

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS**
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS Y TÉCNICAS DEL AGUA Y DEL MEDIO AMBIENTE
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



**Proyecto Fin de Carrera
(Proyecto de Investigación)**

**Eliminación de nutrientes mediante procesos
combinados en un reactor anóxico-anaerobio
seguido de un reactor biopelícula y un
decantador lamelar**

Nutrients removal by combined processes in an anaerobic and anoxic reactor followed by a biofilm reactor and a lamella clarifier

Autor: Raquel Ruiz González

Director: Iñaki Tejero Monzón

Tutores: Rubén Díez Montero y Marta González Viar

Julio – 2013

PRESENTACIÓN

El presente Proyecto de Fin de Carrera es un proyecto de investigación realizado en el Grupo de Ingeniería Ambiental (GIA) de la Universidad de Cantabria, por lo que se presenta en forma de artículo científico.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha sido posible gracias a la ayuda y apoyo del Grupo de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cantabria, y en especial, a la dirección, colaboración y recomendaciones de Iñaki Tejero, Rubén Díez y Marta González.

Tabla de contenidos

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 7 |
| MATERIALES Y MÉTODOS | 9 |
| CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL DE LA PLANTA PILOTO (ANOXAN+RBP+D)..... | 9 |
| MÉTODOS ANALÍTICOS | 12 |
| ETAPAS EXPERIMENTALES | 13 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 13 |
| MATERIA ORGÁNICA | 13 |
| SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN | 14 |
| NITRÓGENO | 16 |
| FÓSFORO..... | 20 |
| CONCLUSIONES | 22 |
| REFERENCIAS | 23 |

ARTÍCULO CIENTÍFICO

Eliminación de nutrientes mediante procesos combinados en un reactor anóxico-anaerobio seguido de un reactor biopelícula y un decantador lamelar

R. Ruiz González, M. González Viar*, R. Díez Montero* e I. Tejero Monzón*

**Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, Universidad de Cantabria.*

Resumen En el presente proyecto se ha estudiado la eliminación biológica de nutrientes de una planta piloto formada por un reactor anóxico-anaerobio (AnoxAn) seguido de un reactor aerobio biopelícula (RBp) y un decantador lamelar. Se trata de un proceso biológico integrado (PBI) que combina procesos de fangos activos y de biopelícula en dos reactores en serie. El reactor AnoxAn sustituye al decantador primario y se divide en tres zonas: una zona inferior anaerobia, una zona intermedia anóxica y una zona superior de clarificación. Desde el reactor aerobio posterior se recircula el efluente nitrificado a la zona anóxica de AnoxAn. La experimentación se llevó a cabo durante 25 semanas y se dividió en dos etapas, la primera de ellas tratando agua residual urbana bruta y la segunda tratando el mismo agua residual con una dosificación extra de materia orgánica y nutrientes. Las concentraciones efluente de DQO, DBO₅, SST, NT, N-NH₄, P-PO₄ y N-NO₃ durante la primera etapa fueron 25,0mg/L, 4,5mg/L, 2,9mg/L, 8,9mg/L, 0,17mg/L, 0,89mg/L y 8,1mg/L, respectivamente, mientras que durante la segunda etapa fueron 39,7mg/L, 9,6mg/L, 6,7mg/L, 14,2mg/L, 1,0mg/L, 3,9mg/L y 6,9mg/L, respectivamente. La eliminación de materia orgánica y la nitrificación fueron estables durante toda la experimentación (86% y 93% de eliminación de DBO₅ en la primera y segunda etapa, respectivamente; y 98% y 94% de eliminación de N-NH₄). El rendimiento de eliminación de NT alcanzó 48% y 50% en la primera y segunda etapa, respectivamente, mientras que no se observó eliminación biológica de fósforo. A pesar de ello, el efluente cumplió los requisitos de depuración exigidos para vertido a zona sensible en poblaciones menores de 100.000 habitantes equivalentes, excepto en lo referente al fósforo en la segunda etapa experimental.

Palabras clave anóxico, anaerobio, AnoxAn, reactor biopelícula, eliminación biológica de nutrientes, procesos biológicos integrados.

INTRODUCCIÓN

La eutrofización es un proceso que se produce lentamente de forma natural en los medios acuáticos, debido a la recepción de nutrientes. Los vertidos humanos aceleran el proceso hasta convertirlo, muchas veces, en un grave problema de contaminación. Las principales fuentes de eutrofización son:

- los vertidos urbanos, que llevan detergentes y desechos orgánicos
- los vertidos ganaderos y agrícolas, que aportan fertilizantes, desechos orgánicos y otros residuos ricos en fosfatos y nitratos.

En los ecosistemas acuáticos el nitrógeno (N) y el fósforo (P) son factores limitantes para el desarrollo de la biomasa, por lo que el enriquecimiento de dichos nutrientes genera un crecimiento acelerado de algas y otros organismos consumidores de oxígeno que dan lugar a un empobrecimiento de la diversidad, disminuyéndose la calidad del agua.

Actualmente, uno de los principales problemas de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) consiste en la eliminación de nutrientes para el cumplimiento de los límites de vertido.

Desde 1900 hasta la década de los 60, el tratamiento de aguas se basaba en la eliminación de residuos, el tratamiento de la materia orgánica biodegradable y la eliminación de organismos patógenos. En la década de los 60, surge la eliminación de nutrientes (N y P); los procesos biológicos convencionales se basan en la eliminación biológica de nutrientes con procesos de fangos activos (biomasa en suspensión), mientras que los procesos basados en biopelícula (biomasa fijada a soporte) se aplican fundamentalmente para la eliminación de materia orgánica y la nitrificación del amonio [1].

La eliminación biológica de N requiere de los procesos de nitrificación y desnitrificación. En primer lugar el nitrógeno amoniacal se convierte en nitrito con la oxidación de amonio y dicho nitrito se convierte en nitrato con la oxidación de nitrito; a continuación es necesaria la desnitrificación.

En lo referente a la eliminación biológica de P se precisan condiciones anaerobias y aerobias (o anóxicas). Por ejemplo, el proceso *Pho-redox* (A/O) consta de una secuencia anaerobia/aerobia para la eliminación de P; mientras que el proceso *3 Stage Pho-redox* (A2/O) para eliminación de N y P incluye una zona anóxica en la que tiene lugar la desnitrificación.

Además del A2/O, existen diversos procesos o configuraciones convencionales para la eliminación biológica de N y P. El proceso *Bardenpho* consta de una zona anaerobia seguida de una alternancia de zonas anóxicas y aerobias, con cinco etapas en total, en algunos casos las dos primeras etapas son sustituidas por zanjas de oxidación; la recirculación del fango activo nitrificado tiene lugar desde la zona aerobia a la zona anaerobia. Mientras que en el proceso UCT (*University of Cape Town*), que consta de una zona anaerobia, una zona anóxica y una zona aerobia, el fango activo nitrificado es recirculado a la zona anóxica para permitir la desnitrificación y el licor mezcla se recircula desde la zona anóxica a la zona anaerobia.

Las zanjas de oxidación para eliminar fósforo consisten en una zona anaerobia seguida de una zanja de oxidación donde tiene lugar simultáneamente la nitrificación y desnitrificación.

