CONAMA 2026

PROYECTO EMERGENTcy (EFA37/01)

Diagnóstico, eliminación y prevención de antibióticos y otros contaminantes emergentes, bacterias resistentes y genes de resistencia a antibióticos en el ciclo urbano del agua del territorio POCTEFA

Edita: Fundación Conama

Año: 2026

Este documento está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.

Personas autoras de la presente comunicación técnica

Autor Principal de la comunicación: Beatriz Laso. Técnico I+D+i. Navarra de Infraestructuras Locales S.A. (NILSA)

Otros Autores: Itsaso Ilzarbe. Técnico I+D+i. Navarra de Infraestructuras Locales S.A. (NILSA)

Pilar Goñi. Investigadora. Universidad de Zaragoza (UNIZAR)

Rosa Mosteo. Investigadora. Universidad de Zaragoza (UNIZAR)

Jairo Gómez. Responsable I+D+i. Navarra de Infraestructuras Locales S.A. (NILSA)

Ana Isabel Vitas Permán. Investigadora. Universidad de Navarra (UNAV)

Lara Pérez-Etayo. Investigadora. Universidad de Navarra (UNAV)

Francisco Javier Fraguas Lasheras. Investigador. Navarrabiomed, Hospital Universitario de Navarra.

Alberto Gil Setas. Investigador. Navarrabiomed, Hospital Universitario de Navarra.

Índice

1. RESUMEN 4

2. INTRODUCCIÓN 5

3. METODOLOGIA 7

3.1. Caracterización de instalaciones y líneas de tratamiento 7

3.2. Cuantificación de microcontaminantes farmacéuticos 8

3.3. Aislamiento de bacterias resistentes prioritarias 9

3.4. Detección de genes de resistencia prioritarios 10

3.5. Tratamiento con Fotocatálisis con TIO2 11

3.6. Carbón activo 11

4. RESULTADOS 12

4.1. Diagnóstico de contaminantes Emergentes 12

4.2. Eliminación de Contaminantes Emergentes 15

4.2.1. Eliminación en EDAR 15

4.2.2. Eliminación de CE con tratamientos cuaternarios 16

4.3. Divulgación - Prevención 18

4.3.1. Plan de comunicación 18

4.3.2. Plan educativo 18

4.3.3. Informe de adaptación normativa 19

5. DISCUSION 20

6. BIBLIOGRAFÍA 22

1. RESUMEN

La presencia de contaminantes emergentes (CE) en las aguas, como fármacos, plaguicidas, biocidas, drogas y cosméticos, supone un riesgo potencial para el medio ambiente y salud humana, entre otras cuestiones por la capacidad de generar resistencias bacterianas, dificultando su tratamiento, aumentando los costes y derivando en una mayor mortalidad. La nueva normativa europea sobre Tratamiento de Aguas residuales (TARU) Directiva (UE) 2024/3019, y la mejora de métodos analíticos disponibles, han permitido avanzar en el conocimiento de la distribución y comportamiento de estos contaminantes en el ciclo del agua. Este estudio ha identificado y cuantificado los principales contaminantes emergentes (CE), como antibióticos, bacterias resistentes (ARB), genes de resistencia (ARG) y otros fármacos en el ciclo urbano del agua (CAU) del territorio POCTEFA. El estudio está proporcionando la base científica y técnica necesaria para implementar tratamientos cuaternarios destinados para optimizar la eliminación de estos CE. Las estaciones depuradoras de agua residuales convencionales presentan cierta capacidad de eliminación mediante los tratamientos aplicados en las líneas de agua y fangos y, su eficacia mejora mediante tecnologías complementarias como son los procesos de oxidación y adsorción.
El proyecto contempla actividades orientadas a la prevención, incluyendo la divulgación de la problemática y de los resultados alcanzando a todo tipo de audiencias, el desarrollo de material técnico y divulgativo específico, y un estudio del marco normativo aplicable para identificar cómo poder integrar el origen de los vertidos en su regulación y gestión.

ABSTRACT
The presence of emerging contaminants (ECs) in water, including pharmaceuticals, pesticides, biocides, illicit drugs, and personal care products, poses a potential risk to both the environment and human health, particularly due to their ability to promote the development of bacterial resistance, making infections more difficult to treat, increasing associated costs, and potentially leading to higher mortality rates. The new European Urban Wastewater Treatment Directive (UWWTD) Directive (UE) 2024/3019, and the improvement of available analytical methods have enhanced our understanding of the distribution and behaviour of these contaminants throughout the water cycle.
This study has identified and quantified the main emerging contaminants (ECs), including antibiotics, antibiotic-resistant bacteria (ARB), antibiotic resistance genes (ARGs), and other pharmaceutical compounds within the urban water cycle (UWC) of the POCTEFA territory. The results are providing the scientific and technical basis required for the implementation of quaternary treatment processes aimed at improving their removal. Conventional wastewater treatment plants (WWTPs) already achieve a certain degree of contaminant removal through water and sludge treatment processes; however, their efficiency can be significantly enhanced through the application of complementary technologies such as oxidation and adsorption processes.
The project also includes prevention-oriented activities, such as raising awareness of the issue and disseminating the project results to a wide range of audiences, developing specific technical and outreach materials, and assessing the applicable regulatory framework to identify how the origin of discharges could be incorporated into future regulation and management strategies.

Palabras clave: *Depuradora urbana, contaminante emergente, sensibilización social, Directiva TARU, tratamiento cuaternario, diagnóstico, reducción*

2. INTRODUCCIÓN

Los contaminantes emergentes, como pueden ser los antibióticos, las bacterias resistentes a antibióticos (ARB) y los genes de genes de resistencia a antibióticos (ARGs) han adquirido especial relevancia debido a su papel en la aparición y propagación de resistencias antimicrobianas, consideradas por la World Health Organization (WHO, 2024) una de las principales amenazas para la salud humana, animal y ambiental, como señala el enfoque One Health (WHO, 2025).

Diversos estudios han demostrado la presencia de antibióticos, bacterias resistentes y genes de resistencia en aguas residuales, efluentes de EDAR y medios receptores, evidenciando la importancia del ciclo del agua como vía potencial de dispersión de la resistencia antimicrobiana (Chen et al., 2023; Duarte-Martínez et al., 2026).

