta las dificultades de acceso y el elevado caudal de descarga. Posteriormente se valida con las medidas puntuales de aforo in-situ que se hayn realizado. Para la estimación del caudal se emplearon datos bibliográficos, estimando un porcentaje del 87 % respecto del caudal de entrada a la centrifuga operativa.



La comparación de ambos valores muestra que la estimación propuesta se ajusta a los valores experimentales.

4.3.3. Equipos y métodos analíticos

La caracterización del retorno consiste en los parámetros: pH, T^a , DQO_T , DQO_5 , DBO_5 , SS, NT, PT, $N-NH_4^+$, $N-NO_3^-$, $P-PO_4^{3-}$, Alcalinidad, CT, COT, TIC. La Tabla 3 muestra los equipos empleados para la monitorización y reactivos (test) para la realización de las analíticas, ubicados todos ellos en el laboratorio de la EDAR Calahorra.

Tabla 3. Equipos de laboratorio empleados y reactivos

Equipos	Marca	Modelo	Test analíticos	Marca	Modelo
Equipos					
Agitador magnético	STUART	STIR SB161	Pipeta automática	HACH	0,2-1ML (BBP078)
Ph-metro portátil	METTLER	FIVE GO	Pipeta automática	EASY 40+	0,5-5ML
Termómetro digital	LABBOX	TP3001	Estufa	MEMMERT	BASIC UNB 200
Balanza analítica	KERN	ALS 250-4A	Termoreactor	HACH	LT 200
Bomba de vacío	DINKO	D95	Espectrofotómetro	HACH	DR3900
Cámara frigorífica	DIXELL	XR20 (COMERSA)	Checker alcalinidad	HANNA	HI772
Campana extractora	NEDERMAN	FX ARM 100-1200	Tomamuestras portátil	HACH	AS950
Pipeta automática	HACH	1-5ML (PH50656)	Pipeta automática	HACH	0,2-1ML (BBP078)
Test analíticos					
DQO	HACH	514/1414/314/014	Fósforo/Fosfatos	HACH	348/349/350
Nitrógeno	HACH	338/238/138	Alcalinidad	HANNA	HI775-26
Nitrato	HACH	339/340	Carbono Total (CT)	HACH	LCK380
Amonio	HACH	303/304/305			

4.3.4. Simulación mediante software WEST®

El empleo de la **modelización matemática** para el diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales, así como para la ampliación, optimización, operación y control de las ya existentes, ha dado excelentes resultados en los últimos años. La mayoría de los **modelos matemáticos** utilizados en el campo del tratamiento de aguas residuales son del tipo **semiempírico (grey-box)**, los cuales incorporan tanto aspectos fenomenológicos, como empíricos, pero con un alto grado de complejidad que los acerca a los primeros.

Debido a la complejidad de todos estos modelos, se hace necesaria la implementación en programas informáticos para resolver los balances de materia planteados. En la actualidad, existen diversos programas comerciales que tienen incorporado alguno o varios de los modelos anteriormente citados (GPS-X, EFOR, BioWin, Simba, WEST, DESASS...).

El software escogido para simular es WEST® (**Word wide Engine for Simulation, Training and Automation**) desarrollado por la empresa HEMMIS N.V. de Kortrijk (Bélgica). Se trata de un herramienta avanzada y fácil de usar para el modelado dinámico y la simulación de plantas de tratamiento de aguas residuales (EDAR) y otros sistemas relacionados con la calidad del agua.

4.4. Resultados

4.4.1. Caracterización y evaluación de caudales

En la Tabla 4 se muestran los valores promedio y desviación típica para cada uno de los parámetros para el período que duró la experimentación, así como valores bibliográficos.

Tabla 4. Valores promedio y desviación típica de parámetros analizados durante fase de experimentación

Parámetro	Ud	Promedio + desv.típica	Valores bibliográficos
pH	Ud pH	8,33 ± 0.07	7-9
Temperatura	°C	26,0 ± 0.2	-
DQO _T	mg/L	891 ± 441	2.000-4.000
DQO ₅	mg/L	348 ± 51	1.500-3.000
DBO ₅	mg/L	501 ± 236	800-1.500
SS	mg/L	618 ± 307	500-1.000
NT	mg/L	991 ± 407	500-1.200
PT	mg/L	90,3 ± 35,2	50-100
N-NH ₄ ⁺	mg/L	818 ± 323	300-800
N-NO ₃ ⁻	mg/L	2,36 ± 1,23	1-10
P-PO ₄ ³⁺	mg/L	85,7 ± 33,5	20-60
Alcalinidad	mg/L	3.752 ± 43	2.000-5.000
CT	mg/L	767 ± 352	1.000-2.000
COT	mg/L	67,0 ± 33,4	800-1.500
TIC	mg/L	701 ± 322	700-1.500
Q a centrífuga ⁽¹⁾	m ³ /h	11,4 ± 0,1	-
Q estimado escurrido ⁽²⁾	m ³ /h	9,92 ± 0,09	-