Los reactores secuenciales discontinuos (SBR) permiten la eliminación de nutrientes operando de forma discontinua en cuanto a la mezcla y aireación.

Los procesos híbridos químicos-biológicos, como la configuración *PhoStrip*, usados en plantas no nitrificantes, constan de un flujo lateral de fango activo en una planta de fango activo convencional. En dicho flujo se producen condiciones anaerobias y de fermentación, que tiene como resultado la liberación de fosfatos. Al añadir cal se hace produce la precipitación y la eliminación de fósforo [2], [3].

Las configuraciones convencionales para eliminación biológica de nutrientes requieren grandes necesidades de espacio, lo cual no siempre está disponible, especialmente en el caso de ampliación de EDAR existentes. Por ello, han surgido configuraciones y procesos novedosos, como el sistema de fangos activos con película fija (IFAS) que consiste en la incorporación de un soporte biopelícula a cualquier sistema de biomasa en suspensión, mejorando así las características de sedimentación y capacidad de tratamiento. Mientras que el reactor biopelícula de lecho móvil (MBBR) es similar al sistema IFAS, pero no incluye recirculación de fangos [4].

Kwon et al. [5] estudiaron un reactor multicapa de flujo ascendente (UMBR), que actúa a su vez de decantador primario y contiene una zona anaerobia y otra anóxica, y un reactor aerobio posterior de biopelícula con decantador lamelar donde se produce la nitrificación y la recirculación de la biomasa al UMBR.

Andalib et al. [6] estudiaron la eliminación de nutrientes en una planta con una columna anóxica ascendente y una columna aerobia descendente (TCFBBR). Tras alcanzar una determinada altura, las partículas de la biopelícula son transferidas a la columna descendente a través de una tubería inclinada; recirculándose, los nitratos producidos en esta columna, a la columna anóxica. La eliminación de fósforo tiene lugar debido a asimilación y a precipitación.

Song et al. [7] llevaron a cabo un estudio de un biorreactor de membrana secuencial anóxico/anaerobio (SAM), compuesto por un reactor secuencial anóxico/anaerobio (SAAR) y un reactor aerobio (AR) con membrana.

A pesar de que a través de los estudios de los reactores de membrana (MBR) se obtienen buenos resultados en cuanto a la eliminación de nitrógeno y permiten la separación de las fases sólida y líquida, los resultados de la eliminación de fósforo no son significativos, lo cual se consigue a través del reactor de membrana MLE (*Modified Luzack- Ettinger*).

Numerosos estudios demuestran que parámetros como el TRH (tiempo de retención hidráulica), el tiempo de recirculación, el ratio de recirculación y el SRT (*sludge retention time*) afectan a la eliminación de nutrientes.

La principal finalidad de los procesos biológicos integrados (PBI), que consisten en combinar, en un único reactor (procesos híbridos) o en reactores en serie (procesos

combinados), procesos de fangos activos y de biopelícula, ha sido la eliminación de materia orgánica y en menor medida la eliminación de nitrógeno.

El Grupo de Ingeniería ambiental (GIA) de la Universidad de Cantabria ha desarrollado varios procesos PIB innovadores para la eliminación de nutrientes. Entre ellos se encuentra la planta piloto AnoxAn+RBp+D, proceso combinado que consiste en un reactor anóxico-anaerobio de lecho de fangos y flujo ascendente, seguido de un reactor aerobio biopelícula de flujo descendente y finalmente, un decantador lamelar.

El reactor AnoxAn patentado por Tejero et al. [8] sustituye al decantador primario que normalmente se encuentra en las instalaciones convencionales de fangos activos al permitir una importante eliminación de materia orgánica e inorgánica, además de concentrar en un único reactor una zona aerobia y una zona anóxica; todo esto supone una importante reducción de espacio y de consumo energético. La elevada concentración de biomasa en este reactor, da lugar a un gran rendimiento de eliminación de nutrientes sin necesidad del uso de reactivos.

El reactor AnoxAn ha sido estudiado previamente [9, 10] tratando agua residual urbana seguido de un reactor aerobio híbrido con membranas de filtración [11]. Con el objetivo de incrementar la concentración del lecho de fango del reactor AnoxAn y mantener el posterior reactor aerobio como biopelícula puro, se modificó la estrategia de mezcla de AnoxAn reduciendo el escape de sólidos en suspensión. El objetivo principal del presente proyecto es la evaluación experimental de esta nueva configuración AnoxAn+RBp+D para la depuración de agua residual urbana y eliminación biológica de nutrientes (N y P).

MATERIALES Y MÉTODOS

Configuración experimental de la planta piloto (AnoxAn+RBp+D)

La planta piloto se ubicó en una caseta de campo en la Estación Depuradora de Aguas Residuales de Santander (EDAR El Mazo) y estuvo compuesta por un reactor anóxico-anaerobio (AnoxAn), un reactor biopelícula (RBp) y un decantador secundario de tipo lamelar.



Figura 1. Situación de la planta piloto.

El afluente a la planta fue agua residual urbana real, captada tras el pretratamiento recibido en la EDAR (desbaste, tamizado y desarenado-desengrasado), siendo el caudal Q de entrada 12 L/h aproximadamente y el TRH 8.2 h.

Los dos reactores utilizados, AnoxAn y RBp, eran verticales e iguales, de sección cuadrada $0,2 \times 0,2 \text{ m}^2$, volumen de 49 L y altura de 1,3 m.

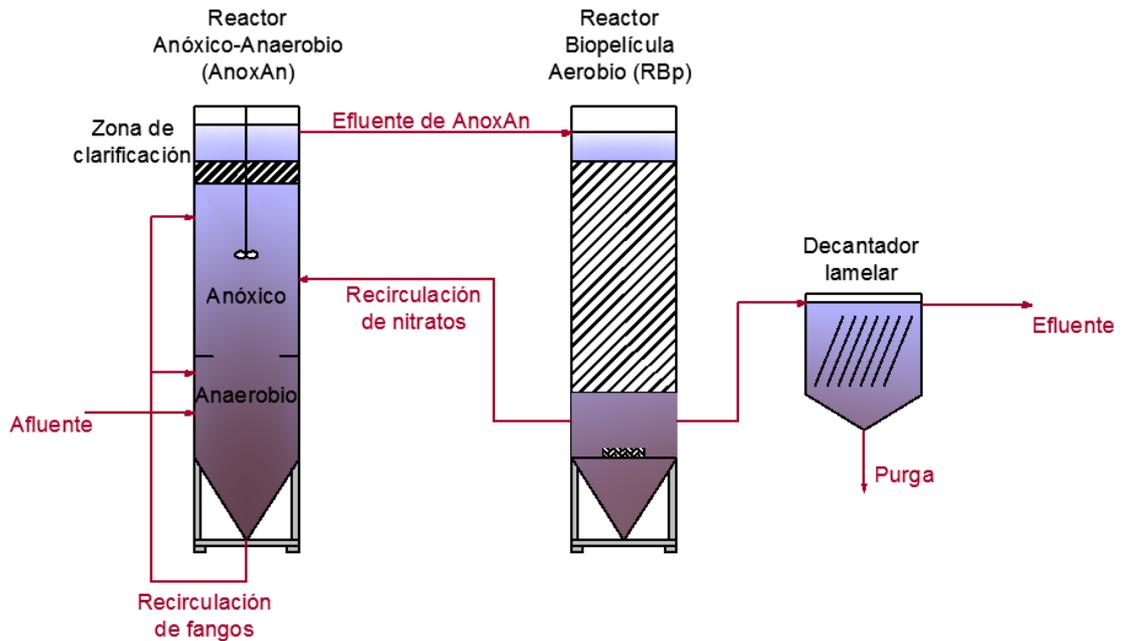


Figura 2. Esquema planta piloto AnoxAn+RBp+D.

