

SEGURIDAD HÍDRICA



JOAQUÍN MELGAREJO MORENO
M^a INMACULADA LÓPEZ ORTIZ
PATRICIA FERNÁNDEZ ARACIL

SEGURIDAD HÍDRICA

© los autores, 2023
© de esta edición: Universitat d'Alacant
ISBN: 978-84-1302-234-5

Reservados todos los derechos. No se permite reproducir, almacenar en sistemas de recuperación de la información, ni transmitir alguna parte de esta publicación, cualquiera que sea el medio empleado -electrónico, mecánico, fotocopia, grabación, etcétera-, sin el permiso previo de los titulares de la propiedad intelectual.

TABLA DE CONTENIDO

BLOQUE I - PLANIFICACIÓN

Consideraciones ambientales con relación a la aprobación del Plan Hidrológico del Tajo de Tercer Ciclo 2022-2027 y el Traspase Tajo-Segura José Navarro Pedreño.....	19
Planificación Hidrológica: información, participación y evaluación ambiental estratégica Ángel Ruiz de Apodaca Espinosa	39
Representación espacio-temporal del riesgo de inundación a partir de las indemnizaciones del seguro de riesgos extraordinarios Francisco Espejo Gil, Urko Elozegi Gurmendi.....	59
La desalación en la estrategia de seguridad hídrica. Implicaciones económicas y ambientales Alberto del Villar García.....	73
La desalación en la provincia de Almería: garantía para el abastecimiento y el regadío Francisco Javier Alcántara Pérez	93
Mejorar la resiliencia ante las inundaciones en la Vega Baja (España). Propuesta didáctica en bachillerato Ángela del Carmen Zaragoza, Álvaro-Francisco Morote, María Hernández Hernández.....	105
Resignificando la ciudad como biotopo humano Javier Eduardo Parada Rodríguez, Liliana Romero Guzmán, Jesús Enrique De Hoyos Martínez	117
Gestión del agua y saneamiento básico en una reserva de desarrollo sostenible: comunidad de Nossa Senhora do Livramento do Tupé, Brasil Antonio Jorge Barbosa da Silva Maria Claudia da Silva Antunes de Souza	133
Proposición de una metodología para estimar la erosión del suelo en viticultura mediante ISUM (Improved Stock Unearthing Method). Un caso en el viñedo leonés Antonio Jódar-Abellán, Marta García-Fernández, Susana García-Pisabarro, Jesús Rodrigo-Comino	141
Estimación de la disponibilidad y seguridad hídrica bajo escenarios de cambio climático en una cuenca hidrológica agro-forestal del sureste de España Antonio Jódar-Abellán, Dámaris Núñez-Gómez, Efraín Carrillo-López, Ryan T. Bailey, Pablo Melgarejo	151
Determinación del umbral de escorrentía y disponibilidad hídrica de la cuenca hidrográfica del río Jubones, Ecuador Paolo Brazales Cervantes, Seyed Babak Haji Seyed Asadollah, Antonio Jódar-Abellán.....	163
Análisis del umbral de escorrentía de la cuenca del río Obispo, en la provincia del Carchi (Ecuador) Pablo David Viera Ríos, Derdour Abdessamed, Antonio Jódar-Abellán.....	175
El acuífero del Peñón (Alicante): un pequeño acuífero kárstico Víctor Sala Sala, José Miguel Andreu Rodes, Miguel Fernández Mejuto, Ernesto García Sánchez.....	185

¿Se observan cambios en la precipitación que afecten al Acuífero del Ventós (provincia de Alicante)?

José Miguel Andreu Rodes, Igor Gómez Domenech, Miguel Fernández-Mejuto, Juan Bellot Abad197

Revisión de las políticas de modernización de regadíos en la Comunidad Valenciana. La estrategia valenciana de regadíos 2020-2040

David Sancho-Vila, Marta García-Mollá207

El impacto del proyecto europeo ARSINOE en la gestión del acuífero de la isla de El Hierro (Canarias)

Juan C. Santamarta, Noelia Cruz-Pérez, Joselin S. Rodríguez-Alcántara, Alejandro García-Gil, Miguel Á. Marazuela, Carlos Baquedano, Jesica Rodríguez Martín, Luis Fernando Martín Rodríguez 219

BLOQUE II - INFRAESTRUCTURAS

Reutilización de aguas regeneradas en la cuenca del seguro. Adaptación al reglamento (UE) 2020/741: retos y oportunidades

Sonia M. Hernández López, José Carlos González Martínez231

Caracterización hidrológica de los caudales ecológicos mínimos en España

Luis Garrote de Marcos 249

Sobrevvertido en presas de hormigón. Evaluación de las acciones hidrodinámicas

Luis G. Castillo Elsitdié, José M. Carrillo Sánchez, Juan T. García Bermejo 269

Consideraciones sobre la estimación de hidrogramas de rotura de presas

Luis Altarejos García 295

La seguridad de las infraestructuras hidráulicas

Francisco Javier Flores Montoya315

La ordenación del territorio y la planificación hidrológica al servicio de la seguridad hidráulica y energética

Francisco Javier Flores Montoya325

La evolución de los servicios urbanos del agua en Madrid: un servicio de alta calidad