⁽¹⁾Determinado a partir de caudalímetro

⁽²⁾Determinación según apartado |Error! No se encuentra el origen de la referencia.. |Error! No se encuentra el origen de la referencia.

Del análisis de los datos mostrados se puede observar una elevada variabilidad en los parámetros. Del análisis de la Tabla 4, se observa una elevada oscilación de determinados parámetros como se puede apreciar en la gran variación de la desviación típica. Estas oscilaciones pueden venir dadas por la forma de operar el digestor anaerobio e, incluso, por variaciones en la toma de muestra. En líneas generales, los valores obtenidos se encuentran dentro de los rangos bibliográficos consultados. Si bien, destacan los valores inferiores para la materia orgánica (DQO_T, DQO, DBO₅ y COT), además de valores superiores para el amonio y el fosfato. En principio, estas desviaciones respecto a los valores bibliográficos se deben, principalmente, a las características del fango purgado de los reactores biológicos y a la forma de explotación del digestor anaerobio.

La elevada alcalinidad del escurrido está asociada valores elevados de pH que pueden dificultar los procesos biológicos a proponer, tal y como se explica en el siguiente apartado. Respecto a la especiación del nitrógeno, la práctica totalidad del nitrógeno total (aproximadamente el 83%) está asociada al amonio, ya que el fango deshidratado procede de una digestión anaerobia. Algo similar sucede con el fósforo total, donde, aproximadamente el 95%, se presenta en forma de ortofosfato (P-PO₄³⁻). Además, tal y como se observa en la Tabla 4, los valores de amonio y ortofosfato se encuentran por encima del límite superior de los valores bibliográficos, lo que puede estar relacionado con los parámetros de control y funcionamiento del digestor anaerobio: incrementos de carga orgánica de entrada, cambios en los tiempos de retención hidráulico inferiores, temperatura fuera del rango óptimo, pH, relación C/N y/o agitación.

En cuanto a la comparación de la materia orgánica (DQO total y soluble, DBO₅, COT) se observa una fuerte correlación entre ellas, en menor grado con los SS. Además, tal y como se observa en la Tabla 4, los valores de DQO_T, DQO, DBO₅ y COT, se encuentran por debajo del límite inferior de los valores bibliográficos, lo que refuerza la hipótesis de su relación con los parámetros de control y funcionamiento del digestor anaerobio.

La evaluación de las distintas formas de Carbono (Total, orgánico e inorgánico) se realiza con objeto de determinar las necesidades de fuentes externas de carbono. Se observa que el 91% del carbono total se debe a carbono inorgánico. Los sistemas de tratamiento propuestos pueden funcionar eficazmente con bajas concentraciones de carbono orgánico total y elevadas concentraciones de carbono inorgánico.

De la comparación del resultado analítico de las muestras puntuales de los días 21 de enero, 4 de febrero y 21 de febrero, en los que se realiza el seguimiento físico-químico cada tres horas, se observa que los resultados de las muestras de los días 21 de enero son significativamente superiores a los del 4 de febrero y 21 de febrero que presentan resultados similares. En los muestreos puntuales de los tres días, se observa, en líneas generales, que las últimas mediciones del escurrido suelen presentar mayores concentraciones de los parámetros.

4.4.2. Evaluación de posibles tratamientos

Teniendo en cuenta los resultados de los parámetros analizados y las propuestas de alternativas de tratamiento de estudio para el escurrido de la centrífuga, se hace una evaluación preliminar de las ventajas y desventajas de las alternativas de tratamiento a estudiar (ANAMMOX®, ANITA™MOX y SHARON).

En la Tabla 5 se pueden ver esta evaluación preliminar, en la que además se ha añadido el tratamiento convencional de nitrificación-desnitrificación por su mayor facilidad de explotación, basado en su amplia instauración y conocimiento.