El reactor AnoxAn, de flujo ascendente, se encuentra dividido en tres zonas:

- En la parte inferior del reactor se encuentra una zona anaerobia (13 L) por la que entra el agua afluente y que dispone de un fondo inclinado que concentra los sólidos sedimentados para su posterior recirculación a la zona anóxica para contrarrestar la decantación de los fangos y a la parte superior de la zona anaerobia para impedir el espesamiento.
- En la zona intermedia, separada por un deflector perimetral de la zona anaerobia para permitir la circulación ascendente del agua, se encuentra una zona anóxica (32 L) a la que llega una recirculación de nitratos de caudal 3 veces el caudal afluente Q (36 L/h) procedente del reactor RBp aerobio. Esta zona está dotada de un agitador mecánico que asegura la mezcla completa, reduce la sedimentación y mantiene los sólidos en suspensión.
- Y en la parte superior se encuentra una zona de clarificación (4 L), separada de la zona anóxica por un tranquilizador para la retención de sólidos, encontrándose en esta zona la salida del efluente del reactor AnoxAn.

El reactor aerobio RBp recibe el efluente del reactor AnoxAn por la parte superior y es de flujo descendente. Dispone de un soporte de tipo esponja cubos de poliuretano y dimensiones de $0,02 \times 0,01 \times 0,01 \text{ m}^3$, para el crecimiento de la biopelícula en el 60% del volumen del reactor. Está dotado de un difusor en el fondo que permite la aireación, hace posible la degradación aerobia de la materia orgánica y nitrificación, favorece la mezcla del reactor y permite limpiar los soportes de la biopelícula cuando el crecimiento de ésta es excesivo.



Figura 3. Reactores AnoxAn y biopelícula.

Finalmente, se encuentra el decantador de tipo lamelar que facilita la separación de los sólidos y el agua, y permite la purga de los sólidos concentrados en el fondo.



Figura 4. Decantador lamelar.

Métodos analíticos

El seguimiento analítico del funcionamiento de la planta se ha llevado a cabo en el laboratorio del Grupo de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cantabria, ubicado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Se han realizado los siguientes ensayos, dos veces por semana durante 25 semanas, para muestras compuestas (correspondientes a 24 h) tomadas en seis puntos de la planta: el efluente del decantador lamelar, la recirculación de nitratos, el efluente del reactor AnoxAn, el afluente, la zona anaerobia y la zona anóxica, y almacenadas a una temperatura aproximada de 4°C en la caseta de campo hasta su traslado al laboratorio.

- Ensayo de determinación de la demanda química de oxígeno (DQO) según el *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* [12], para las muestras: efluente, recirculación de nitratos, efluente de AnoxAn y afluente.
- Ensayo de determinación de la demanda bioquímica de oxígeno después de 5 días (DBO₅), para ello se debe calentar la muestra hasta 20°C y pretratar según establece el *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, para las muestras: efluente y afluente.
- Determinación de los sólidos en suspensión totales (SST) y volátiles (SSV), mediante la filtración de las muestras y su posterior secado a 105°C y calcinación de los sólidos volátiles a 550°C, para todas las muestras.
- Ensayo de determinación del nitrógeno total (NT) mediante la utilización de kits HACH Test'N Tube, para las muestras: efluente y afluente.
- Ensayo de determinación de nitrógeno de nitratos (N-NO₃) mediante la utilización de kits MERCK Spectroquant Test, para todas las muestras.
- Ensayo de determinación de fósforo de fosfatos (P-PO₄) mediante la utilización de kits MERCK Spectroquant Test, para todas las muestras.
- Determinación de la conductividad mediante sonda portátil HACH HQ40d, para las muestras: efluente y afluente.
- Y determinación del nitrógeno amoniacal (N-NH₄) mediante electrodo selectivo o la utilización de kits MERCK Spectroquant Test, para las muestras: efluente, recirculación de nitratos, efluente de AnoxAn y afluente.

Adicionalmente, con el objetivo de caracterizar la actividad llevada a cabo por la biomasa acumuladora de fósforo PAO y DPAO se ha realizado un ensayo de actividad biológica de la eliminación de fósforo con biomasa del reactor AnoxAn, de acuerdo al método propuesto por Wachtmeister et al. [13]. Durante el ensayo el fango se mantuvo a 20°C, continuamente

agitado para proporcionar una mezcla adecuada y midiéndose la concentración de oxígeno disuelto y la temperatura mediante una sonda. Se dispuso un reactor de 2 L de volumen con fango en suspensión de la zona anaerobia de la planta, al que se añadió acetato sódico como fuente de materia orgánica fácilmente biodegradable. Una vez que el ácido acético se ha consumido completamente el fango anaerobio se divide en dos partes iguales; exponiendo una parte a condiciones aerobias mediante la inyección de oxígeno a través de un difusor, y la otra parte a condiciones anóxicas mediante la adición de nitrato sódico. Se tomaron muestras cada 15 minutos durante la primera hora, y cada 30 minutos hasta el final de cada fase; permitiendo, el análisis de la concentración de fosfatos, obtener las tasas de liberación de fosfatos en condiciones anaerobias ($P_{release\ rate}$) y de acumulación de fosfato en condiciones aerobias y anóxicas ($P_{uptake\ rate}$).

Etapas experimentales

Durante el seguimiento de la planta piloto se distinguieron dos etapas, denominadas en los siguientes apartados como Etapa 1 y Etapa 2.

La etapa 1 corresponde a un período comprendido entre el día 18 de diciembre de 2012 y el 5 de marzo de 2013 (11 semanas) en el que se realiza el seguimiento analítico del agua residual urbana bruta. Desde el 5 de marzo de 2013 hasta el último día de realización de los ensayos, 6 de junio de 2013 (14 semanas), se añade una dosificación de fosfatos, acetato sódico y nitrógeno amoniacal al afluente. La planta piloto está situada en una zona lluviosa y costera, por lo que el agua residual es de caracterización débil, con esta dosificación se busca obtener un agua residual más típica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Materia orgánica

Las concentraciones de DQO y DBO₅ en el afluente y en el efluente, así como los rendimientos de eliminación se muestran en la tabla 1 y figuras 5 y 6.