Estas sustancias pueden alcanzar el ciclo del agua tras ser utilizados de forma genérica en actividades sanitarias (uso doméstico, sanitario, veterinaria), industriales y agroganaderas (World Health Organization, 2025; Duarte-Martínez et al., 2026). Una fracción de estos llega a las redes de saneamiento y posteriormente a las depuradoras de aguas residuales (EDAR), donde reciben de forma continua antibióticos junto con bacterias resistentes (ARG), genes de resistencia y otros contaminantes (Samuel et al. 2026, Wengenroth, et al. 2021, Uluseker et al, 2021). Tras el tratamiento de la depuradora el agua tratada retorna al medio ambiente con aquellos compuestos y organismos que los tratamientos convencionales no han podido eliminar. (Figura 1)



Figura 1: Ciclo del agua. Fuente: imagen realizada con IA

Muchos de estos compuestos de preocupación emergente se han investigado desde los años 90 (Daughton et al., 1999), se han monitorizado y seguido en Listas de Observación de la Comisión Europea, que incluyen varios compuestos farmacéuticos y se contemplan también en la reciente Directiva 2024/3019 sobre el tratamiento de aguas residuales urbanas (TARU). En las aguas de la Unión Europea se ha detectado su presencia en controles rutinarios y se ha determinado que los tratamientos actuales logran una reducción insuficiente por lo que requieren un tratamiento denominado cuaternario destinado específicamente para su eliminación. La directiva TARU establece también la obligación de vigilar la resistencia antimicrobiana en las aguas residuales, reforzando el papel de las EDAR como infraestructuras críticas para la salud ambiental.

EMERGENTcy presenta un enfoque público, desde salud y medio ambiente, centrándose en antibióticos, otros Contaminantes emergentes (CE) como fármacos, bacterias resistentes a antibióticos (ARBs) y genes de resistencia a antibióticos (ARGs) en el ciclo urbano de agua (CUA), en el territorio POCTEFA, en una región trasfronteriza entre España y Francia caracterizada por una elevada heterogeneidad hidrológica y demográfica.

El proyecto lo forman 7 socios

NILSA	Empresa pública	Gestión del proyecto, acción de eliminación, Análisis físico químico
UNIZAR	Universidad	Toma de muestras y Análisis con inmuensayos ELISA
UNAV	Universidad	Análisis de bacterias resistentes a Antibióticos (ARB)
Hospital Universitario y Navarrabiomed	Centro de investigación	Análisis de genes de resistencia a antibióticos (ARG)
CNRS-IPREM	Centro de investigación	Análisis de Fármacos (antibióticos y otros)
ECOCENE	Asociación de comunicación científica	Comunicación y educación ambiental
EUROCOB	Empresa privada	Carbón activo a base de mazorca de maíz

Consta de un presupuesto de 1.999.748,36 euros, financiado al 65 % 1.299.834,9 euros, con un plazo 2024-2027 (tras solicitud de prórroga).

Está compuesto de 5 acciones

a) Transversales: 1. Gestión y 2. Comunicación
b) Específicas: 3. Diagnósticos, 4. Eliminación y 5. Prevención

Se centra en la identificación, detección y eliminación de antibióticos y otros fármacos, ARB y ARG en distintas líneas de tratamiento de aguas y fagos. Para ello se analizan 10 EDAR del territorio POCTEFA, que presentan una amplia variabilidad respecto a los tratamientos, habitantes equivalentes. Lo que permite obtener un enfoque integral de las distintitas etapas de los procesos y/o otras variabilidades intrínsecas de área de estudiadas. Se han probado diferentes técnicas de eliminación mediante oxidación avanzada y adsorción. Y se ha realizado un plan de comunicación y difusión de los resultados obtenidos.

3. METODOLOGIA

3.1. Caracterización de instalaciones y líneas de tratamiento

Se han seleccionado diez EDAR del territorio POCTEFA que representan un amplio rango de tamaños y tipologías de tratamientos. Entre ellas, una única instalación supera los 150.000 habitantes equivalentes (h.e.), ocho se sitúan entre 10.000 y 150.000 h.e., y una corresponde a una pequeña instalación por debajo de 10.000 h.e. (Tabla 1). Esta diversidad permite analizar el comportamiento de los microcontaminantes y los elementos de resistencia en contextos operativos muy heterogéneos. Se han realizado dos campañas de muestreo en años consecutivos.
Las EDAR se clasifican en distintos niveles de tratamiento, T1–T4, en función de las etapas presentes en cada instalación. Esta clasificación distingue entre tratamiento primario (T1), biológico (T2), procesos de afino como lagunas o humedales (T3) y tratamiento avanzado (T4), permitiendo describir combinaciones como T1–T2, T1–T2–T3 o T1–T2–T4. La tabla 1 muestra las características y tratamientos de las EDAR estudiadas. Cabe destacar que esta agrupación no coincide plenamente con la tipología definida en la Directiva (UE) 2024/3019, ya que en el marco de este estudio la eliminación de nutrientes, considerada tratamiento terciario en la normativa, se ha integrado dentro del tratamiento biológico (T2), al formar parte de los procesos habituales de las EDAR analizadas.

Tabla 1: características y tratamientos de las EDAR estudiadas

	Hab. Equv.	Tipo de tratamiento	T1	T2	T3	T4
EDAR 1	26.000	T1-T2-T4	Pretratamiento + D. primaria	Fangos activos	-	Ultrafiltración
EDAR 2	110.000	T1-T2	Pretratamiento + D. primaria	Fangos activos	-	-
EDAR 3	100.000	T1-T2	Pretratamiento + D. primaria	Filtros percoladores	-	-
EDAR 4	527.000	T1-T2	Pretratamiento + D. primaria	Fangos activos	-	-
EDAR 5	13.000	T1-T2	Pretratamiento	Fangos activos	-	-
EDAR 6	120.000	T1-T2	Pretratamiento + D. primaria	Fangos activos	-	-
EDAR 7	35.000	T1-T2-T3	Pretratamiento + D. primaria	Filtros percoladores	Lagunas	-
EDAR 8	12.000	T1-T2-T3	Pretratamiento	IFAS + Filtro percolador	Lagunas	-
EDAR 9	340	T1-T2-T3	Imhoff	Din don	Humedal	-
EDAR 10	22.000	T1-T2	Pretratamiento	IFAS	-	-

La categoría T1 incluye el pretratamiento y la separación primaria de sólidos mediante decantación primaria o tanques Imhoff, según la tipología de la instalación. La categoría T2 corresponde a los tratamientos biológicos e incorpora sistemas de fangos activos, filtros percoladores, IFAS (Integrated Fixed-Film Activated Sludge, que combina biomasa suspendida y soportes de crecimiento biofilm) y, en instalaciones pequeñas, el sistema extensivo Din Don (una tecnología extensiva similar a un filtro percolador de piedra que opera sin consumo energético). La categoría T3 agrupa los procesos de afino basados en tecnologías basadas en la naturaleza, que son lagunas y humedales. La categoría T4 incluye los tratamientos avanzados. En este caso únicamente está implantada una membrana de

ultrafiltración (tamaño de poro 0,04 µm), cuyo objetivo es la retención de sólidos finos y microorganismos.
En paralelo, en la línea de fangos se ha estudiado el fango primario, secundario y mixto y en cuanto a tratamientos en las EDAR más grandes se incluye el espesamiento, digestión anaerobia en régimen mesófilo o termófilo, deshidratación, secado solar, compostaje y finalmente aplicación agrícola. Todos estos tratamientos abarcan las etapas habituales de gestión y estabilización de fangos urbanos.

