



Puesta en marcha de un sistema híbrido UASB + MBR para el tratamiento de las aguas residuales

Pedro J. Simón Andreu director técnico de la Entidad Regional de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales de Murcia (Esamur)
Carlos Lardín Mifsut técnico de Explotación de la Entidad Regional de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales de Murcia (Esamur)
Liuba Domínguez Chabalina investigadora del Instituto del Agua y las Ciencias Ambientales (IUACA) de la Universidad de Alicante
Daniel Prats Rico coordinador de Proyectos del Instituto del Agua y las Ciencias Ambientales (IUACA) de la Universidad de Alicante
Vicente Cases López técnico superior del Instituto del Agua y las Ciencias Ambientales (IUACA) de la Universidad de Alicante
Gustavo Prado Álvarez estudiante máster oficial del Instituto del Agua y las Ciencias Ambientales (IUACA) de la Universidad de Alicante
Antonio Sánchez Betrán responsable de Desarrollo de I+D+i de Red Control
Raquel González Herrero responsable del Área de I+D+i de Red Control
Juan Antonio Vicente González responsable de Explotaciones de Red Control
Claudia Llosa Llacer jefa de planta en la EDAR de Santomera de Red Control

En esta investigación se procede a la puesta en marcha de un sistema anaerobio UASB seguido de un biorreactor de membranas (MBR) para el tratamiento de las aguas residuales en la estación depuradora de aguas residuales (EDAR) de Santomera, Murcia. La estrategia de operación del híbrido fue correcta, ya que en 2 meses tan solo se realizó una limpieza química de membranas. Se han obtenido excelentes resultados de eliminación de materia orgánica, nutrientes y sólidos en suspensión. La producción de biogás ha sido de $0,7 \text{ L}\cdot\text{d}^{-1}$ (71% de metano), considerado un buen resultado para haberse obtenido en un piloto alimentado con bajas cargas orgánicas.

Palabras clave
 Biogás, MBR, ensuciamiento de membranas, reactor anaerobio de flujo ascendente, tratamiento de aguas residuales.

Set-up of an hybrid system UASB + MBR for wastewater treatment

This research deals with the set-up of an anaerobic system UASB followed by a membrane bioreactor (MBR) for wastewater treatment at the wastewater treatment plant (WWTP) of Beniel, Murcia (Spain). The performance of the system was suitable because only one chemical cleaning was carried out in 2 months of operation. High percentages removal of organic matter, nutrients and suspended solids were reached. The biogas production was $0,7 \text{ L}\cdot\text{d}^{-1}$ (71% of methane). This is a good result to be obtained in a small pilot plant fed with low organic loading rates.

Keywords
 Biogas, MBR, membrane fouling, upflow anaerobic sludge blanket, wastewater treatment.



1. Introducción

Las plantas de tratamiento de aguas residuales más extendidas para la depuración de aguas residuales hoy en día se basan en el sistema de lodos activados. Este sistema necesita de un tratamiento terciario, ya que las normativas de vertido son cada vez más exigentes, y grandes necesidades de aireación. Además, la producción de fangos en estas plantas es muy elevada, lo cual aumenta los costes de operación al ser necesario darles un tratamiento de estabilización.

Para estudiar la posible aplicación de tecnologías alternativas con ventajas en ese sentido, se ha diseñado una planta piloto híbrida en la que se emplea un reactor biológico anaerobio, en este caso mediante un UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) sin necesidad de aireación y con producción de biogás que podría aprovecharse para recuperación energética, seguida de un sistema de biorreactor de membranas (MBR, *membrane bioreactor*) para mejorar las características del efluente.

Con ello, se propone estudiar la viabilidad de la puesta en marcha del sistema, conociendo las necesidades de limpiezas de membranas en el MBR, la composición y producción de biogás en el UASB, la eliminación de materia orgánica, nutrientes y sólidos en suspensión en cada sistema y en el global y, finalmente, caracterizar microbiológicamente el fango aerobio desarrollado.

2. Materiales y métodos

El sistema utilizado consta de un reactor UASB seguido de un MBR. La **Figura 1** muestra un esquema de la planta piloto instalada en la EDAR de Santomera, Murcia, que fue alimentada con agua residual de componente municipal e industrial.