Tabla 1. Concentración rendimiento de eliminación de DQO y DBO₅.

| | DQO | | DBO ₅ | | |
|--------------------------------|------------|--------------|------------------|---------|--------|
| | Etapa 1 | Etapa 2 | Etapa 1 | Etapa 2 | |
| Afluente | | | | | |
| Rango | 64-248,42 | 31,74-602,98 | Rango | 10-140 | 50-400 |
| Media | 158,73 | 242,66 | Media | 75 | 159,25 |
| Efluente | | | | | |
| Rango | 8,38-54,74 | 4,12-189,58 | Rango | 3-6 | 3-39 |
| Media | 25,02 | 39,72 | Media | 4,50 | 9,68 |
| Rendimiento eliminación | | | | | |
| | 82.66% | 81.66% | | 86.24% | 93.21% |

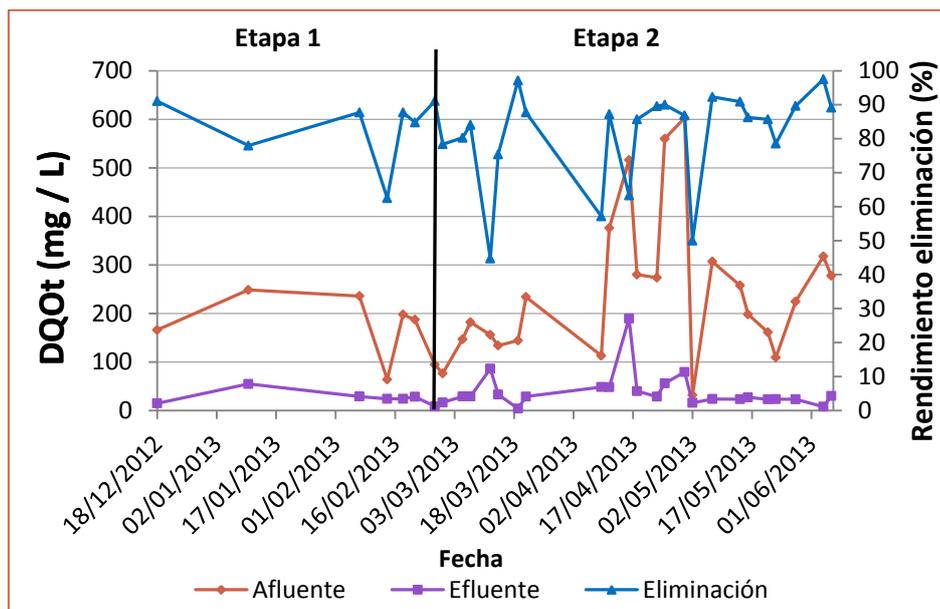


Figura 5. Eliminación de DQO.

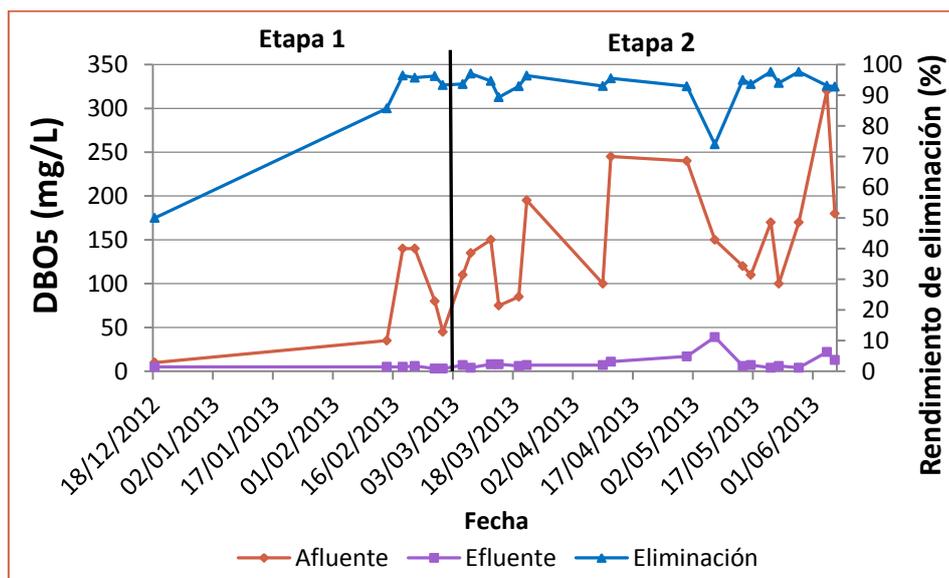


Figura 6. Eliminación de DBO5.

La eliminación de materia orgánica fue prácticamente completa y estable durante toda la experimentación. Particularmente, se observó que la dosificación dio lugar a un ligero aumento del rendimiento de eliminación de la DBO₅, manteniéndose aproximadamente constante en el caso de la DQO.

Sólidos en suspensión

La concentración de sólidos en suspensión en el afluente, el efluente de AnoxAn y el efluente total y los rendimientos de eliminación se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Concentración rendimiento de eliminación de SST.

| SST | | | |
|------------------------|--------------------|-----------|------------|
| | | Etapa 1 | Etapa 2 |
| Afluente | | | |
| | Rango | 14-178 | 16-472 |
| | Media | 94,75 | 125,13 |
| Efluente AnoxAn | | | |
| | Rango | 15-77 | 7-127 |
| | Media | 35,5 | 63,39 |
| | Eliminación | 22,40% | 35,90% |
| Efluente | | | |
| | Rango | 3,8-13,93 | 6,57-25,97 |
| | Media | 8,88 | 14,16 |
| | Eliminación | 97,33% | 94,65% |

La concentración de sólidos en suspensión en el lecho de fango en las zonas anóxica y anaerobia del reactor AnoxAn se muestra en la figura 7 y los rendimientos de eliminación en la figura 8.

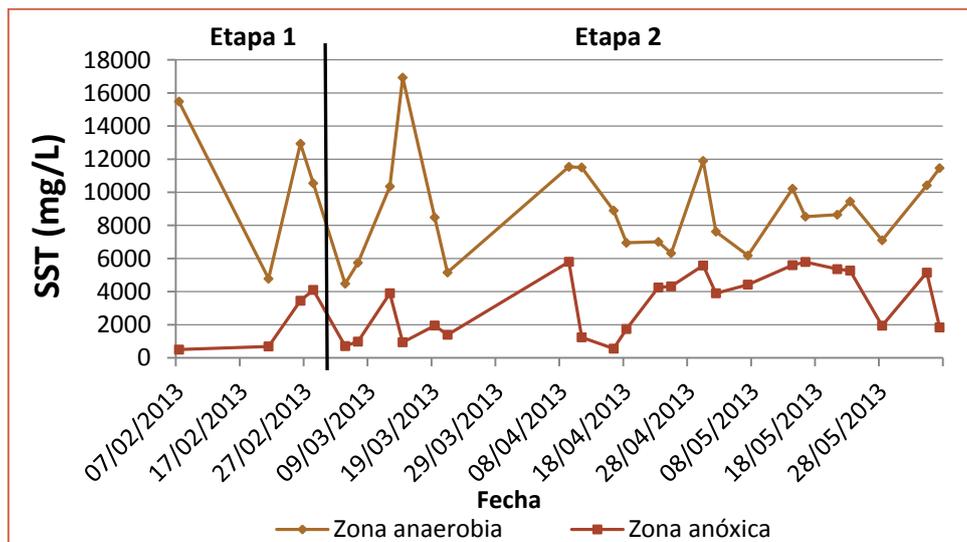


Figura 7. SST en la zona anóxica y en la zona anaerobia.

