



Proyecto Life Amia: tecnologías innovadoras para la depuración y eliminación de microcontaminantes en aguas

El proyecto Life Amia pretende validar un nuevo concepto de estación depuradora de aguas residuales (EDAR), innovador y sostenible, combinando un tratamiento compacto anaerobio-aerobio (A²C), un biorreactor de microalgas (HRAP) y un proceso de adsorción con oxidación avanzada (POA). El proyecto busca ofrecer una solución tecnológica apta para pequeñas poblaciones que permita el tratamiento y regeneración de aguas residuales urbanas, produciendo un agua de calidad apta para su uso en agricultura y recarga de acuíferos. El nuevo proceso está siendo validado a escala demostrativa en la EDAR de Alhama de Murcia y ofrece resultados prometedores en cuanto a calidad del agua, consumo energético y producción de biogás y microalgas.

Palabras clave

Contaminante emergente, fango granular, *carriers*, microalgas, POA, regeneración de agua.

LIFE AMIA PROJECT: ADVANCED TECHNOLOGIES FOR TREATMENT AND ELIMINATION OF MICRO-POLLUTANTS IN WATER

The Life Amia project aims to validate a new concept of waste water treatment plants (WWTP), innovative and sustainable, combining a compact anaerobic-aerobic treatment (A²C), a microalgae bioreactor (HRAP) and an adsorption process with advanced oxidation process (AOP). The project seeks to offer a technological solution suitable for small towns that allows the treatment and regeneration of urban wastewater, producing water suitable for use in agriculture and aquifer recharge. The new process is being validated on a demonstrative scale at the Alhama de Murcia WWTP and offers promising results in terms of water quality, energy consumption and production of biogas and microalgae.

Keywords

Emerging compound, granular sludge, carriers, microalgae, AOP, water reclamation.

José Luís Aranda Mares

responsable del Laboratorio de Cromatografía de Eurofins-Iproma

Estefanía Ferrer Caraco

técnica del Área de Diversificación y Desarrollo de Eurofins-Iproma

Elena Zuriaga Agustí

responsable técnica de I+D+i de Facsa

Núria Zamorano López

técnica del Área de I+D+i de Facsa

Rubén García Tirado

técnico del Área de I+D+i de Facsa

Cristian Pérez Hernández

técnico de Explotación de Depuración de Facsa

Ignacio Pastor Carbonell

coordinador de Zona de Explotaciones de Depuración de Facsa

Manuel Abellán Soler

responsable de Explotación Zona I de la Entidad de Saneamiento de la Región de Murcia (Esamur)



1. INTRODUCCIÓN

El progresivo endurecimiento de las políticas ambientales para la mejora de la calidad de las aguas residuales urbanas tratadas y regeneradas, la eficiencia energética y la recuperación de recursos, han puesto en entredicho la idoneidad de las tecnologías tradicionales de depuración y regeneración basadas en fangos activos y cloración o ultravioletas (UV). Por tanto, se necesitan nuevas propuestas tecnológicas para cubrir estas necesidades, especialmente para poblaciones pequeñas y mejorar con ello la eficiencia y viabilidad de los tratamientos de aguas residuales urbanas.

En el proyecto Life Amia se está desarrollando una novedosa combinación de tecnologías que permite la depuración y regeneración de aguas residuales urbanas con un mínimo consumo energético y aplicando los principios de economía circular. El sistema propuesto está siendo validado a escala demostrativa en las instalaciones de la EDAR de Alhama de Murcia, donde la planta de Life Amia está tratando un caudal de 12 m³/día. El proyecto está siendo liderado por la empresa española dedicada al ciclo integral del agua Facsa