El UASB tiene un volumen útil de 30 L y contiene 8 L de relleno granular fluidizado. El sistema MBR consta de 2 tanques: el tanque aerobio al que se adicionó un 35% de relleno soportado (Kaldness, tipo K1) y el tanque de membranas donde se instaló una membrana de microfiltración de Porous Fibers (tamaño de

poro de 0,4 µm y área de filtración de 0,2 m²). La planta consta de una serie de equipos e instrumentos de medida y control conectados a un panel de control automático, el cual ofrece información en continuo de las principales variables del proceso.

Las determinaciones de demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno total (NT), fósforo total (PT), nitrato (NO₃⁻), nitrito (NO₂⁻) y amonio (NH₄⁺) se realizaron mediante cubetas-test de Hach Lange. La composición del biogás producido fue determinada utilizando un analizador de composición de gas de la marca Geotech, modelo 5000.

3. Resultados y discusión

3.1. Puesta en marcha

En los días previos a la instalación de la planta se realizaron pruebas con agua de red para comprobar que no hubiera fugas y que tanto los equipos como el sistema de control automático funcionaban. También se realizó una calibración de los caudales de las diferentes bombas. Al observar que el sistema funcionaba correctamente se procedió al vaciado de la planta para facilitar su transporte a la depuradora. Una vez en la depuradora se procedió al llenado del UASB con lodo del biológico de la EDAR a una concentración de 3 g·L⁻¹ y fue pasando por reboso a los tanques aerobios. Se añadió el lodo granular en el UASB y soporte plástico en tanque aerobio. Una vez llena la planta se pusieron en marcha todas las bombas al máximo de su caudal, excepto la bomba de permeado que se mantuvo con un flujo de 5 L/m/h.

Se comenzó a operar con un caudal bajo buscando que la biomasa fuera aclimatándose a las nuevas condiciones y que poco a poco fuera creciendo la población bacteriana,

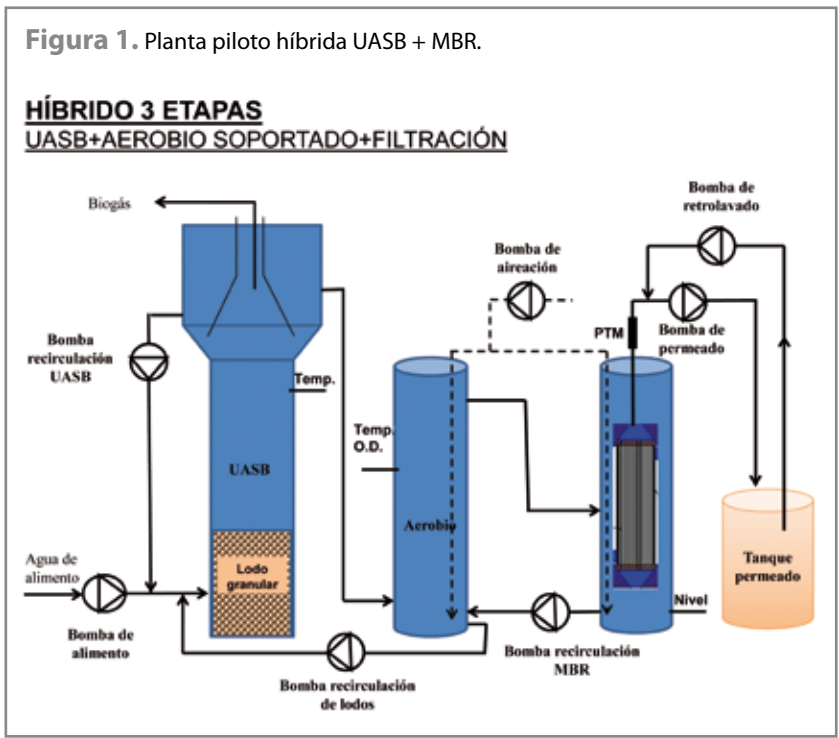
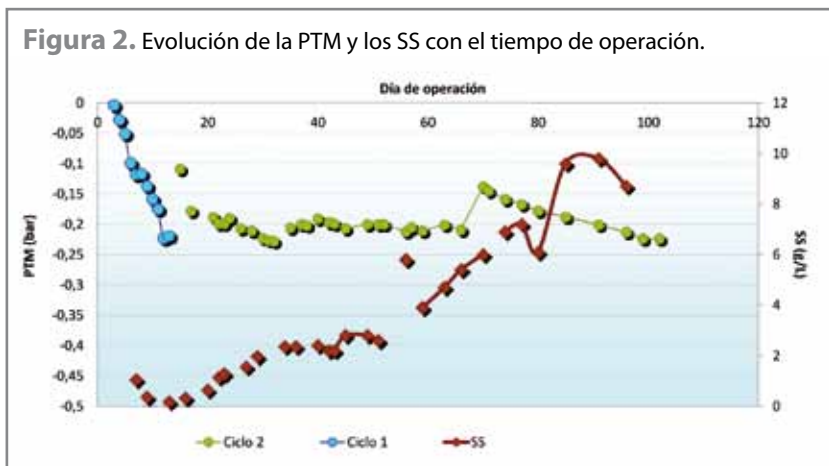