Tabla 5. Comparativa de alternativas de tratamiento

Método	Ventajas	Desventajas
ANAMMOX®	- Alta eficiencia eliminación nitrógeno (>80%) - Menor consumo de energía (ausencia de necesidades de aireación) - No requiere fuente externa de carbón - Menor producción de lodo, reduciendo costes de manejo y producción	- Larga puesta en marcha por lento crecimiento de bacterias ANAMMOX - Sensible a choques de carga y efectos inhibidores
ANITA™MOX	- Alta eficiencia eliminación nitrógeno amoniacal - Menor producción de lodo, similar a ANAMMOX® - Menores emisiones de CO₂ (menor huella de carbono)	- Control complejo de variables operacionales, requiere sistemas de monitoreo avanzado - Larga puesta en marcha, similar a ANAMMOX®
SHARON	- Ahorro energético significativo - Menor producción de lodo respecto sistemas convencionales - Menores emisiones de CO₂	- Control complejo de variables operacionales para mantener nitrificación parcial - Larga puesta en marcha y condiciones específicas de Temperatura y pH
NITRIFICACIÓN/ DESNITRIFICACIÓN	- Proceso bien establecido y ampliamente utilizado - Alta eficiencia en la eliminación de nitrógeno	- Requiere control cuidadoso de las condiciones ambientales - Necesita fuente externa de carbono para la desnitrificación - Mayor consumo energético por aireación

Desde el punto de vista científico-técnico, la selección de la mejor alternativa de tratamiento dependerá de varios factores, entre ellos la eficiencia del proceso, costos operativos, complejidad del control de proceso y la estabilidad del sistema.

La caracterización físico-química mostraba valores elevados de alcalinidad asociados al elevado valor medio de pH (8,33) que puede dificultar los procesos biológicos. Principalmente, es el proceso Sharon el que se puede ver más influido por los elevados valores de pH, ya que el rango óptimo para las bacterias nitratooxidantes (NOB) es de 7,2-7,63, considerablemente inferior al que se ha detectado en el escurrido. Por el contrario, tanto para los procesos ANAMMOX como para el ANITA™MOX, el pH se encuentra dentro del rango superior óptimo (7,5-8,5 unidades de pH).

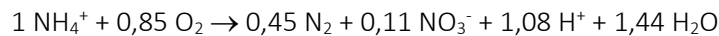
Por otra parte, los procesos ANAMMOX®, ANITA™MOX y SHARON pueden funcionar con bajas concentraciones de carbono orgánico total y elevadas concentraciones de carbono inorgánico total, ya que no requieren de una fuente externa de carbono orgánico.

Del análisis preliminar, el proceso ANAMMOX® es, posiblemente, el mejor proceso para la eliminación de nitrógeno amoniacal en el escurrido del fango deshidratado procedente de la digestión anaerobia de Calahorra. Aunque requiere de una larga puesta en marcha y es sensible a choques de carga, sus ventajas en términos de eficiencia y sostenibilidad lo convierten en la mejor opción.

4.4.3. Resultados simulación

4.4.3.1. Proceso de simulación planteado

El proceso más adecuado para plantear la simulación un proceso en dos etapas mediante dos reactores separados, nitrificación parcial seguido del proceso ANAMMOX®. Se trata de un proceso biológico de deamonificación para eliminar de forma energéticamente eficiente el nitrógeno amoniacal en los escurridos de deshidratación de los fangos digeridos. En el proceso de conversión ANAMMOX®, el amonio (NH_4^+) y el nitrito (NO_2^-) son convertidos en nitrógeno gaseoso en condiciones anaerobias y en ausencia de una fuente externa de carbono. Este proceso combina la nitrificación parcial con la oxidación anaerobia del amonio. La combinación de ambos procesos también conocida como Nitrificación Parcial /Anammox (PN/A) se resume en la siguiente ecuación:

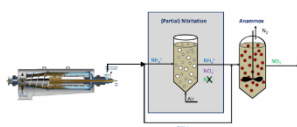


En el proceso PN/A solo una parte del nitrógeno amoniacal se oxida a nitrito, en lugar de nitrato, permitiendo alcanzar un ahorro de energía de la aireación cercano al 60%, siendo las necesidades de materia carbonosa inexistentes al tratarse de procesos autótrofos. Se ha considerado como

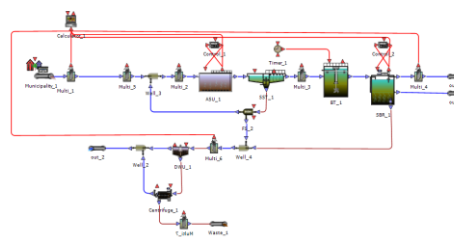
Como software de simulación se ha elegido WEST debido a la sencillez y simplificación de la herramienta, además de la posibilidad de introducir extensiones al modelo ASM1 que incluya el modelo ASM1-AN con Anammox y la nitrificación y desnitrificación en dos etapas. En la Figura 2, se muestra un esquema del proceso planteado y el esquema de WEST® propuesto.