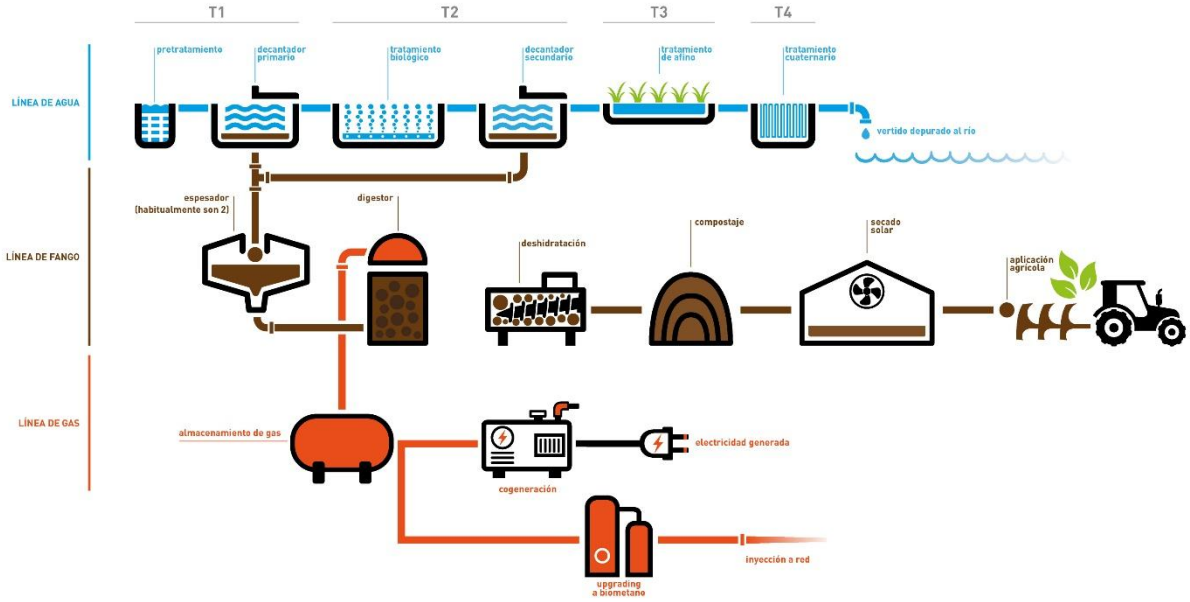


Figura 1: representación de los principales tratamientos de las EDAR estudiadas.

3.2. Cuantificación de microcontaminantes farmacéuticos

Se realiza un cribado preliminar en aguas de entrada y salida de dos EDAR del territorio POCTEFA, identificando 143 compuestos farmacéuticos, entre ellos fármacos y metabolitos. Los compuestos detectados abarcan una amplia diversidad química, con predominio de antibióticos, analgésicos, antiinflamatorios, psicofármacos, antiepilépticos, medicamentos cardiovasculares y anticoagulantes, antifúngicos, antiparasitarios, drogas de abuso y otros microcontaminantes. Dentro de los antibióticos, las familias más frecuentes son las fluoroquinolonas, macrólidos, sulfonamidas y penicilinas.

A partir de este cribado, y teniendo en cuenta también datos de la bibliografía y los patrones de consumo farmacológico, se seleccionan 18 antibióticos y otros 21 fármacos (Tabla 2) para su seguimiento cuantitativo. El análisis se realiza mediante Cromatografía Líquida de Ultra Rendimiento (UPLC) acoplada a LC-MS/MS, siguiendo un protocolo de preparación de muestras basado en la metodología EPA 1694, adaptado a un sistema automatizado de

extracción. Este procedimiento permite la determinación estandarizada de fármacos y antibióticos en matrices de agua y fango con criterios analíticos homogéneos.

Tabla 2: fármacos seleccionados.

	Sustancia	Tipo de fármaco
	AMX diketo piperazine	Antibiótico
	AMX pencilloic acid	
	Azithromycin	
	Ciprofloxacin	
*1	Clarithromycin	
	Clindamycine	
	Doripenem	
	Enrofloxacin	
	Levofloxacin	
	Meropenem	
	Metronidazole	
	Norfloxacin	
	Pirlimycin	
	Rifaximin	
	Sulfadiazine	
	Sulfamethoxazole	
	Sulfapyridine	
	Trimethoprim	

	Sustancia	Tipo de fármaco
	Codeine	Analgesico
	Paracetamol	
	Ketamine	Anestesico
	Lorazepam	Ansiolitico
	Lormetazepam	
	Oxazepam	
	Omeprazole	Antiacido
	Rivaroxaban	Anticoagulante
*1	Carbamazepine	Anticombulsivo
	Amitriptyline	Antidepresivo
	Fluconazole	Antifungico
*2	Irbesartan	Antihipertensivo
	Losartan	
	Valsartan	
*1	Venlafaxine	
*1	Diclofenac	Antiinflamatorio
	Ketoprofen	
	Atenolol	Betabloqueador
*1	Metoprolol	
	Iopromide	Decontraste
	Atorvastatin	Hipolipemiante

*1 TARU - Categoría 1
*2 TARU – Categoría 2

S. Prioritaria | Lista observación 2025

3.3. Aislamiento de bacterias resistentes prioritarias

Para la detección de bacterias resistentes (ARB) se selecciona un conjunto de siete patógenos prioritarios incluidos en la lista de microorganismos de mayor relevancia para la salud humana publicada por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2024). Tres pertenecen al grupo de prioridad crítica, *Acinetobacter baumannii* resistente a carbapenémicos, enterobacterias resistentes a cefalosporinas de tercera generación y enterobacterias resistentes a carbapenémicos, y cuatro al grupo de prioridad elevada, Salmonella resistente a quinolonas, *Enterococcus faecium* resistente a vancomicina, *Pseudomonas aeruginosa* resistente a carbapenémicos y *Staphylococcus aureus* resistente a meticilina (MRSA).

Para su aislamiento se desarrollan seis protocolos específicos, cada uno basado en medios de cultivo selectivos y condiciones adecuadas para favorecer el crecimiento de las bacterias objetivo y permitir la detección de los fenotipos de resistencia definidos. Estos protocolos son validados utilizando cepas de referencia resistentes, procedentes de la colección del Laboratorio de Microbiología de Alimentos y Aguas de la Universidad de Navarra (incluyendo cepas de la CECT, aislados ambientales y clínicos).