Figura 2. Evolución de la PTM y los SS con el tiempo de operación.



sobre todo en el tanque aerobio, en el que se tenía que desarrollar el biofilm sobre los soportes. Posteriormente y durante toda la experimentación se aumentó el caudal de permeado a 10 L/m/h, lo que supuso la disminución de los tiempos de retención hidráulica en los distintos reactores: en el UASB pasó de 30 a 15 h, mientras que en el conjunto aerobio el TRH pasó de 20 a 10 h.

3.2. Ciclos de filtración y limpieza de membranas

La monitorización de la presión transmembrana (PTM) es una herramienta de control para conocer el grado de ensuciamiento de las membranas. La **Figura 2** muestra la evolución de la PTM durante más de 2 meses de filtración, así como los sólidos en suspensión (SS) del lodo biológico frente a los días de operación.

El primer ciclo de filtración (representado en azul), mostró una velocidad de ensuciamiento media de 21,5 mbar·d⁻¹. Esto es debido a la disminución de SS correspondiente a ese periodo inicial de trabajo. Al haber muy poca concentración de sólidos no hay formación de flóculos, por lo que el ensuciamiento es más difícil de eliminar por aireación, pues no se forma torta sino que se produce el bloqueo de poros o la adsorción de los flóculos sobre ellos

(Dominguez, 2012). La disminución de SS en la fase inicial fue debido a que la biomasa se fue quedando retenida en el relleno y comenzó a formarse la biopelícula (**Figura 3**).

En el segundo ciclo de filtración (en color verde), hasta alrededor del día 20 de operación, la velocidad de ensuciamiento fue de 5,8 mbar·d⁻¹, 4 veces menor que en el primer ciclo. Esto podría explicarse por el paulatino aumento en la concentración de SS del licor mezcla, lo que favorece la floculación y el ensuciamiento reversible. A partir del día 20 de operación se muestra una estabilidad de la PTM de alrededor de -0,2 bar con un mínimo ensuciamiento. En este caso, las concentraciones de SS superan los 2 g·L⁻¹, evitando una pérdida acelerada de la permeabilidad de la membrana. Solo se realizó una limpieza química, por lo que la limpieza física de aireación y retrolavado fueron muy efectivas.

3.3. Eliminación de materia orgánica, nutrientes y sólidos en suspensión

En general se obtuvieron buenos resultados en cuanto a la degradación de materia orgánica y nutrientes. En la **Figura 4** se muestran las concentraciones de DQO de entrada a la planta o UASB (influyente), salida del UASB y salida de la planta (permeado), así como el rendimiento de eliminación de materia orgánica en el UASB y sistema global.

La DQO media de entrada al sistema fue de 536 ± 90 mg·L⁻¹ durante el período de estudio. En el reactor UASB se alcanzó un porcentaje de eliminación entre 47 y 81%. La DQO del permeado mostró un valor promedio de 25 ± 7 mg·L⁻¹, mostrando una eliminación de materia orgánica media de 95% en el sistema global. Hay que destacar que a medida que ha avanzado el periodo de experimentación dicho porcentaje fue incrementándose ligeramente.

