



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

MASTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Evaluación e implementación conjunta de
métodos físico-químicos y biológicos para la
prevención de contaminantes odoríferos en
EDARs**

Autor: D. Miguel Almarza Barbado

Tutor: D. Raúl Muñoz Torre

D. Manuel Toledo Padrón

Valladolid, 06, 2023



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

MASTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Evaluación e implementación conjunta de
métodos físico-químicos y biológicos para la
prevención de contaminantes odoríferos en
EDARs**

Autor: D. Miguel Almarza Barbado

Tutor: D. Raúl Muñoz Torre

D. Manuel Toledo Padrón

Valladolid, 06, 2023



Resumen

Actualmente uno de los problemas más importantes de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDARs) es la generación y emisión de contaminantes odoríferos. Estos contaminantes producen malos olores, lo que conlleva un elevado número de quejas en las zonas residenciales cercanas a las EDARs y causan efectos negativos en las personas y en el medioambiente. El objetivo principal de este estudio es la evaluación e implementación de métodos físico-químicos y biológicos para la eliminación de estos contaminantes, pero debido a problemas con los equipos de medición solo se ha podido estudiar la transformación y la eliminación de H_2S disuelto en un sistema piloto de fangos activos desnitrificación-nitrificación. Para ello se han realizado experimentos utilizando bacterias sulfooxidantes para la oxidación del sulfuro, consiguiendo valores de rendimiento de reducción del 99,9% en el agua tratada. Asimismo, se ha evaluado la oxidación del amonio, la degradación de materia orgánica en el tratamiento biológico y la evolución de la concentración de microorganismos tanto en el reactor biológico como en el sedimentador secundario a lo largo del periodo experimental.

Palabras clave: eliminación de H_2S , planta piloto de aguas residuales, reducción de amonio, tratamiento de lodos activos.

Abstract

Currently one of the most important problems of wastewater treatment plants (EDARs) is the generation and emission of odoriferous pollutants. These contaminants produce bad odors, which leads to a high number of complaints in residential areas near the WWTPs and cause negative effects on people and the environment. The main objective of this study is the evaluation and implementation of physical-chemical and biological methods for the elimination of these contaminants, but due to problems with the instrumental analysis equipment, it has only been possible to study the transformation and elimination of H_2S in a pilot active sludge system. To this end, experiments have been carried out using sulfoxidizing bacteria for the oxidation of sulfide, achieving reduction efficiencies of 99.9% in the treated water. Likewise, the oxidation of ammonium, the degradation of organic matter in the biological treatment and the evolution of the concentration of microorganisms both in the biological reactor and in the secondary settler throughout the experimental period have been evaluated.

Keywords: activated sludge treatment, ammonium reduction, H_2S removal, wastewater treatment pilot plant.



Índice

1. Introducción.....	1
1.1. Explicación y funcionamiento de una EDAR	1
1.2. Contaminantes Oloríferos.	3
1.3. Metodologías de control del H ₂ S	5
1.4. Objetivos del TFM.....	7
2. Materiales y métodos.....	9
2.1. Preparación del experimento	9
2.2. Agua residual sintética urbana	10
2.3. Toma de muestras y preparación	11
2.4. Análisis de muestras	12
3. Resultados y discusión	16
3.1. Análisis de oxígeno disuelto	16
3.2. Análisis de pH.....	19
3.3. Análisis de sulfuros.....	21
3.4. Análisis de sulfatos.....	25
3.5. Análisis de nitrógeno	28
3.6. Análisis de sólidos suspendidos volátiles.	39
3.7. Análisis de la concentración de materia orgánica.....	41
4. Conclusiones y trabajo futuro.....	51
5. Bibliografía.....	53



Índice de figuras

Figura 1. Diagrama de una estación depuradora [5].....	3
Figura 2. Diagrama de flujo de la planta piloto	10
Figura 3. Imagen de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales.....	10
Figura 4. Curva de calibración para la concentración de sulfuros.	14
Figura 5. Curva de calibración para la concentración de amonio	15
Figura 6. Control del oxígeno disuelto en el tiempo.....	18
Figura 7. Evolución del pH en el tiempo	21
Figura 8. Evolución de la concentración de sulfuros.	24
Figura 9. Evolución de la concentración de sulfatos.	27
Figura 10. Evolución del nitrógeno en la planta piloto.	30
Figura 11. Evolución de la concentración de amonio en el tiempo.....	33
Figura 12. Evolución de la concentración de iones nitrato en el tiempo	36
Figura 13. Evolución de la concentración de iones nitritos en el tiempo.....	38
Figura 14. Evolución de los sólidos suspendidos volátiles en el tiempo.....	41
Figura 15. Evolución de la concentración del materia total.....	44
Figura 16. Evolución de la materia orgánica biodegradable.....	46
Figura 17. Evolución de la concentración de carbono inorgánico	49



Índice de tablas

Tabla 1. Datos de concentración de oxígeno disuelto	16
Tabla 2. Datos de pH a la entrada y a la salida de la planta piloto	19
Tabla 3. Datos de las concentraciones de sulfuros.	22
Tabla 4. Datos de concentraciones de sulfatos.	25
Tabla 5. Datos de concentración de nitrógeno	28
Tabla 6. Datos de concentración de amonio.....	30
Tabla 7. Datos de concentración de nitrato	34
Tabla 8. Datos de concentración de nitrito	36
Tabla 9. Datos de concentración de sólidos suspendidos volátiles.	39
Tabla 10. Datos de concentración de carbono total.....	42
Tabla 11. Datos de concentración de materia orgánica biodegradable	44
Tabla 11. Datos de concentración de materia orgánica biodegradable.	46
Tabla 12. Datos de concentración de materia inorgánica.	47



1. Introducción

1.1. Explicación y funcionamiento de una EDAR

Las EDARs, o también conocidas como estaciones depuradoras de aguas residuales, son instalaciones que tienen tratamientos para la eliminación de la materia orgánica, nitrógeno y fósforo, además de aceites, grasas, sólidos suspendidos, etc. para cumplir con los límites de vertido del agua residual al río según la legislación[1]. En las EDARs se pueden producir contaminantes odoríferos, conocidos como malos olores, debido a que existen condiciones anaerobias o sépticas en lugares donde no hay aireación o hay poca aireación, y con condiciones meteorológicas desfavorables.

