



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

**TRABAJO FIN DE MASTER**

MASTER EN INVESTIGACIÓN

INGENIERÍA DE PROCESOS Y SISTEMAS

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES  
URBANAS PARA LA ELIMINACIÓN DE  
NITRÓGENO Y MATERIA ORGÁNICA MEDIANTE  
UN SISTEMA SBR.

LARA PELAZ PÉREZ  
Septiembre 2013



María Fdez-Polanco, profesor del Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente de la Universidad de Valladolid, INFORMA:

Que D. Lara Pelaz Pérez ha realizado bajo mi dirección el Trabajo Fin de Master, del Master en Investigación Ingeniería de Procesos y Sistemas, titulado “Tratamiento de aguas residuales urbanas para la eliminación de nitrógeno y materia orgánica mediante un sistema SBR”.

Valladolid, 5 de Septiembre de 2013

Fdo. TUTOR

Reunido el Tribunal designado por el Comité Académico del Master en Investigación en Ingeniería de Procesos y Sistemas, para la evaluación de los Trabajos Fin de Master, y después de estudiar la memoria y atender a la defensa del trabajo “Tratamiento de aguas residuales urbanas para la eliminación de nitrógeno y materia orgánica mediante un sistema SBR”, presentado por el alumno D. Lara Pelaz Pérez decidió otorgarle la calificación de \_\_\_\_\_.

Valladolid, 10 de Septiembre de 2013

El Presidente

El Secretario

Fdo.:

Fdo.:

Vocal

Fdo.:

# TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS PARA LA ELIMINACIÓN DE NITRÓGENO Y MATERIA ORGÁNICA MEDIANTE UN SISTEMA SBR

Lara Pelaz Pérez  
Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente  
Escuela de Ingenierías Industriales. Sede Dr. Mergelina  
C/ Dr. Mergelina, s/n - P.C. 47011 - Valladolid - Spain  
Universidad de Valladolid

---

## RESUMEN

La eliminación biológica de nitrógeno en aguas residuales, a partir de reactores discontinuos secuenciales o SBR (Sequencing Batch Reactors) es un proceso que da buenos resultados.

Este trabajo muestra los resultados experimentales del proceso de tratamiento de un agua residual urbana de elevado contenido en nitrógeno amoniacal y baja materia orgánica fácilmente biodegradable. Toda la experimentación tuvo una duración de 355 días. Se ha optimizado la duración de cada ciclo de tratamiento así como la distribución de tiempo de cada una de las etapas que lo componen para conseguir eliminar el nitrógeno presente en el agua residual. El ciclo final de trabajo tiene una etapa de pre-desnitrificación, una de nitrificación y otra de desnitrificación a cuyo comienzo se añade metanol como fuente de carbono externa. De este modo, se obtienen unos porcentajes promedio de eliminación de DQO y de nitrógeno de 59% y 76% respectivamente.

**Palabras clave:** Nitrificación, Desnitrificación, Eliminación biológica. Sistema discontinuo secuencial.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

A mediados del siglo XX y principios del siglo XXI, diversas organizaciones como la Organización de las Naciones Unidas y la Comunidad Económica Europea, se han enfocado en controlar y regular el impacto que el hombre tiene sobre el medio ambiente. Una de las mayores preocupaciones es la descarga de aguas residuales en los cuerpos hídricos por lo que las legislaciones se han tornado más estrictas (García Arrazola, R.).

Para cumplir con la más exigente calidad de efluente, se han desarrollado nuevos sistemas de tratamiento de aguas residuales y los ya conocidos se han mejorado.

Existen métodos físicoquímicos y biológicos para la eliminación de nitrógeno del agua. Los primeros, en la mayoría de casos, no resuelven el problema ya que trasladan el contaminante de un ambiente a otro. Los métodos biológicos sí eliminan el contaminante y, en condiciones idóneas, sus productos finales son CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>. Por tanto, debido a que la eliminación biológica de nitrógeno es más eficaz y relativamente más barata, resulta un proceso más interesante (Young-Ho Ahn).

Debido a que en estos sistemas se requiere producir un agua clarificada de calidad específica y un lodo biológico bien sedimentado, tanto el arreglo de equipos como la operación de los mismos han incrementado en complejidad, tratando de encontrar una mayor eficiencia y una mejor economía.

La presencia de altas concentraciones de nitrógeno en las masas de agua trae como consecuencia la acelerada eutrofización de ríos, lagos y embalses, debido a que puede ser utilizado como nutriente para plantas acuáticas (Sadarriaga, J. C. et al.).

La eliminación de nitrógeno es muy importante debido a que este elemento químico existe en muy diversas formas por su gran número de estados de oxidación y a que puede ser asimilado biológicamente por los microorganismos. Además, puede encontrarse en las aguas residuales en sus formas orgánicas, amoniacales y en nitritos o nitratos, los cuales requieren tratamiento para su remoción. Dichos compuestos no son deseables en las descargas por diversas razones: el *amoniacal* es tóxico para organismos acuáticos; el *ion amonio* es un compuesto consumidor de oxígeno por lo que agota el oxígeno disuelto en las aguas receptoras; en todas sus formas, el nitrógeno puede ser utilizado como nutriente para plantas acuáticas y ocasionar eutrofización; y como *ion nitrito* es un peligro para la salud de los bebés.

En el caso del nitrógeno de entrada de un agua residual, éste se presenta principalmente en forma de compuestos amoniacales aunque también puede estar en forma de nitrógeno orgánico. Los N-orgánicos pasan a N-amoniacales para posteriormente ser removidos por dos procesos: nitrificación y desnitrificación (García Arrazola, R.)

El método biológico aplicado para la eliminación de nitrógeno es un proceso de dos etapas, una fase aerobia, en la que ocurre la oxidación del nitrógeno amoniacal a nitritos y nitratos, denominada nitrificación,

seguido por una segunda fase anóxica, en la que los nitritos y nitratos se reducen a nitrógeno gaseoso, el cual es liberado a la atmósfera, denominada desnitrificación. (Correa, M. A. et al.).

El objetivo fundamental del proyecto es el diseño de un sistema de tratamiento biológico con lodos activos de un efluente municipal que tiene una alta carga de nitrógeno amoniacal, capaz de eliminar el contenido de nitrógeno presente mediante nitrificación-desnitrificación y basado en la tecnología SBR.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Materiales:

El agua a tratar es un agua residual urbana procedente de un reactor anaerobio. Se trata de un agua con elevado contenido en nitrógeno amoniacal y poca materia orgánica.

Las características del agua se muestran en la tabla 1:

**Tabla 1: Características del agua a tratar.**

DQO soluble (mg O <sub>2</sub> /L)	NKT (mg N/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /L)	P soluble (mg P/L)
100,6	81,9	77,7	9,2

Para llevar a cabo la etapa de nitrificación, por medio de un compresor se introdujo aire del ambiente al proceso para aportar el oxígeno necesario.

Para la etapa de desnitrificación fue necesario añadir metanol (1:100), como luego se explica más adelante.

### 2.2. Dispositivo experimental: Sistema piloto de fangos activados en discontinuo (SBR):

El reactor discontinuo secuencial, o Sequencing Batch Reactor (SBR) en inglés, es un sistema de tratamiento de fangos activados que opera mediante un procedimiento de llenado-vaciado. En este tipo de reactores, el agua residual es adicionada en un solo reactor que trabaja por cargas repitiendo un ciclo (secuencia) a lo largo del tiempo. Una de las características de los SBR es que todas las diferentes operaciones (llenado, reacción, sedimentación y vaciado) se dan en el mismo reactor.

Se ha escogido un reactor de tipo discontinuo debido a que ofrecen ventajas por su flexibilidad, estabilidad, alto rendimiento y su capacidad de amortiguamiento ante cargas y caudales elevados. Dada su flexibilidad de operación, es posible introducir las condiciones requeridas para la eliminación de nitrógeno, que implican la secuencia de fases aerobias y anóxicas durante el ciclo de operación, y que generan las condiciones necesarias para la ocurrencia de procesos como la nitrificación y la desnitrificación.

El SBR cilíndrico está implantado en una caseta perteneciente al departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente de la Universidad de Valladolid.

El sistema piloto de fangos activados discontinuo (SBR) operado para el desarrollo de este estudio lo conforman los tanques de almacenamiento (de alimentación, efluente y rebose), y el tanque reactor. El tanque reactor tiene un volumen total de 6 litros y su interior está conformado por un difusor de burbuja fina que hace parte del sistema de aireación (conjunto difusor-soplante) y un sistema de agitación mecánica. El sistema consiste además dos bombas peristálticas que permiten llevar a cabo el llenado y el vaciado del tanque. Todo ello está correctamente temporizado. Un esquema del sistema se muestra en la figura 1.

La temperatura de operación es de 18°C aproximadamente, temperatura que hay dentro de la caseta gracias a un sistema de climatización en su interior.

### 2.3. Métodos analíticos

Se tomaron muestras del agua residual urbana antes del tratamiento y del agua al finalizar el ciclo de tratamiento, después de la etapa de sedimentación. Mediante cromatografía de líquidos se calculó el nitrógeno en forma de nitrito (N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), nitrógeno en forma de nitrato (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y el fósforo soluble (P). El amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) se determinó mediante un electrodo selectivo de amoníaco. Los análisis de DQO, nitrógeno

Kjeldahl total NKT así como los sólidos suspendidos totales y volátiles (SST y SSV) fueron determinados de acuerdo a los métodos normalizados APHA-AWWA-WPCF (23).