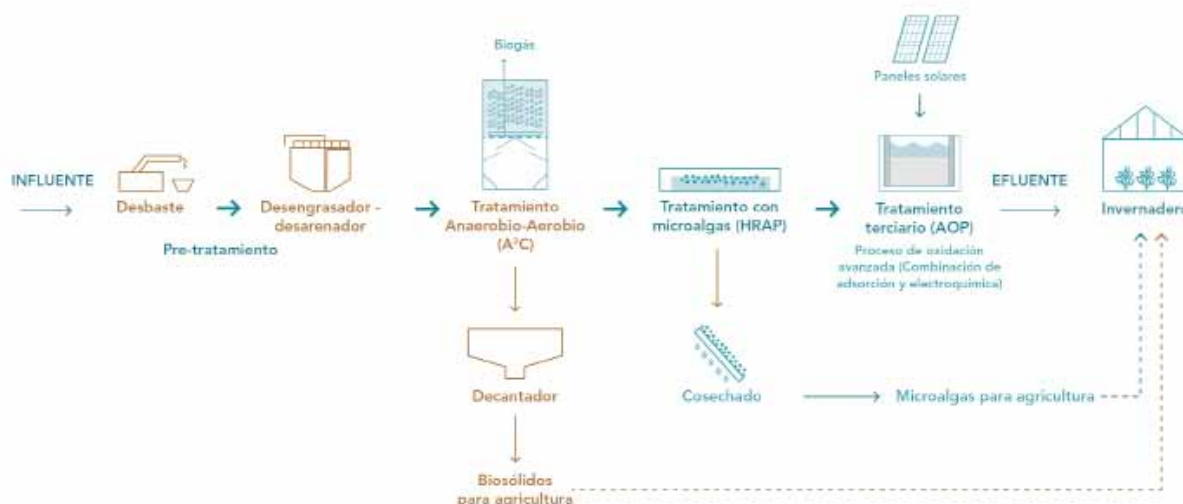
y cuenta con la participación de los socios: Eurofins-Iproma (España), Esamur (España), CEBAS-CSIC (España), Arvia (Reino Unido) y Atlantis (Chipre).

El tratamiento propuesto se inicia con un sistema compacto que combina de forma verticalmente apilada una etapa anaerobia situada en la parte inferior con una etapa aerobia en la parte superior (**Figura 1**). El agua a tratar se introduce por la parte inferior de la cámara anaerobia, que opera con biomasa granular y está configurada como un reactor de flujo ascendente tipo EGSB. En esta primera etapa se produce la eliminación de la mayor parte de la carga orgánica contaminante y su conversión a biogás, lo cual permite una reducción importante del consumo energético y una potencial valorización energética en forma de metano contenido en el biogás. Tras un sistema de separación trifásico, el agua asciende a la cámara superior donde se aplica un tratamiento aerobio basado en una tecnología de lecho móvil (MBBR), en la que gracias al uso de *carriers*, que permiten una retención más efectiva de biomasa, se consigue eliminar el resto de materia orgánica.

Seguidamente el agua se introduce en un reactor de microalgas tipo *raceway* o HRAP (*high rate algal pond*, por sus siglas en inglés), que en el caso del proyecto se encuentra distribuido en dos reactores idénticos operados en paralelo para dotar de mayor flexibilidad a la instalación. En estos reactores, especialmente diseñados para maximizar la incidencia solar en el cultivo y mantener una correcta agitación, se realiza un cultivo de microalgas que crecen sobre el agua a tratar. Estos microorganismos autótrofos fotosintéticos utilizan la luz solar para fijar el CO₂ disuelto y asimilar los nutrientes presentes en el agua residual (principalmente nitrógeno -N- y fósforo -P-), evitando de este modo el posible impacto negativo de los mismos sobre el medio en caso de que el agua tratada llegue a cauce. Para la optimización del HRAP, se utiliza un control de pH que dosifica CO₂ para asegurar la presencia de carbono inorgánico en el medio, lo que permite maximizar la calidad del efluente y producción de biomasa algal.

Tras la salida del HRAP, las microalgas son separadas del medio líquido con un sistema de flotación por aire disuelto (DAF), que permite el cose-

FIGURA 1. Diagrama del proceso de depuración y regeneración Life Amia.



chado de las microalgas, las cuales pueden ser valorizadas como fertilizante gracias a su elevado contenido en nutrientes. Las propiedades de esta biomasa algal como fertilizante están siendo estudiadas a escala de invernadero y de campo sobre diferentes cultivos, demostrando su contribución positiva al aportar nutrientes y materia orgánica al suelo agrícola.