Estas instalaciones constan de las siguientes etapas:

- **Pretratamiento:** Esta etapa consiste en la separación de elementos gruesos y finos, arenas y aceites empleando mecanismos físico-químicos. En esta etapa se eliminan del agua residual aquellos elementos que se pueden separar por acción de la gravedad u otra propiedad física sin adición de compuestos químicos. En esta se identifican los siguientes sistemas o elementos[2]:
 - **Pozo de gruesos.** Se encuentra situado a la entrada del colector de la depuradora con un fondo tronco piramidal invertido y paredes muy inclinadas, con la finalidad de concentrar sólidos y arenas decantadas. Para la extracción de los residuos se suele utilizar cucharas anfibia[2].
 - **Desbaste.** Consiste en la separación de sólidos como piedras, ramas, trapos, etc. mediante rejillas o tamices[2]. Estas rejillas o tamices pueden tener una limpieza manual o automática.
 - **Desarenado-desengrasado.** Consiste en la separación de cualquier sólido con una granulometría superior a 200 micras y las materias flotante más ligeras que el agua[2].
 - **Homogeneización.** Consiste en la amortiguación de las cargas que entran a una estación depuradora de aguas residuales para conseguir un caudal lo más uniforme posible[2].
 - **Pre-aireación:** Consiste en airear el agua residual en la etapa de la homogeneización para evitar que el agua residual entre en condiciones sépticas[2].
- **Tratamiento primario:** Esta etapa consiste en el tratamiento de las aguas residuales empleando mecanismos físico-químicos para la eliminación de sólidos suspendidos. En esta etapa se separan los sólidos que están en suspensión por gravedad, dado que su tamaño de partícula es lo suficientemente grande como para que sedimenten, o añadiendo compuestos químicos para que ocurra el proceso de coagulación-floculación y los sólidos suspendidos sedimenten por acción de la gravedad. Se puede distinguir entre:
 - **Decantación primaria.** Utiliza la acción de la gravedad para separar los sólidos suspendidos del agua residual[2].



- Tratamiento físico-químico. Se compone de tres etapas: desestabilización de las partículas coloidales, agregación de las partículas desestabilizadas y separación de los agregados[2]. Este tipo de tratamiento primario utiliza reactivos químicos para lograr la desestabilización de las partículas coloidales y la agregación de las partículas desestabilizadas.
- Tratamiento secundario: Esta etapa consiste en la eliminación de materia orgánica biodegradable de manera biológica, además de eliminar nitrógeno y fósforo. En esta etapa las bacterias que hay dentro del reactor biológico degradan la materia orgánica que hay en las aguas residuales, además de utilizar el nitrógeno y el fósforo para construir su material celular. Consta de un reactor biológico y una decantación secundaria. Como ejemplo de reactor biológico se pueden encontrar los reactores de fangos activos, reactor biológico de membrana, UASB, biodiscos, etc.[3].
- Tratamiento terciario: Esta etapa del tratamiento del agua residual en una EDAR es opcional dependiendo de la concentración de los contaminantes a la salida. Es una etapa de tratamiento físico-química para el afino del agua residual de tal manera que las características del agua residual sean iguales a las del río donde se va a devolver. Su función es de afino en la eliminación de nutrientes. Las tecnologías más utilizadas para el tratamiento terciario son: filtración, flotación con aire disuelto, membranas de filtración, oxidación avanzada y desinfección[4].
- Otra etapa que hay es el tratamiento de fangos que se producen en una EDAR. Esta etapa consiste en tratamientos físico-químicos y biológicos para producir un fango (biomasa que se produce en el tratamiento secundario y sólidos suspendidos que provienen del tratamiento primario) que luego se puede utilizar para la agricultura previa estabilización. En esta etapa se elimina el agua que contienen los fangos hasta que se consigue un sólido con cierta sequedad, alrededor del 20%.