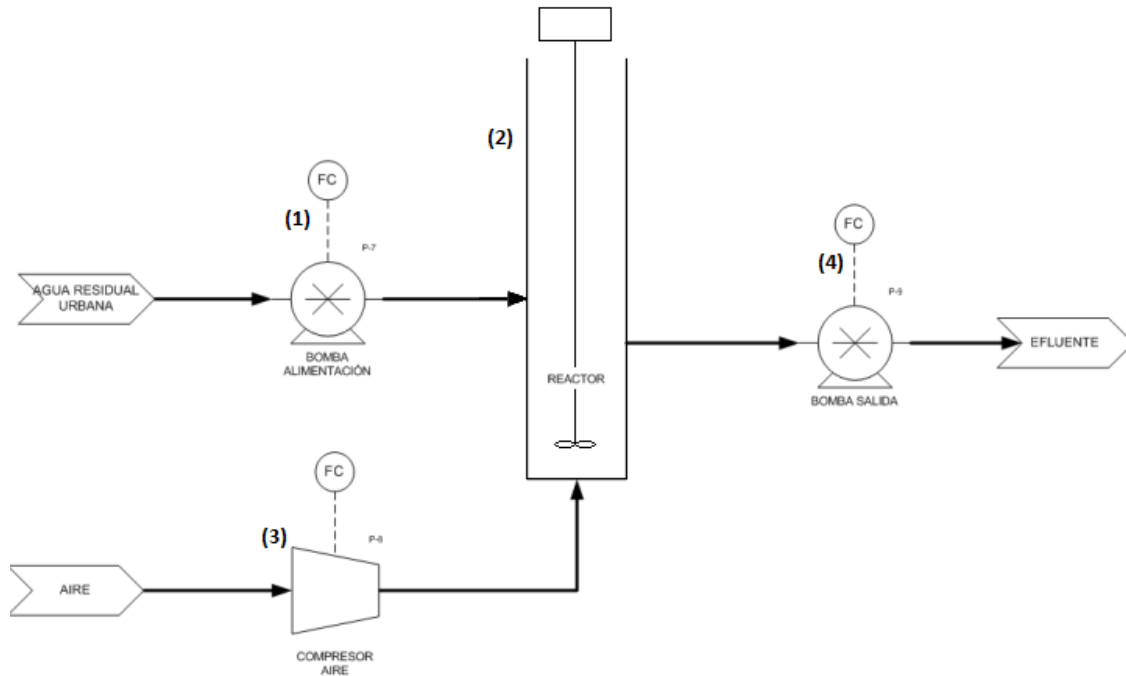


Figura 1: Esquema de la planta SBR. (1) Bomba de llenado que suministra el agua residual a tratar, (2) Reactor SBR, (3) Compresor encargado de suministrar el aire durante la etapa de aireación, (4) Bomba de vaciado por donde sale el agua después de ser tratada.

## 2.4. Condiciones de operación del sistema

El reactor se inoculó con 2,5 L de fango secundario no espesado de depuradora. La concentración de biomasa en el reactor es aproximadamente de 2,5 g SSV/L.

El proceso de tratamiento de agua residual en el reactor discontinuo secuencial estudiado, está constituido por las siguientes etapas:

- Etapla de llenado o alimentación:** durante esta etapa se carga el reactor con agua residual urbana que ha sido tratada anteriormente en un reactor anaerobio.
- Etapla de aireación:** durante esta etapa se mezcla el agua residual (con alto contenido en amonio) en el reactor con el lodo. Durante esta etapa se inyecta aire al sistema. El aire suministrado proporciona un mezclado entre el agua y el lodo.
- Mezcla anóxica:** durante esta etapa se realiza un proceso de mezclado por agitación mecánica, sin proporcionar aire al sistema.
- Etapla de sedimentación:** en esta etapa el lodo sedimenta por acción de la gravedad y se separa del agua residual tratada, obteniéndose un sobrenadante clarificado.
- Etapla de vaciado:** durante esta etapa se retira el agua residual tratada (sobrenadante), a través del sistema de descarga.

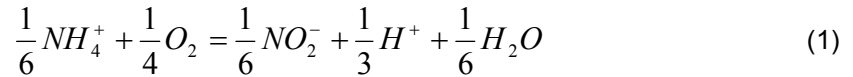
## 2.5. Funcionamiento biológico

### 2.5.1. Nitrificación biológica

La nitrificación es la oxidación microbiológica de  $\text{N-NH}_4^+$  a  $\text{N-NO}_2^-$  y  $\text{N-NO}_3^-$  (Rittmann, B. et al.). La demanda de oxígeno de este proceso es de hasta  $4,57 \text{ g O}_2/\text{g N-NH}_4^+$ .

Las bacterias nitrificantes son autótrofas, quimiolitótrofas y aerobias obligadas. Al ser autótrofos, los nitrificantes deben de fijar y reducir carbono inorgánico.

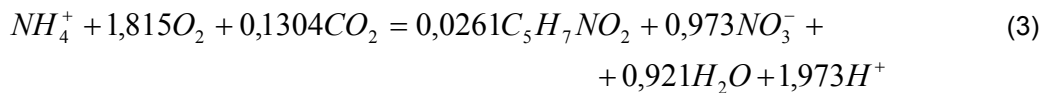
La nitrificación es un proceso en dos pasos. En el primer paso  $NH_4^+$  se oxida a  $NO_2^-$  según la reacción (1):



El primer paso se conoce como nitrificación, y el grupo de bacterias que lo lleva a cabo son los Nitrosomonas. El segundo paso (reacción 2) se conoce como nitratación y es llevado a cabo por el grupo de bacterias denominadas Nitrobacter. Estas transforman el nitrito a nitrato (2).



La ecuación (3) muestra la reacción global equilibrada de oxidación completa de  $NH_4^+$  a  $NO_3^-$ .



Las bacterias nitrificantes son muy sensibles a gran cantidad de sustancias inhibitoras, que pueden llegar a impedir el crecimiento y su actividad. Pueden resultar inhibitoras altas concentraciones de amoníaco y de ácido nitroso, siendo también importante el efecto del pH. El intervalo óptimo de pH es entre 7,5 y 8,6. La temperatura también ejerce una gran influencia sobre el crecimiento de las bacterias nitrificantes, aunque la cuantificación de dicha influencia es difícil de establecer.

Para que se produzca la nitrificación, es fundamental que existan concentraciones de oxígeno disuelto (OD) por encima de 1 mg/l. Si el nivel de OD es inferior a este valor, el oxígeno se convierte en el nutriente limitante del proceso, y puede producirse el cese o la ralentización de la nitrificación.

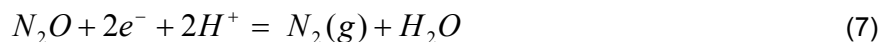
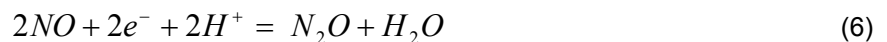
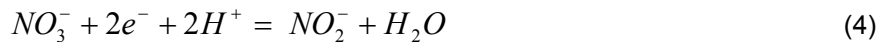
### 2.5.2. Desnitrificación biológica

Desnitrificación al proceso por el cual el nitrato y nitrito son reducidos a nitrógeno gas mediante la acción de bacterias facultativas. Este proceso se consigue bajo condiciones anóxicas (sin oxígeno).

Las bacterias desnitrificantes a destacar son las Pseudomonas, Alcaligenes, Paracocos, y Tiobacilos (Rittmann, B. et al.).

Las bacterias heterótrofas facultativas utilizan el carbono de la materia orgánica para la síntesis celular y fuente de energía (heterótrofo) y, en ausencia de oxígeno utilizan el nitrato como aceptor de electrones (anaerobia facultativa).

La desnitrificación procede en forma de pasos en los que los nitratos ( $NO_3^-$ ) se reducen secuencialmente a nitritos ( $NO_2^-$ ), óxido nítrico (NO), óxido nitroso ( $N_2O$ ) y gas ( $N_2$ ). Cada una de estas semirreacciones se muestran en las ecuaciones (4), (5), (6) y (7).



Resumiendo, el proceso de reducción del nitrógeno es el siguiente:



El NO,  $N_2O$  y  $N_2$  son gases y se pueden liberar a la atmósfera.

La capacidad de desnitrificar está relacionada con la cantidad de sustrato biodegradable presente (relación carbono orgánico/nitrógeno). En la mayoría de los tratamientos biológicos de residuos líquidos, la presencia de sustrato fácilmente degradable es baja. Con una relación carbono nitrógeno (C/N) mayor a 4,



la tasa de desnitrificación se incrementa en un factor de 1,5 a 1,7; a relaciones C/N menores a 2,5 no se alcanza una relación satisfactoria, por lo tanto se necesita una fuente externa de carbono.

La presencia de oxígeno disuelto en el proceso suprime el sistema enzimático necesario para el desarrollo de la desnitrificación. La alcalinidad se produce durante la conversión de nitrato en nitrógeno gas, lo cual provoca un aumento del pH. El pH óptimo se sitúa entre 7 y 8, con diferentes valores óptimos que dependen de las diferentes poblaciones bacterianas posibles. La temperatura afecta a la tasa de eliminación del nitrato y a la de crecimiento microbiano. Los organismos son sensibles a los cambios de temperatura.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Definición de los ciclos de operación del reactor

En el estudio se variaron los tiempos de las etapas de mezcla aerobia y mezcla anóxica del ciclo, con la finalidad de determinar la influencia de la duración de estas etapas en la remoción de nutrientes.

Los diferentes ciclos que se han estudiado se muestran en la tabla 2.

Tabla 2: Comparación de los diferentes ciclos.

Etapa	CICLOS			
	8 horas	8 horas modificado	12 horas	6 horas
Llenado	15 m	15 m	15 m	15 m
Aireación	3 h	5 h 30 m	7 h	4 h
Mezcla Anóxica	4 h	1h 30 m	4 h	1 h
Sedimentación	30 m	30 m	30 m	30 m
Vaciado	15 m	15 m	15 m	15 m

Haciendo una comparación gráfica de los parámetros a estudiar, se pueden ver los periodos de tiempo óptimos para las distintas etapas de los ciclos. En las figura 2, 3 y 4 se representa la concentración de NKT,  $N-NH_4^+$  y  $N-NO_2^-$  en función del tiempo respectivamente. Los parámetros que más se modifican en los ciclos son los relacionados con el Nitrógeno, es decir: el NKT, el amonio y el nitrito. Sólo durante la realización de dos de los experimentos (12 y 6 horas) aparecieron nitratos pero en bajas concentraciones, no superando los 4 mg  $N-NO_3^-/L$ , por eso no se detalla su evolución gráfica.