Figura 2. a) Proceso de nitrificación en dos etapas; b) Esquema de tratamiento propuesto en WEST

a)



b)



4.4.3.2. Principales variables de control

Las principales variables de control que se han tenido en cuenta en las simulaciones para optimizar la eficiencia del proceso PN/Anammox® han sido las necesidades de oxígeno, el tiempo de retención celular, concentración de sólidos en el reactor y en el fondo de decantador secundario, purga de fango en decantador secundario, recirculación de fangos, concentración de fangos, concentración de $\text{NH}_4^+/\text{NO}_2^-$ en el efluente del reactor biológico de mezcla completa.

En la Tabla 6 se muestran las variables de control y los valores óptimos que se han alcanzado para la simulación. Además, se indica el porcentaje de desviación de la variable de control a partir de la cual los rendimientos de eliminación del amonio y nitrito en el efluente de salida dejan de ser óptimos para el proceso de tratamiento.

Tabla 6. Principales variables de control

Variable de control	Unidades	Valor óptimo	Desviación (%)
TRC – Tiempo de retención celular	d	21	5 %
SST reactor PN	mg/L	2.470	12 %
SST recirculación/purga	mg/L	5.653,64	6 %
SST SBR	mg/L	3.980,00	25 %
Q purga PN	m ³ /d	0,3	10 %
Q recirculación PN	m ³ /d	7,2	15 %
N-NH ₄ ⁺ Efluente Reactor PN	mg/L	409,00	6 %
N-NO ₂ ⁻ Efluente Reactor PN	mg/L	404,91	7 %
Necesidades de O ₂ proceso completo	Kg/d	25,68	4 %
O ₂ en proceso Anammox®	mg/L	<0,1	-

PN: Nitrificación Parcial

Otras variables de control (pH, alcalinidad, micronutrientes) no generan cambios significativos en el proceso de tratamiento. La alcalinidad no genera ningún problema. En general el proceso de nitrificación parcial consume alcalinidad, pero el agua afluente dispone de alcalinidad suficiente para compensar esta disminución. De hecho, la elevada alcalinidad que posee el agua procedente del escurrido, es probable que permita que no haya variaciones de pH significativas que puedan inhibir los procesos, al tamponar el medio.

Se ha probado el trabajar a distintas concentraciones de Oxígeno en el SBR, sin embargo, la óptima es trabajar con concentraciones inferiores a 0,1 mg/L, valores superiores produce la proliferación de bacterias NOB que oxidan los nitritos a nitratos. Sin embargo, es necesario mantener una concentración residual de oxígeno en el reactor SBR (<0,1 mg/L) para que se lleve a cabo el proceso Anammox®. Si bien este proceso es anaerobio, es probable que se requiera de este ligero aporte para conseguir las concentraciones adecuadas del ratio NH₄/NO₂ que permita que las bacterias anammox® realicen la conversión de estos componentes a nitrógeno gaseoso.

De las simulaciones se observa como factor de control crítico el control de la aireación. La conversión del amonio en nitrito es muy sensible a los aportes de oxígeno. En dicho proceso se debe controlar la oxidación del amonio a nitrito y a la vez evitar la conversión de este a nitrato. Ligeras variaciones en la aireación pueden provocar que el proceso de nitrificación parcial no se alcance en las proporciones necesarias o se genere acumulación de nitritos que impidan el proceso Anammox® posterior.

Por ello se fundamental, definir un adecuado sistema de control que asegure la eficacia del tratamiento. Se propone como sistema de control un lazo que mida continuamente parámetros críticos en el proceso como pueden ser la temperatura, la conductividad, el pH, el oxígeno disuelto amoniacal, el nitrógeno amoniacal y los nitritos, siendo los cuatro últimos parámetros los que gobernarán en cada momento la cantidad de aire necesaria para eliminar el nitrógeno.