Ignacio Lozano Colmenarejo345

BALTEN: el agua regenerada como garantía de suministro de agua de riego en Tenerife

Ana Sánchez Espadas, Jesús Rodríguez Martí363

El sector del agua urbana frente a las nuevas exigencias legislativas para mantener la seguridad hídrica

Carmen Hernández de Vega, Alicia Ayuso Solís381

El abastecimiento de la ciudad de Ávila: retos y soluciones científico-técnicas

José Luis Molina González, Jorge Mongil Manso 399

El Consorcio de Aguas de la Marina Baja: un ejemplo de economía circular en la garantía del abastecimiento urbano ante el reto continuo de las sequías

Jaime Berenguer Ponsoda409

Gestión activa de sistemas de abastecimiento mediante el empleo de sistemas multiagente (MAS) para la sostenibilidad

Carlos Calatayud Asensi, José Vicente Berná Martínez, Vicente Javier Macián Cervera, Lucía Arnau Muñoz439

La gestión municipal del ciclo urbano del agua digitalizado

Rosa Rozas Torrente, M^a José Moya Llamas, Arturo Trapote Jaime451

Microsectorización dinámica redes de distribución de agua	
Arturo Albaladejo Ruiz.....	463
Uso de compuertas en redes de drenaje para reducir inundaciones	
Leonardo Bayas-Jiménez	477
Detección y monitoreo de aguas superficiales en la región semiárida brasileña a partir de datos orbitales de sensores remotos	
Izaias de Souza Silva.....	487

BLOQUE III - EVALUACIÓN SOCIOECONÓMICA Y JURÍDICA

La inseguridad hídrica del informe del Consejo Nacional del Agua sobre el recorte del travase Tajo-Segura	
Miguel Ángel Blanes Climent.....	499
El necesario impulso a las centrales hidroeléctricas reversibles como contribución a la seguridad energética nacional: algunas cuestiones jurídicas	
Estanislao Arana García	511
Políticas públicas para la mitigación del impacto del cambio climático sobre los aprovechamientos energéticos	
Jesús Conde Antequera	529
La legislación contra el cambio climático y la transición a una economía descarbonizada desde una doble perspectiva: ambiental y social	
José Esteve Pardo.....	549
Huella hídrica y financiación sostenible	
Domingo Zarzo Martínez, Mercedes Calzada Garzón, Patricia Terrero Rodríguez.....	559
¿Estamos sobreestimando los recursos de agua regenerada? Una ducha fría con la realidad hidro-económica	
Julio Berbel, Esther Díaz-Cano, Alfonso Expósito	577
Taxonomía de los instrumentos económicos aplicados para la gestión sostenible del agua	
Nazaret M ^a Montilla López, Esther Díaz-Cano y Julio Berbel.....	597
Seguridad hídrica y objetivos del PNIEC desde una perspectiva jurídica	
José Antonio Blanco Moa	613
SIAGES: un innovador sistema integrado de apoyo a la gestión del agua	
Alberto Esteban Barrera García, Álvaro Rodríguez García, Ramón Bella Piñeiro, Jose Pablo Ormaechea, Luis José Ruiz Aznar, Abel Solera Solera et al., Manuel Argamasilla Ruiz, Lupicino García Ortiz.....	631
Crisis energética y equilibrio económico financiero en la contratación pública	
Esteban Arimany Lamoglia	643
Garantía del abastecimiento en el Sureste español: la Mancomunidad de los Canales del Taibilla	
Patricia Fernández Aracil, M ^a Inmaculada López Ortiz, Joaquín Melgarejo Moreno.....	655
La evaluación de impacto ambiental de proyectos hidráulicos ¿lo estamos haciendo bien?	
Carlos Martín Cantarino.....	677

La seguridad energética y el autoconsumo fotovoltaico como herramienta para la seguridad hídrica	
Marcos García-López, Joaquín Melgarejo	695
Seguridad hídrica y equilibrio ecológico en el parque natural «El Hondo»: visión histórico-jurídica	
Francisco José Abellán Contreras	709
Los trasvases en tiempos de seguridad hídrica	
Paul Villegas Vega	723
Vulnerabilidad e incidencia de la pobreza hídrica en Alicante	
Ricardo Abad Coloma	735
Asequibilidad al agua urbana y pobreza hídrica en ciudades del Norte global: el caso de Alicante	
Luis E. Zapana Churata, Rubén A. Villar Navascués, María Hernández Hernández, Antonio M. Rico Amorós	745
Políticas públicas de ayudas para la mejora, modernización e innovación en el regadío de la Región de Murcia	
Ramón Martínez Medina, Encarnación Gil Meseguer, José María Gómez-Gil, José María Gómez Espín	759
O reflexo das <i>fake news</i> frente a crise ambiental: uma reflexão necessária nos dias atuais	
Aline Hoffmann, Liton Lanes Pilau Sobrinho	773
Apontamentos sobre o pagamento por serviços ambientais	
André Luiz Anrain Trentini	783
Constitucionalismo das águas – o “aguar” das constituições	
Luciana Pelisser Gottardi Trentini	795
Uso sustentável da água: uma definição a partir dos conceitos de segurança hídrica, de eficiência e de sustentabilidade	
Ana Luisa Schmidt Ramos, Alexandre Morais da Rosa	805
O regime de responsabilidade penal pela poluição hídrica no Brasil	
Jefferson Zanini, Luiz Antônio Zanini Fornerolli	815
Segurança hídrica e seu tratamento jurídico no o regime de responsabilidade penal pela poluição hídrica no Brasil e na Espanha	
Leandro Katscharowski Aguiar	827
Debatendo os ODS com base na sustentabilidade e no desenvolvimento sustentável.....	
Denise Schmitt Siqueira Garcia, Heloise Siqueira Garcia	837
A falta de efetividade no planejamento da segurança hídrica do Brasil	
Denise Schmitt Siqueira Garcia, Alexandre Waltrick Rates	851
Do constitucionalismo ao constitucionalismo global: por uma constituição mundial em defesa de bens fundamentais	
Vanessa Ramos Casagrande	863
A dessalinização da água como instrumento de segurança hídrica	
Anaxágora Alves Machado Rates	875
A canção dos oceanos	
Paola Fava Saikoski	885