Finalmente, el agua depurada y libre de sólidos pasa del DAF al tratamiento terciario para su regeneración mediante un proceso de adsorción y electro-oxidación avanzada (POA) alimentado con energía solar. Este novedoso proceso se basa en el uso de las partículas patentadas NYEX, que permiten la adsorción de moléculas orgánicas como microcontaminantes, materia orgánica refractaria o incluso patógenos, que posteriormente son oxidados a CO₂ mediante la aplicación de una pequeña corriente eléctrica que permite además la regeneración de las partículas. De este modo, se obtiene un agua regenerada de alta calidad que puede ser tanto para riego en agricultura como para recarga de acuíferos, en función de las necesidades del momento.

La concentración de microcontaminantes orgánicos emergentes en el agua de salida está regulada por el RD 817/2015 sustancias prioritarias y preferentes de la Directiva Marco del Agua (Anexo IV Normas de calidad ambiental para las sustancias prioritarias y otros contaminantes y Anexo V Normas de calidad ambiental para sustancias preferentes).

Adicionalmente, existe una lista de observación (*Watch List*), que se revisa periódicamente, cuya última actualización se publicó en el año 2020 en la Decisión de Ejecución (UE) 2020/1161 de la Comisión. Esta lista de observación define las sustancias

FIGURA 2. Imagen de la planta demostrativa Life Amia ubicada en Alhama de Murcia.



sobre las que deben recabarse datos de seguimiento a nivel de la Unión Europea, para que posteriormente se puedan establecer normas de calidad ambiental. Esta lista cuenta con 5 grupos de sustancias, cuya presencia en entornos acuáticos tiene un impacto medioambiental y sobre la salud pública negativo (antibióticos, antidepresivos, productos farmacéuticos, plaguicidas y fungicidas).

La mayoría de EDAR convencionales no están diseñadas para la eliminación de estos compuestos, por lo que su seguimiento y especialmente el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan reducir su retorno al medio, es clave de cara a evitar el impacto negativo de su llegada a cauce, especialmente en aquellos casos donde difunde hacia el subsuelo afectando de manera negativa a los procesos de captación para generar agua potable o, en su caso, en los procesos de reutilización indirecta (Feng *et al.*, 2013; Rodríguez *et al.*, 2009).

El riesgo asociado a la persistencia de los microcontaminantes como los pesticidas, las hormonas, los hidrocarburos y los restos de fármacos, así como las formas secundarias que se generan durante su degradación en el propio tratamiento del agua

residual, se debe a su interferencia a diferentes niveles biológicos. En concreto, pueden afectar a estructuras celulares concretas o a nivel enzimático, lo que conlleva a alteraciones en la fisiología, morfología o histología de los organismos vivos. También, pueden generar efectos de inhibición del crecimiento, entre otras alteraciones hormonales, cambios en las tasas de proliferación y multiplicación celular o incluso la muerte (Rogowska *et al.*, 2019).

A lo largo del esquema de tratamientos Amia se ha realizado un estudio exhaustivo de la presencia de microcontaminantes y patógenos en varios puntos de la planta (**Figura 2**), con el fin de evaluar la combinación de todos los procesos para la obtención de un efluente de alta calidad. A su vez, se han evaluado puntos intermedios donde se espera un efecto sinérgico adicional en cuanto a la eliminación de microcontaminantes, como es la adsorción sobre los cultivos de microalgas. Además de ello, se ha estudiado la eficiencia de los procesos convencionales como referencia para evaluar la mejora en materia de eliminación de microcontaminantes de la combinación de tecnologías estudiadas en el proyecto Life Amia.



2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. TOMA DE MUESTRAS

En el estudio que se presenta se han tomado muestras del agua residual pretratada (**Figura 3**), a la salida del tratamiento convencional de la EDAR, a la salida del tratamiento A²C (reactor 1) y a la salida del tratamiento con microalgas (HRAP, reactor 2).

En la fase inicial del proyecto, con objeto de llevar a cabo una caracterización inicial del contenido global en contaminantes emergentes, se realizaron diversos *screenings*, tanto en la entrada como en la salida de la planta de tratamiento. A partir de estos resultados se seleccionaron los compuestos de mayor relevancia, sobre los que se están realizando los análisis cuantitativos para evaluar la eficacia de la eliminación en las distintas etapas del proyecto.