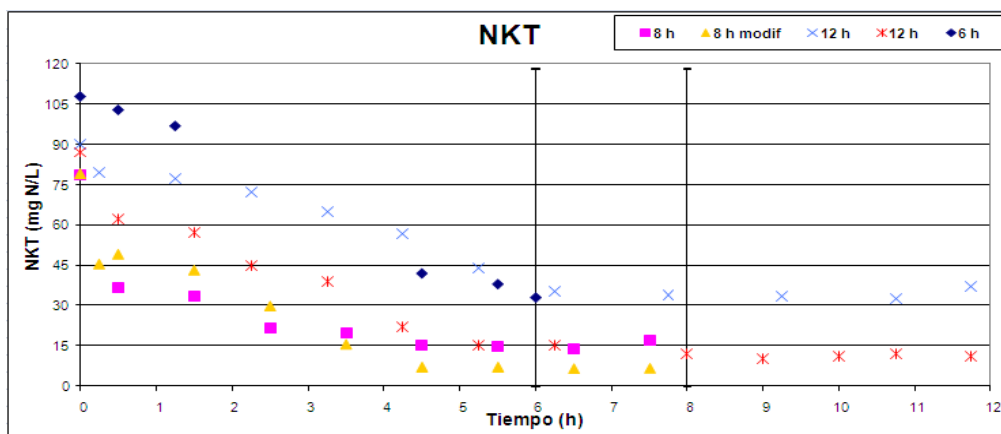


Figura 2: Evolución de la concentración de Nitrógeno Kjeldhal Total en el tiempo. ■ Representa un ciclo de 8 horas, ▲ un ciclo de 8 horas con distinta distribución de tiempos, × y \* son ciclos de 12 horas y ◆ ciclo de 6 horas.

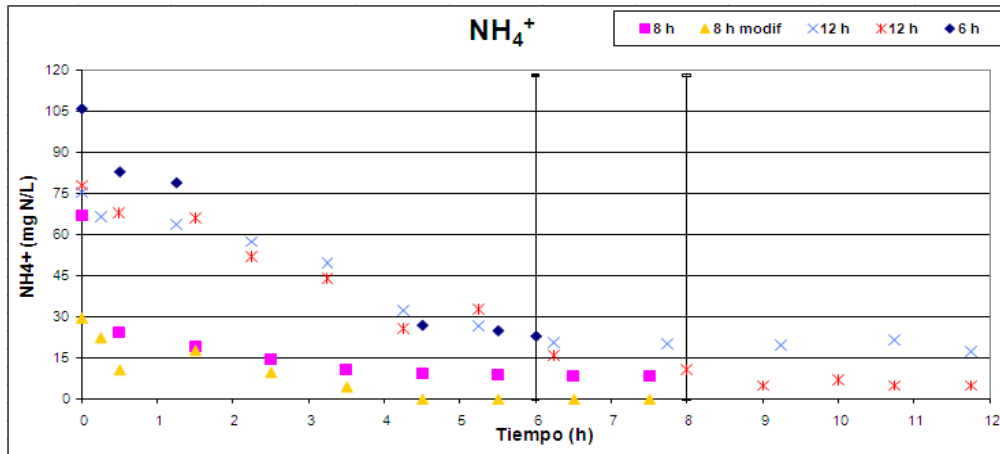


Figura 3: Evolución de la concentración de nitrógeno amoniacal en el tiempo. ■ Representa un ciclo de 8 horas, ▲ un ciclo de 8 horas con distinta distribución de tiempos, × y \* son ciclos de 12 horas y ◆ ciclo de 6 horas.

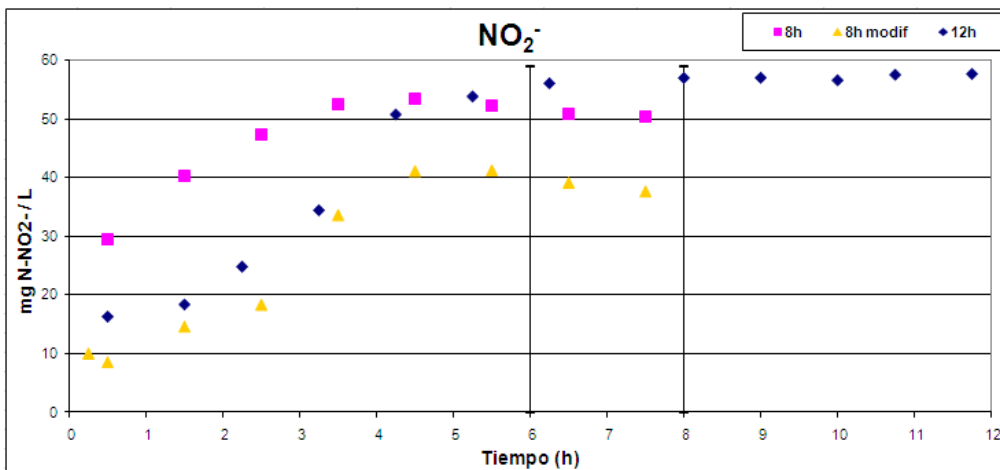


Figura 4: Evolución de la concentración de N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup> en el tiempo. ■ Representa un ciclo de 8 horas, ▲ un ciclo de 8 horas con distinta distribución de tiempos, × y \* son ciclos de 12 horas y ◆ ciclo de 6 horas.

A partir de las figuras 2, 3 y 4 se observa que la concentración de NKT, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup> de los ciclos mayores a 6 horas no muestran una variación de los parámetros mayor al 1%. Por tanto, a partir de las representaciones anteriores, se puede deducir que el *ciclo óptimo tiene una duración de 6 horas*.

### Balances de Nitrógeno:

En la tabla 3 se muestran las concentraciones del agua a tratar antes de entrar al reactor y las del agua a la salida una vez ya terminado el tratamiento biológico, para los distintos ciclos estudiados. También se incluye el porcentaje de eliminación de nitrógeno.

Tabla 3: Concentración de nitrógeno en el agua residual antes y después de ser tratada.

Parámetro	CICLOS				
	8 horas	8 horas modificado	12 horas	6 horas	
N entrada	NKT (mg N/L)	78,8	78,8	87,2	107,5
	N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg N/L)	--	--	--	--
	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg N/L)	--	--	--	--
N salida	NKT (mg N/L)	17,1	6,4	11,4	33,3
	N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg N/L)	50	37,7	57,7	11,9
	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg N/L)	--	--	3,9	4,3
% N eliminado	14,3%	44,0%	16,2%	54,0%	

### 3.2. Optimización del periodo de aireación

El objetivo de estas experiencias es determinar el tiempo óptimo necesario del proceso de aireación en el que se asegure la nitrificación.

Se han hecho diferentes seguimientos en reactores de 1 litro de volumen. En cada recipiente se ha añadido el mismo fango del reactor y el mismo agua a tratar (con baja relación C/N). La primera experiencia se llevó a cabo durante 12 horas mientras que la segunda durante 7. Durante la duración de todo el proceso hay aireación procedente de un compresor. El aire se aporta mediante un difusor para favorecer la mezcla y permitir una buena difusión de éste por todo el volumen de agua. Lo que ocurrió durante la experimentación se representa en las gráficas 5, 6, 7 y 8.

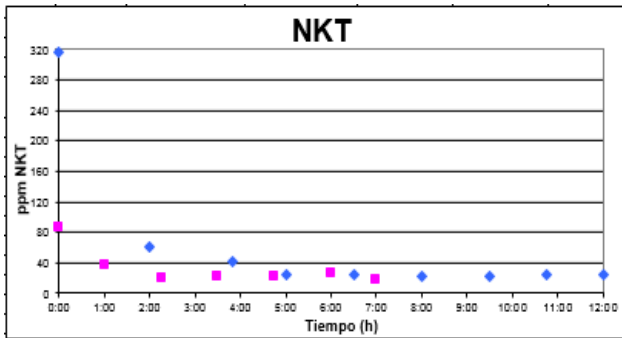


Figura 5: Variación del NKT a lo largo de 7 horas y 12 horas de oxigenación.

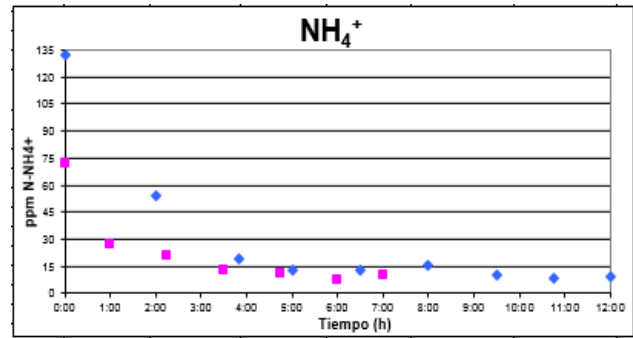


Figura 6: Variación del N-NH4+ a lo largo de 7 horas y 12 horas de oxigenación.

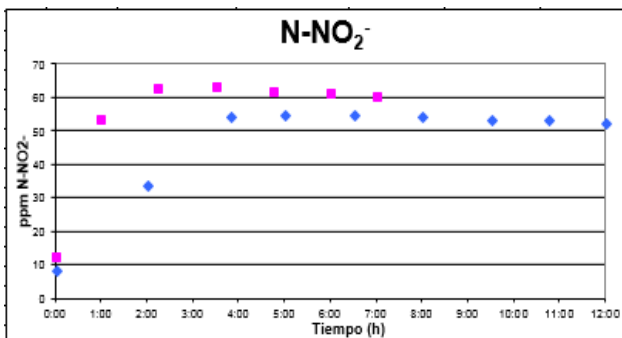


Figura 7: Variación del N-NO2- a lo largo de 7 horas y 12 horas de oxigenación.