3.4. Detección de genes de resistencia prioritarios

Para la caracterización del resistoma en muestras de agua y fango se selecciona un enfoque basado en metagenómica tipo shotgun, con el objetivo de detectar genes de resistencia adquirida presentes en las comunidades microbianas. Siguiendo criterios de la literatura y las recomendaciones del borrador de la Directiva (UE) 2024/3019, se prioriza la identificación de genes de resistencia adquiridos incluidos en bases de datos de referencia consolidadas (ResFinder, CARD), excluyendo los mecanismos basados en mutaciones puntuales en genes diana. (Jojoa-Sierra, et al., 2026)

La extracción de ADN se adapta al tipo de matriz: se utiliza DNeasy PowerSoil Pro (Qiagen) para fangos y aguas turbias (tras precentrifugación) y DNeasy PowerWater (Qiagen) para aguas claras. Las bibliotecas se preparan con Illumina DNA Prep y se secuencian en plataforma Illumina MiSeq, tras controles de calidad, cuantificación mediante Qubit y validación del tamaño por QIAxcel.

La metodología bioinformática sigue un flujo estandarizado: control de calidad y recorte con Trimmomatic, eliminación de lecturas de ADN humano mediante Bowtie2, ensamblaje metagenómico con MEGAHIT, y detección de ARG mediante diferentes estrategias complementarias. Se emplean ABRicate con las bases de datos ResFinder y CARD, ResFinder en línea de comando y RGI (CARD) para la anotación basada en modelos específicos de esa base de datos. Como criterio común se aplica un umbral mínimo de identidad ≥80% y cobertura ≥30%. Adicionalmente, se utiliza DeepARG, basado en modelos de aprendizaje profundo, para ampliar la identificación a posibles ARG no caracterizados previamente.

Las secuencias metaensambladas se agrupan en MAGs (Metagenome-Assembled Genomes) mediante MetaBAT2, y estos se clasifican taxonómicamente con Kraken2 y Bracken, utilizando la base de datos estándar actualizada.

3.5. Tratamiento con Fotocatálisis con TIO2

El tratamiento de fotocatálisis con TIO_2 se ha realizado utilizando la patente ES2585087: Proceso fotocatalítico en continuo para la depuración de un medio líquido y reactor para llevarlo a cabo.

Para el proceso de fotoxidación se han utilizado varias lámparas UVA y UVC.

La fotocatálisis heterogénea ha mostrado un elevado potencial para la eliminación simultánea de antibióticos, bacterias resistentes y genes de resistencia mediante la generación de especies reactivas capaces de oxidar contaminantes e inactivar microorganismos (Chen et al., 2023; Bai et al., 2022).

Para mejorar la eficiencia de las lámparas se adquieren lámparas fluorescentes UVA de 36 W con LED UVA de 55W y 6.5 W.

3.6. Carbón activo

El carbón activo constituye una de las tecnologías más implantadas para la eliminación de microcontaminantes orgánicos debido a su elevada capacidad de adsorción y facilidad de integración en tratamientos avanzados (Chen et al., 2023).

Se crean varios carbonos activos a base de residuos de mazorcas de maíz.

Se utilizan dos tipos de productos EU-Grits y EU-feeds, y se aplican dos sistemas de activación mediante NaOH y $H3PO_4$.

4. RESULTADOS

4.1. Diagnóstico de contaminantes Emergentes

Durante 4 campañas se han tomado un total de 160 muestras de diferentes épocas del año (enero-febrero y septiembre-octubre), en 5 municipios distribuidos entre España y Francia, que incluyen los diferentes puntos del ciclo de agua urbano: ríos aguas arriba y aguas abajo del vertido de la EDAR; domésticos; no doméstico: hospitalarios, residencias de mayores; industriales: mataderos, industrias… EDAR entrada y salida.

Para la selección de los puntos se considera la pertinencia de la muestra, permisos de recolección, tipos y acceso a los colectores, y representatividad de la muestra.

En la siguiente figura 2 se identifican los fármacos y antibióticos que dominan el sistema

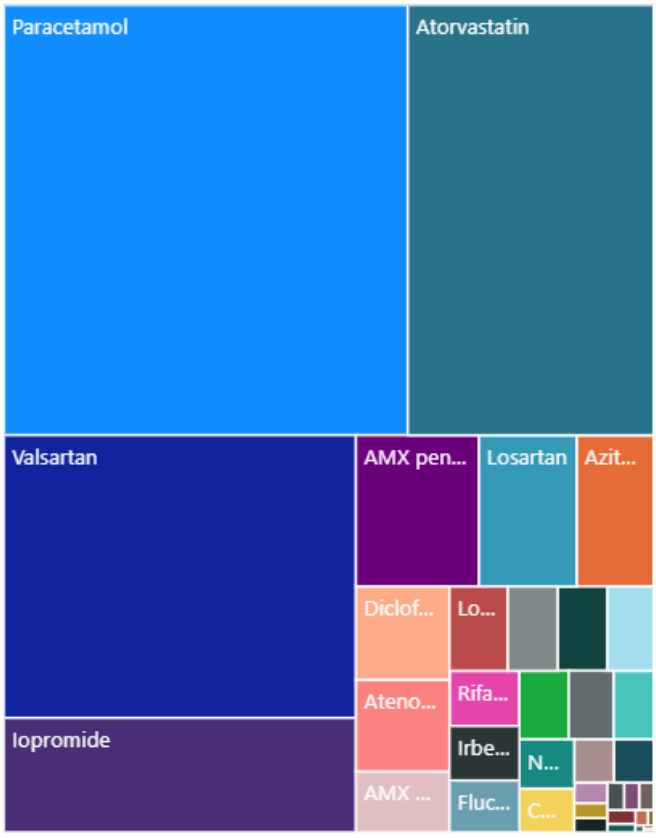


Figura 2: Contaminantes emergentes diagnosticados en el ciclo del agua de POCTEFA

Predominan el paracetamol (alivio de dolor y fiebre), atorvastatin (reducción de colesterol), Valsartan (control de la presión arterial, protección del corazón), y Iopromide (medio de contraste) respecto al resto de sustancias. A destacar que las unidades en las que han sido detectadas son ng/L,

Al comparar entre los vertidos se observan variaciones entre los tipos de fármacos utilizados.

También se observan diferencias entre los mismos tipos de origen (Figura 3)