2.2. SCREENING DE CONTAMINANTES EMERGENTES.

Las metodologías empleadas en los análisis de *screening* fueron las siguientes:

2.2.1. Análisis por GC-MS(Q)

Para el análisis de compuestos volátiles y semivolátiles poco polares, se ha empleado la técnica de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas con el analizador

cuadrupolo, adquiriendo en modo *full scan*. La identificación se efectuó tanto comparando los espectros experimentales con los teóricos de la librería NIST, así como comparando con todos los patrones standard disponibles.

Con el fin de determinar el mayor número posible de compuestos, se aplicaron dos técnicas diferentes de tratamiento de muestra: *Headspace* y microextracción en fase sólida (SPME), para analitos más volátiles; y extracción por sorción sobre barra agitadora (SBSE o *Twister*) y posterior desorción térmica (TDU), más enfocado a compuestos semivolátiles.

2.2.2. Análisis por LC-QTOF y LC-QQQ

El *screening* de los compuestos emergentes de mayor polaridad se llevó a cabo realizando un tratamiento previo de las muestras mediante extracción en fase sólida, y posterior análisis mediante la técnica de cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas de alta resolución, con un equipo de cuadrupolo/tiempo de vuelo (LC-QTOF).

Para la identificación de los compuestos se aplicaron criterios de error entre la masa exacta teórica y experimental, diferencia del perfil isotópico entre teórico y experimental, así como la comparación de los

espectros obtenidos con los teóricos según una librería de masa exacta.

Paralelamente, para los 90 compuestos de los que se disponía patrón estándar (principalmente plaguicidas y fármacos) también se efectuó una determinación mediante cromatografía líquida y espectrometría de masas/masas con triple cuadrupolo (LC-QQQ).

2.3. ANÁLISIS CUANTITATIVO DE CONTAMINANTES EMERGENTES

Para realizar la determinación cuantitativa de los contaminantes emergentes seleccionados se emplearon métodos acreditados por ENAC bajo norma UNE-EN ISO 17025. Las técnicas empleadas fueron las siguientes:

2.3.1. Cromatografía de gases masas/masas (GC-MS/MS)

El procedimiento analítico consiste en una extracción de los compuestos de interés mediante barras agitadoras recubiertas de PDMS (polidimetilsiloxano) denominadas *Twisters*, y posterior desorción térmica, seguida de análisis por cromatografía de gases con detección por espectrometría de masas/masas con triple cuadrupolo (GC 7890A MS 7000 Agilent Technologies). Esta metodología se emplea para determinar los plaguicidas clorpirifos, tebuconazol y cipermetrina I-IV.

2.3.2. Cromatografía líquida masas/masas (LC-MS/MS)

Se utiliza una preconcentración en línea de los compuestos a determinar (extracción en fase sólida), seguida de la elución de los mismos, y separación por cromatografía líquida y posterior detección por espectrometría de masas/masas con triple cuadrupolo (HPLC Serie 1200 Agilent Technologies y API 3200 QTRAP SCIEX). Mediante este método se

FIGURA 3. Esquema de puntos de muestreo.



TABLA 1

INDICADORES DE FUNCIONAMIENTO. RANGOS DE CONCENTRACIÓN, PORCENTAJE DE ELIMINACIÓN, LÍMITES LEGISLADOS Y USOS.
 Notas: * Límite de detección: Decisión (UE) 2020/1161 de 4 agosto de 2020; ** NCA-CMA: Anexo IV RD 817/2015, prioritarios y preferentes (obligación de control).

Compuesto	Rango influente EDAR (µg/L)	Rango efluente EDAR (µg/L)	Rango efluente Amia: R1+R2 (µg/L)	Eliminación EDAR (%)	Eliminación Amia: R1+R2 (%)	Legislación (µg/L)	Aplicación compuesto
Acetaminofen	64,6	0,040	0,050	99,9	99,8	-	analgésico
4-Aminoantipirina	5,13	0,095	0,040	99,5	99,0	-	analgésico derivado metamizol
Ketoprofen	0,667	0,200	0,069	60,0	87,6	-	antiinflamatorio
Diclofenaco	0,414	0,250	0,150	37,5	57,1	-	antiinflamatorio
Sulfametoxazol	0,234	0,065	0,070	84,6	74,1	*0,1	antibiótico
Venlafaxin	0,226	0,226	0,120	0	45,2	*0,006	antidepresivo
Trimetoprim	0,063	0,045	0,015	20	68,4	*0,1	antibiótico
Cipermetrina I-IV	0,260	0,026	0,0201	96,4	95,1	*0,0006	insecticida piretroide
Clorpirifos	< límite detección	< límite detección	< límite detección	-	-	**0,1	insecticida organofosforado
Tebuconazol	< límite detección	< límite detección	< límite detección	-	-	*0,24	fungicida triazolico

analizan los siguientes fármacos: sulfametoxazol, venlafaxin, 4-aminoantipirina, acetaminofen (paracetamol), ketoprofen, diclofenaco y trimetoprim.