Los resultados reportados por algunos autores coinciden con los del presente estudio, aunque el tratamiento anaerobio acostumbra a emplearse para tratar efluentes con una carga orgánica más alta. Vieira *et al.* (1992) alcanzaron un valor del 60%, inferior al obtenido en este trabajo, trabajando con un TRH de entre 5 y 15 h. Qiu *et al.* (2013) reportan un porcentaje de eliminación de DQO en el UASB entre el 13 y el 79% trabajando con un TRH de 24 h, lo que

Figura 3. Relleno del tanque aerobio: día de operación 0, 23 y 50 (de izquierda a derecha).





Figura 4. DQO en el alimento, salida del UASB y permeado, y porcentajes de eliminación en el UASB y sistema global.

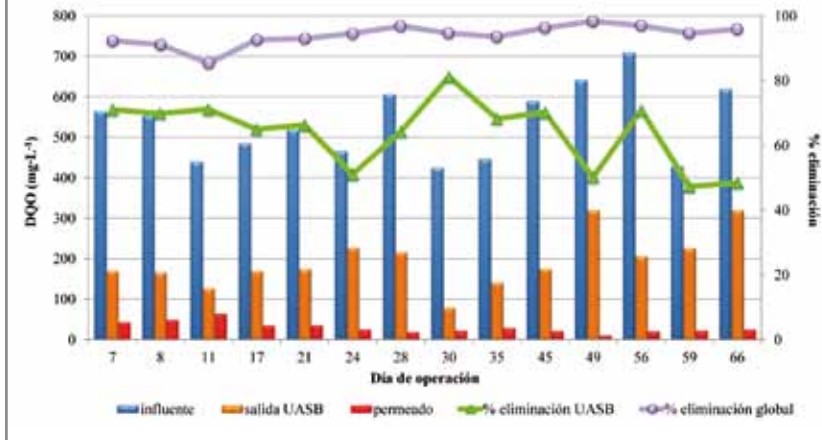


Figura 5. Concentraciones de las distintas formas de nitrógeno en los 3 puntos de muestreo.

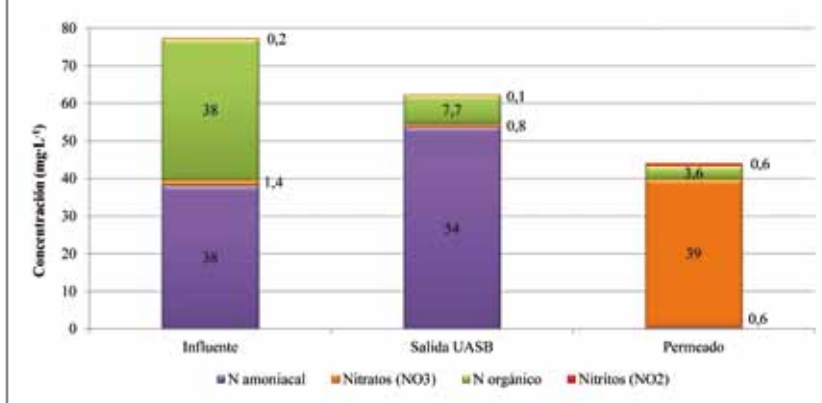
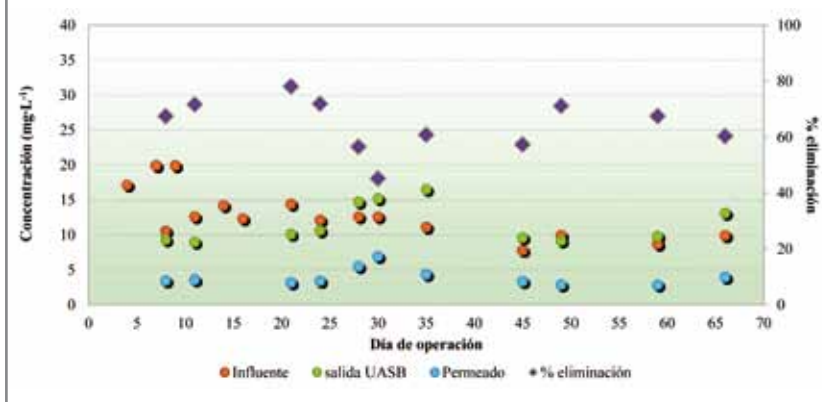


Figura 6. Concentración de PT en los 3 puntos de muestreo y porcentaje de eliminación en el sistema global.



indica que la gran variación de valores depende de las diferentes cargas másicas. En el sistema global UASB + MBR reportan un porcentaje de

eliminación de entre el 89 y el 97%.