Se requiere obtener en la primera etapa (CSTR) un efluente con una proporción de N-NH₄/N-NH₂ de 0,88-1,15 para asegurar el posterior tratamiento Anammox en el reactor SBR. Por debajo de dichas concentraciones se observa una inhibición en el crecimiento de las bacterias Anammox, por no encontrarse dentro del ratio estequiométrico para que las bacterias realicen sus funciones metabólicas de crecimiento. Por el contrario, por encima del ratio N-NH₄/N-NH₂, se observa que se ve favorecido el crecimiento de bacterias AOB, frente a la biomasa Anammox.

Se observa que es necesario mantener una concentración residual de oxígeno en el reactor SBR (<0,1 mg/L) para que se lleve a cabo el proceso Anammox. Si bien este proceso es anaerobio, es probable que se requiera de este ligero aporte para conseguir las concentraciones adecuadas de ratio NH₄/NO₂ que permita que las bacterias Anammox realicen la conversión de estos componentes a nitrógeno gaseoso.

4.5. Conclusiones y recomendaciones

De la realización de dicho trabajo, se ha podido concluir que:

- De todos los procesos analizados el proceso PN/Anammox® es el que se ha considerado más adecuado para realizar la simulación debido a que tiene una elevada eficiencia en la eliminación de nitrógeno, requiere un bajo consumo energético y menos complejo en el control de las variables de operación que los otros sistemas planteados.
- La conversión del amonio en nitrito es muy sensible a los aportes de oxígeno en el proceso de nitrificación parcial.
- La variable de operación crítica que se ha detectado es la concentración de oxígeno en los reactores, por lo que se considera fundamental a la hora de llevar a cabo este proceso de tratamiento, ya sea escala laboratorio/piloto, escala demostración o a escala real establecer un adecuado control de la aireación. Es necesario mantener una concentración residual de oxígeno en el reactor SBR ($<0,1$ mg/L) para que se lleve a cabo el proceso Anammox. Si bien este proceso es anaerobio, es probable que se requiera de este ligero aporte para conseguir las concentraciones adecuadas del ratio NH_4/NO_2 que permita que las bacterias Anammox realicen la conversión de estos componentes a nitrógeno gaseoso.
- Separar el proceso en dos etapas, nitrificación parcial seguida de Anammox® permite tener mayor control sobre el proceso, y realizar un seguimiento al crecimiento de los diferentes tipos de biomasa involucradas en los procesos: Biomasa heterótrofa, Bacterias oxidantes de amonio (AOB), Bacterias oxidantes de nitrito (NOB), Biomasa Anammox.
- Se requiere obtener en la primera etapa (CSTR) un efluente con una proporción de $\text{N-NH}_4/\text{N-NH}_2$ de 0,88-1,15 para asegurar el posterior tratamiento Anammox en el reactor SBR. Por debajo de dichas concentraciones se observa una inhibición en el crecimiento de las bacterias Anammox.
- Se evidencian períodos muy largos de puesta en marcha hasta conseguir estados estacionarios (o pseudo-estacionario). Aunque la simulación se ha realizado con concentraciones promedio obtenidas de la caracterización de los efluentes de deshidratación, los tiempos para alcanzar valores estacionarios han sido considerablemente superiores a procesos de tratamiento convencionales (100-120% superiores).

Las recomendaciones para los pasos sucesivos pasan por:

- Plantear un proyecto de I+D+i futuro a partir de los resultados obtenidos en la caracterización del agua y el análisis de simulación preliminar.
- Reproducir a escala laboratorio/escala piloto el proceso de simulación propuesto, con objeto de verificar y validar los resultados alcanzados en la simulación. Para ello se podrán emplear los resultados obtenidos en la simulación para prediseñar una instalación a escala laboratorio/piloto adaptada a las características de la corriente.

5. AQUA2VAL. DESARROLLO DE SOLUCIONES NOVEDOSAS QUE FOMENTEN LA ECONOMÍA CIRCULAR Y SOSTENIBLE EN LOS SECTORES INDUSTRIALES ESTRATÉGICOS VALENCIANOS CONSUMIDORES DE AGUA Y GENERADORES DE AGUAS RESIDUALES.

5.1. Antecedentes

Mejorar la eficiencia en el uso del agua se ha convertido en una necesidad que afecta a toda la sociedad, debido a la creciente presión sobre los recursos hídricos disponibles y la escasez. En el sector industrial de la Comunidad Valenciana convierte en un reto relevante, teniendo en cuenta que muchas de sus industrias dependen intensamente del agua en sus procesos productivos, y a la vez generan aguas residuales con bajo nivel de reutilización, en una región que sufre un estrés hídrico extremo.