3. RESULTADOS

Los niveles de compuestos emergentes que se suelen encontrar en las aguas residuales suelen estar del rango de µg/l o incluso menores, lo que dificulta el estudio correcto de la reproducibilidad real de su eliminación, ya que algunos de ellos son apenas detectados, presentan interferencias de matriz o dan lugar a diferentes metabolitos que no se controlan. Mediante las técnicas analíticas identificadas y utilizadas en el estudio, se ha podido obtener una serie de datos analíticos robustos en condiciones reales de depuración, datos que de forma resumida se muestran a continuación.

Los diferentes estudios realizados en EDAR muestran que la presencia

de contaminantes emergentes en la entrada de una EDAR puede variar bastante de una planta a otra, pero también en la misma planta dependiendo de la climatología, la estación del año, hábitos de consumo, etc., teniendo en cuenta estos factores se han realizado las analíticas a lo largo de varios meses.

La mayoría de los estudios encontrados en bibliografía se basan en adicionar los compuestos y valorar la eliminación de los mismos. En el presente estudio los resultados provienen de valores observados durante el funcionamiento diario de rutina de la EDAR en paralelo con la planta piloto Life Amia.

Tras realizar un barrido cualitativo y cuantitativo se seleccionaron una serie de contaminantes emergentes relacionados con sus altos niveles, dificultad en su eliminación por procesos tradicionales y por su bajo nivel exigido en legislación de aguas. Dos de ellos, clorpirifos y te-

buconazol, dieron positivos en algún momento puntual del estudio, pero no con suficientes datos para ser incluidos en este estudio.

La EDAR de Alhama, con su tratamiento biológico y terciario, permite eliminar niveles altos los fármacos acetaminofeno y diclofenac, así como del insecticida cipermetrina, muy usuales en depuradoras de origen urbano (Tabla 1). Sin embargo, el resto de emergentes presentaron valores por debajo del 90% de eliminación.

Mediante un tratamiento en tándem, utilizando dos (A²C más microalgas) de los tres tratamientos estudiados en el proyecto, se pueden alcanzar valores ya muy similares a los identificados en una EDAR convencional de fangos activos.

Cabe destacar que la planta Life Amia llega a los niveles >90% de eliminación para los compuestos acetaminofén, 4-aminoantipirina y cipermetrina, al igual que el tra-



FIGURA 4. Comparación reducción emergentes en el tratamiento convencional frente a planta piloto Life Amia con reactores 1 y con 2 (%).