En cuanto a los nutrientes, en primer lugar se analizaron, tal y como recoge la **Figura 5**, los valores me-

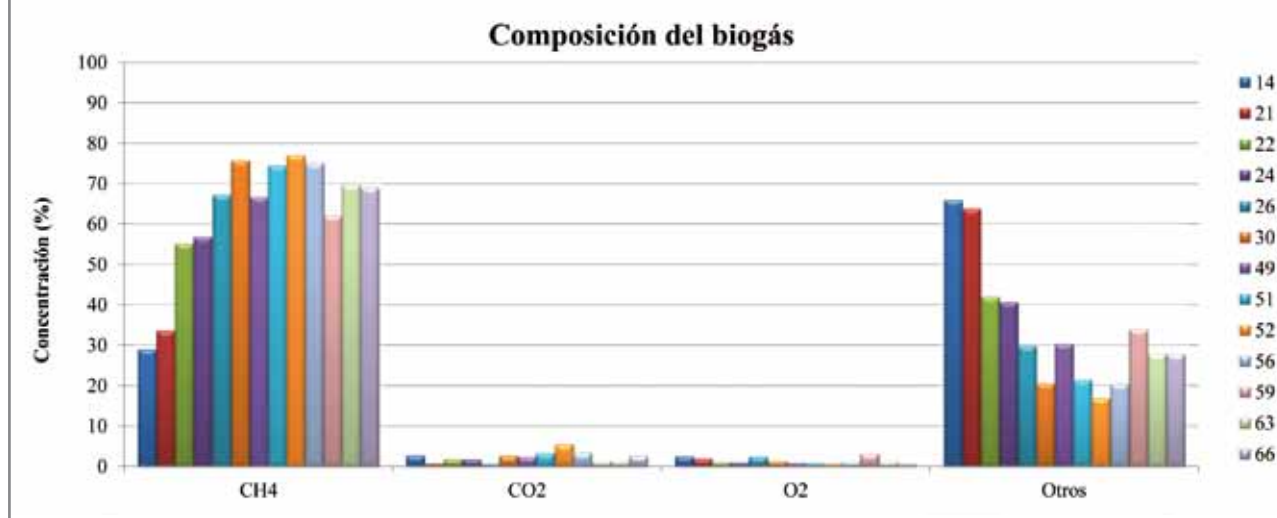
dios de las concentraciones de nitrógeno total (NT), nitratos ($N-NO_3^-$), nitritos ($N-NO_2^-$) y amonio ($N-NH_4^+$) en el influente y efluente de la planta, además de en la salida del reactor UASB.

La forma de nitrógeno predominante en la entrada y en el UASB es el nitrógeno amoniacal, mientras que en el permeado es la de nitrógeno en forma de nitrato. La concentración de nitrógeno total a la entrada fue de $77 \pm 11 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ y el porcentaje medio de eliminación para el sistema global fue de 45%. En el proceso anaerobio aumenta la concentración de nitrógeno amoniacal y es en el sistema MBR donde tiene lugar la transformación total de esta especie. En el permeado el valor medio fue de $0,6 \pm 0,9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ representando un 98% de transformación del nitrógeno amoniacal en sistema global. La concentración de nitrógeno orgánico fue disminuyendo a medida que pasaban las etapas de tratamiento con valores de 38 ± 15 , $7,7 \pm 6$ y $3,6 \pm 4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ en la entrada, salida de UASB y salida del MBR, respectivamente. Las concentraciones de nitrito fueron insignificantes en cada uno de los procesos.

Esto concuerda con los datos presentados por algunos autores, en los que se refleja un aumento de la concentración de $N-NH_4^+$ en el reactor UASB y la eliminación en el sistema MBR (Qiu *et al.*, 2013; Tawfik *et al.*, 2005). Este aumento de la concentración en el sistema anaerobio se produce porque durante el proceso de la digestión el nitrógeno orgánico es hidrolizado, dando lugar a nitrógeno amoniacal.