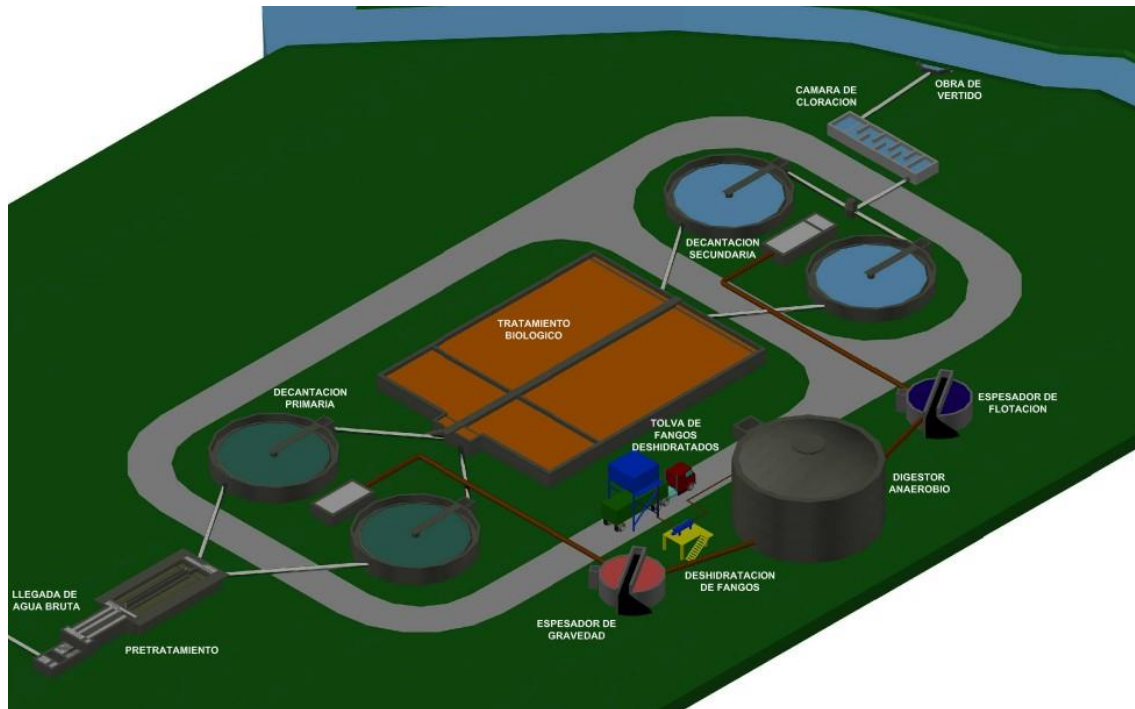


Figura 1. Diagrama de una estación depuradora [5]

1.2. Contaminantes Odoríferos.

Las condiciones de un agua séptica, que no está aireada ni contiene nitratos o nitritos, hacen que la materia orgánica empiece a degradarse anaeróbicamente produciendo gases como compuestos orgánicos volátiles (COVs), compuestos sulfurados volátiles (CSVs) y compuestos nitrogenados que pueden tener serios impactos en la salud y bienestar de la población cercana a las EDARs.[6], [7]

Los principales efectos sobre las personas pueden ser náuseas, dolores de cabeza o falta de apetito y, con relativa rareza, efectos crónicos sobre la salud de las personas[6]. Según [6] hay “una relación directa entre la sintomatología y los malos olores”.

Estos contaminantes odoríferos se producen con distintas concentraciones dependiendo del proceso y de la ventilación del mismo. Además, las EDARs producen distintos impactos ambientales en mayor o menor medida, como el consumo eléctrico, ruidos y formación de bioaerosoles[8]. Dependiendo de la tecnología utilizada se puede concluir que las EDARs que utilizan tecnologías biológicas son más respetuosas con el medioambiente que las EDARs que solo utilizan métodos físico-químicos[9].

Para poder medir estos contaminantes odoríferos se tienen que tomar muestras representativas de los gases que se emiten en la planta. Para ello se designan distintas áreas que son representativas de los gases que puede emitir la planta, aunque no existe una regulación para elegir que lugares son los representativos. La



obtención de las muestras representativas depende del tipo de planta, del lugar donde se encuentre localizada esa planta y de los investigadores que hayan preparado esas muestras [7].

Para la medición y cuantificación de emisiones olorosas se utiliza el estándar “BS EN13725:2022- Stationary source emissions. Determination of odour concentration by dynamic olfactometry” (consiste en el uso de la nariz humana para medir la concentración de los olores), aunque no todos los estudios utilizan este estándar. La olfatometría dinámica es una forma estandarizada de medir la concentración de los olores a través del sentido del olfato de un ser humano. Esta técnica pertenece a las denominadas “técnicas señoriales “ dado que la medición de la concentración depende de la sensación que puede causar la muestra gaseosa a un ser humano. Para poder utilizar este estándar hay que recoger las muestras gaseosas en bolsas adecuadas y luego diluirlas en aire fresco para poder analizarlas[10]. Otra forma de medir olores es a través de una nariz electrónica que es capaz de medir las concentraciones de múltiples compuestos odoríferos en línea. Este tipo de mediciones con nariz electrónica son rápidas, económicas, portátiles y no invasivas para detectar los primeros problemas de olores.[7]

Además de las técnicas descritas anteriormente para la cuantificación de olores en EDARs, existe otra forma de medir los compuestos sulfurados volátiles, que es a través de la medición de azufre reducido total. Esta técnica consiste en medir de manera continua el azufre reducido total (son los compuestos líquidos y gaseosos organosulfurados) a través de un medidor TRS a tiempo real. Este medidor es capaz de operar de dos maneras: midiendo concentraciones de azufre reducido con pocas ppmv o concentraciones mayor a 1 ppmv[11].

Teniendo en cuenta la importancia de minimizar la emisión de contaminantes odoríferos derivados de las EDARs, es mucho más efectivo en relación coste-beneficio identificar los mecanismos para la formación de los contaminantes odoríferos que implementar tecnologías que eliminen estos contaminantes cuando se producen durante el tratamiento de las aguas residuales urbanas. Gracias a esto se están desarrollando distintas estrategias para la prevención de contaminantes odoríferos en estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas[12].

Entre ellos se encuentran:

- La recirculación de fangos activos, nitratos y nitritos. Esta técnica consiste en optimizar el caudal de fangos activos, nitratos y nitritos que se recirculan a la cabecera de la planta para controlar la producción de malos olores. Se trata de una estrategia respetuosa con el medioambiente y rentable que previene y minimiza la formación de olores durante el tratamiento del agua residual. Se ha demostrado que esta estrategia consigue reducir los contaminantes producidos en las EDARs, Concretamente la producción de H₂S (sulfuro de hidrógeno) se ha conseguido reducir en un 42% y la producción de ácido acético (CH₃COOH) en un 95%[13][14][15].
- El proceso de oxidación avanzada, que consiste en utilizar reactivos Fenton (Fe²⁺/H₂O₂, Fe³⁺/H₂O₂) para reducir la putrescibilidad (susceptibilidad a la



putrefacción de la aguas residuales), emisión de H_2S y concentración de malos olores. Estos reactivos son capaces de inhibir el desarrollo de las condiciones redox en aguas residuales eliminando la materia orgánica, inhibiendo la formación de H_2S y reduciendo la emisión de olores. Esta estrategia consigue reducir la concentración de contaminantes odoríferos en un 96,3%[16].