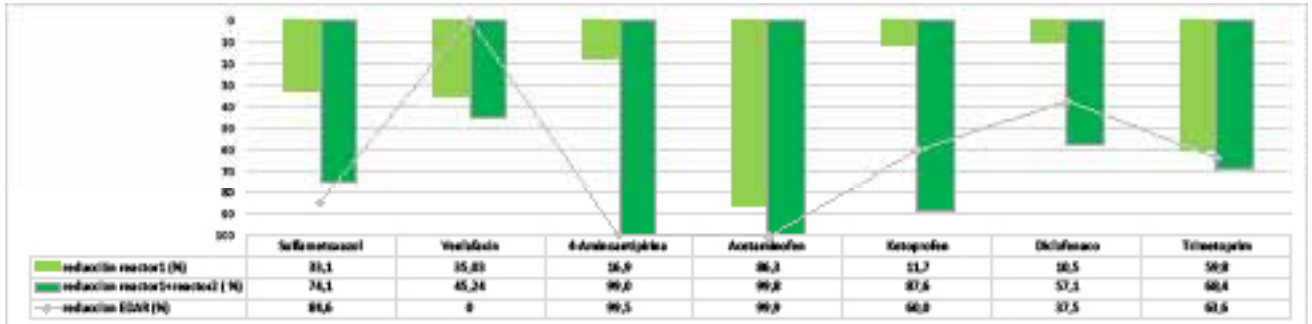
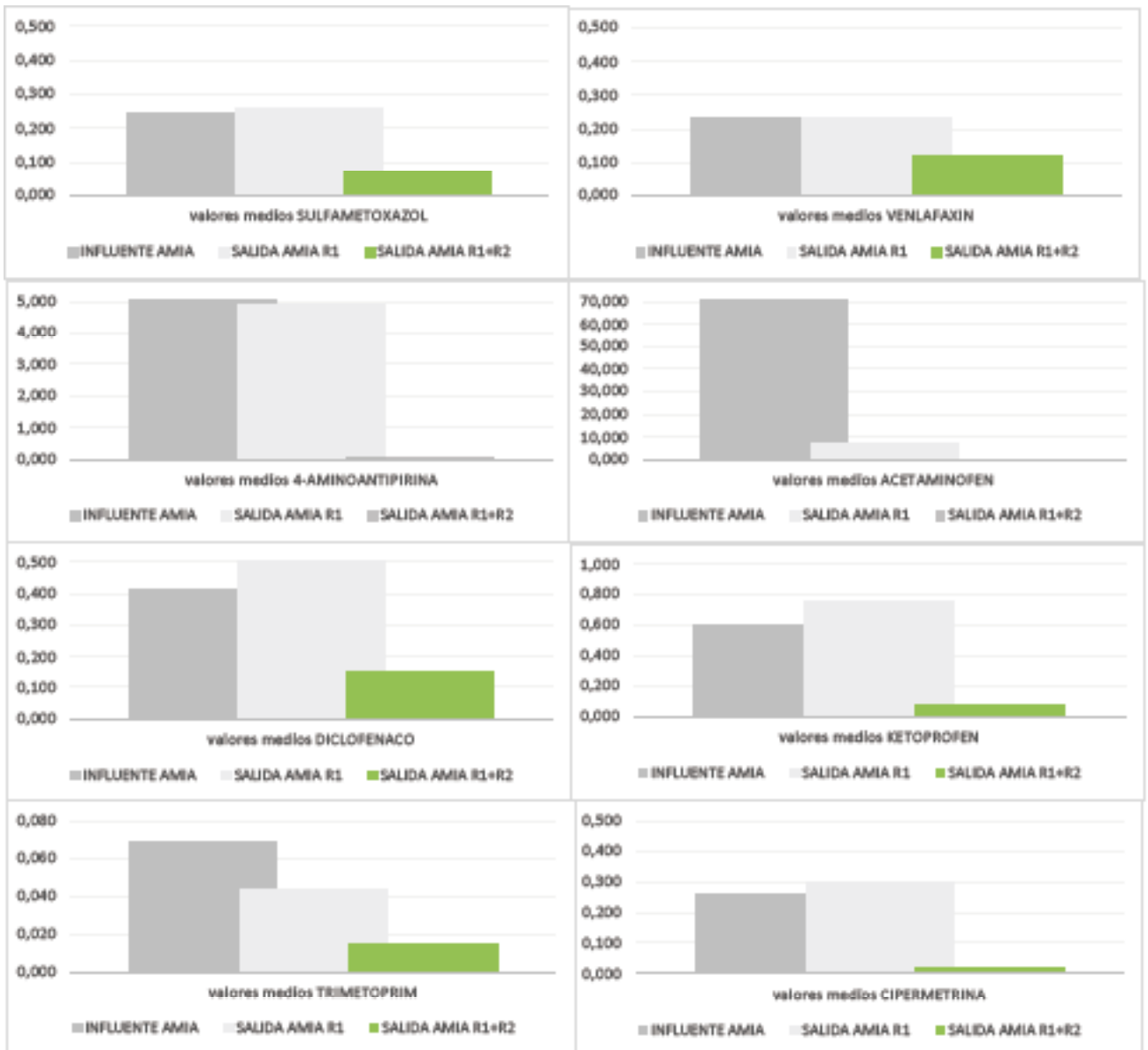


FIGURA 5. Reducción de la concentración de los contaminantes emergentes a lo largo del proceso.