En segundo lugar, se analizó como nutriente el fósforo total (PT). En la **Figura 6** se muestran los resultados relativos a su eliminación en los 3 puntos de muestreo.

Figura 7. Porcentaje de CH₄, CO₂, O₂ y otros gases de diferentes muestras (en esta página) y biogás acumulado en el periodo de estudio (página siguiente).



La eliminación de PT en el sistema global varió entre 45 y 78% con una concentración media en el permeado de $3,9 \pm 1,2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. A partir del día 35 hubo rotura de algunas bombas del sistema, afectando el funcionamiento del mismo, fundamentalmente en la eliminación del PT en el UASB. Por ello, el porcentaje de eliminación global del fósforo se redujo en ese periodo, aunque posteriormente volvió a recuperar su valor medio hasta el final de la experimentación. Esta eliminación de fósforo total es similar a la observada por Monclús *et al.* (2010) en un sistema MBR ya estabilizado que combina cámaras con condiciones anaerobias, anóxicas y aerobias.

Respecto a los SS en el permeado, en ninguna muestra se alcanzó el límite de detección ($1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), por lo que la separación sólido-líquido mediante la membrana fue totalmente efectiva. El valor medio de turbidez en el permeado fue de 0,66 NTU.

3.4. Composición y volumen de biogás producido

Los análisis de composición de biogás de varias muestras tomadas y el biogás acumulado producido duran-

te el periodo de estudio se muestran en la **Figura 7**, donde se observa cómo el porcentaje de metano aumenta conforme avanza la operación hasta el día 30. Posteriormente decae ligeramente por los problemas de operación mencionados anteriormente por rotura de las bombas. Sin embargo, se puede considerar que el sistema operó de forma estable, manteniendo un porcentaje medio de metano de 71%.

El total de biogás producido al final del periodo de estudio alcanzó los 48 L, o sea, unos $0,7 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$. La producción de metano fue de 34 L en el periodo experimental. Se considera un buen resultado para ser una planta experimental de pequeñas dimensiones y con una carga de entrada baja. El rendimiento obtenido fue de $0,03 \text{ m}^3 \text{CH}_4 \cdot \text{kgDQO}^{-1}$ eliminada.

3.5. Evolución microbiológica del proceso aerobio

A continuación se muestran una serie de fotografías tomadas en un microscopio Zeiss Axiolab, en varios días de operación con el objetivo de estudiar la evolución microbiológica del sistema (**Figura 8**). Las muestras fueron tomadas del tanque aerobio,

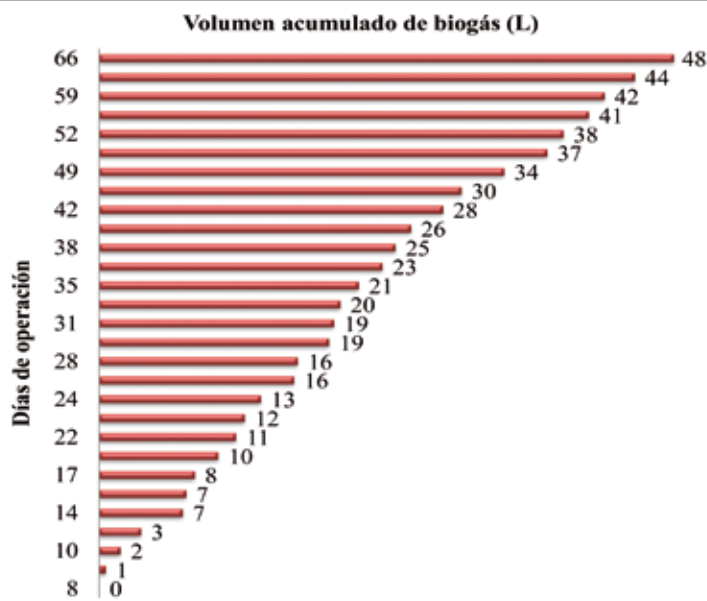
o sea, donde ocurre la biodegradación de la materia orgánica residual proveniente del USAB.