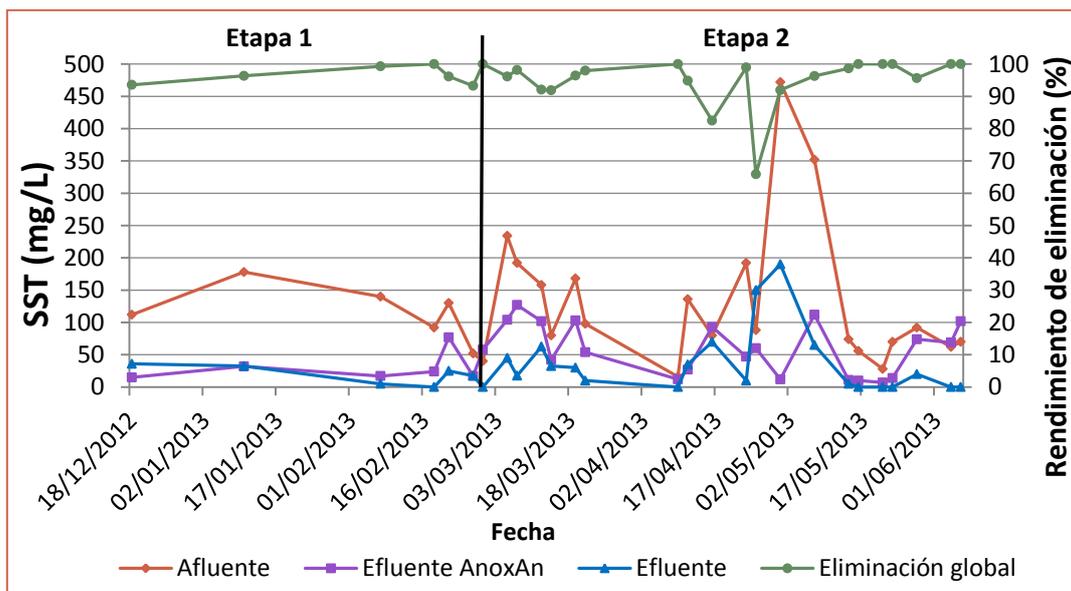


Figura 8. Eliminación de SST.

La estrategia de mezcla del reactor AnoxAn se mostró válida para evitar el escape de sólidos en suspensión. La concentración de SST en el efluente de AnoxAn se mantuvo por debajo de 130 mg/L durante toda la experimentación. En cambio, no se apreció un aumento significativo de la concentración de sólidos en el lecho de fango. La zona anaerobia alcanzó concentraciones de SST de 17 g/L de manera puntual, manteniéndose entre 6 y 12 g/L de manera general, mientras que en la zona anóxica no se superaron los 6 g/L. Incluso se registraron valores de concentración de SST en la zona anóxica inferiores de 1 g/L en episodios puntuales que se atribuyen a problemas operacionales con el sistema de mezcla y agitación. Estos valores superan los obtenidos en anteriores experimentaciones [10] pero sin alcanzar un lecho de fango de elevada concentración. Respecto a la eliminación de SST, la dosificación provocó una pequeña disminución del rendimiento de eliminación, aunque este se mantuvo aproximadamente constante.

Nitrógeno

La concentración de NT en el afluente y en el efluente, así como el rendimiento de eliminación, se muestran en la tabla 3 y figura 9.

Tabla 3. Concentración rendimiento de eliminación de NT.

| NT | | | |
|-----------------------------------|-------|-----------|------------|
| | | Etapa 1 | Etapa 2 |
| Afluente | | | |
| | Rango | 8,1-32,87 | 13,47-49 |
| | Media | 18,7 | 29,44 |
| Efluente | | | |
| | Rango | 3,8-13,93 | 6,57-25,97 |
| | Media | 8,875 | 14,16 |
| Rendimiento de eliminación | | | |
| | | 47,71% | 49,77% |

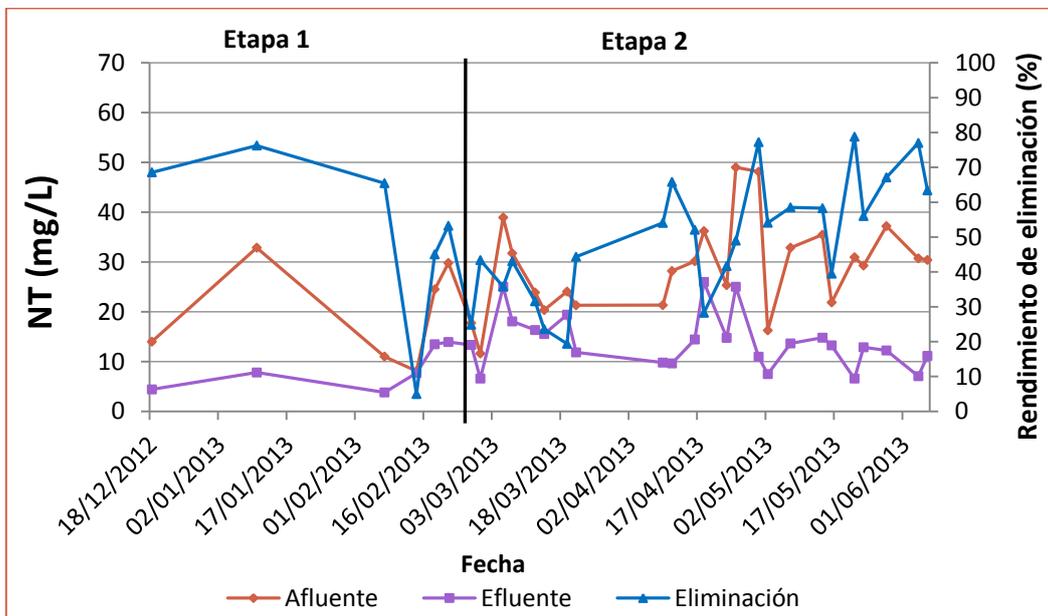


Figura 9. Eliminación de NT.

En lo referente al nitrógeno amoniacal, se muestran las concentraciones y el rendimiento de eliminación en la tabla 4 y en la figura 10. Como se puede observar, la nitrificación fue prácticamente completa y estable durante toda la experimentación.