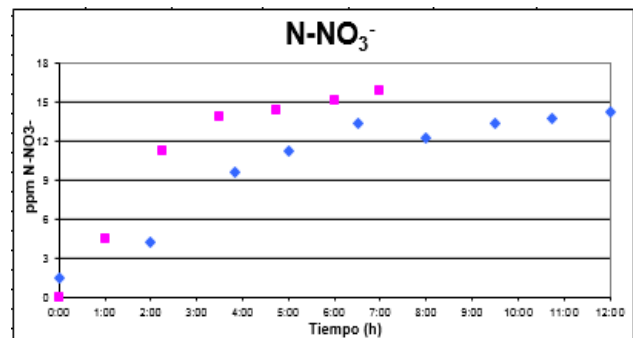


Figura 8: Variación del N-NO3- a lo largo de 7 horas y 12 horas de oxigenación.

En las figuras 5 y 6 se observa que hasta las 2 horas de operación hay una disminución importante en la concentración de nitrógeno orgánico total y del amonio (ya que la mayor parte del NKT es nitrógeno amoniacal), debido a que tienen lugar las reacciones de nitrificación. Al mismo tiempo aumenta la concentración de nitritos en el medio y un poco más lentamente de nitratos, como muestran las figuras 7 y 8.

El tiempo que consideramos óptimo para el proceso de aireación es cuatro horas. A partir de ese tiempo hay una variación de los parámetros menor al 3%. En figura 7, se observa que a las cuatro horas de experimentación no ha alcanzado su valor máximo de concentración.

### 3.3. Seguimiento de los ciclos en el tiempo

A la vista de las conclusiones de los apartados anteriores se han implantado en el proceso ciclos de 6 horas, con la distribución de etapas como se indica en la tabla 4:

Tabla 4: Distribución de tiempo en las etapas en el ciclo.

Ciclo 6 horas	
Llenado	15 m
Aireación	4 h
Mezcla Anóxica	1 h
Sedimentación	30 m
Vaciado	15 m

En las figuras 9, 10, 11, 12, 13 y 14 se muestran las representaciones gráficas de la DQO soluble, del Nitrógeno Orgánico Total (NKT), Nitrógeno amoniacal, Nitrógeno correspondiente a los aniones y el fósforo soluble en el tiempo, respectivamente.

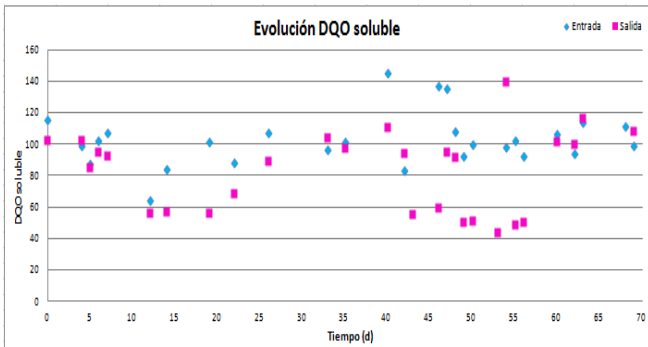


Figura 9: Evolución de la DQO soluble en el tiempo. Donde,  $\blacklozenge$  es el influente y  $\blacksquare$  el efluente.

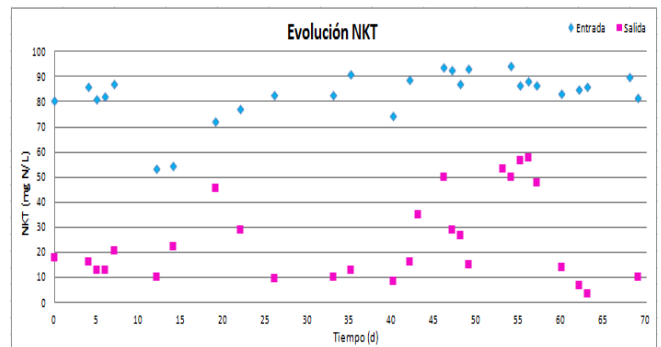


Figura 10: Evolución del NKT en el tiempo. Donde,  $\blacklozenge$  es el influente y  $\blacksquare$  el efluente.

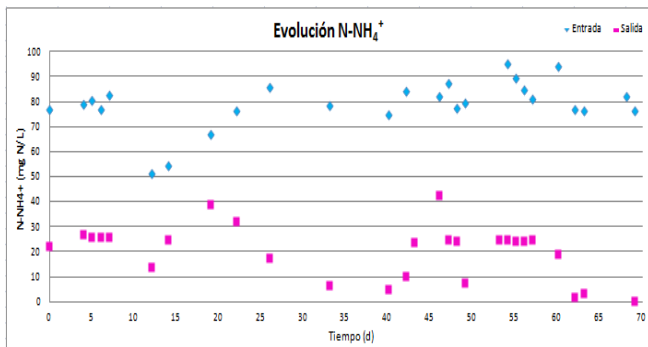


Figura 11: Evolución del  $N-NH_4^+$  en el tiempo. Donde,  $\blacklozenge$  es el influente y  $\blacksquare$  el efluente.

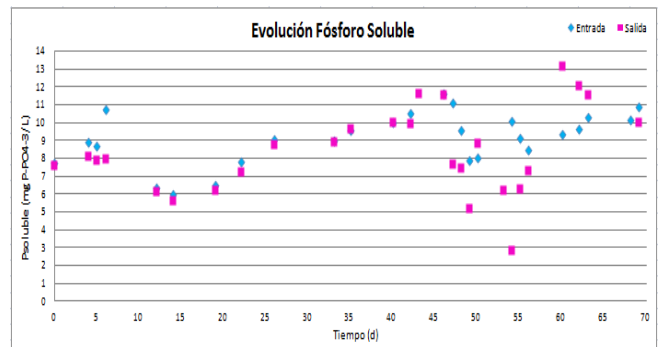


Figura 12: Evolución del fósforo soluble en el tiempo. Donde,  $\blacklozenge$  es el influente y  $\blacksquare$  el efluente.

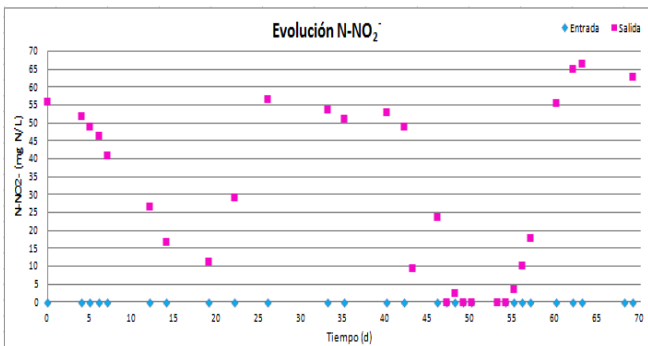


Figura 13: Evolución del  $N-NO_2^-$  en el tiempo.  $\blacklozenge$  es el influente y  $\blacksquare$  el efluente.

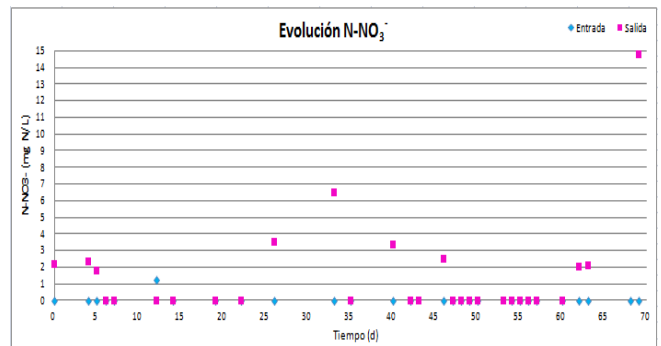


Figura 14: Evolución del  $N-NO_3^-$  en el tiempo.  $\blacklozenge$  es el influente y  $\blacksquare$  el efluente.

La media de los parámetros antes y después del ciclo de tratamiento se muestra en las tablas 5 y 6.

**Tabla 5: Parámetros agua antes del tratamiento.**

DQO soluble (mg O <sub>2</sub> /L)	NKT (mg N/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /L)	P soluble (mg P/L)
100,6	81,9	77,7	9,2

**Tabla 6: Parámetros agua después del tratamiento.**

DQO soluble (mg O <sub>2</sub> /L)	NKT (mg N/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /L)	P soluble (mg P/L)	N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg N/L)	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg N/L)	N total (mg N/L)
93,6	17,1	15,7	9,4	44,5	3,8	66,7

De estos datos, podemos calcular la media de eliminación de Nitrógeno y de DQO soluble que hay.

- % Nitrógeno eliminado: 23 %.
- % DQO soluble eliminada: 7 %.

El nitrógeno total es la suma de NKT, nitrógeno procedente de los nitritos y el nitrógeno procedente de los nitratos. En los balances no se tiene en cuenta el nitrógeno utilizado para la síntesis celular. El nitrógeno eliminado corresponde a la parte que ha pasado a nitrógeno gas (N<sub>2</sub>) en la etapa de desnitrificación.

Respecto a la DQO, se consume tan solo un diez por ciento, por lo tanto esa DQO que hay en el agua no es biodegradable.

En el fósforo soluble no se observan cambios, se mantiene constante en el tiempo debido a que las bacterias que tenemos no son específicas para ello.

En la figura 12, donde se representa el nitrógeno procedente de los nitritos, se observa que desde la puesta en marcha del equipo, en el efluente hay nitrito en una concentración de unos 40 mg N-NO<sub>2</sub>/L. Este nitrito puede proceder de una mala nitrificación o desnitrificación. Teniendo en cuenta que para la nitrificación se introduce un flujo de aire elevado, no se considera que sea ese el problema. Por tanto, se produce una desnitrificación parcial debido a la baja materia orgánica existente en el agua residual a tratar.

Por el contrario, en la figura 13 se ve que siempre ha habido ausencia de nitratos hasta que en abril y mayo de 2011 se detectan en días determinados. Esto da lugar que en la figura 13 se aprecien ciclos de baja y de elevada concentración. Los tramos de concentración más alta corresponden a los días en los que el efluente presenta contenido en nitratos. A partir de mediados de junio de 2011 van a aparecer siempre. Estos nitratos que aparecen en el efluente son debidos a una mala desnitrificación. Para eliminarlos se procede a introducir en el ciclo una etapa de desnitrificación anterior a la de aireación con el fin de eliminar durante la primera desnitrificación los nitratos que pueda haber en el volumen de agua.