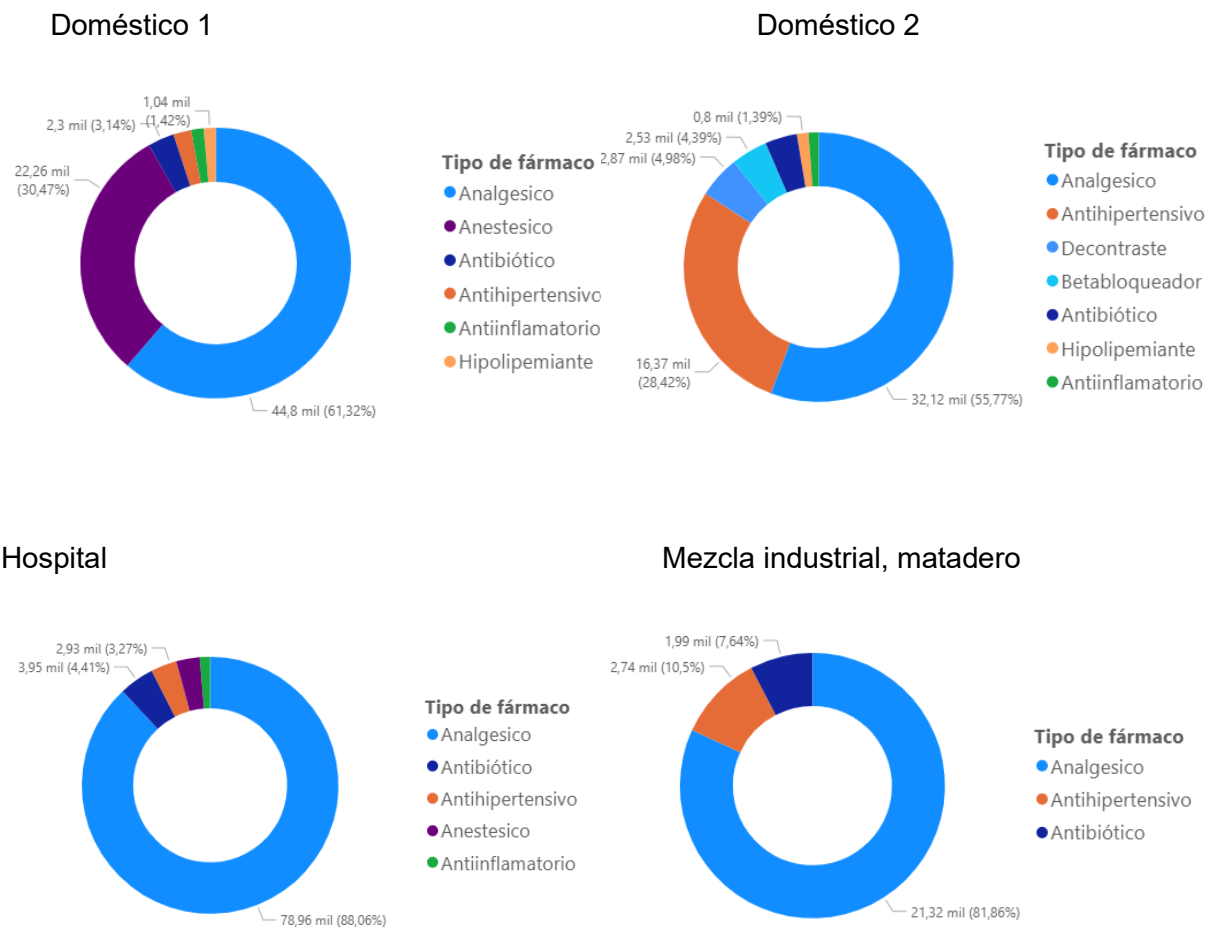


Figura 3: Tipo de fármacos según origen del vertido

Si se analizan los compuestos considerando la concentración y diversidad de los contaminantes según el tipo de muestra durante los muestreos realizados (Figura 4).

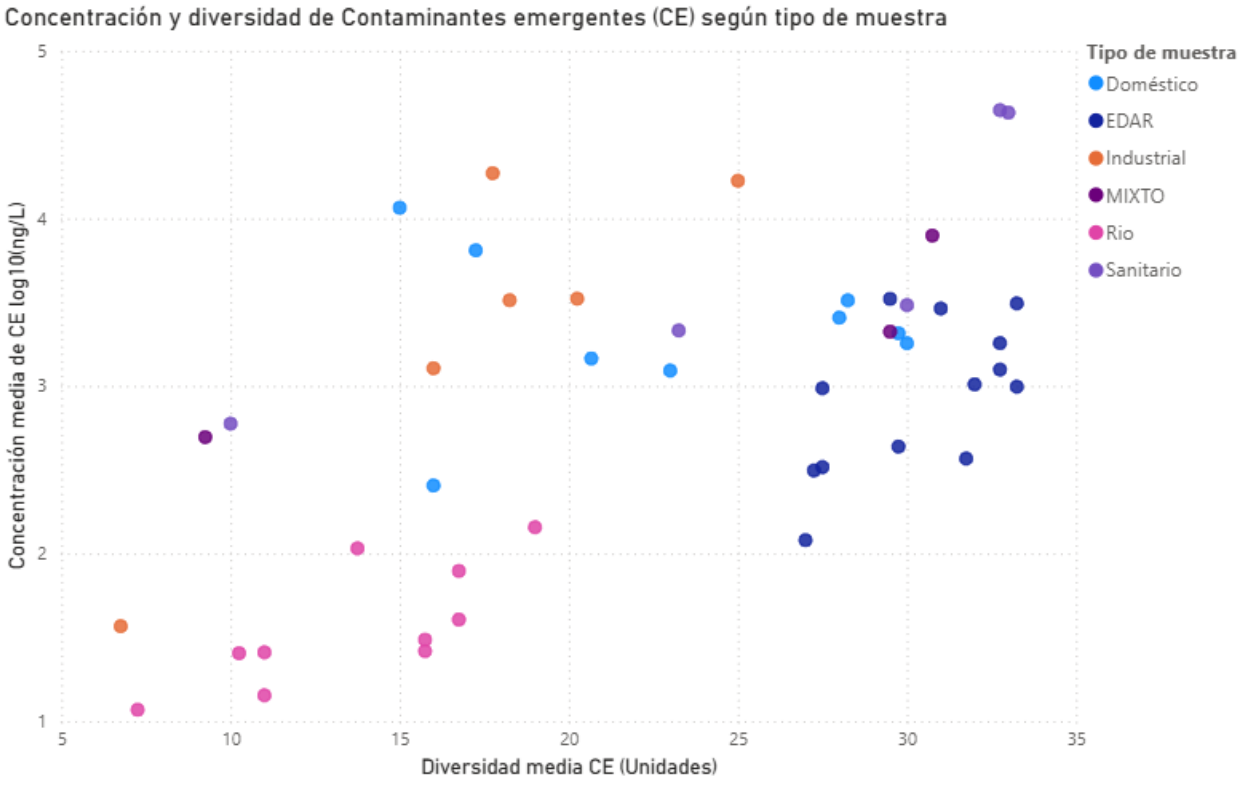


Figura 4: Concentración y diversidad de contaminantes emergentes según tipo de muestra.

Se observa que los vertidos con mayor concentración de contaminantes emergentes corresponden a los vertidos de origen sanitario, e industriales, seguida de los de origen doméstico y EDAR con gran variabilidad entre muestras. Los valores menores se observan en las muestras de ríos.

La mayor diversidad de contaminantes emergentes se observa en el ámbito sanitario y en las EDAR, y disminuye en el ámbito doméstico e industrial, obteniéndose los valores más bajos otra vez en los ríos. Destaca una gran variación entre los mismos tipos de orígenes.

En los ríos se observa que la discrepancia de valores de concentración aguas abajo de la EDAR estaban influenciados por el caudal de la EDAR y del propio río. En caudales menores la concentración de contaminantes emergentes es mayor, mientras en ríos con mayor caudal la concentración es menor posiblemente debido al efecto de dilución.