Análise da lei de recursos hídricos à luz da responsabilidade do Brasil para com a sustentabilidade e a conscientização ambiental	
Adilor Danieli	895
Investigación sobre el río Amarillo en las dinastías Ming y Qing. Comentario sobre la Ley de protección del río Amarillo	
Yang Yang.....	907
Propuesta metodológica para la recolección del etnoconocimiento en la gestión del riesgo de desastre	
Isaleimi Quiguapumbo Valencia, Antonio Aledo Tur.....	919

BLOQUE IV - TECNOLOGÍAS

Nuevo sistema de riego con recuperación de agua y nutrientes	
Pablo Melgarejo, Dámaris Núñez-Gómez, Pilar Legua, Vicente Lidón, Agustín Conesa, Antonio Marhuenda, Juan José Martínez-Nicolás.....	933
Dinapsis: transformación digital para la gestión sostenible del agua y la salud ambiental	
María Tuesta San Miguel.....	953
Los contaminantes emergentes en la reforma de la directiva de aguas residuales	
Daniel Prats Rico.....	959
Fertirrigación y nuevas estrategias como garantía de seguridad hídrica en el regadío	
Alejandro Pérez Pastor y Elisa Pagán Rubio.....	985
La desalación y el hidrógeno	
Alejandro Zarzuela López.....	1005
Análisis regional de la reducción de boro en agua marina desalinizada para el riego agrícola en el sureste español	
Alberto Imbernón Mulero, José Francisco Maestre Valero, Saker Ben Abdallah, Victoriano Martínez Álvarez, Belén Gallego Elvira.....	1021
Impacto ambiental de la reducción del boro del agua de mar desalinizada para el riego en parcela	
Saker Ben Abdallah, Belén Gallego-Elvira, Alberto Imbernón-Mulero, Victoriano Martínez-Alvarez, José Francisco Maestre Valero.....	1031
Modelado cinético del consumo de CO₂ para la cepa Spirulina platensis	
Antonio F. Marcilla Gomis, Inmaculada Blasco López.....	1041
Empleo de filtro verde construido con residuos para reducir el contenido en fósforo en aguas de riego	
Teresa Rodríguez Espinosa, María Belén Almendro Candel, Ana Pérez Gimeno, Iliana Papamichael.....	1055
Tecnologías de oxidación avanzada para la degradación del fármaco carbamazepina: la ozonización	
María José Moya-Llamas, Marta Ferre Martínez, Elizabetha Domínguez Chabaliná, Arturo Trapote Jaime, Daniel Prats Rico.....	1067
Aprendizaje basado en proyectos colaborativos globales en formación profesional: banco de ensayos hidráulicos para la digitalización del agua	
Albert Canut Montalvã, Joaquín Martínez López, Maties Roma mayor, Antonio Oliva Sánchez.....	1079

Reutilización de agua para riego en la ciudad de Murcia. Proyecto LIFE CONQUER Eva Mena Gil, Simón Nevado Santos, Elena de Vicente Aguilar, Adriana Romero Lestido Benoît Fabien Claude Lefèvre.....	1091
Eliminación de microcontaminantes emergentes en lodos de depuradora mediante procesos de oxidación avanzada: peróxido de hidrógeno y ozono Clara Calvo Barahona, Adrián Rodríguez Montoya, María José Moya-Llamas, Arturo Trapote Jaume, Daniel Prats Rico.....	1103
Vigilancia y protección de las aguas superficiales mediante el proyecto WQeMS y los servicios del Copernicus Pablo Cascales de Paz, Eva Mena Gil, Isabel Hurtado Melgar, Laurent Pouget.....	1115
Tratamiento ecológico para la eutrofización y la anoxia en las masas de agua Ricardo Mateos-Aparicio Baixauli.....	1125
Modelado de descarga submarina de salmuera antes y después de la instalación de un difusor Silvano Porto Pereira, José Luís Sánchez-Lizaso, Paulo César Colonna Rosman. Ángel Loya, Iran Eduardo Lima Neto.....	1137
Las sequías en España en el siglo XXI: su influencia en la disminución y cierre de transferencias de agua del acueducto Tajo-Segura y de la conexión Negratín-Almanzora Encarnación Gil Meseguer, Ramón Martínez Medina, José María Gómez-Gil, José María Gómez Espín.....	1147