Como existen tecnologías que utilizan procesos físico-químicos y otras tecnologías que utilizan procesos biológicos, puede ser difícil seleccionar el tipo de tecnología para una instalación en concreto por lo que se puede hacer un análisis de ciclo de vida a la configuración de EDAR para decidir qué tipo de tecnología se utiliza, siendo la tecnología biológica la que tiene un menor impacto ambiental pero un mayor consumo de energía para mantener los microorganismos vivos[17].

Muchas de estas tecnologías aplicadas a la reducción de los contaminantes odoríferos en las EDARs se han desarrollado debido a la producción incontrolada de estos contaminantes en las EDARs. Sobre todo estas tecnologías se han desarrollado para reducir la producción de H_2S .

El H_2S se produce en condiciones anaerobias por la descomposición de la materia orgánica. La producción de H_2S gaseoso depende del potencial de reducción y del carbono orgánico disuelto que hay en las aguas a tratar mientras que el H_2S disuelto depende de la concentración de sulfatos que haya en el agua a tratar y su potencial de reducción[18].

Los efectos que puede causar el H_2S al ser humano si está en el aire son: irritaciones respiratorias y de ojos, dolores de cabeza y náuseas; pero pueden ser mucho peores dependiendo de la concentración de H_2S y de los lugares donde se pueda dar esa concentración. A modo de ejemplo, exposiciones continuadas por encima de 300 ppmv pueden conllevar la muerte de personas. Debido a los problemas que causa el H_2S es necesario plantearse medidas para reducirlo y que no tenga un efecto adverso en la sociedad, en el medioambiente y en las infraestructuras de la EDAR [19].

1.3. Metodologías de control del H_2S

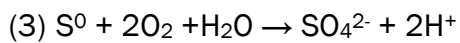
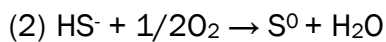
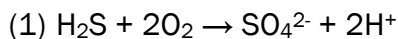
Debido a los efectos adversos que tiene el H_2S en el ser humano y en las infraestructuras de transporte y tratamiento de aguas residuales se han desarrollado tecnologías para poder reducir la producción de H_2S en las EDARs. Entre las posibles tecnologías que se pueden utilizar para su reducción se encuentran:

- Añadir CaO (óxido de calcio) en la parte anaerobia del proceso. Esta tecnología se trata de un tipo de tecnología físico-química en la cual, el CaO destruye la estructura del fango que hay en la parte anaerobia del proceso haciendo que se libere materia orgánica con los puentes de hidrógeno destruidos. Además, el CaO aumenta la alcalinidad del fango aumentando consumo de H^+ y S^{2-} (iones de hidrógeno y azufre) y la liberación de iones metálicos reduciendo la producción de H_2S . Esta tecnología reduce la producción de H_2S en un 60%[20].



- Utilizar familias de bacterias sulfo-oxidantes, como *Spirochaetaceae*, *Chromatiaceae*, *Helicobacteriaceae*, *Rhodospirillaceae*, y *Neisseriaceae*. Este tipo de tecnología es una tecnología biológica que utiliza estas familias de bacterias para reducir el H₂S. Estas familias de bacterias se ven influenciadas por la concentración que haya de los siguientes componentes químicos: oxígeno, azufre, potasio, zinc, manganeso, fósforo y nitrógeno[21]. Esta tecnología consigue una eliminación de H₂S disuelto mayor al 99%[15].

Las reacciones que ocurren en la oxidación biológica del H₂S son las siguientes[22]:



Las reacciones que se han expuesto anteriormente se han utilizado como base para seleccionar la familia de bacterias necesarias para la eliminación o reducción de la concentración de H₂S en una planta de tratamiento de aguas residuales de lodos activos.



1.4. Objetivos del TFM

Este estudio tenía como objetivo poder reducir los contaminantes odoríferos descritos anteriormente y medirlos para monitorización su reducción. Debido a que el espectrómetro de masas necesario para medir la mayoría de los contaminantes odoríferos en la cabecera del decantador primario ha estado estropeado durante la realización de este TFM, se ha hablado con los tutores del TFM y se ha llegado al acuerdo de cambiar el enfoque de este TFM a la reducción del ácido sulfhídrico disuelto que se produce en un proceso de lodos activos. De tal manera que, a continuación, este TFM se va a centrar en la problemática del ácido sulfhídrico, en los métodos para su eliminación con particular énfasis en los métodos biológicos.

De este modo, el objetivo global de este TFM fue oxidación del H_2S disuelto en el agua séptica sintética para conseguir una disminución de la concentración de H_2S a la salida de una planta piloto de fangos activos nitrificación-desnitrificación.



Universidad de Valladolid

Prevención de
contaminantes
odoríferos en
EDARs



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL



2. Materiales y métodos

2.1. Preparación del experimento

Para la realización de este TFM se utilizó una planta piloto de tratamiento de aguas residuales que consta de un sedimentador primario, un reactor biológico de lodos activos con un proceso de nitrificación- desnitrificación y un sedimentador secundario. Se utilizan como contaminantes odoríferos sulfuro de sodio (Na_2S) y ácido acético para que el agua sintética reproduzca las condiciones del agua séptica. Para la preparación de los contaminantes se pesan 6,21 g de $\text{Na}_2\text{S}\times 9\text{H}_2\text{O}$ con una pureza del 98% procedente de Sigma-Aldrich Co.(EEUU) y 3,42 ml de ácido acético glacial con una pureza del 99,9% proporcionado por Panreac Applichem (España). Luego los contaminantes se disuelven en matraces aforados de 50 ml con agua destilada de tipo II. Después, se introducen 20 ml de los contaminantes preparados en los matraces aforados en jeringas para introducirlos en el sistema. Las jeringas preparadas se introducen en la bomba de jeringa (Fusion 100) para que se introduzca el contaminante en el agua sintética con un flujo de 0,21 mL/h.