### 3.4. Ciclo anóxico - aireación - anóxico

Se va a añadir una etapa anóxica de 30 minutos de duración para reducir a nitrógeno gas (N<sub>2</sub>) los nitratos presentes en el sistema, que no fueron eliminados en el ciclo anterior, y empezar el periodo de aireación sin formas oxidadas. La nueva etapa de predesnitrificación consiste en mezclar el agua residual (con alto contenido en amonio) en el reactor con el lodo mediante agitación mecánica sin suministrar aire al sistema.

Para adaptar el ciclo completo con este nuevo cambio, es necesario modificar los tiempos de los distintos periodos, de tal manera que el ciclo de seis horas ahora se lleva a cabo como se indica en la tabla 7:

Tabla 7: Distribución de tiempos en las etapas del nuevo ciclo.

Etapa	6 horas
Llenado	15 m
Mezcla Anóxica	30 m
Aireación	3 h 45 m
Mezcla Anóxica	45 m
Sedimentación	30 m
Vaciado	15 m

Después de más de tres meses con este ciclo no se consigue eliminar el nitrito, apareciendo siempre en la corriente de salida junto con los nitritos.

Las gráficas 15, 16, 17, 18, 19 y 20 muestran la evolución de los diferentes parámetros durante el periodo de tiempo en el que se mantuvo el ciclo de esta manera:

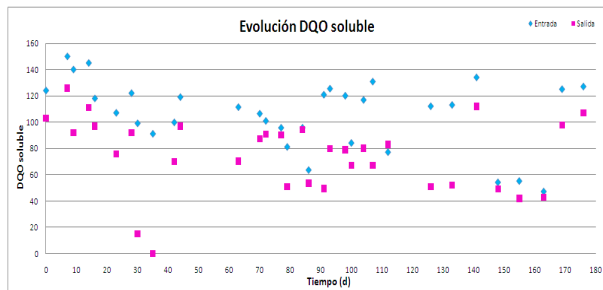


Figura 15: Evolución de la DQO en el tiempo. Donde,  $\blacklozenge$  es el influente y  $\blacksquare$  el efluente.

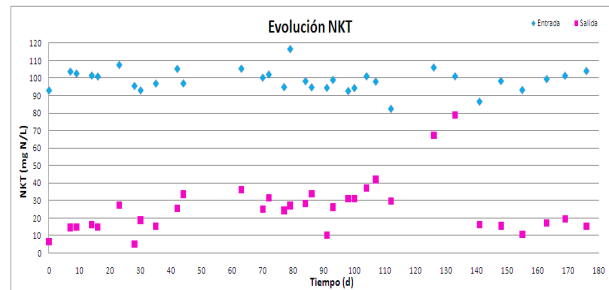


Figura 16: Evolución del NKT en el tiempo. Donde,  $\blacklozenge$  es el influente y  $\blacksquare$  el efluente.

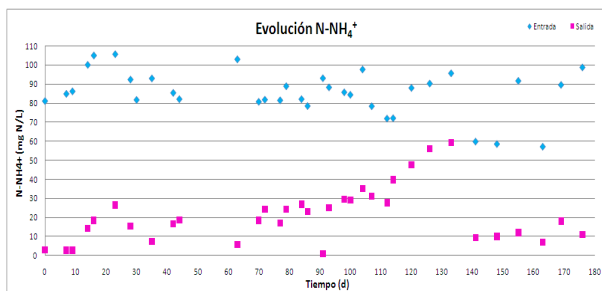


Figura 17: Evolución del Nitrógeno amoniacal en el tiempo. Donde,  $\blacklozenge$  es el influente y  $\blacksquare$  el efluente.

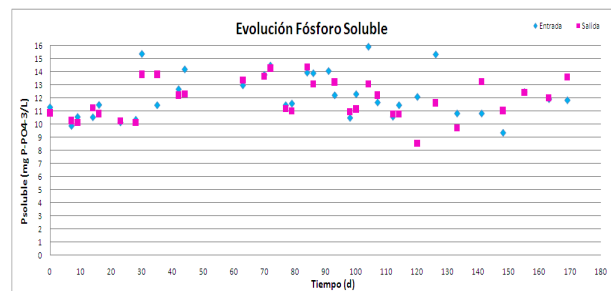


Figura 18: Evolución del Fósforo soluble en el tiempo. Donde,  $\blacklozenge$  es el influente y  $\blacksquare$  el efluente.

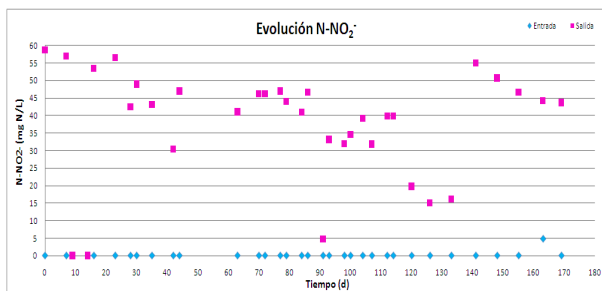


Figura 19: Evolución del N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup> en el tiempo. Donde,  $\blacklozenge$  es el influente y  $\blacksquare$  el efluente.

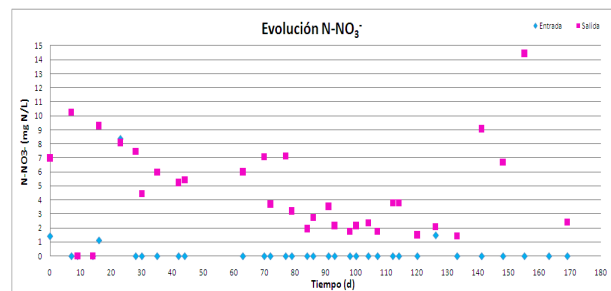


Figura 20: Evolución del N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en el tiempo. Donde,  $\blacklozenge$  es el influente y  $\blacksquare$  el efluente.

La media de los parámetros antes y después del ciclo de tratamiento se muestra en las tablas 8 y 9.

Tabla 8: Parámetros agua antes del tratamiento.

DQO soluble (mg O <sub>2</sub> /L)	NKT (mg N/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /L)	P soluble (mg P/L)
110,3	99,5	88,4	12,3

Tabla 9: Parámetros agua después del tratamiento.

DQO soluble (mg O <sub>2</sub> /L)	NKT (mg N/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /L)	P soluble (mg P/L)	N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> y N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg N/L)	N total (mg N/L)
77,1	23,2	20,1	12,6	42,3	65,5

La media de eliminación de Nitrógeno y de DQO soluble que hay:

- % Nitrógeno eliminado: 34 %.
- % DQO soluble eliminada: 30 %.

Los valores de DBO<sub>5</sub> a la entrada es de unos 36 mg O<sub>2</sub>/L, y a la salida de unos 20 mg O<sub>2</sub>/L.

### 3.5. Influencia del fango y del tipo de agua:

El objetivo de este apartado es realizar distintos ensayos para ver qué ocurre en cada reactor durante el periodo de aireación.

En cuatro reactores de 1 L de volumen se van llevar a cabo periodos largos de aireación con diferentes condiciones. Esto es, se va a modificar por una parte el fango del reactor situado ya en la caseta y fango fresco de la depuradora, y por otra el agua de salida del reactor anaerobio de membrana y el agua a la entrada. En la figura 21 se muestra la experimentación, que tiene lugar en la caseta a 18 °C de temperatura.

Se va a llamar:

- 1 → Fango antiguo (interior reactor aerobio/anóxico).
  - 2 → Fango fresco de la depuradora.
  - A → Salida reactor anaerobio (alimentación normal del reactor aerobio/anóxico).
  - B → Entrada reactor anaerobio (elevado contenido en materia orgánica).
- Y se va a llevar a cabo con las cuatro combinaciones posibles de fango y agua.

Esta experiencia se ha realizado en 3 ocasiones para poder tener datos reproducibles. La duración de cada experiencia ha sido de 7 horas. Durante todo el tiempo se ha mantenido el mismo flujo de aire de forma continuada procedente de un compresor. El aire se aporta mediante un difusor para favorecer la mezcla y permitir una buena difusión de éste por todo el volumen de agua.

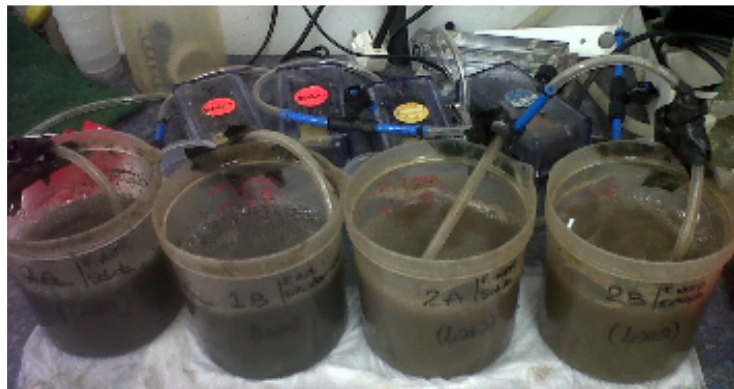


Figura 21: Ensayo de aireación. Se ven los cuatro reactores en plena aireación. Al fondo se ven los compresores que aportan aire a cada recipiente a través de una conducción que termina en un difusor.

Las características de los dos tipos de agua que se va a tratar se muestra en la tabla 10:

Tabla 10: Parámetros de los dos tipos de agua a estudiar.