Reutilización de agua para riego en la ciudad de Murcia. Proyecto LIFE CONQUER

Eva Mena Gil

Innovación y Gestión de Laboratorios, Empresa Municipal de Aguas y Saneamiento de Murcia S.A, EMUASA, España
eva.mena@emuasa.es

Simón Nevado Santos

Operaciones, Empresa Municipal de Aguas y Saneamiento de Murcia S.A, EMUASA, España
simon.nevado@emuasa.es

Elena de Vicente Aguilar

I+D+i, Empresa Municipal de Aguas y Saneamiento de Murcia S.A, EMUASA, España
elena.devicente@emuasa.es

Adriana Romero Lestido

Cetaqua, Water Technology Center, Barcelona, España
adrianalucia.romero@cetaqua.com

Benoît Fabien Claude Lefèvre

AQUATEC, Proyectos para el sector del agua, S.A.U., Murcia, España
benoit-fabien.lefevre@aquatec.es

RESUMEN

La escasez de agua es un problema creciente en todo el mundo, incluyendo la Unión Europea (UE). Varias causas, como el cambio climático, el aumento de la demanda y la sobreexplotación de los recursos hídricos, han llevado a una disminución significativa de las reservas de agua en la UE, generando preocupación por la seguridad hídrica. Una solución efectiva para abordar esta limitación de recursos es la reutilización de aguas residuales. Sin embargo, las altas concentraciones de sal en estas aguas dificultan su tratamiento convencional en plantas depuradoras y limitan su uso para el riego urbano, lo que a su vez puede provocar la eutrofización del medio ambiente. Para hacer frente a este desafío, el proyecto LIFE CONQUER, liderado por CETAQUA y en colaboración con EMUASA y AQUATEC, busca desarrollar un proceso inno-

vador utilizando la tecnología de nanofiltración (NF) para la reutilización de agua subterránea contaminada en zonas residenciales para el riego urbano. Además, el proyecto utiliza procesos electroquímicos para valorizar las salmueras generadas y transformar la salinidad concentrada en subproductos valiosos, como el hipoclorito de sodio, promoviendo así la economía circular. El proyecto se llevará a cabo en las instalaciones de la estación regeneradora de aguas (ERA) de Zarandona, en Murcia, donde se tratará una corriente de alta salinidad utilizando un reactor biológico seguido de membranas de ultrafiltración. El agua regenerada resultante, que posee aún una elevada concentración en sales y nitratos se tratará en los prototipos del proyecto LIFE CONQUER para producir agua rica en nutrientes que cumpla con los requisitos de calidad establecidos por la legislación española (Real Decreto 1620/2007). Esta agua regenerada se inyectará en la Red Urbana de Riego de la ciudad de Murcia, evitando así el vertido de nitrógeno a las masas de agua. Además, la salmuera generada en el proceso se tratará para producir hipoclorito de sodio mediante procesos de adsorción, nanofiltración, ósmosis inversa y electrooxidación.

1. INTRODUCCIÓN

En el transcurso del siglo XXI, hemos sido testigos de un aumento significativo en la frecuencia de sequías y escasez de agua en la Unión Europea (UE). Lo que en un principio era un problema limitado a ciertas regiones de Europa, se ha convertido en una preocupación generalizada en toda la UE, con aproximadamente un tercio del territorio experimentando estrés hídrico.

Ante esta situación, la regeneración de agua ha surgido como una alternativa sostenible para el aprovechamiento de fuentes de agua dulce, tanto en términos de costos como de impacto ambiental. Sin embargo, la salinidad de las aguas residuales plantea un desafío en las plantas de tratamiento y regeneración de aguas (EDAR y ERA, respectivamente), donde los colectores reciben salmueras industriales, aguas de escorrentía agrícola e incluso intrusión marina. Las EDAR convencionales o las ERA no están diseñadas para eliminar la salinidad, lo cual se convierte en un parámetro limitante en cuanto a la calidad del agua para su reutilización.

La salinidad se vuelve especialmente crítica cuando el agua se utiliza para fines de riego, como en parques, jardines y para uso agrícola, ya que afecta negativamente la absorción de agua por parte de las plantas y el rendimiento del suelo. Esta limitación implica el consumo de fuentes de agua dulce para usos no potables, en lugar de utilizar alternativas más sostenibles, así como la descarga de efluentes con nutrientes en cuerpos de agua naturales. La reutilización del agua permitiría prevenir la eutrofización, al desviar los nutrientes hacia aplicaciones de riego, donde serían aprovechados por las plantas.

A lo largo de los años, las membranas de ósmosis inversa (OI) han sido consideradas una solución prometedora para abordar los desafíos relacionados con la eliminación de la salinidad en la recuperación de aguas residuales. Sin embargo, la OI implica costos de operación significativos y, además, genera salmueras que deben ser gestionadas como residuos, aumentando así el problema de la eutrofización en los cuerpos de agua receptores.