El proyecto AQUA2VAL se centra en el desarrollo de soluciones sostenibles e innovadoras para el tratamiento y la reutilización de aguas residuales industriales. El proyecto cuenta con financiación en el marco de la convocatoria IVACE + FEDER, que apoya la innovación y la sostenibilidad en sectores estratégicos.

Se trata de una iniciativa que aborda los principales retos ambientales e industriales relacionados con la gestión de los recursos hídricos en la Comunidad Valenciana, proporcionando a partir de los principios de la economía circular y en línea con los objetivos del Pacto Verde Europeo, soluciones sostenibles y de alto impacto para el tratamiento y la reutilización de aguas residuales industriales.

La combinación de sostenibilidad, digitalización y economía circular, para transformar el modelo actual de gestión del agua en la industria, requiere de la colaboración de diversos entes con capacidad para promover un cambio real en los sistemas de producción valencianos. Por ello, en esta iniciativa colaborativa participan institutos tecnológicos ITC, AIJU, AINIA, AITEX, INESCOP, ITE e ITI, y una serie de empresas tractoras de la Comunitat Valenciana (entre ellas s) con intereses creciente en temáticas relacionadas con la gestión de residuos, la economía circular, la digitalización y la optimización de la gestión del agua, así como el uso de aguas no convencionales en los procesos productivos o como fuente de energía renovable.

En este sentido, el proyecto tiene como principal objetivo buscar soluciones que se ajusten a las normativas vigentes y que vayan más allá de éstas, anticipándose a un futuro sostenible y de calidad del agua y de los recursos relacionados. El proyecto adopta un enfoque basado en la demanda, comenzando con una evaluación detallada de las necesidades tecnológicas en colaboración con sectores representativos, como AQLARA, empresa líder en la gestión del ciclo del agua.

Este proyecto estará dirigido a dar respuesta a 5 retos fundamentales: escasez de agua (fomentar el uso de aguas no convencionales), degradación de ecosistemas acuáticos (eliminación de microcontaminantes, contaminantes emergentes y críticos), economía circular y gestión de residuos (valorizar y reutilizar), generación de energías renovables a partir de agua (H₂), y digitalización (de EDAR). AQUA2VAL desarrollará y validará tecnologías avanzadas para alcanzar estos retos, y ayudar a posicionar a las empresas colaboradoras como referentes de producción sostenible y eficiente.

5.2. Objetivos

5.2.1. Objetivo general

AQUA2VAL pretende mejorar la gestión hídrica en diversos sectores industriales estratégicos de la Comunidad Valenciana con importante consumo de agua y también generadores de aguas residuales.

El principal objetivo de este proyecto es el desarrollo de soluciones novedosas, fomentando la economía circular y sostenibilidad de estos sectores productivos como son el cerámico, el químico, el metalúrgico, el textil, el de la cosmética, el del plástico, el de la curtición, la agricultura, industria del agua, más allá de la normativa vigente.

Esto permitirá promover la adaptación al cambio climático de la industria valenciana y garantizar su resiliencia hídrica, al anticiparse a un futuro sostenible, abordando temáticas relacionadas con gestión de residuos, economía circular, digitalización, gestión integral del ciclo del agua y uso de aguas no convencionales con el fin de impulsar nuevos desarrollos científicos y tecnológicos que posicionen a las empresas colaboradoras a la cabeza de las tecnologías del sector.

5.2.2. Objetivos específicos

- Avanzar en el desarrollo científico y tecnológico en materia de gestión de agua para posicionar a las empresas colaboradoras a la cabeza de las tecnologías del sector.
- Ayudar a las industrias productivas valencianas a adaptarse al cambio climático (escasez de agua) y alinearse con estrategias nacionales y directivas europeas en materia de agua.
- Impulsar el tejido industrial Valenciano en la gestión sostenible de recursos hídricos y minimizar riesgos de contaminación por vertidos.
- Contribuir a la contaminación ZERO y a una Economía Circular del Agua.

Los principales retos del proyecto son:

- Escasez de agua, incluyendo sequía e inundaciones, a través de la recuperación del recurso hídrico y del uso de aguas no convencionales residuales y desaladas.
- Degradación de ecosistemas acuáticos y de las masas de agua.
- Economía Circular y Gestión de Residuos.
- Generación de Energías Renovables a partir de agua.
- Digitalización para el control inteligente de las EDARs.