A > Salida Reactor Anaerobio		B > Entrada Reactor Anaerobio	
DQO total	109 mg O <sub>2</sub> /L	DQO total	4093 mg O <sub>2</sub> /L
DQO soluble	108 mg O <sub>2</sub> /L	DQO soluble	653 mg O <sub>2</sub> /L
NKT	103 mg N/L	NKT	97 mg N/L
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	77 mg N/L	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	67 mg N/L
N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0 mg N/L	N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0 mg N/L
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0 mg N/L	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0 mg N/L
P soluble	13 mg P/L	P soluble	12 mg P/L
Sulfatos	16 mg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /L	Sulfatos	43 mg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /L

Los datos experimentales obtenidos se muestran en la tabla 11:

**Tabla 11: Parámetros obtenidos experimentalmente.**

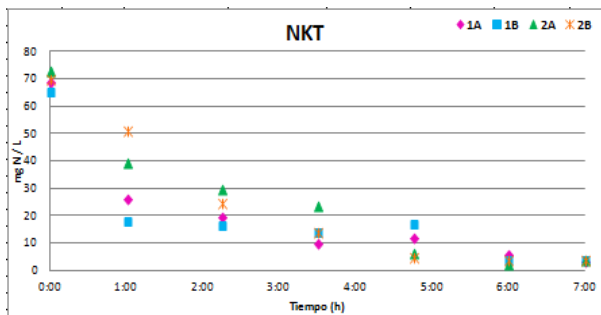
	Parámetro	1A	1B	2A	2B
Entrada	DQO soluble (mg O <sub>2</sub> /L)	62	247	143	604
	SST (g/L)	5,3	5,5	4,4	4,5
Salida	DQO soluble (mg O <sub>2</sub> /L)	45	26	123	428
	SST (g/L)	4,6	4,7	3,7	3,7

Al proporcionar todo el tiempo aire en los reactores, no debería de haber eliminación de nitrógeno, ya que no tendría lugar la desnitrificación. Haciendo los correspondientes balances se obtiene la tabla 12, con los siguientes porcentajes de eliminación de nitrógeno:

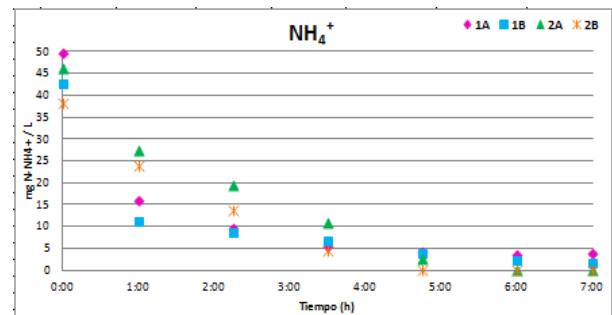
**Tabla 12: Porcentaje de Nitrógeno eliminado en cada experimento.**

	1A	1B	2A	2B
% N eliminado:	4%	-1%	9%	7%

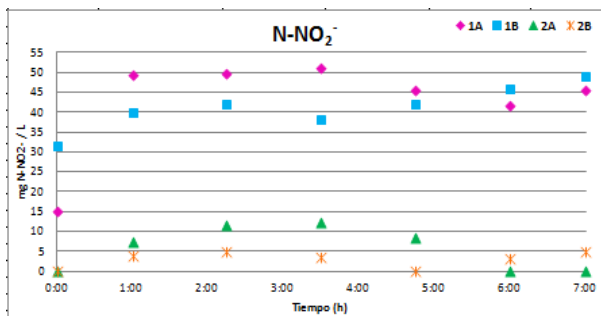
Se presentan las representaciones gráficas de NKT, nitrógeno amoniacal, nitrógeno en forma de nitritos, nitrógeno en forma de nitratos, fósforo soluble y sulfatos en las figuras 22, 23, 24, 25, 26 y 27, para observar lo que sucedió durante el último ensayo realizado.



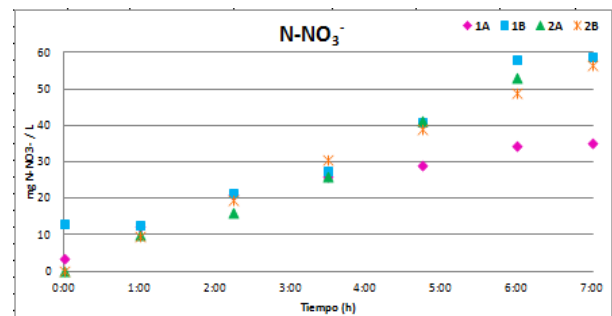
**Figura 22: Evolución del NKT en el tiempo durante el periodo de aireación. ◆ corresponde al experimento 1A, ■ al experimento 1B, ▲ al experimento 2ª y ✕ al 2B.**



**Figura 23: Evolución del N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> en el tiempo durante el periodo de aireación. ◆ corresponde al experimento 1A, ■ al experimento 1B, ▲ al experimento 2ª y ✕ al 2B.**



**Figura 24: Evolución del N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup> en el tiempo durante el periodo de aireación. ◆ corresponde al experimento 1A, ■ al experimento 1B, ▲ al experimento 2ª y ✕ al 2B.**



**Figura 25: Evolución del N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en el tiempo durante el periodo de aireación. ◆ corresponde al experimento 1A, ■ al experimento 1B, ▲ al experimento 2ª y ✕ al 2B.**



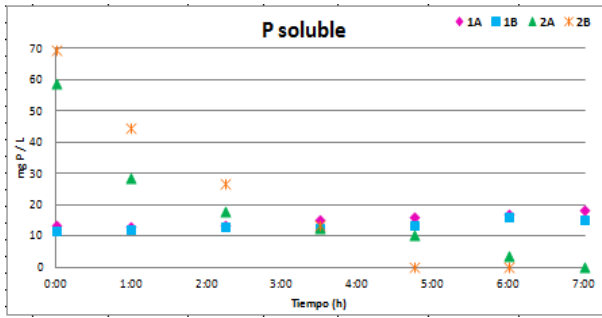


Figura 26: Evolución del Fósforo soluble en el tiempo durante el periodo de aireación. ● corresponde al experimento 1A, ■ al experimento 1B, ▲ al experimento 2ª y ✱ al 2B.

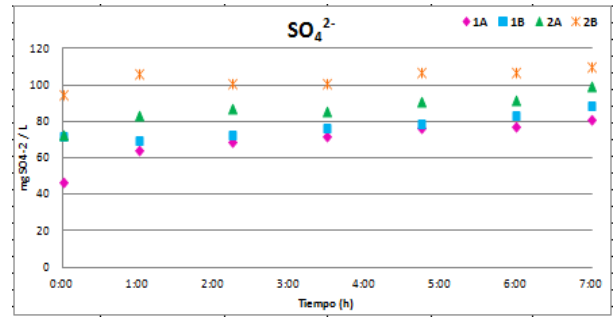


Figura 27: Evolución del N-NH<sub>4</sub><sup>-</sup> en el tiempo durante el periodo de aireación. ● corresponde al experimento 1A, ■ al experimento 1B, ▲ al experimento 2ª y ✱ al 2B.

De aquí se deduce que la reducción de la concentración de nitrógeno orgánico total y amonio se da de forma muy rápida en los cuatro reactores, siendo esta disminución apreciablemente más lenta en los casos en los que está el fango fresco de la depuradora (2A y 2B).

Con el fango denominado antiguo (el del reactor situado en la caseta), aparece en seguida nitrógeno en forma de nitrito y se mantiene su concentración en el tiempo, mientras que apenas se aprecian trazas de éste en el caso del fango fresco.

En el caso del nitrógeno en forma de nitrato su concentración va aumentando linealmente durante la aireación hasta llegar un valor a las 6 horas en el que se mantiene. Esto ocurre porque a partir de las 5 o 6 horas de aireación ya no queda nitrógeno amoniacal por oxidar.

Respecto al fósforo soluble, en el caso del fango fresco se aprecia una eliminación considerable mientras que en el fango antiguo no hay variación, sus valores se mantienen constantes.

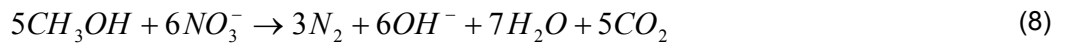
Los sulfatos no sufren cambios significativos durante todo el periodo de operación en ninguno de los casos.

### 3.6. Adición de metanol.

Debido a que la desnitrificación es generalmente el último paso en el tratamiento de aguas residuales, cuando la mayor parte de DQO ya se ha oxidado, frecuentemente se ha de añadir una fuente externa de carbono orgánico debido a las características de las bacterias desnitrificantes (Thalasso, F. et al.). Para este propósito se usan variedad de fuentes de carbono como metanol, etanol, acetato y azúcares. Debido al precio y viabilidad, el metanol es el componente mas usado para las desnitrificación biológica.

Si se observa un ciclo normal de operación del sistema a estudiar, en el efluente, la concentración que se indica de nitrógeno en forma de aniones corresponde principalmente a nitrógeno procedente de nitritos, pero también hay una pequeña cantidad de nitratos. Esto es debido a una mala etapa de desnitrificación o incompleta debido a que no hay suficiente materia orgánica biodegradable en el medio que pueda ser utilizada. Para solucionar este problema se va a añadir metanol (fuente de carbono rápidamente biodegradable) para ser utilizado como dador de electrones durante la desnitrificación. De esta forma, el metanol actúa como fuente externa de carbono para el crecimiento de los microorganismos heterotróficos en condiciones anóxicas, responsables de la reducción de los nitratos y nitritos a nitrógeno gaseoso.

La reacción global de la desnitrificación, puede ser descrita según la ecuación 8:



Se va a añadir una disolución de metanol-agua (1:100).

De esta manera, ahora los ciclos en el reactor quedan como se indica en la tabla 13:

Tabla 13: Distribución de tiempos en las etapas del ciclo.

Etapa	6 horas
Llenado	15 m
Mezcla Anóxica	30 m
Aireación	3 h 45 m
Introducción de Metanol	--
Mezcla Anóxica	45 m
Sedimentación	30 m
Vaciado	15 m

Las medias de los parámetros analíticos más importantes se muestran en las tablas 14 y 15.