La ciudad de Murcia se caracteriza por su estrés hídrico estructural y su alta actividad agrícola. Actualmente, la ciudad cuenta con una red de riego urbano (RUR) diseñada para satisfacer las necesidades de agua de 405 hectáreas de parques y áreas verdes. Esto implica una demanda total de agua de riego de 1.750.000 metros cúbicos al año, que actualmente se cubre por com-

pleto mediante el uso de fuentes de agua dulce (un 55% de agua subterránea y un 45% de agua potable).

Existe un interés por fomentar la reutilización del agua en el riego de los parques, a través de la recuperación de 201.480 metros cúbicos al año del efluente total generado por la planta de regeneración de aguas residuales de Zarandona (Figura 1).



Figura 1. Estación Regeneradora de Aguas (Zarandona, Murcia).

El agua regenerada se inyecta en la RUR existente con el objetivo de reducir la cantidad de agua potable destinada al riego. Sin embargo, el tratamiento actual utilizado (MBR+UF) permite eliminar la materia orgánica, pero no aborda el problema de la salinidad. Como resultado, el efluente presenta valores promedio de conductividad eléctrica de $3,5 \pm 1$ mS/cm, con picos que alcanzan los 4 y 4,5 mS/cm, superando el límite establecido por el Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas, que es de 3 mS/cm. Además, la concentración promedio de sodio es de 233 ± 180 mg/l, con picos de hasta 750 mg/l, duplicando el valor de la Relación de Adsorción de Sodio (SAR) recomendado para el riego, que es de 6 meq/l. Por lo tanto, se requiere implementar un postratamiento para cumplir con las regulaciones y asegurar que el volumen definido como agua para riego sea adecuado. Además, el efluente de la planta de tratamiento presenta una concentración de nitratos de 35 mg/l, los cuales actualmente se vierten al medio acuático en una zona particularmente sensible, como es el Mar Menor, donde la contaminación por nitratos y la consiguiente eutrofización representan un problema significativo.

2. OBJETIVO

El objetivo general del proyecto LIFE CONQUER es llevar a cabo la demostración de una innovadora tecnología de recuperación de aguas residuales basada en el uso de Nanofiltración Inteligente (Smart NF). Esta tecnología revolucionaria tiene la capacidad de separar la salinidad y los nitratos presentes en las aguas residuales, obteniendo como resultado un agua regenerada

de alta calidad, rica en nutrientes, que puede ser reutilizada para el riego urbano. Al mismo tiempo, se logrará eliminar las sales disueltas concentrándolas en salmueras.

Además, dentro del marco del proyecto LIFE CONQUER, se pretende demostrar la eficacia de un tren de concentración de salmueras y de la electrocloración 3D (EC-3D). Estas tecnologías permitirán aprovechar las salmueras generadas durante el proceso de recuperación de agua y transformar la salinidad concentrada en subproductos de valor, como el hipoclorito de sodio. Estos subproductos son de gran importancia en los procesos de tratamiento de agua, lo que contribuye a un enfoque más sostenible y eficiente en el manejo de los recursos hídricos.

El esquema general del proyecto, representado en la Figura 2, muestra cómo la tecnología de nanofiltración inteligente se utiliza para dividir la salinidad y los nitratos en las aguas residuales, generando agua regenerada de alta calidad para su reutilización en el riego urbano. Al mismo tiempo, se concentran las sales disueltas en salmueras, las cuales son sometidas a un proceso de concentración y posteriormente se valorizan mediante la electrocloración 3D, obteniendo hipoclorito de sodio como subproducto de valor.

El proyecto LIFE CONQUER tiene como objetivo demostrar la viabilidad y eficiencia de esta tecnología innovadora, brindando una solución integral para abordar los desafíos de la salinidad y los nitratos en las aguas residuales. A través de esta iniciativa, se busca promover una gestión más sostenible del agua, fomentando la reutilización y valorización de los recursos hídricos, y contribuyendo así a la conservación del medio ambiente y la mitigación de los impactos asociados a la escasez de agua y la contaminación.