Las aguas residuales sépticas sintéticas pasan por una tubería de 1,5 m enrollada para asegurar que la mezcla de los contaminantes con el agua sintética sea completa. Después, el agua séptica se introduce al sedimentador primario hermético hecho de PVC con 8 L de volumen de total de líquido y un espacio de cabecera de 10 L de volumen construido en PVC transparente. A continuación, el agua residual se suministra por gravedad al reactor biológico de lodos activos de 11 litros y separado en 2 cámaras anóxica y aerobia. Las cámaras anóxicas están cerradas con una tapa para evitar el contacto con el aire; la cámara donde entra el agua residual tiene una turbina Rushton que agita continuamente a 200 rpm. En la cámara aerobia hay 3 difusores de burbuja fina conectados a una soplante que suministran el oxígeno necesario para que se mantengan las condiciones aerobias en la cámara y una turbina Rushton para favorecer la aireación con una velocidad de aproximadamente 130 rpm. Para controlar el flujo de oxígeno que entra en la cámara aerobia, debe estar entre 2 y 3 mgO_2/L , se utiliza un rotámetro conectado a la entrada de los difusores de burbuja. El reactor biológico está equipado con una recirculación interna del licor de mezcla a la cámara anóxica. Por último, los lodos activos producidos por el reactor biológico se decantan en un decantador secundario construido de PVC con 8 litros de volumen de trabajo y provisto de una pala giratoria encargada de arrastrar los lodos decantados al fondo. También hay una recirculación externa de los lodos del decantador secundario a la cabecera del reactor biológico y se realiza una extracción periódica de los lodos producidos. El efluente clarificado se descarga en un tanque de agua tratada[15].

A continuación, se presenta un diagrama de flujo de la planta piloto:

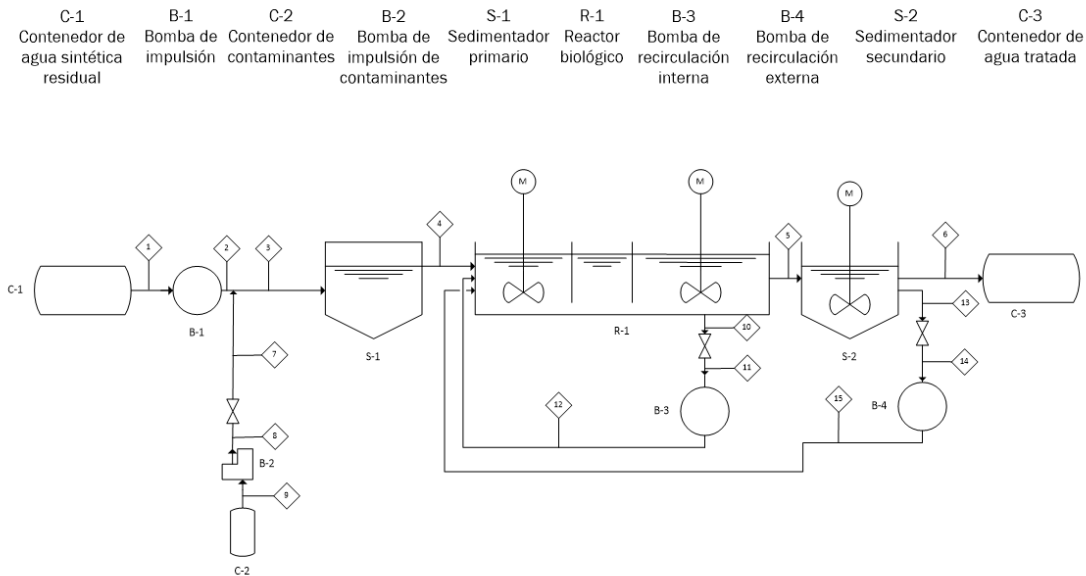


Figura 2. Diagrama de flujo de la planta piloto



Figura 3. Imagen de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales.

2.2. Agua residual sintética urbana

Es necesario preparar agua residual sintética con unas físico-químicas y una composición parecida a las aguas residuales urbanas para mantener las condiciones de operación de la planta piloto estables. Para ello se prepara un agua residual sintética con las siguientes características: 250 mg/L de glucosa, 220 mg/L de extracto de carne, 320 mg/L de peptona de casiena, 112mg/L de $K_2HPO_4 \times 3H_2O$, 1,1 g/L de $NaHCO_3$, 6,3 mg/L de $NaCl$, 3,6 mg/L de $CaCl_2 \times 2H_2O$, 1,8 mg/L de $MgSO_4 \times 7H_2O$, 0,45 mg/L de $CuCl_2 \times 2H_2O$ y 27 mg/L de Urea. Se preparan 140 litros de agua sintética semanalmente y se dividen en tres días en los que se cambia el agua sintética para mantener la operación continua de la planta piloto de aguas residuales.



2.3. Toma de muestras y preparación

Para conocer la evolución de las características del agua residual sintética a lo largo de la planta piloto es necesario tomar muestras de los distintos compartimentos del proceso. Se obtuvieron muestras de la entrada de la planta piloto, el sedimentador primario y la salida de la planta piloto.

Para poder caracterizar la composición del agua residual, lo primero que se hace es medir su pH, luego se filtran las muestras de manera que las muestras de entrada y salida tengan más de 30 ml filtrados. Para filtrar las muestras se utiliza un filtro de 0,45 mm que se inserta en un portafiltros. Después se utiliza una jeringa de 12 ml para filtrar las muestras. Este proceso se repite dos veces para las muestras de la entrada de la planta piloto y del sedimentador primario y tres veces para la muestra de salida.

Una vez que las muestras están filtradas hay que preparar las disoluciones dependiendo del tipo de muestra.

Para la muestra de la entrada se preparan las siguientes disoluciones:

- Para la muestra que se va a analizar en el analizador de carbono orgánico total (TOC) se prepara un vial con 5 ml de la muestra y 25 ml de agua tipo MiliQ.
- Para la muestra que se va a analizar para determinar la concentración de sulfuros se toman 1 ml de la muestra y 4 ml de agua tipo II con una micropipeta de 5 ml para conseguir una disolución 1:5 en un tubo de muestras de laboratorio.
- Para la muestra que se va a analizar para determinar la concentración de amonio se toman 1 ml de la muestra y 9 ml de agua tipo II con una micropipeta de 5 ml para conseguir una disolución 1:10 en un tubo de muestras del laboratorio.