**Tabla 14: Parámetros agua antes del tratamiento.**

DQO soluble (mg O <sub>2</sub> /L)	NKT (mg N/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /L)	P soluble (mg P/L)
203,6	95,3	87,6	13,9

**Tabla 15: Parámetros agua después del tratamiento.**

DQO soluble (mg O <sub>2</sub> /L)	NKT (mg N/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /L)	P soluble (mg P/L)	N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg N/L)	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg N/L)	<b>N total</b> (mg N/L)
82,9	7,7	5,2	10,5	14,6	0,5	<b>22,8</b>

Haciendo balances, las medias de eliminación de Nitrógeno y de DQO soluble son las siguientes:

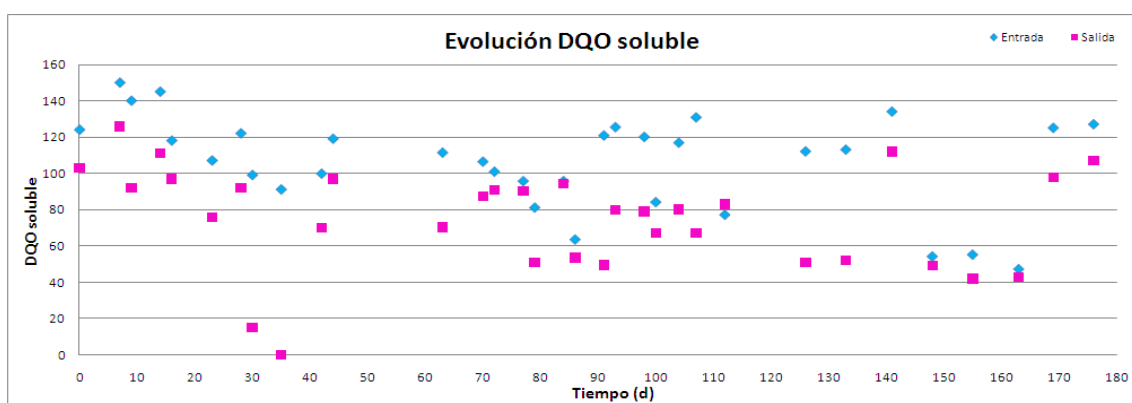
- ➔ % Nitrógeno eliminado: 76%. (Frente al 34 % sin metanol).
- ➔ % DQO soluble eliminada: 59%. (Frente al 30% sin metanol).

Por tanto, se observa una mejora en los porcentajes de eliminación.

En un principio para la concentración de nitrógeno en forma de nitrato que había en el efluente se introdujo la cantidad de metanol que por estequiometría correspondía. Se consiguió eliminar prácticamente la totalidad de aniones. Después de 39 días funcionando así, para comprobar si estábamos introduciendo metanol en exceso o no, se paró la bomba que alimenta al reactor con metanol. Durante 15 días se trabajó en Anóxico-Aerobio-Anóxico y se analizaron las características del agua al final de ciclo. La concentración de aniones se disparó. Al aumentar el nitrógeno en forma de nitratos a la salida, aumentó la necesidad de metanol a añadir para conseguir una desnitrificación completa. Así, ahora mismo, se introdujo 0,19 mL de metanol por ciclo.

Gráficamente, se pueden ver los resultados de DQO, NKT, nitrógeno amoniacal, nitrógeno en forma de nitritos y nitrógeno en forma de nitratos en las figuras 28-37.

Las representaciones van de dos en dos. La primera es la situación durante el periodo Anóxico-Aerobio-Anóxico. En la segunda se refleja lo que ocurrió al adicionar metanol, cuando se dejó de añadir y el último periodo que es el actual con metanol para las nuevas necesidades.



**Figura 28: Evolución en el tiempo de la concentración de la DQO soluble antes de la adición de metanol.**

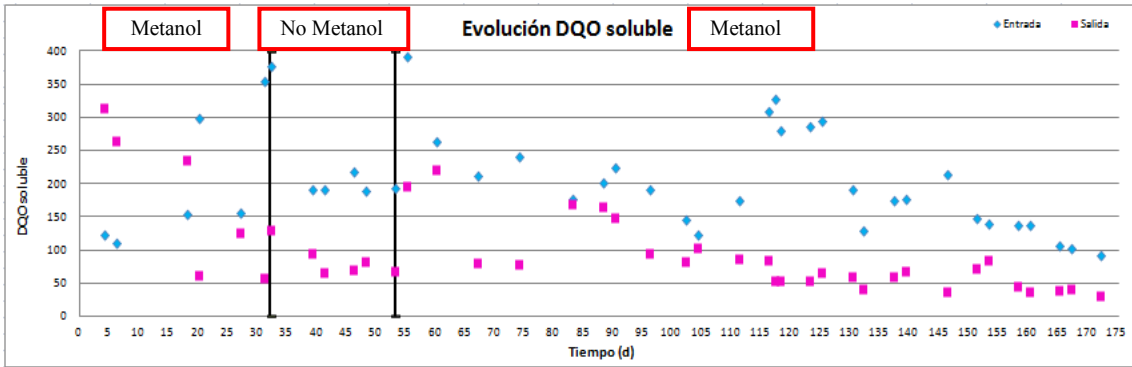


Figura 29: Evolución en el tiempo de la concentración de la DQO soluble al añadir metanol.

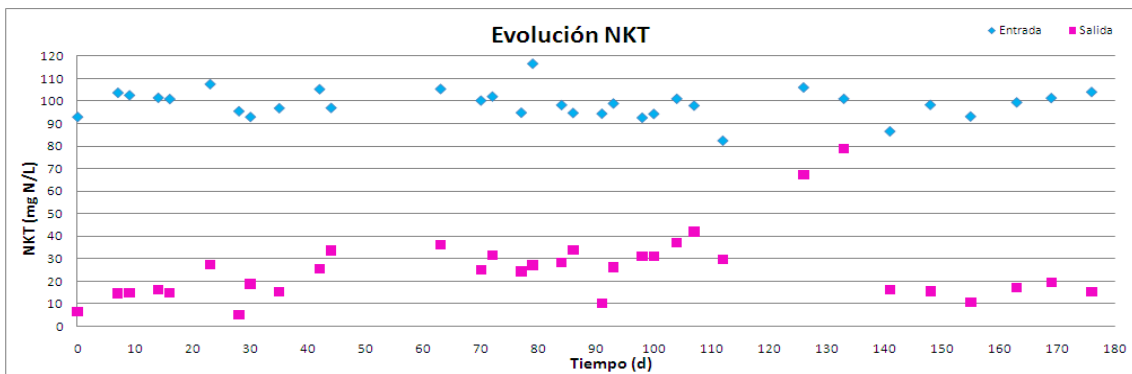


Figura 30: Evolución en el tiempo de la concentración de NKT antes de la adición de metanol.

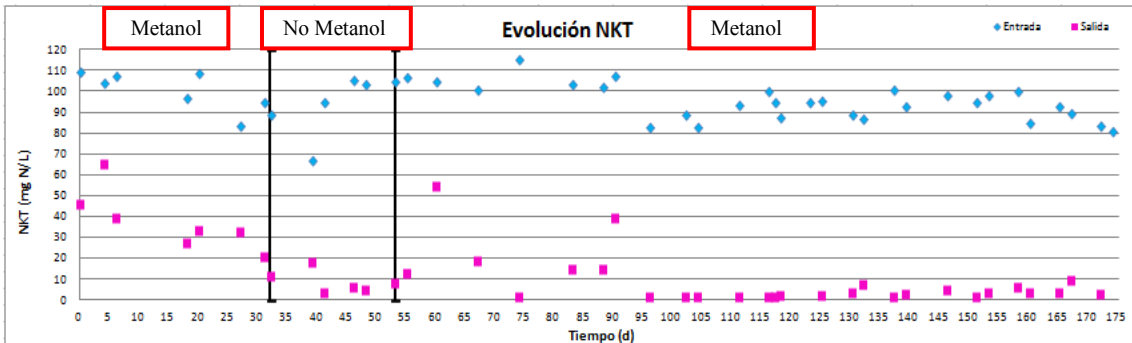


Figura 31: Evolución en el tiempo de la concentración de NKT al añadir metanol.

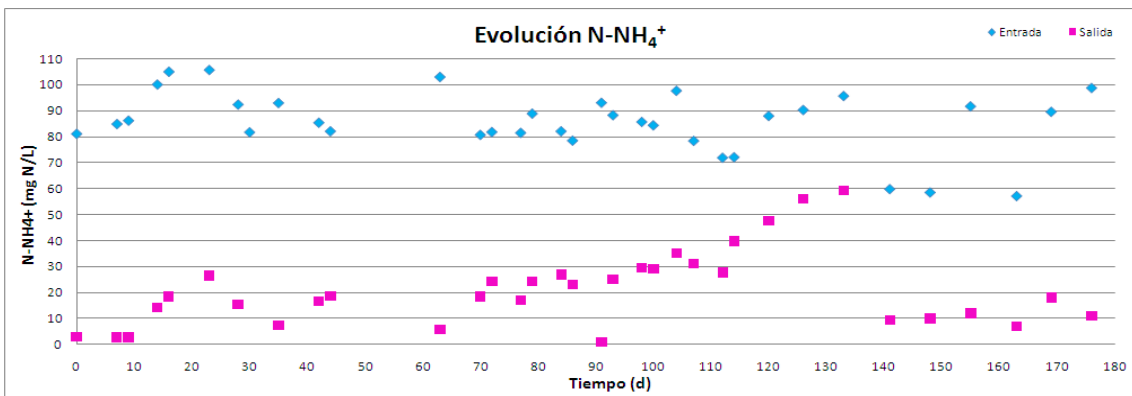


Figura 32: Evolución en el tiempo de la concentración de Nitrógeno Amoniaco antes de la adición de metanol.