Se detectan bacterias resistentes en colectores (domésticos, hospital, residencia de mayores) y en EDAR, pero no en ríos.

Predominan las enterobacterias BLEE y resistentes a Carbapenemes (EPC), pero no se detecta a Salmonella resistente a quinolonas.

4.2. Eliminación de Contaminantes Emergentes

4.2.1. Eliminación en EDAR

Se realiza un análisis en el que analiza el comportamiento de los CE a su paso por la EDAR, verificando los resultados obtenidos a la entrada y la salida de la EDAR (Figura 5).

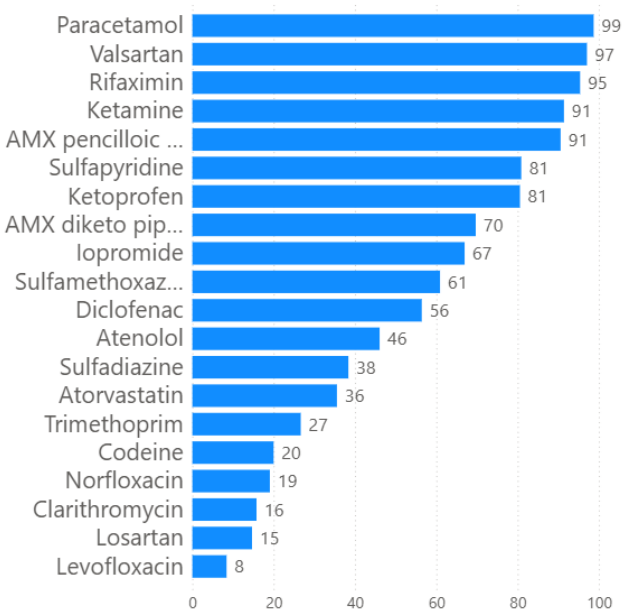


Figura 5: Porcentaje de eliminación de los contaminantes emergentes de las EDAR con tratamientos convencionales,

Se observan que hay fármacos como el paracetamol en la que hay una casi eliminación total de la sustancia, mientras que en otras como la levofloxacina su reducción está bastante limitada.

En las líneas de agua se detectan bacterias resistentes a antibióticos como las Enterobacterias ESBL, y Enterobacterias CARBA y Pseudomonas CARBA en fangos primarios y secundarios. Pero estas bacterias disminuyen a valores < 10 ufc/ml a la salida de la línea de las aguas y tras el tratamiento de los fangos mediante digestión anaerobia y compostaje.

Al revisarse los genes de resistencia a antibióticos, se observa una abundancia relativa de genes de resistencia a antibióticos, que es reducida a la salida de agua y tras los tratamientos de fangos (Figura 6).

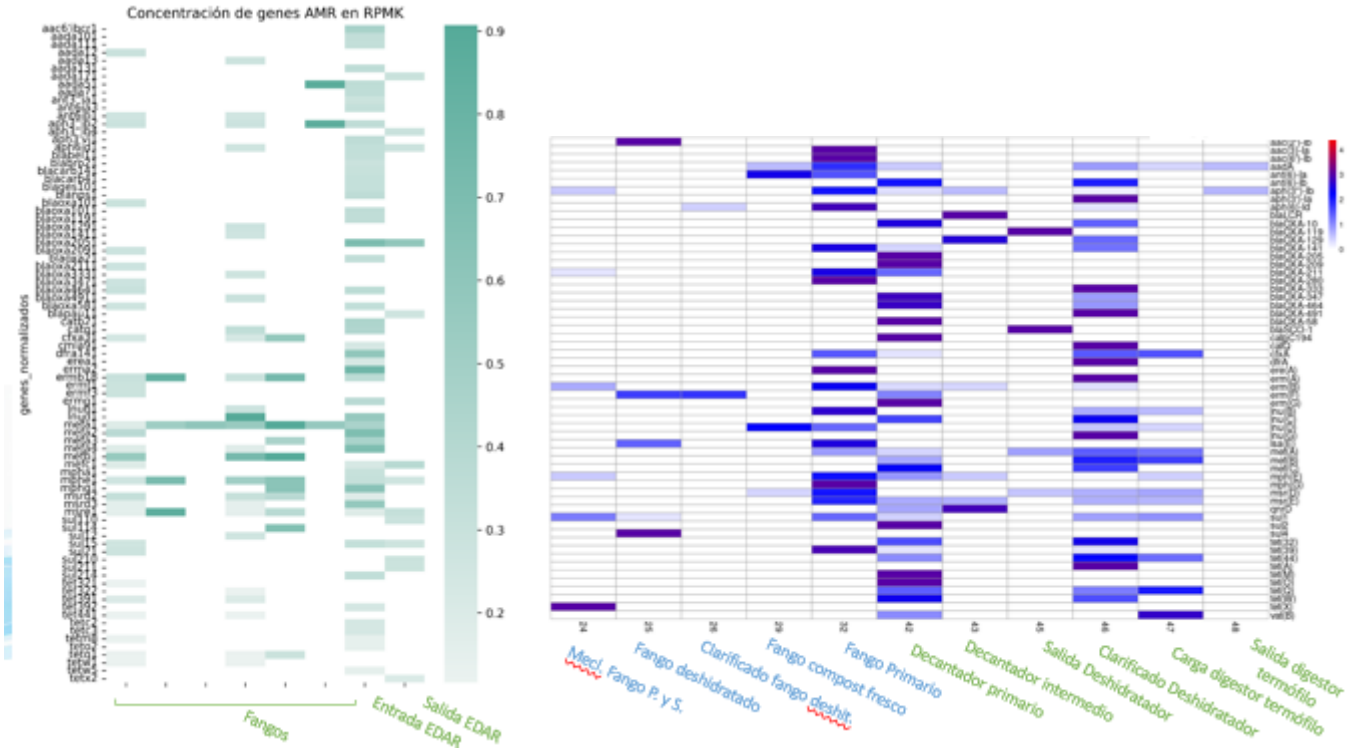


Figura 6: Concentración y diversidad de genes de resistencia a antibióticos en la EDAR

4.2.2. Eliminación de CE con tratamientos cuaternarios

4.2.2.1. Fotocatálisis con TiO2

Se han realizado pruebas con tratamientos de oxidación avanzada y adsorción.

La fotocatálisis ha mostrado un elevado potencial para la eliminación simultánea de antibióticos, bacterias resistentes y genes de resistencia mediante la generación de especies reactivas capaces de oxidar contaminantes e inactivar microorganismos (Chen et al., 2023; Bai et al., 2022)

La fotocatálisis se ha empleado en el proyecto antecesor POCTEFA OUTBIOTICS. NILSA dispone de una patente mediante procesos de fotocatálisis en combinación con carbono activo donde se ha comprobado la eliminación de contaminantes emergentes. Sin embargo, el coste de su tratamiento es relativamente elevado respecto al coste del tratamiento convencional del proceso de depuración. En este estudio se ha optimizado del proceso, ajustando el gasto energético mediante la utilización de lámparas LED, cuyo consumo es inferior a las lámparas fluorescentes pero cuyos resultados son muy similares, consiguiendo una reducción del gasto 27 % con la menor potencia de 6.5W.