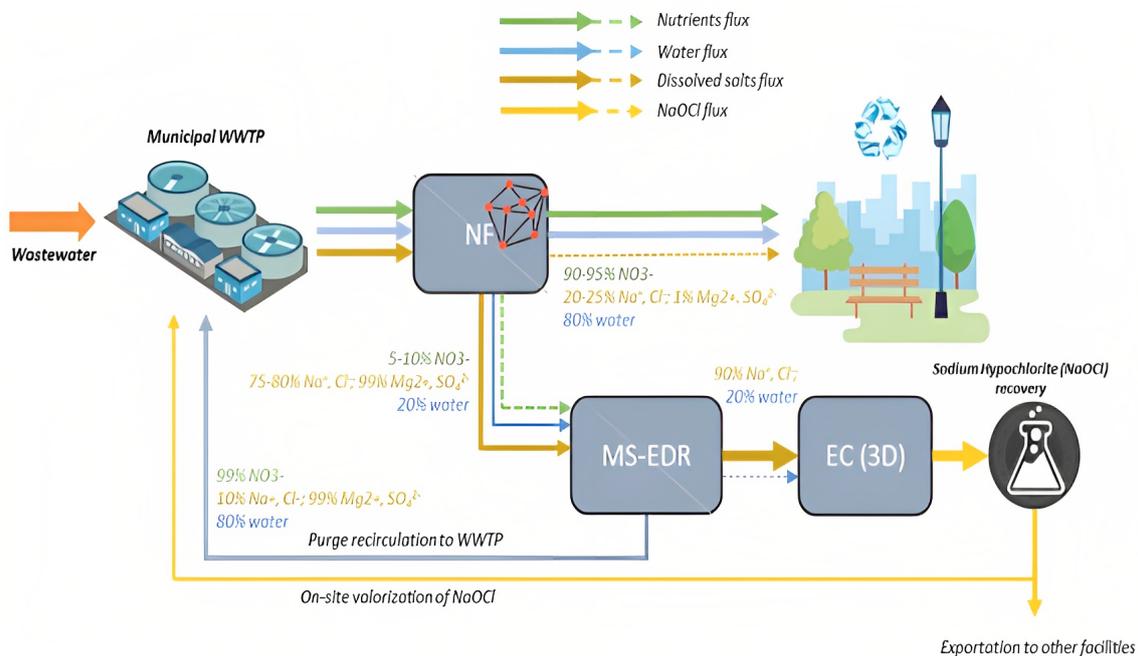


Figura 2. Esquema general del proceso LIFE CONQUER. Fuente: elaboración propia.

3. METODOLOGÍA

La metodología del proyecto LIFE CONQUER se basa en el diseño, construcción, instalación y operación de dos prototipos (nivel de madurez tecnológica TRL 7) en la planta de recuperación de aguas residuales de Zarandona, ubicada en Murcia y operada por EMUASA, estos prototipos se muestran desde el exterior en la Figura 3.



Figura 3. Prototipos proyecto LIFE CONQUER.

El primer prototipo, compuesto por membranas de nanofiltración (Smart NF) se encargará de tratar de forma continua un caudal de 20 m³/h durante el período comprendido entre 2023 y 2024 (Figura 4).



Figura 4. Piloto 1, nanofiltración inteligente (Smart NF).

El segundo prototipo está compuesto por un tren de concentración de salmueras que incluye técnicas de descalcificación con resinas de intercambio iónico (Figura 5A), una etapa de nanofiltración para la eliminación de sulfatos (Figura 5B) y una posterior etapa de ósmosis inversa (Figura 6), donde se recogerá la salmuera para su uso en la etapa posterior de electrooxidación, donde se utiliza un electroclorador alimentado a partir de un rectificador para la producción de hipoclorito de sodio (NaClO).

El agua regenerada generada por los efluentes de la nanofiltración y la planta de recuperación de aguas residuales se mezclará, dando como resultado un volumen de $0,2 \text{ hm}^3/\text{año}$ de agua regenerada rica en nutrientes que cumple con los requisitos establecidos por el Real Decreto 1620/2007 en cuanto a salinidad ($<3,0 \text{ mS/cm}$). Esta agua regenerada se inyectará en la Red Urbana de Riego de la ciudad de Murcia, evitando así la descarga de $0,5$ toneladas equivalentes de nitrógeno (Neq) en los cuerpos de agua receptores. Al mismo tiempo, se producirán 29 toneladas al año de NaClO , que podrán ser reutilizadas como desinfectante en las Estaciones de Depuración de Aguas Residuales (EDAR) operadas por EMUASA.



Figura 5. A. Izquierda: descalcificadora (resinas). 5.A. Derecha: membranas de nanofiltración.



Figura 6. Ósmosis inversa.

En colaboración con la Universidad Politécnica de Cataluña, se desarrollará un innovador algoritmo para simular los perfiles de rechazo de la nanofiltración, en función de los datos de calidad del agua de entrada. Este algoritmo se incorporará en una herramienta de control que permitirá optimizar de forma automática los parámetros de operación, minimizando los costes y asegurando la calidad del agua regenerada. Este enfoque alcanzará un nivel de madurez tecnológica TRL 9, es decir, un nivel de validación y aplicación a escala real.

Mediante la implementación de esta metodología integral, el proyecto LIFE CONQUER busca demostrar la viabilidad y eficacia de la tecnología de nanofiltración inteligente en la recuperación de aguas residuales, contribuyendo así a la conservación y gestión sostenible de los recursos hídricos. Además, se promoverá la reutilización de agua regenerada en el riego urbano, evitando la descarga de contaminantes en los cuerpos de agua naturales y generando subproductos valiosos como el hipoclorito de sodio.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados Piloto 1

Los resultados obtenidos hasta el momento muestran el rendimiento de la tecnología de nanofiltración (NF) en el tratamiento de las aguas residuales en la planta de Zarandona. Se ha logrado una conversión (agua permeada) de entre el 70% y el 85% mediante una configuración de NF de dos etapas. La primera etapa consta de dos tubos de presión con 7 membranas por tubo, cuyo rechazo alimenta la segunda etapa que cuenta con un tubo de presión con 7 membranas. Los

permeados de ambas etapas se combinan en una corriente final que se inyecta en la Red Urbana de Riego de la ciudad de Murcia.

El piloto de NF se encuentra actualmente en funcionamiento en la planta de Zarandona desde enero de 2023, las condiciones de operación (Caudal de alimentación, Caudal de agua regenerada, Presión de operación y pH) se encuentran en la Tabla 1.