5.3. Metodología y plan de trabajo

5.3.1. Etapas

El proyecto cuenta con diferentes etapas:

- **Definición del escenario base** de las industrias valencianas colaboradoras, realizando un estudio de la tipología de necesidades de estas empresas, así como un diagnóstico digital de las EDAR y un mapa de las soluciones tecnológicas desarrolladas.
La iniciativa comienza con una evaluación exhaustiva de las necesidades de las principales industrias regionales, identificando las brechas tecnológicas y los retos en la calidad del agua.
Los contaminantes objetivo incluyen sustancias persistentes como PFAS, surfactantes y microplásticos en textiles y en plantas de tratamiento de agua y aguas residuales; filtros UV y tintes orgánicos en cosméticos; residuos de cromo y proteínas en curtidurías; y metales pesados y alta conductividad en las industrias de tratamiento de superficies y cerámica.
El objetivo es mejorar la calidad de los efluentes para facilitar la recuperación y la reutilización segura del agua, de acuerdo con los marcos regulatorios de la UE. Los resultados de esta fase de diagnóstico servirán de base para el desarrollo de tecnologías de tratamiento avanzadas que fomenten la sostenibilidad industrial, la eficiencia de los recursos y la resiliencia ambiental.

- **Evaluación de los Procesos de tratamiento** más innovadores y eficaces en la depuración de aguas: Se evaluarán distintos procesos de tratamiento, como son la separación por membranas, técnicas de adsorción y tecnologías destructivas. Además, se evaluará la viabilidad económica y técnica de cada una de las tecnologías, con el fin de facilitar su implementación en condiciones o entornos reales y contribuir a la gestión eficiente del agua en la región.
- **Evaluación de recuperación de productos de valor añadido:** centrado en la valorización de corrientes residuales industriales a través de la recuperación de compuestos de alto valor añadido, especialmente proteínas y metales pesados, que posteriormente. A través de las distintas tareas se desarrollarán tecnologías de separación, concentración y purificación avanzadas (como membranas, adsorción y procesos específicos de recuperación). Estas tecnologías serán validadas en condiciones de laboratorio y preindustriales, sentando las bases para su transferencia al tejido empresarial.

Como consecuencia se abordará las tecnologías idóneas para la regeneración de aguas residuales industriales, las cuales puedan ser reintroducidas de nuevo en los procesos productivos. Por otro lado, se trabajará entre los diferentes socios en definir una estándar de calidad de agua regenerada de EDAR idónea para los sectores industriales abordados en el proyecto AQUA₂VAL. Además, se evaluará el impacto de usar agua desalada y regenerada para la producción de hidrógeno verde tanto desde el punto de vista experimental como de diseño de procesos optimizados desde el punto de vista técnico-económico.

- **Validación de las tecnologías y desarrollos** llevados a cabo, además se trabajará en el diseño de modelos circulares para la implementación de los productos recuperados, y de gestión del agua regenerada; teniendo en cuenta aspectos técnicos, económicos y regulatorios.
- **Validación y transferencia de resultados**

5.3.2. Participación de Aqlara Ciclo Integral del Agua

Aqlara Ciclo Integral del Agua participará en análisis y necesidades en las potabilizadoras de la Comunitat Valenciana; como validadores en sus instalaciones de la solución innovadora generada para eliminar microplásticos mediante adsorción con nanoestructuras biodegradables; además de formar parte del Comité de Expertos que contribuirá al análisis de los resultados de validación.

5.4. Alcances del proyecto

El carácter integrador e intersectorial del proyecto, en el siete institutos tecnológicos del ecosistema de innovación valenciano y diferentes empresas tractoras han unido esfuerzos voluntariamente para crear una plataforma colaborativa capaz de generar un impacto real. Esta convergencia de experiencia sin precedentes refuerza la capacidad de la región para desarrollar tecnologías avanzadas de tratamiento de aguas adaptadas a las necesidades industriales específicas y a la composición de los efluentes.

Al abordar contaminantes emergentes de preocupación, como microplásticos, PFA, filtros UV, metales pesados y cargas salinas, el proyecto busca mejorar la calidad de los efluentes para su reutilización segura o incluso su posible conversión a fuentes alternativas de agua potable. Se espera que los resultados contribuyan significativamente a la sostenibilidad, la competitividad y la resiliencia ambiental de las industrias regionales.

AQUA₂VAL ofrece un modelo replicable para la innovación colaborativa en el ámbito de la gestión del agua, impulsado por la excelencia técnica, la cooperación estratégica y una clara misión ambiental.