Se comparan los resultados obtenidos en fotocatálisis con TIO_2 durante 2 horas con diferentes lámparas: UVC y UVA. Los resultados muestran eliminaciones por encima del 80 % para ambas lámparas para el Norfloxacin, Riflaximin, Sulfapyridine, Clindamycine, Astorvastatin, Clarithromycin y Azitrhomycin, Amitriptyline. Además, la lámpara UVA consigue el mismo efecto en Codeine, Amoxiciline, levofloxacin, ciclofloxacina, losartan, sulfametoxacine y paracetamol. Y el UVC únicamente mejora al UVA en el Ketoprofen.

En general la lámpara UVA tiene un mínimo de eliminación del 50 % de todos los compuestos, con un promedio del 80 %. Mientras que con la UVC se obtiene un valor medio de eliminación del 50 % con rangos de eliminación mínimos del 13 %.

Además, se observa que el diclofenaco en contacto con la luz UVA se transforma en otras sustancias, que podrían tener mayor toxicidad según otros estudios (Cruz, et al, 2025 y Fischer et al, 2020)

Respecto a los análisis realizados de ARB y ARG tras el tratamiento de fotocatálisis, no se detectan bacterias resistentes, ni ADN en los análisis metagenómicos, lo que coincide con diversos estudios en los que se observa que además de la eliminación del antibiótico, la fotocatálisis puede contribuir a la inactivación de bacterias resistentes y a la degradación del ADN extracelular portador de genes de resistencia (Chen et al., 2023; Bai et al., 2022).

4.2.2.2. Carbón activo

Se comprobó la eficacia a escala de laboratorio para la eliminación de contaminantes emergentes: diclofenaco, paracetamol, trimetoprima. Se prueban 4 sustancias y se compara con un carbono activo comercial. Se observan resultados muy similares entre ambos carbones, e incluso una capacidad de recuperación superior en el carbón no comercial. Al revisar las características se observa una mayor superficie específica y menor volumen del mesoporo.

Se observa la eficacia del carbón activo en antibióticos y otros contaminantes emergentes, aunque su mecanismo principal se basa en la adsorción y no implica necesariamente la degradación de los contaminantes ni de los genes de resistencia presentes en el agua debido a su elevada capacidad de adsorción (Chen et al., 2023).

Para la validación de los resultados está previsto realizar pruebas a escala piloto semi industrial con agua residuales.

4.3. Divulgación - Prevención

4.3.1. Plan de comunicación

Se ha impulsado un plan de comunicación y difusión de la problemática de los resultados obtenidos del proyecto dirigido a la ciudanía, a comunicad educativa, científica, profesionales, de la salud, y del agua. Para ellos se han utilizado diferentes medios, como son la web del proyecto (https://www.emergentcy.eu/es/), redes sociales que muestran noticias periódicas del proyecto y temáticas afines; newsletters, workshop y jornada técnicas en los que se muestran los avances del proyecto; congresos y actividades académicas dirigidos al público y personal sanitario. Todo ello ha favorecido crear nuevas sinergias y contactos y elaborar nuevos grupos de colaboración con diferentes entidades y dar a conocer el proyecto y sus objetivos.

4.3.2. Plan educativo

Se ha diseñado y elaborado una maleta pedagógica específica para el proyecto, cuyo objetivo es transmitir los conocimientos adquiridos de una forma lúdica. Su objetivo principal es prevenir el uso indiscriminado de los antibióticos. Para ello, se han realizado varios juegos con cartas – dinámicas que permiten adquirir conocimientos del ciclo del medicamento desde que lo ingieren como pasa a través del cuerpo y llega a la red de aguas residuales. También se quieren desmonar mitos/fake respecto al uso de los mismos y mostrar la evolución de las campañas de prevención a lo largo de los años y según los países (los mensajes de España y Francia son diferentes). Así mismo, hay juegos de rol que incluyen representar a los diferentes agentes sociales y que permiten ver diferentes puntos de vista y obtener acciones de mejoras según la problemática, y un juego de preguntas con puntuación que desafía el conocimiento adquirido al respecto (Figura 7).

El material ha sido mostrado en varios ámbitos de jornadas y personal especializado en educación, y generado interés en su contenido y su uso. Será utilizado en institutos de España y Francia.



Figura 7: Imágenes del contenido de la maleta pedagógica

4.3.3. Informe de adaptación normativa

La Directiva de sobre tratamiento de agua residuales urbanas 2024/3019 (TARU) incluye la implementación de cuaternarios en EDAR de más de 1500.000 habitantes equivalentes y 10.000-150.000 en zonas sensibles a contaminantes Emergentes.
Incluye un listado de contaminantes emergentes que está compuesto de 12 sustancias que incluyen 1 herbicidas y 11 compuestos farmacéuticos, establece una reducción del 80 % tras el tratamiento de las estaciones de tratamiento de agua residuales.

Los contaminantes emergentes también controlan el resto del ciclo de agua, Agua de consumo a través de la Directiva (98/83/CE) y Directiva de aguas consumo humano (2020/2184); y agua ambiental a través de la Directiva Marco de Agua (200/60/CE), Directiva Normas de Calidad Ambiental (NCA) (2008/105/CE) y Directiva 2026.

Sin embargo, en estas normativas no se considera el origen del vertido, y los estudios del proyecto muestran que el origen es un factor para considerar porque puede influir en su correcta gestión y tratamiento.

En este contexto se ha comenzado un estudio que recogerá toda la normativa relacionada, y se están buscando las herramientas – requisitos para permitir que esta pueda ser adaptada considerando el origen de vertido en la regulación del vertido.

5. DISCUSION

Los resultados obtenidos evidencian una dinámica claramente condicionada por el origen de los vertidos. Las mayores concentraciones y diversidades de antibióticos, bacterias resistentes a los antibióticos (ARB) y genes de resistencia a los antibióticos (ARG) se han identificado en los vertidos procedentes de centros sanitarios, mientras que los entornos naturales, como los ríos, presentan generalmente menores concentraciones y una menor diversidad de contaminantes. Asimismo, se ha observado una elevada variabilidad entre muestras de un mismo tipo de origen, atribuible a factores como la localización geográfica (país y ciudad), la fecha de muestreo, las características específicas del vertido y las condiciones de funcionamiento de cada sistema.

Se ha constatado que los tratamientos convencionales de depuración, tanto en la línea de agua como en la línea de fangos, aunque no fueron diseñados específicamente para la eliminación de contaminantes emergentes o elementos asociados a la resistencia antimicrobiana, son capaces de reducir notablemente sus concentraciones. Además, la combinación de estos tratamientos con tecnologías complementarias, como la fotocatálisis con TiO_2 y la adsorción mediante carbón activo en la línea de agua, así como la digestión anaerobia y el compostaje en la línea de fangos, incrementa los rendimientos de eliminación observados.