Parámetro	Valor
Caudal alimentado (m ³ /h)	20,32
Caudal de agua regenerada (m ³ /h)	16,20
Presión de operación (bar)	6,32
pH	7,31

Tabla 1. Condiciones de operación Piloto 1.
Fuente: elaboración propia.

En la Figura 7 se encuentran representados los caudales obtenidos durante un periodo experimental de 63 días, donde el color más oscuro representa el caudal de agua regenerada (Permeado global, Global permeate en inglés), rondando los 16 m³/h, el caudal de alimentación (Feed, en inglés) ronda valores de aproximadamente 20 m³/h, y el caudal de salmuera (Brine, en inglés), en color más claro, presenta valores de alrededor de los 4 m³/h.

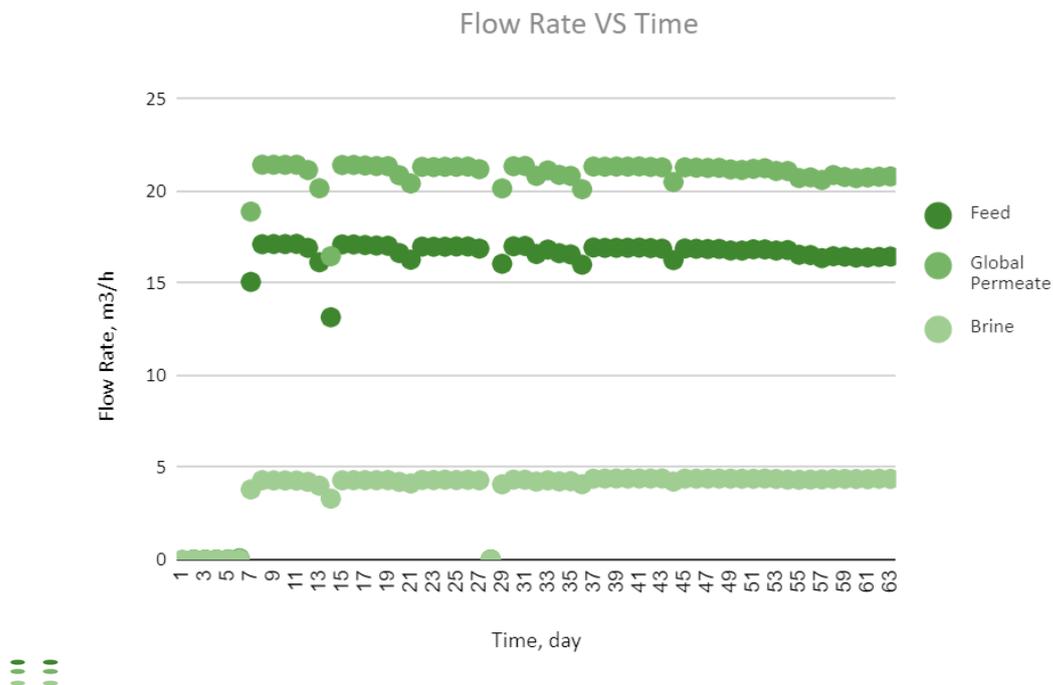


Figura 7. Representación de los datos obtenidos para caudal de alimentación (del inglés, Feed) del permeado global (del inglés, global permeate) y salmuera (del inglés, brines). Fuente: elaboración propia.

Durante la operación del piloto se miden en remoto ciertos parámetros de control, como los caudales de agua alimentada y regenerada, con el que se obtiene un porcentaje de conversión de casi el 80%, y además se mide en remoto el pH, conductividad, nitratos y sólidos suspendidos totales, para los que se han obtenido los resultados que se muestran en la Tabla 2.

Parámetro	Agua contaminada	Agua regenerada	% Recuperación	% Eliminación
CD (mS/cm)	2,35	0,52	-	82,42
NNO3 (mg/l)	4,6	3,7	63,04	-
TSS (mg/l)	3,4	0	-	100

Tabla 2. Parámetros medidos en remoto. Fuente: elaboración propia.

Gracias a estos datos podemos observar que se consigue una recuperación del 63,04% de los nitratos que se alimentan a la planta, reduciendo un 82,42% de la conductividad de la corriente alimentada.

Además, se realizan analíticas tanto semanales como mensuales de ciertos parámetros de interés para realizar un seguimiento de los resultados obtenidos. Se analizan algunos resultados para estos parámetros se muestran en la Tabla 3, donde además se han añadido los porcentajes de eliminación conseguidos gracias a esta tecnología.

Parámetro	Agua contaminada	Agua regenerada	% Eliminación
DQO (mg/l)	4	3,6	28,50
Turbidez (NTU)	0,9	0,5	57,63
Sodio (mg/l)	238	74	75,30
Cloro (mg/l)	463	119	79,58
Magnesio (mg/l)	117	5,4	96,35
Calcio (mg/l)	260	14	95,74
Sulfatos (mg/l)	758	13,2	98,61

Tabla 3. Resultados de analíticas en laboratorio. Fuente: elaboración propia.