Tabla 4. Concentración rendimiento de eliminación de N-NH₄.

| N-NH ₄ | | | |
|------------------------|--------------------|------------|------------|
| | | Etapa 1 | Etapa 2 |
| Afluente | | | |
| | Rango | 3,34-24,4 | 4,4-25,4 |
| | Media | 11,57 | 16,70 |
| Efluente AnoxAn | | | |
| | Rango | 0,817-4,45 | 0,84-10,96 |
| | Media | 2,46 | 4,53 |
| | Eliminación | 74,04% | 72,98% |
| Efluente | | | |
| | Rango | 0,03-0,32 | 0,06-5,5 |
| | Media | | |
| | Eliminación | 98,47% | 93,74% |

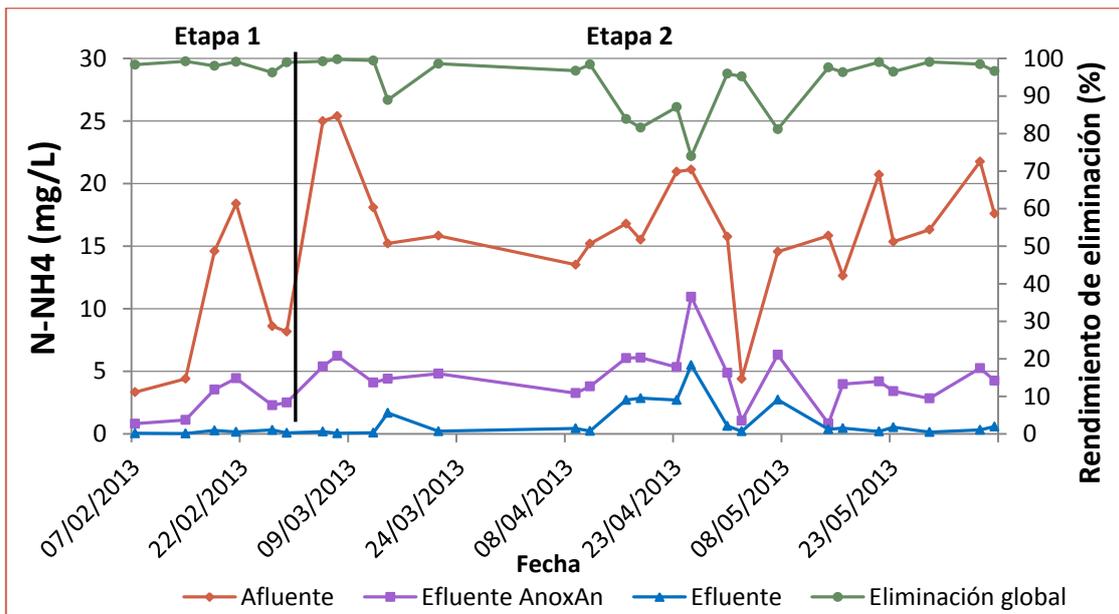


Figura 10. Eliminación de N-NH₄.

El rendimiento de desnitrificación se obtuvo mediante balance de masa de nitratos en el reactor AnoxAn, teniendo en cuenta el caudal y concentración de la recirculación desde el posterior reactor aerobio. También se calculó la tasa de desnitrificación respecto del volumen de la zona anóxica. En la tabla 5 y en la figura 11 se muestran las concentraciones de N-NO₃ en el afluente, el efluente de AnoxAn, la recirculación de N-NO₃ y el efluente, además del rendimiento de desnitrificación y la tasa de desnitrificación.

Tabla 5. Concentración rendimiento de desnitrificación.

| N-NO3 | | | |
|---------------------------------|-------------|----------|----------|
| Afluente | | Etapa 1 | Etapa 2 |
| | Rango | <0,5-1,2 | <0,5-2,8 |
| | Media | <0,75 | <1,11 |
| Efluente AnoxAn | | | |
| | Rango | 1,4-6,5 | 0,8-10,5 |
| | Media | 4,05 | 3,42 |
| Recirculación de N-NO3 | | | |
| | Rango | 6-12,7 | 0,9-16 |
| | Media | 8,13 | 6,67 |
| Efluente | | | |
| | Rango | 6-12,3 | 0,8-16,4 |
| | Media | 8,08 | 6,93 |
| Rendimiento de desnitrificación | | | |
| | | 31,95% | 25,96% |
| Tasa de desnitrificación | | | |
| | gN-NO3/m3 d | 73,58 | 57,05 |

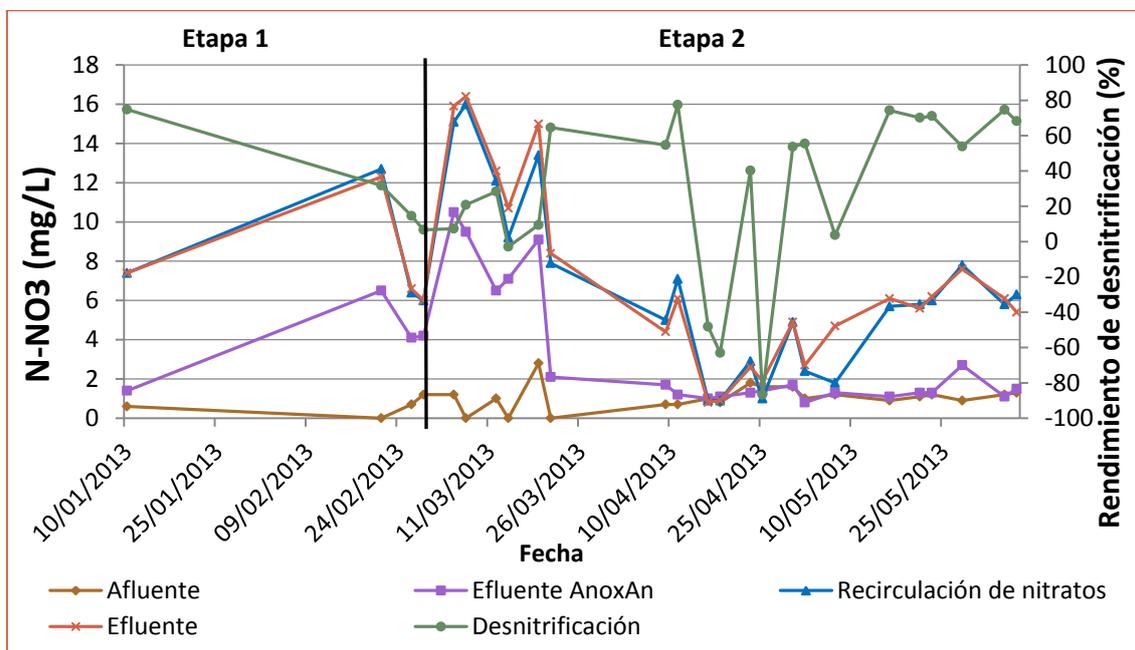


Figura 11. Proceso de desnitrificación.

Se puede concluir que el ratio de desnitrificación es bajo (73,58 gN-NO3/m3/d en la etapa 1 y 57,05 gN-NO3/m3/d en la etapa 2) en comparación con Larrea et al. [14] que obtiene ratios de desnitrificación entre 100 y 330 gN-NO3/m3/d.

Desde el inicio de la dosificación extra se observaron ligeras diferencias en los rendimientos de eliminación de nitrógeno. A pesar del incremento en la concentración afluente de NT, se observó un aumento de aproximadamente el 2% en el rendimiento de eliminación de NT. En cuanto a los requisitos de los tratamientos de nutrientes, el límite de vertido de NT a zona sensible de acuerdo a la Directiva 91/271/CEE es, para comunidades menores de 100.000 habitantes equivalentes, de 15 mg/L y para comunidades mayores de 100.000 habitantes equivalentes, de 10 mg/L.

En lo referente a los días de lluvia, se produce la dilución del agua residual urbana bruta por lo que no se dan condiciones favorables para la eliminación de NT. Sin embargo, como se comprueba en las gráficas, la dosificación permite compensar dicha dilución.