Estos resultados ponen de manifiesto el papel fundamental de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) como barrera sanitaria para la protección de la salud pública y del medio ambiente, limitando la liberación al medio receptor de contaminantes emergentes, antibióticos, ARB y ARG. En este contexto, las EDAR constituyen un elemento estratégico dentro del enfoque One Health para la mitigación de la resistencia antimicrobiana.

Respecto a los tratamientos cuaternarios evaluados, la fotocatálisis con TiO_2 ha mostrado resultados prometedores, alcanzando eficiencias de eliminación superiores al 80 % para determinados compuestos. No obstante, resulta necesario continuar optimizando estas tecnologías considerando simultáneamente su eficacia, consumo energético y costes de explotación, ya que el comportamiento de los distintos contaminantes frente a los tratamientos avanzados es variable. Asimismo, será necesario completar la evaluación de los procesos de adsorción con carbón activo y comparar sus resultados con otras tecnologías avanzadas, como la ozonización, para realizar una valoración técnico-económica integral que permita identificar las soluciones más eficientes y sostenibles para su implantación a escala real.

Los resultados obtenidos evidencian la necesidad de seguir avanzando en la implantación de tecnologías avanzadas de tratamiento y de reforzar los programas de vigilancia y seguimiento de la resistencia antimicrobiana en el ciclo integral del agua. Del mismo modo, es necesario optimizar tanto la línea de agua como la línea de fangos para mejorar la eliminación de antibióticos, ARB y ARG, contribuyendo al cumplimiento de los objetivos ambientales y sanitarios establecidos en la Directiva (UE) 2024/3019.

Por otra parte, el plan de comunicación desarrollado ha permitido transferir los conocimientos generados a la ciudadanía, la comunidad educativa, científica y técnica, así como a los profesionales de los sectores del agua y la salud. Las acciones de divulgación han contribuido a aumentar la sensibilización sobre el uso responsable de los medicamentos, el funcionamiento del ciclo integral del agua y el comportamiento de los antibióticos y de los mecanismos de resistencia antimicrobiana en los distintos compartimentos ambientales.

El material pedagógico elaborado ha generado un notable interés y se ha consolidado como una herramienta eficaz para divulgar la problemática abordada y los objetivos del proyecto, favoreciendo la concienciación ciudadana y la prevención del uso inadecuado de antibióticos.

En conjunto, los resultados obtenidos ponen de manifiesto la importancia de conocer el origen de los vertidos, la presencia y comportamiento de los contaminantes emergentes y las tecnologías disponibles para su tratamiento a lo largo del ciclo integral del agua. Asimismo, respaldan la necesidad de estudiar posibles adaptaciones de la regulación de los vertidos en función de su origen y carga contaminante, favoreciendo estrategias de prevención, control y tratamiento más eficientes. Todo ello contribuye así a una gestión más sostenible de los recursos hídricos, a la reducción de la propagación de la resistencia antimicrobiana y a una mejor protección de la salud pública y del medio ambiente.

RECONOCIMIENTOS

El proyecto EMERGENTcy (EFA37/01) ha sido cofinanciado al 65% por la Unión Europea a través del Programa Interreg VI-A España-Francia-Andorra (POCTEFA 2021-2027). El objetivo del POCTEFA es reforzar la integración económica y social de la zona fronteriza España-Francia-Andorra".

6. BIBLIOGRAFÍA

Alduina, R. (2024). The role of wastewater treatment plants in dissemination of antibiotic resistance genes. *Microorganisms*, *12*(7), 1468. doi.org

Bai, X. et al. (2022). *Photocatalytic Degradation of Some Typical Antibiotics*. International Journal of Molecular Sciences, 23. DOI : 10.3390/ijms23158130.

Daughton, C. G., & Ternes, T. A. (1999). Pharmaceuticals and personal care products in the environment: agents of subtle change? *Environmental Health Perspectives*, *107*(suppl 6), 907-938. doi.org

Duarte-Martínez, M.R. et al. (2026). *Antibiotic Resistance Genes in Wastewater: A Systematic PRISMA-Guided Review on Risk, Genetic Transfer and Removal Technologies*. Journal of Xenobiotics. DOI: 10.3390/jox16030094.

DIRECTIVA (UE) 2024/3019 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 27 de noviembre de 2024

Muñoz, E., Tseberlidis, G., Husien, A., Binetti, S., Gosetti, F (2025). Identification and ecotoxicity of the diclofenac transformation products formed by photolytic and photocatalytic processes. Environmental Science and Pollution Research (2025) 32:12700–12712 https://doi.org/10.1007/s11356-025-36466-5

Fischer, K., Sydow, S., Griebel, J., Naumov, S., Elsner, C., Thomas, I., Latif A. and Schulze, A. (2022). Enhanced Removal and Toxicity Decline of Diclofenac by Combining UVA Treatment and Adsorption of Photoproducts to Polyvinylidene Difluoride. Polymers.

Moles, S., Goñi P., Jojoa, D., Ilzarbe, I., Angaïts, A., Szpunar, J. (2026). Occurrence, Fate, and Mobility of Antibiotic and Pharmaceutical Residues in Wastewater, River Water, and Urban Waters in France and Spain. Approved.

Wang, J., Chu, L., Wojnárovits, L., & Takács, E. (2020). Occurrence and fate of antibiotics, antibiotic resistant genes (ARGs) and antibiotic-resistant bacteria (ARBs) in municipal wastewater treatment plant: An overview. *Science of The Total Environment*, *744*, 140997. doi.org

Cansu Uluseker1†, Krista Michelle Kaster1†, Kristian Thorsen2, Daniel Basiry1, Sutha Shobana3, Monika Jain4, Gopalakrishnan Kumar1, Roald Kommedal1 and Ilke Pala-Ozkok1* A Review on Occurrence and Spread of Antibiotic Resistance in Wastewaters and in Wastewater Treatment Plants: Mechanisms and Perspectives. 2021. Front. Microbiol., 11

Wengenroth, L., Berglund, F., Blaak, H., Chifiriuc, M. C., Flach, C. F., Pirc Marolt, T., ... & Schmitt, H. (2021). Antibiotic resistance in wastewater treatment plants and transmission risks for employees and residents: The concept of the AWARE study. *Antibiotics*, *10*(5), 478. doi.org

World Health Organization (WHO). WHO Bacterial Priority Pathogens List, 2024 *Bacterial pathogens of public health importance to guide research, development and strategies to prevent and control antimicrobial resistance*. WHO Document Production Services, Ginebra, Suiza. 2024b.

World Health Organization (WHO) (2025). *Wastewater and Environmental Surveillance: Summary for Antimicrobial Resistance*. World Health Organization.

CONAMA 2026