4.1.1. Calidad del agua regenerada apta para usos urbanos según Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas

Según este RD, debemos atender a la Calidad 1.2. (Servicios) siendo el propósito de reutilización del agua regenerada para riego de zonas verdes urbanas, donde se han de cumplir con los valores señalados en la Tabla 4.

USOS URBANOS				
	Nemátodos intestinales	Escherichia Coli	Sólidos en suspensión	Turbidez
Calidad 1.2. SERVICIOS Riego de zonas verdes urbanas	1 huevo/10 L	200 (UFC/100 ml)	20 mg/l	10 UNT
Valores analíticos de agua regenerada en proyecto LIFE CONQUER	0 huevo/10 L	0 (UFC/100 ml)	0 mg/l	0,5 UNT

T

Tabla 4. Comparación requisitos RD 1620/2007 con los parámetros obtenidos en laboratorio.
Fuente: Real Decreto 1620/2007.

Tras esta comparación, podemos concluir que el agua regenerada cumple con los requisitos establecidos en este Real Decreto, siendo apta para su uso en el riego de jardines en la Región de Murcia.

4.2. Resultados Piloto 2

En cuanto al piloto de valorización de salmueras, que comprende las unidades de concentración de salmueras y electrocloración, se encuentra en proceso de construcción y puesta en marcha. Este piloto estará alojado en un contenedor de 12 metros y será alimentado por el concentrado del piloto de NF a una tasa de 2 m³/h. La unidad de concentración de salmueras constará de una etapa de adsorción con resinas de intercambio iónico para eliminar el calcio perjudicial para las membranas de las etapas siguientes, seguida de una etapa de NF para la eliminación de los sulfatos y una etapa de ósmosis inversa (OI) para concentrar los iones monovalentes (Cl, Na). La corriente resultante, con alta concentración de sales, podrá ser utilizada como alimentación para la unidad de electrocloración.

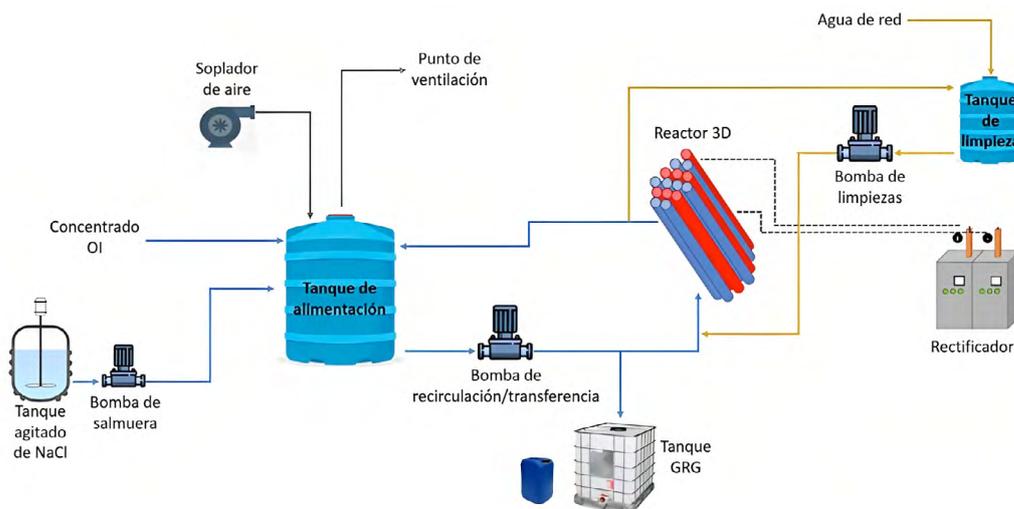


Figura 8. Esquema de proceso del Piloto 2, concentración y valorización de salmueras.

El diseño de la unidad de electrocloración se basa en un modo de operación por lotes. La solución de alimentación se recirculará en un reactor 3D hasta alcanzar la concentración deseada de hipoclorito de sodio, completando así el lote de producción. El proceso se encuentra ilustrado en la Figura 8.

Se realizarán pruebas con soluciones sintéticas de NaCl para evaluar la eficiencia óptima del proceso y encontrar un equilibrio entre la producción de hipoclorito y los costos asociados a la concentración de sal y al consumo eléctrico. Se espera que el diseño innovador del electroclorador permita reducir significativamente su tamaño sin comprometer su rendimiento, logrando una eficiencia un 25% mayor en comparación con los reactores 2D comerciales existentes en el mercado. Actualmente se está tramitando una patente relacionada con este equipo, por lo que no se pueden proporcionar fotografías ni datos específicos sobre esta unidad en particular.

5. CONCLUSIONES

En resumen, los resultados y la discusión, hasta ahora, muestran avances prometedores en el proyecto LIFE CONQUER, tanto en la eficacia de la tecnología de nanofiltración para el tratamiento de aguas residuales como en el desarrollo del piloto de valorización de salmueras mediante electrocloración. Estos avances contribuirán a la obtención de agua regenerada de alta calidad y subproductos valiosos, promoviendo la sostenibilidad en la gestión de recursos hídricos y en la operación de las plantas de tratamiento de aguas residuales.

REFERENCIAS

- España (2007). Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. Boletín Oficial del Estado, 294.