» El tratamiento Life Amia ha sido diseñado para conseguir un agua regenerada con garantía y de bajo impacto contaminante. La adición de un tercer proceso en tándem de oxidación avanzada conseguirá mejorar todavía más su calidad

tamiento convencional y mejora el resto de los compuestos emergentes ((Tabla 1). El ketoprofen pasa del 60% de eliminación a un 87,6%. Destaca la venlafaxina, que no parece eliminarse en el tratamiento convencional, pero llega a reducirse un 45,2% con los tratamientos A²C más microalgas (R1 + R2). Es de esperar que, una vez el tratamiento de oxidación avanzada (R3) esté en operación, los rendimientos de eliminación serán muy superiores.

El tratamiento Life Amia fue diseñado para la obtención de un agua regenerada de alta calidad, utilizando entre otros, la reducción de compuestos orgánicos emergentes. En la Figura 4 se observa para los compuestos detectados el orden de reducción según el tratamiento utilizado.

El primer reactor R1 del tratamiento Life Amia (A²C) permite reducir a los mismos rangos que la EDAR con el tratamiento convencional, pero debido al bajo tiempo de retención de la planta Life Amia, en algunos casos se queda por debajo. El agua que sale del reactor R1 se introduce en el reactor de microalgas (R2). La suma de los dos tratamientos mejora notablemente la eliminación de emergentes. Obteniendo valo-

res superiores a los obtenidos en la planta convencional, excepto para el sulfametoxazol encontrándose en rangos similares.

En la Figura 5 se muestran los datos promedio obtenidos en concentración de los diferentes indicadores de compuestos emergentes a los largo del tratamiento Life Amia. En ellos se puede apreciar la reducción en términos de concentración. El tratamiento anaerobio/aerobio (A²C) con bajo tiempo de retención (R1) contribuye a una reducción de sólidos y de materia orgánica, pero no a la eliminación de compuestos orgánicos emergentes. Sin embargo, el tratamiento con microalgas (R2) contribuye a una eliminación media (>60%) en la mayoría de indicadores, excepto diclofenaco y venlafaxina, aún así superiores a un tratamiento convencional.

4. CONCLUSIONES

Los dos compuestos de mayor concentración identificados (acetamofen y 4-aminoantipirina) se eliminan completamente mediante el tratamiento Life Amia.

Los rendimientos de eliminación en Life Amia son medios y altos para los compuestos emergentes estudiados (45,24%-99,8%).


La eliminación de trimetoprim, diclofenac, ketoprofen y, especialmente venlafaxin, es mayor con Life Amia frente al tratamiento convencional.

Por último, hay que destacar que Life Amia fue diseñado para conseguir un agua regenerada con garantía y de bajo impacto contaminante. La adición de un tercer tratamiento en tándem de oxidación avanzada conseguirá mejorar todavía más su calidad.

5. AGRADECIMIENTOS

El proyecto Life Amia ha sido financiado por el Programa Life de la Unión Europea bajo el Grant Agreement LIFE AMIA 18/ENV/ES/000170.

Bibliografía

- [1] Barbosa, M.; Moreira, N.F.F.; Ribeiro, A.R.; Pereira, M.F.R.; Silva, A.M.T. (2016). Occurrence and removal of organic micropollutants: an overview of the watch list of EU Decision 2015/495. *Water Research*.
- [2] Feng, L.; Van Hullebusch, E.D.; Rodrigo, M.A.; Esposito, G.; Oturan, M.A. (2013). Removal of residual anti-inflammatory and analgesic pharmaceuticals from aqueous systems by electrochemical advanced oxidation processes. A review. *Chem. Eng. J.*, núm 228 (0), págs. 944-964.
- [3] Rodríguez, C.; Van Buynder, P.; Lugg, R.; Blair, P.; Devine, B.; Cook, A.; Weinstein, P. (2009). Indirect potable reuse: a sustainable water supply alternative. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, núm. 6(3), págs. 1.174-1.209.
- [4] Rogowska, J.; Cieszynska-Semenowicz, M.; Ratajczyk, W.; Wolska, L. (2020). Micropollutants in treated wastewater. *Ambio*, núm. 49, págs. 487-503. 

www.tecnoaqua.es