Para la muestra de la salida se preparan las siguientes disoluciones:

- Para la muestra que se va a analizar en el analizador orgánico total (TOC) se prepara un vial con 10 ml de la muestra y 20 ml de agua tipo MiliQ.
- Para la muestra que se va a analizar para determinar la concentración de H₂S se prepara un tubo de muestras con 5 ml de la muestra con una micropipeta de 5 ml.
- Para la muestra que se va a analizar para determinar la concentración de amonio se prepara un tubo de muestras con 10 ml de la muestra con una micropipeta de 5 ml.

Para la muestra del decantador primario se preparan las siguientes disoluciones:

- Para la muestra que se va a analizar para determinar la concentración de H₂S se toman 2,5 ml de la muestra y 2,5 ml de agua tipo II con una micropipeta de 5 ml para conseguir una disolución 1:2,5 en un tubo de muestras de laboratorio.



- Para la muestra que se va a analizar para determinar la concentración de amonio se toman 1 ml de la muestra y 9 ml de agua tipo II con una micropipeta de 5 ml para conseguir una disolución 1:10 en un tubo de muestras del laboratorio.

Se preparan muestras de un 1ml para su medición de aniones a la entrada y a la salida de la planta piloto filtradas con un filtro de 0,22 μm .

Para el análisis de sólidos suspendidos se cogen muestras de la sección aerobia del reactor biológico y del fondo del sedimentador secundario. Se cogen más de 10 mL para la determinación de los sólidos suspendidos volátiles.

Para la determinación de la concentración de amonio de las muestras se prepara un blanco con solo 10 ml de agua tipo II y se introduce una gota de EDTA, un reactivo necesario para la medición de amonio a través de cromatografía, y se agita durante 30 segundos. Después se espera 3 minutos y se introducen 400 ml de reactivo de Nessler (K_2HgI_4) para que reaccione con el amonio que haya y se produzca un color amarillo. Por último, se agita de nuevo durante poco tiempo y se espera 10 minutos.

Para las muestras para la determinación de H_2S se utiliza un kit de medición óptica de sulfuros adquirido de Spectroquant® (Merck) de manera que se hecha de la botella con identificador S-1 una gota en cada vial de plástico y se agitan; luego se echan 5 gotas de la botella con identificador S-2 en cada vial y se vuelve a agitar; por último, se echan 5 gotas de la botella con identificador S-3 y se vuelve a agitar. Al final de este procedimiento de preparación de las muestras para la determinación de la concentración de sulfuros aparece un color azulado en aquellas que contenga H_2S .

2.4. Análisis de muestras

- Análisis de oxígeno

Para medir la concentración de oxígeno disuelto en el reactor biológico se utiliza una sonda portátil Probe Oxi 3310 SET 1 WTW™. Se realizó una calibración del equipo cada día de acuerdo con las instrucciones del fabricante.

- Análisis TOC

Cuando las muestras están preparadas se envían a sus respectivos equipos para analizarlas. Las muestras que se han preparado para la medición de TOC se llevan al analizador TOC o analizador de carbono total (Shimadzu, Japón), que se encuentra en el laboratorio de cromatografía, para medir el carbono orgánico total, el carbono inorgánico, el carbono total y el nitrógeno total disuelto que haya en la muestra. En este equipo se introducen viales con un blanco que solo contiene agua MilliQ, y con patrones de 100 mg/L de carbono total y carbono inorgánico.

- Análisis de sólidos suspendidos volátiles

Primero se pesan 2 filtros que se utilizarán para filtrar el sólido suspendido que hay en las muestras. Al finalizar la filtración a vacío se apunta el volumen de muestra que



se ha filtrado, se mete en un desecador y se lleva a una estufa que está a 105 °C y se deja dentro de la estufa durante 24 horas. Transcurrido ese tiempo, las muestras se pesan en una balanza analítica y se meten en una mufla a 550 °C durante 24 horas. Después de ese tiempo se vuelven a meter a la estufa a 105 °C, se deja enfriar durante un tiempo y luego se pasan a un desecador hasta que alcanza la temperatura del laboratorio. Por último se pesan las muestras que están en el desecador en una balanza analítica.

- Análisis de iones.

Para poder analizar los aniones que hay a la entrada y a la salida de la planta piloto se hace una cromatografía a alta presión en un equipo denominado HPLC con detección de conductividad iónica (Shimadzu, Japón) para conocer los iones sulfato, iones nitrito y iones nitrato que hay en la entrada y en la salida de la planta piloto.

- Análisis de sulfuros.

Las muestras preparadas para medir la concentración de sulfuro se envían al ultra-espectrofotómetro para el análisis de su absorbancia. La absorbancia del sulfuro se encuentra en los 665 nm.

Una vez obtenidos los resultados se calcula su concentración a través de la siguiente fórmula:

$$(4) \frac{\text{Absorbancia } 665 \text{ nm} + 0,0062}{0,1262} \times \text{factor de dilución}$$

En esta fórmula el factor de dilución es la dilución que se ha hecho previamente a la muestra, si no hay factor de dilución se sustituye por un 1, y el dato de absorbancia es el valor que te da el espectrofotómetro.