Fósforo

La concentración de fosfatos en el afluente y en el efluente se muestran en la siguiente tabla 6 y en la figura 12.

Tabla 6. Concentración P-PO4.

| P-PO4 | | | |
|-----------------|-------|----------|-----------|
| | | Etapa 1 | Etapa 2 |
| Afluente | Rango | 0,2-2,55 | 0,62-8,12 |
| | Media | 1,09 | 3,72 |
| | | | |
| Efluente | Rango | 0,21-1,7 | 0,46-6,56 |
| | Media | 0,89 | 3,92 |
| | | | |

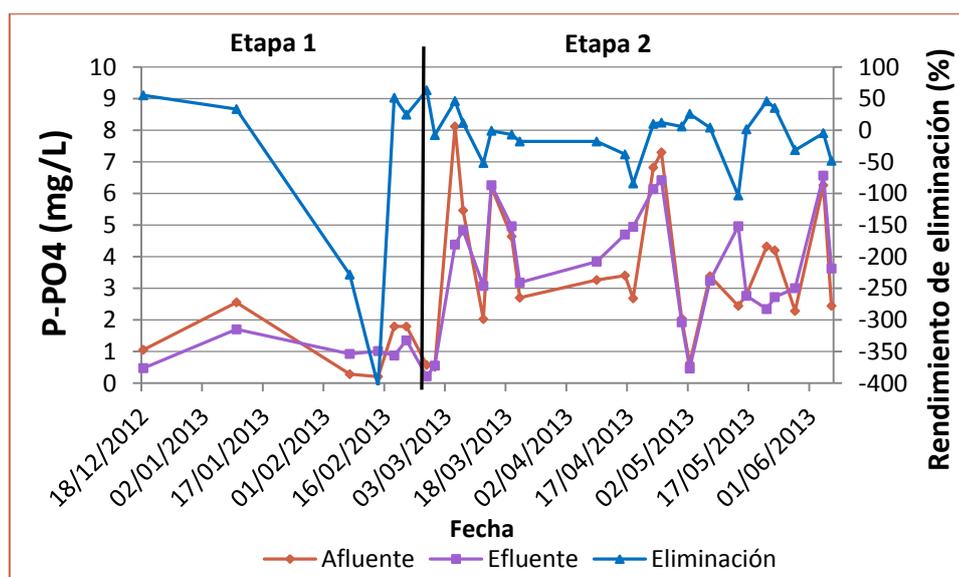


Figura 12. Rendimiento de eliminación.

No se observó eliminación de P-PO₄ en ninguna de las dos etapas, obteniendo un efluente similar al afluente. Esto pudo deberse a unas condiciones inadecuadas para el desarrollo de biomasa DPAO, que serían las responsables de la eliminación de P dado que apenas se produce escape de sólidos del reactor AnoxAn al posterior reactor aerobio. Para identificar la presencia o no de biomasa PAO y DPAO se llevó a cabo el ensayo de actividad biológica de eliminación de fósforo cuyos resultados se muestran en la figura 13 y en la tabla 7.

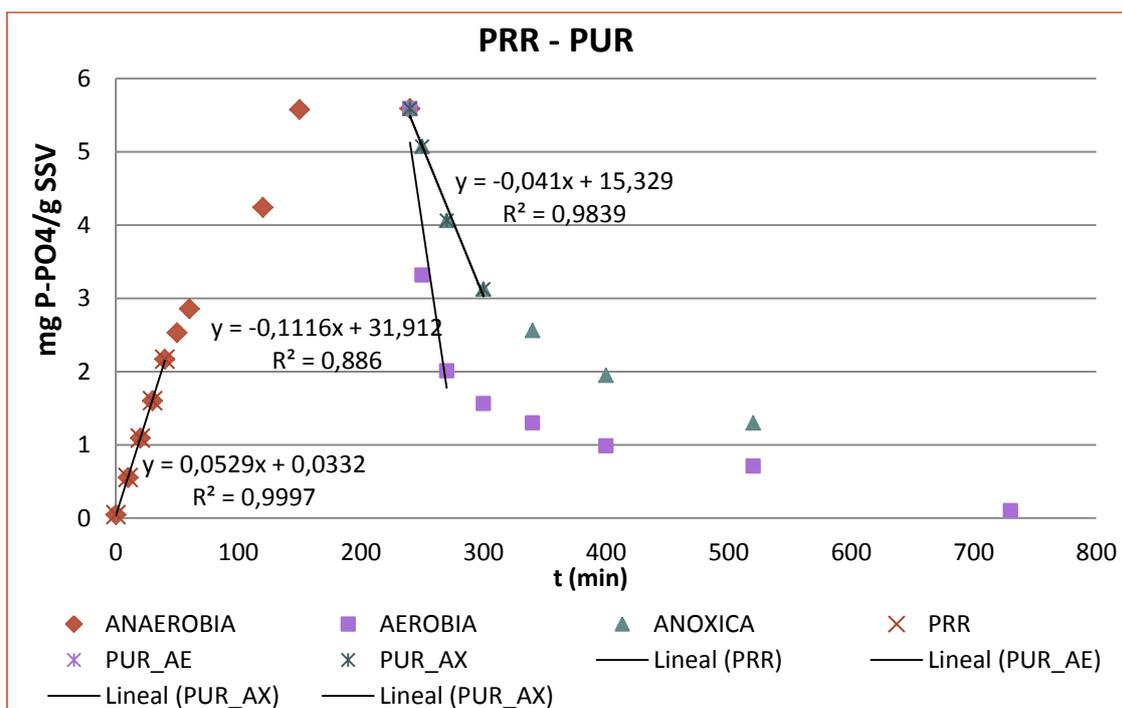


Figura 13. Ensayo de actividad.

Tabla 7. Ensayo de actividad biológica de eliminación de fósforo.

| Parámetros | Valor | Unidades |
|-------------------------------------|-------|-----------------------------|
| P_{release} rate | 3,174 | mgP-PO ₄ /gSSV h |
| P_{uptake} rate PAO | 6,696 | mgP-PO ₄ /gSSV h |
| P_{uptake} rate DPAO | 2,460 | mgP-PO ₄ /gSSV h |

Se observó la liberación fosfatos en condiciones anaerobias y su posterior acumulación en condiciones anóxicas y aerobia. Por lo tanto, se puede concluir que en las condiciones de operación de la planta piloto se ha desarrollado biomasa PAO y DPAO, cuyo funcionamiento es adecuado cuando las condiciones son totalmente favorables, tal y como en el ensayo realizado en el laboratorio [15]. La no eliminación biológica de P se pudo deber a condiciones inadecuadas en la planta, tales como las características del agua residual tratada, la relación C/N o la alternancia de condiciones anaerobias/anóxicas para las biomasa DPAO. Todas estas hipótesis precisan continuar las investigaciones para optimizar la eliminación biológica de P en el reactor AnoxAn.

En comparación con los resultados del estudio de la actividad biológica de la eliminación de fósforo de Monclús et al. [16], cuyos parámetros en mgP-PO₄/gSSV/h son: $P_{release}$ 2,26-4,94, P_{uptake} PAOs 6,24-8 y P_{uptake} DPAOs 2,26-3,29; el funcionamiento de las PAOs y DPAOs es correcto, habiéndose obtenido los parámetros en mgP-PO₄/gSSV/h: $P_{release}$ 3,174, P_{uptake} PAOs 6,696 y P_{uptake} DPAOs 2,46.