El presente proyecto pretende ayudar a las industrias productivas valencianas a adaptarse al cambio climático (escasez de agua) y alinearse con las estrategias nacionales y directivas europeas en materia de agua. El objetivo es que el tejido industrial valenciano sea puntero en la gestión sostenible de los recursos hídricos y en minimizar riesgos de contaminación por vertidos.

El desarrollo de esta investigación busca la validación de tratamientos sostenibles aplicables a sectores estratégicos (cerámico, químico, metalúrgico, del plástico y del cuero) que incluyan la eliminación de contaminantes del agua, la digitalización de procesos en las EDAR (Estación Depuradora de Aguas Residuales) de nuestra región y que nos permita avanzar hacia la resiliencia hídrica de las industrias implicadas.

El presente proyecto pretende alcanzar los siguientes hitos:

- Diseño y síntesis de nuevos materiales, algunos procedentes de residuos o fuentes biológicas, para la eliminación de microcontaminantes y contaminantes emergentes en aguas residuales industriales. Validación de tecnologías avanzadas de tratamiento, como el uso de plasma y membranas cerámicas fotocatalíticas.
- Definición de estándares de calidad para el agua regenerada en entornos industriales, a partir del perfil de agua tratada en EDAR. Producción de agua regenerada industrial para su reutilización en procesos productivos, con el objetivo de disminuir el consumo de agua convencional. Evaluación del uso de agua no convencional, regenerada o desalada, como materia prima para la generación de hidrógeno.
- Desarrollo y validación de tecnologías limpias, sostenibles y económicamente viables para la valorización de subproductos y la recuperación de compuestos de alto valor a partir de aguas residuales.
- Establecimiento de modelos de economía circular aplicados al agua y a los productos recuperados. Garantía de escalabilidad y aplicabilidad de las tecnologías desarrolladas a distintos sectores industriales.
- Mejora de la calidad del agua tratada mediante la eliminación de contaminantes emergentes, conforme a la Directiva (UE) 2020/2184, y adaptación a los requerimientos de la Directiva (UE) 2024/3019 en materia de aguas residuales.
- Implantación de sistemas predictivos en el tratamiento secundario de EDAR, con el fin de reducir los tiempos de respuesta ante contaminaciones accidentales y optimizar la operación de los reactores biológicos, disminuyendo el consumo energético.
- Fomento de la colaboración entre el ámbito industrial y el investigador, orientado al desarrollo de soluciones integradas y sostenibles adaptadas a las necesidades sectoriales.
- Consolidación de una base de conocimiento técnico sobre tratamientos cuaternarios, con vistas a su futura implantación en sectores industriales como el cerámico, textil, químico, cosmético, curtiente, ambiental y del ciclo del agua.

6. I3WATERS

El programa de la Comisión Europea HORIZON-MSCA-2024 aborda mediante el Proyecto i3 Water Systems y aborda la urgente necesidad de optimizar la gestión de los recursos hídricos proporcionando una solución integral para, operar y mantener de manera óptima los sistemas de distribución de agua (WDS).

Aqlara Ciclo Integral del Agua, S. A. participa junto con diversas universidades, empresas e institutos de investigación en este proyecto i3WaterS gracias la beca “Marie Curie” concedida al Consorcio (universidades y empresas abajo relacionadas).

El presente proyecto, muestra un enfoque holístico entre un conjunto de interrelaciones clave entre los factores externos, cotidianos y extremos, y los fallos de los sistemas de distribución de agua, que permita desarrollar un sistema de soporte a la decisión que aconseje las acciones a llevar a cabo. Para ello, el proyecto i3WaterS, se desarrolla en dos vertientes, la formativa y la investigativa.

En la formativa, quince candidatos al doctorado participarán en un programa de formación, en el que aprenderán con una red de expertos, en el monitoreo de redes, datos la gestión, los algoritmos, la IA, la modelización, la microbiología, la ética, lo cual les permitirá adquirir una serie de competencias transversales necesarias para encontrar, probar e innovar sobre una solución que será fundamental para cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible sobre el agua. De esta manera, el proyecto i3WaterS proporciona una nueva generación de profesionales conectados internacionalmente con habilidades únicas para el desarrollo de carreras prósperas en las infraestructuras críticas.

A nivel de investigación, el proyecto i3WaterS se centra en la integración de datos, conocimiento experto específico y herramientas de simulación computacional. La incorporación de la inteligencia artificial (IA) ayudará a aumentar la preparación de los sistemas de distribución de agua, bajo un paradigma de máxima fiabilidad, rendimiento y, seguridad.