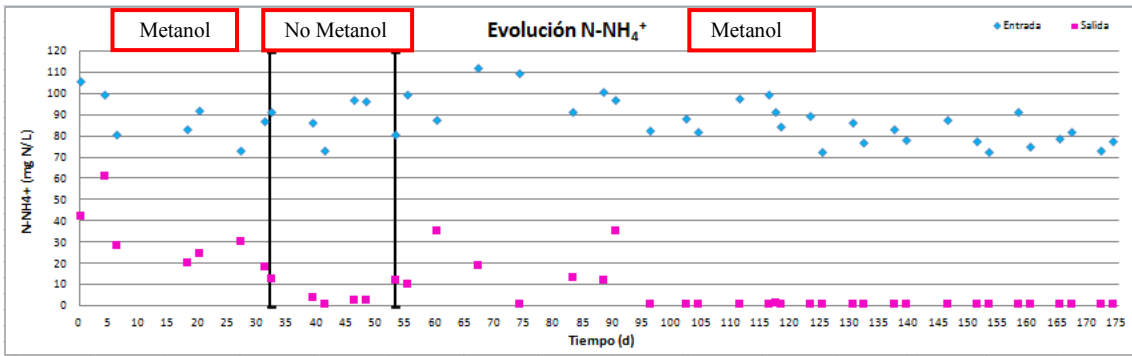


Figura 33: Evolución en el tiempo de la concentración de Nitrógeno Amoniaco al añadir metanol.

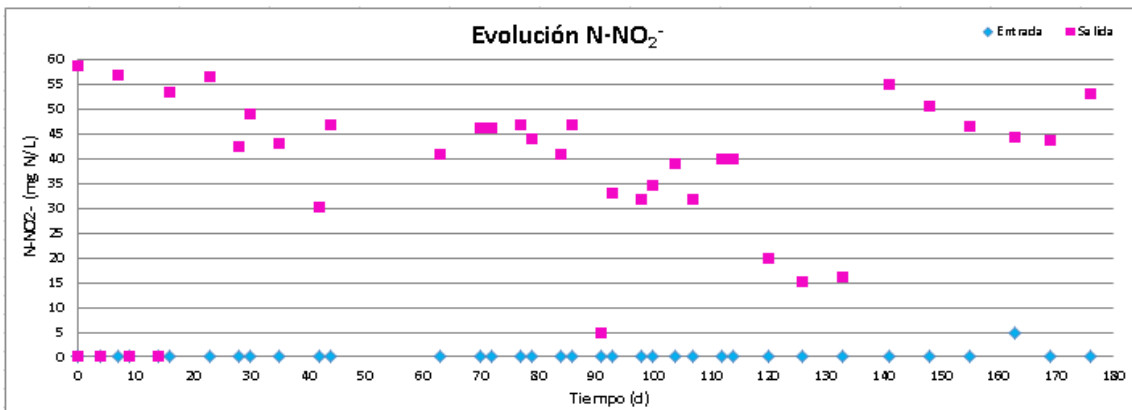


Figura 34: Evolución en el tiempo de la concentración de N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup> antes de adicionar metanol.

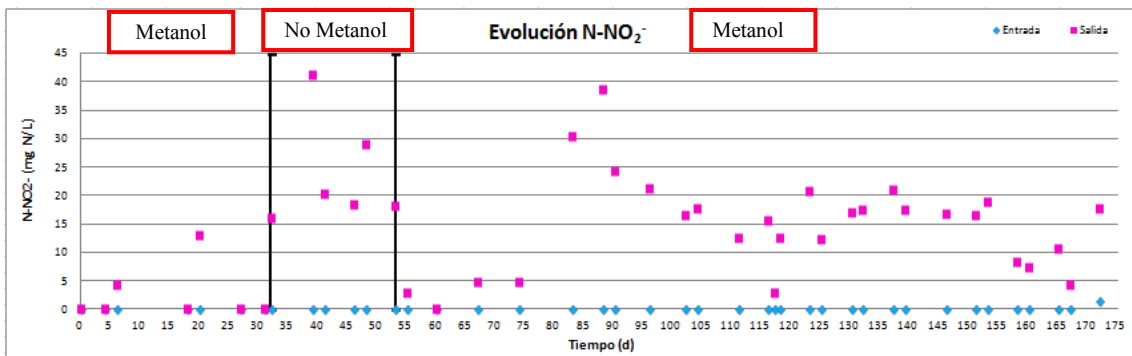


Figura 35: Evolución en el tiempo de la concentración de N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup> al añadir metanol.

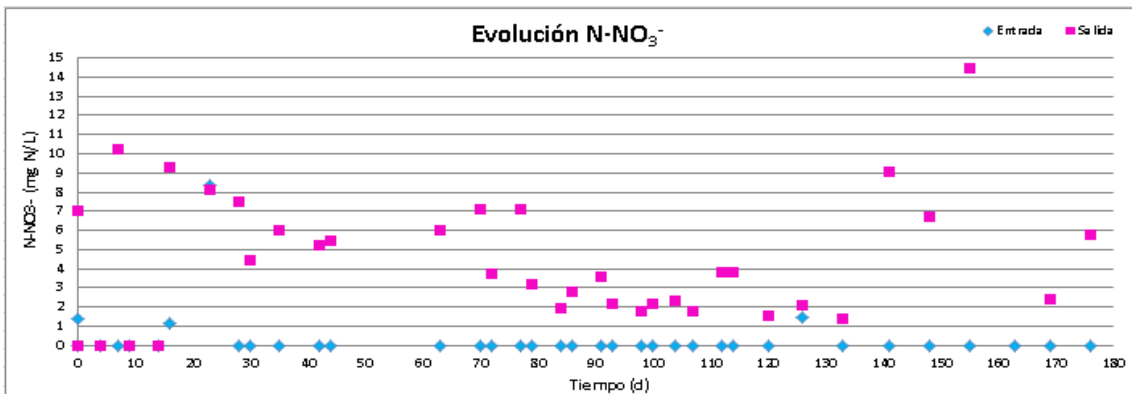


Figura 36: Evolución en el tiempo de la concentración de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> antes de adicionar metanol.

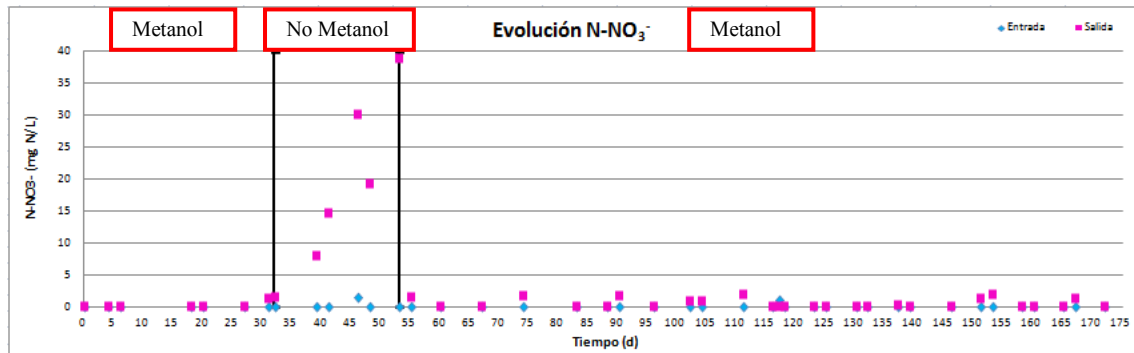


Figura 37: Evolución en el tiempo de la concentración de  $\text{N-NO}_3^-$  al añadir metanol.

El reactor eliminó muy bien nitrógeno. Los valores de NKT, amonio y nitrato fueron mínimos. Lo que hizo subir la concentración de nitrógeno en el efluente son los nitritos, con una concentración media de 15 mg/L.

La diferencia de escala en el eje de ordenadas entre las gráficas 28 y 29, sobre la DQO soluble, es debido a que se empieza a usar como alimentación el agua del reactor anaerobio grande en lugar del pequeño. Así, al tener apreciablemente mayor DQO el agua de este reactor, sería necesario añadir menos fuente de carbono adicional en la desnitrificación.

#### 4. CONCLUSIONES

Del trabajo realizado se obtiene una optimización proceso de eliminación biológica mediante un sistema SBR para un agua residual urbano.

El tiempo óptimo de ciclo es de seis horas. Cada ciclo está formado por una etapa de predesnitrificación, nitrificación y una última etapa de desnitrificación. De esta forma se obtiene un rendimiento de eliminación de materia orgánica del 30% y de nitrógeno un 34%.

A la vista de los resultados no se produce una desnitrificación completa y es necesario añadir metanol una vez terminada la etapa de aireación. De esta forma se obtienen rendimientos de remoción de DQO y de nitrógeno de 59% y 76% respectivamente.

La distribución final de tiempos de cada ciclo de tratamiento son 30 minutos de cada etapa de desnitrificación. 3h 45 minutos de aireación (nitrificación). 30 minutos de sedimentación más 15 minutos de duración de llenado y vaciado.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

El autor y sus directores agradecen el apoyo técnico y financiero de la empresa Cadagua S. L.

#### 6. BIBLIOGRAFÍA

APHA, AWWA and WEF. 1992. Standard methods for the examination of water and wastewater. 18th ed. American Public Health Association, Washington, D.C.

Correa, M. A., Sierra, J. H. 2004. Remoción de materia orgánica, fósforo y nitrógeno en un sistema de filtros (biofiltros) en serie anaerobio/anóxico/aerobio en condiciones dinámicas. Revista Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia (Colombia). Número 031.pp 5-22.

García Arrazola, R. 2007. Políticas óptimas de operación de una planta de tratamiento biológico de aguas residuales por desnitrificación. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Química. Universidad Iberoamericana. Mexico, D. F.

Rittmann, B., McCarty, P. 2001. Biotecnología del medio ambiente. Principios y aplicaciones.

Sadarriaga, J. C., Hoyos, D. A., Correa, M. A. 2011 Evaluación de procesos biológicos unitarios en a remoción simultánea de nutrientes para minimizar la eutrofización. Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellin (Colombia). Número 15, p. 129-140.

Thalasso, F., Vallecillo, P., García-Encina, P., Fdz-Polanco, F. 1997. The use of methane as a sole carbon source for wastewater denitrification. Wat. Res. Vol. 31, No 1, pp 55-60. Young-Ho Ahn. 2006. Sustainable nitrogen elimination biotechnologies: a review. Process Biochemistry, 41 .1709-1721.