En cuanto a los requisitos de los tratamientos de nutrientes, el límite de vertido de PT a zona sensible de acuerdo a la Directiva 91/271/CEE es, para comunidades menores de 100.000 habitantes equivalentes, de 2 mg/L y para comunidades mayores de 100.000 habitantes equivalentes, de 1 mg/L.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha estudiado el proceso para eliminación biológica de nutrientes formado por un reactor anóxico-anaerobio (AnoxAn) y un reactor biopelícula (RBp) seguido de un decantador lamelar, durante un período experimental de 25 semanas, en las que se ha comprobado el correcto funcionamiento de la planta tratando agua residual urbana (primera etapa de 11 semanas) y agua residual con dosificación extra de materia orgánica y nutrientes (segunda etapa de 14 semanas).

La estrategia de mezcla del reactor AnoxAn se mostró válida para evitar el escape de sólidos en suspensión, manteniendo el posterior reactor aerobio como biopelícula puro. A su vez, la concentración de sólidos en suspensión en el lecho de fango fue superior a la obtenida en anteriores experimentaciones, aunque no se logró un lecho de muy elevada concentración.

Se ha observado nitrificación y eliminación de materia orgánica prácticamente completa y estable durante todo el periodo experimental, obteniéndose concentraciones medias de DQO, DBO, SST y N-NH₄ en el efluente tratando agua residual urbana bruta (primera etapa) de 25,02mg/L, 4,50mg/L, 2,90mg/L y 0,17mg/L, respectivamente, que corresponden a rendimientos de eliminación del 82,66%, 86,24%, 97,33% y 98,47%, respectivamente; y para el agua residual urbana con una dosificación de fosfatos, acetato sódico y nitrógeno amoniacal (segunda etapa), 39,72mg/L, 9,64mg/L, 6,74mg/L y 1,05mg/L, respectivamente, que corresponden a rendimientos de eliminación del 81,66%, 93,21%, 94,65% y 93,74%, respectivamente. En ambas etapas se cumplen de manera holgada los límites establecidos por la Directiva 91/271/CEE para tratamiento secundario de aguas residuales.

Además, se ha comprobado que el reactor AnoxAn permite una desnitrificación del 31,94% para el agua residual urbana bruta (primera etapa), y del 25,96% para el agua residual urbana con dosificación (segunda etapa). Esto dio lugar a una concentración efluente de NT, en la primera etapa, de 8,88mg/L, que corresponde a un rendimiento de eliminación 47,71%; y, en la segunda etapa, de 14,16mg/L, que corresponde a un rendimiento de eliminación 49,77%. Por lo que puede concluirse que se cumple siempre el límite de vertido para comunidades menores de 100.000 habitantes equivalentes.

No se consiguió la eliminación biológica de fósforo durante la experimentación. A pesar de ello, el afluente de agua residual urbana bruta tiene cantidades de P-PO₄ muy pequeñas por lo que se puede prever que se cumple el límite de vertido para comunidades mayores de 100.000 habitantes equivalentes. Mediante ensayos de actividad biológica de la biomasa PAO y DPAO en fango del lecho anóxico del reactor AnoxAn, se comprobó su presencia y capacidad de eliminación de P, con valores comparables a los obtenidos por otros autores. Las razones por las que no se elimina fósforo podrían ser la falta de sustrato fácilmente biodegradable en el afluente; la falta de nitratos, que da lugar a la acumulación de fosfatos al perder, la zona anóxica, sus condiciones anóxicas; o la baja concentración de sólidos en suspensión en el efluente de AnoxAn, por lo que en el reactor biopelícula aerobio no se produce acumulación de fósforo.

REFERENCIAS

[1] Kang, S. J., Olmstead, K., Takacs, K., Collins, J. (2008) Municipal Nutrient Removal Technologies. Contract EP-C-05-046.

[2] Nutrient Control Design Manual_State of technology (2009). Contract No. EP-C-05-058.

[3] George T. Moore (2010). Nutrient Control Design Manual. Contract No. EP-C-05-058.

[4] Water Environment Federation and the American Society of Civil Engineers. Environmental and Water Resources Institute, (2010) Design of Municipal Wastewater Treatment Plants.

[5] Kwon, J. C., Park, H. S., An, J. Y., Shim, K. B., Kim, Y. H., Shin, H. S., (2005) Biological nutrient removal in simple dual sludge system with an UMBR (upflow multi-layer bioreactor) and aerobic biofilm reactor. Water Science & Technology Vol 52, No 10-11, pp 443-451.

[6] Andalib, M., Nakhla, G., Zhu, J., (2010). Dynamic testing of the twin circulating fluidized bed bioreactor (TCFBBR) for nutrient removal from municipal wastewater. Chemical Engineering Journal 162 (2010) 616–625.

[7] Song, K. G., Cho, J., Cho, K. W., Kim, S. D., Ahn, K. H., (2010) Characteristics of simultaneous nitrogen and phosphorus removal in pilot-scale sequencing anoxic/anaerobic membrane bioreactor at various conditions. Desalination 250, 801-804.

[8] Díez, R., Tejero, I., (2009) Reactor biológico compacto anóxico-anaerobio para la depuración y eliminación de nutrientes de aguas residuales. Proyecto fin de máster, Máster de Investigación en Ingeniería Ambiental. Universidad de Cantabria.

[9] Pérez, P., Tejero, I., Díez, R., (2010) Eliminación biológica de nutrientes en aguas residuales urbanas mediante un reactor biológico anóxico-anaerobio (AnoxAn) y un reactor biopelícula con membrana de filtración. Proyecto fin de máster, Máster de Investigación en Ingeniería Ambiental. Universidad de Cantabria.

[10] Herrero, M., Tejero, I., Díez, R., (2010) Eliminación biológica de nutrientes en un reactor anóxico-anaerobio (AnoxAn) seguido de un reactor biopelícula aerobio con membranas. Proyecto fin de máster, Máster de Investigación en Ingeniería Ambiental. Universidad de Cantabria.

[11] Tejero y Cuevas (2005) Patente ES2213461B2.

[12] APHA, AWWA, WEF, (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st ed. American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington, DC, USA.

[13] A. Wachtmeister, T. Kuba, M.C.M. Van Loosdrecht, J.J. Heijnen (1997) A sludge characterization assay for aerobic and denitrifying phosphorus removing sludge. *Wat. Res.* Vol 31, No 3, pp 471-478.

[14] Larrea, L., Albizuri, J., Abad, A., Larrea, A., Zalakain, G., (2007) Optimizing and modelling nitrogen removal in a new configuration of the moving-bed biofilm reactor process. *Water Science & Technology*, Vol. 55 No 8–9, pp. 317–327.

[15] Kuba, T., Smolders, G., Van Loosdrecht, M. C. M., Heijnen, J. J., (1993) Biological phosphorus removal from wastewater by anaerobic-anoxic sequencing batch reactor. *Water Science & Technology*, Vol. 27, No. 5-6, pp. 241-252.

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