Al inicio de la operación, cuando el sistema es aún inestable se observó una proliferación de bacterias oxidantes del azufre o filamentosas *Thiothrix spp* (día 23). A medida que el fango se fue adaptando a las características del agua residual alimento y a las condiciones de operación del sistema, fue disminuyendo la presencia de este tipo de bacterias (día 32). Ya alrededor del día 37 desaparecen las bacterias oxidantes del azufre y se ven flóculos mejor formados y otro tipo de fauna típicas de sistema MBR. El día 51 se observa un flóculo poco cohesionado y ya el día 62 no hay presencia de filamentosas y el flóculo es característico de biosoporte.

4. Conclusiones

Se puso en marcha un sistema híbrido UASB+MBR para el tratamiento de aguas residuales en la EDAR de Santomera, Murcia. Las principales conclusiones fueron las siguientes:

- El proceso de aclimatación del fango, tanto anaerobio como aéro-



bio, fue rápido porque se partió de un lodo granular maduro y del fango de recirculación del tratamiento secundario de la EDAR, respetivamente.

- En más de 2 meses de operación, a la membrana se le sometió solo una limpieza química, por lo que la limpieza física de aireación y retrolavado fueron muy efectivas.

- La eliminación media de materia orgánica en el sistema global fue de 95%; de NT y transformación de nitrógeno amoniacal fue de 45 y 98%, respectivamente; de PT entre 45 y 78%; con eliminación total de SS.

- La producción de biogás fue de 0,7 L·d⁻¹ con un porcentaje medio de metano de 71%.

- Al inicio del proceso las bacterias que proliferaron fueron las filamentosas y cuando el fango se estabilizó aparecieron flóculos típicos de sistemas MBR.

Este sistema muestra claramente ventajas desde el punto de vista energético y, por tanto, económico con respecto a los sistemas convencionales aerobios. En primer lugar, mediante el tratamiento anaerobio (sin aireación) se logra una importante reducción de materia orgánica y nutrientes, por lo que al sistema aerobio llegan muy bajas cargas orgánicas. En segundo lugar, como el MBR opera con membranas de

MF, se obtiene un permeado de excelente calidad desde el punto de vista fisicoquímico y microbiológico. Finalmente, el sistema anaerobio produce biogás que puede ser aprovechado en la recuperación de energía.

5. Agradecimientos

El Instituto del Agua quiere agradecer al Ministerio de Educación por la financiación parcial de este estudio a través del proyecto 'Tratamiento de aguas superficiales y aguas residuales para obtener efluentes de alta calidad' (CTM2012-15348).

Bibliografía

[1] Domínguez, L.; Cases, V.; Birek, Ch.; Rodríguez, M.; Prats, D. (2012). Influence of organic loading rate on the performance of ultrafiltration and microfiltration membrane bioreactors at high sludge retention time. *Chemical Engineering Journal*, núm. 181-182, págs. 132-143.

[2] Monclús, H.; Sipma, J.; Ferrero, G.; Comas, J.; Rodríguez-Roda, I. (2010). Optimization of biological nutrient removal in a pilot plant UCT-MBR treating municipal wastewater during start-up. *Desalination*, núm. 250, págs. 592-597.

[3] Qui, G.; Song, Y.; Zeng, P.; Duan, L.; Xiao, S. (2013). Combination of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) and membrane bioreactor (MBR) for berberine reduction from wastewater and the effects of berberine on bacterial community dynamics. *Journal of Hazardous Materials*, núm. 246-247, págs. 34-43.

[4] Tawfik, A.; Ohashi, A.; Harada, H., 2005. Sewage treatment in a combined upflow anaerobic sludge blanket (UASB)-down-flow hanging sponge (DHS) system. *Biochemical Engineering Journal*, núm. 29, págs. 210-219.

[5] Vieira, S.M.M.; Chua, H.C.; Arnot, T.C. (1992). Sewage treatment by UASB reactor. Operation results and recommendations for design and utilization. *Water Science and Technology*, núm. 25(7), págs.143-157.

Figura 8. Fauna del reactor biológico el día de operación 23, 32, 37, 51 y 62 (de izquierda a derecha).