Esta fórmula se saca de la siguiente curva de calibración:

$$\text{Concentración} =$$
$$f = y_0 + a \cdot x$$

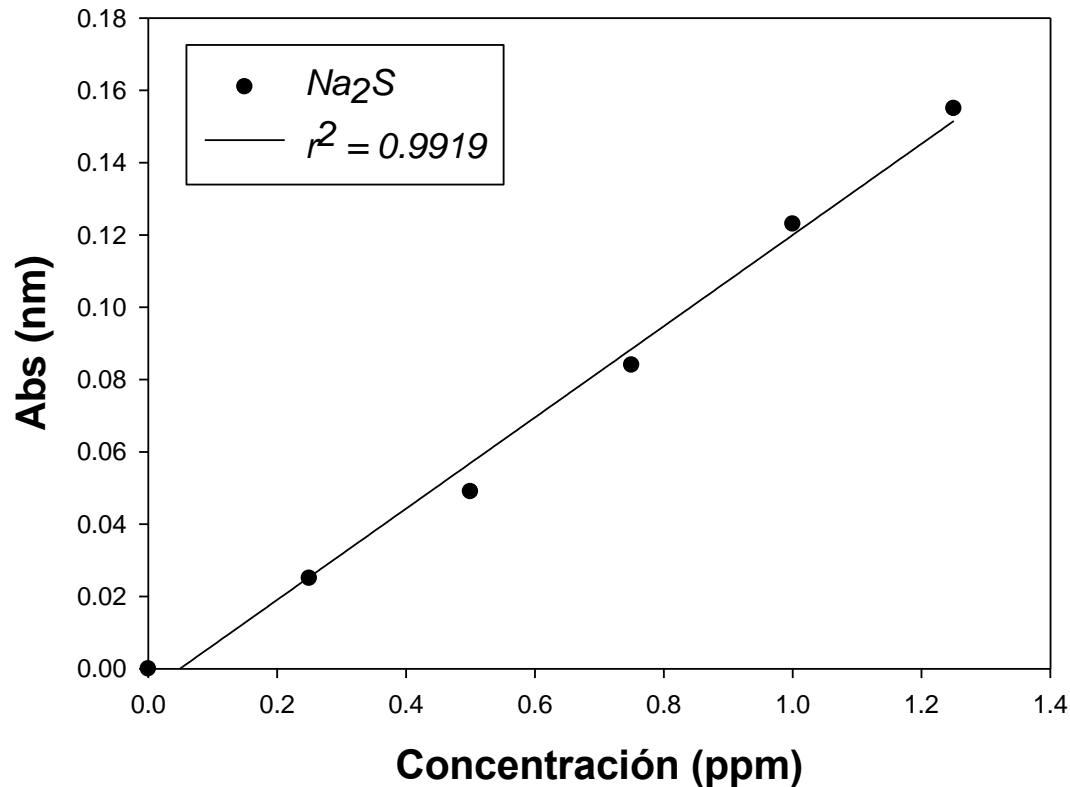


Figura 4. Curva de calibración para la concentración de sulfuros.

- Análisis de amonio

Las muestras preparadas para medir la concentración de amonio se envían al ultra-espectrofotómetro para el análisis de su absorbancia. La absorbancia del compuesto generado a partir del amonio se encuentra a los 425 nm.

Una vez obtenidos los resultados se calcula su concentración a través de la siguiente fórmula:

$$(5) (\text{Absorbancia } 425 \text{ nm} * 6,1087 - 0,029) * \text{factor de dilución}$$

En esta fórmula el factor de dilución es la dilución que se ha hecho a la muestra, si no hay factor de dilución se sustituye por un 1, y el dato de absorbancia es el valor que te da el espectrofotómetro.

La fórmula utilizada se saca de la siguiente curva de calibración:



curva de calibración amonio

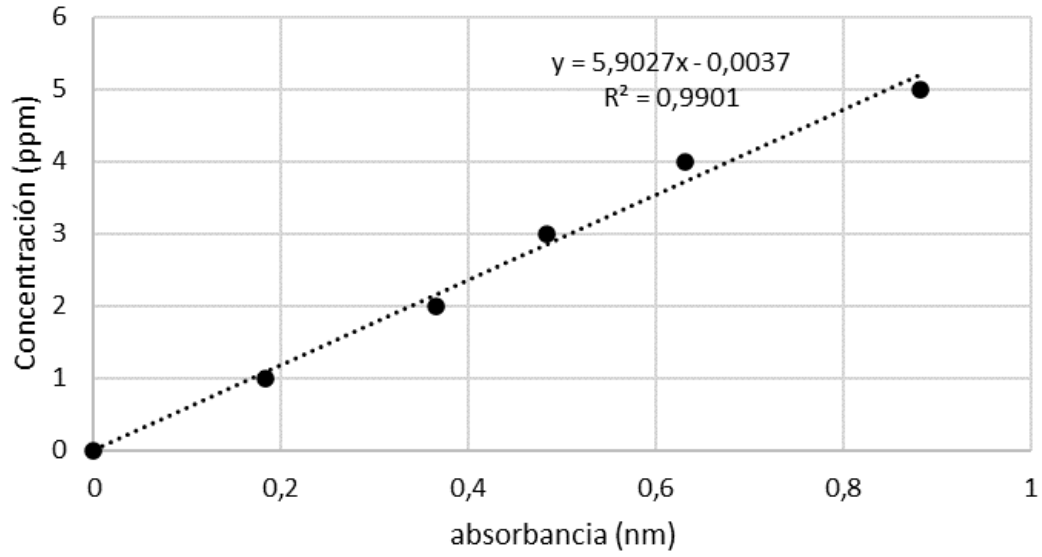


Figura 5. Curva de calibración para la concentración de amonio



3. Resultados y discusión

Debido a que la eliminación de sulfuros, nitrógeno y carbono total en un proceso de depuración de aguas residuales depende de muchos factores como el pH, oxígeno disuelto, concentración de biomasa en el proceso biológico, etc. es necesario hacer esos análisis además de los análisis necesarios para la determinación de la eliminación de sulfuros, nitrógeno y carbono en sus diferentes formas.

A continuación, se presentan los distintos análisis que se han realizado para este estudio:

3.1. Análisis de oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto en el tanque de aireación permite a las bacterias aerobias degradar la materia orgánica y obtener los nutrientes necesarios para su crecimiento, de manera que cuando hay un exceso de oxígeno, es decir la concentración de oxígeno supera los 3 mg O₂/L, la materia orgánica, el amonio y los sulfuros se convierten en los sustratos limitantes para el metabolismo de las bacterias autótrofas y heterótrofas aerobias. De tal manera que la transferencia de materia de la fase gas a la fase líquida por parte del oxígeno es crítica en este tipo de tratamientos biológicos para la eliminación efectiva de amonio, sulfuros y materia orgánica. A su vez, si la concentración del oxígeno disuelto es baja se pueden producir problemas de acumulación de lodos (por mala agitación) y aparición de bacterias filamentosas[15]. Cuando la concentración de oxígeno es baja, aumenta el crecimiento de bacterias filamentosas haciendo que el proceso de sedimentación no funcione de manera correcta y aparezca el problema de bulking (hinchamiento). El bulking ocurre debido a que el volumen del fango ha aumentado haciendo que este pierda las capacidades para decantar. Otro problema que puede ocurrir es el foaming (formación de espumas), este problema ocurre porque parte del fango flota en el sedimentador formando espuma y reduciendo la eficacia de la decantación secundaria.

A continuación se presenta una gráfica y una tabla de seguimiento de la concentración del oxígeno disuelto durante la duración del TFM:

Tabla 1. Datos de concentración de oxígeno disuelto

Días de funcionamiento (d)	Concentración de oxígeno disuelto (mg O ₂ /mL)
0	2,38
2	2,72
5	2,4
7	2,4
9	2
12	2,39
14	2,65
16	2,95
19	2,43
21	2,67



Días de funcionamiento (d)	Concentración de oxígeno disuelto (mg O ₂ /mL)
23	2,56
26	2,71
29	2,06
30	2,85
33	2,38
35	2,33
37	2,45
40	2,65
42	2,37
44	2,02
47	2,49
49	2,74
51	2,73
54	2,47
56	2,89
58	2,7
61	2,61
63	2,69
65	2,35
68	2,48
70	2,76
72	2,33
75	2,8
77	2,71
79	2,67
82	2,48
84	2,31
86	2,34
89	2,77
91	2,81
93	2,64
96	2,48
98	2,59
100	2,54
103	2,21
105	2,1
107	2,51
110	2,67
112	2,58
114	2,46
117	2,49
119	2,65
121	2,65



Días de funcionamiento (d)	Concentración de oxígeno disuelto (mg O ₂ /mL)
124	2,38
126	2,47
128	2,77
131	2,33
135	2,38
138	2,81
140	2,33
142	2,38
145	2,35
147	2,63
149	2,78
152	2,25
154	2,61
156	2,28
161	2,45
163	2,68
166	2,49
168	2,56
170	2,54
173	2,48

O₂

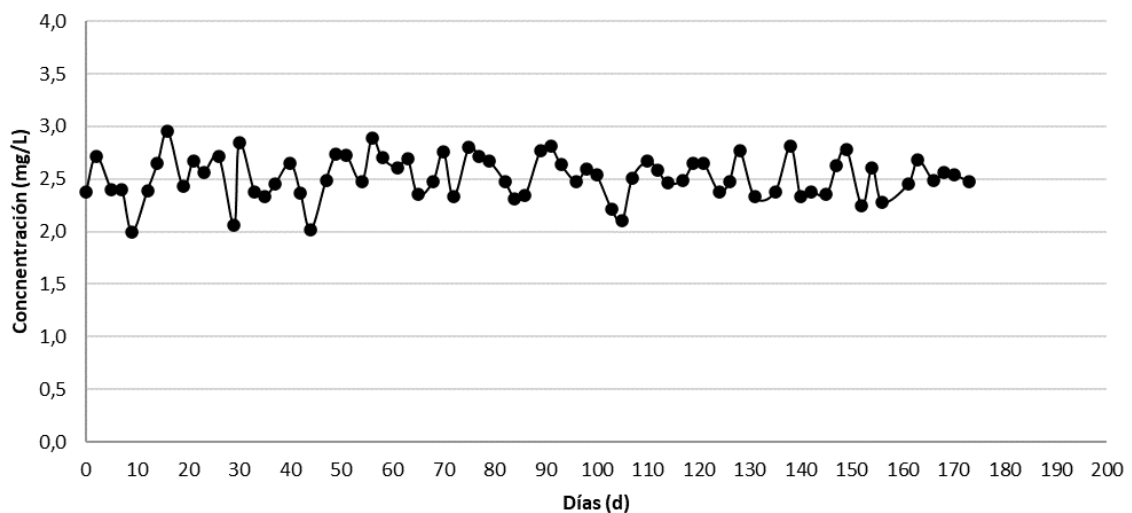


Figura 6. Control del oxígeno disuelto en el tiempo

Como se puede observar en la Figura 6 la concentración de oxígeno se mantiene en el rango entre 2 y 3 mg O₂/L de tal manera que no produzcan ninguno de los problemas que se han planteado anteriormente por una concentración de oxígeno



muy alta o muy baja[15]. Esta concentración se mantuvo mediante el control del flujo de aire de entrada al tanque aerobio.

3.2. Análisis de pH

El pH se considera globalmente como uno de los parámetros que gobiernan la efectividad y la eficacia de un proceso biológico de degradación de contaminantes. Las variaciones de pH pueden producir efectos adversos en el tratamiento de las aguas residuales urbanas en un proceso de fangos activos, entre los que se encuentran la nitrificación y la sedimentación en el sedimentador secundario. El pH óptimo para este tipo de procesos de tratamiento está entre 6,5 y 8,5. Para comprobar que el pH se mantiene en este rango se presenta la siguiente gráfica y la siguiente tabla con la evolución del pH en el tiempo:

Tabla 2. Datos de pH a la entrada y a la salida de la planta piloto

Días de funcionamiento (d)	pH a la entrada	pH a la salida
0	7,66	8,50
2	7,67	8,68
5	7,63	8,53
7	7,75	8,62
9	7,74	8,46
12	7,61	8,54
14	7,53	8,39
16	7,39	8,42
19	7,6	8,61
21	7,37	8,30
23	7,3	8,35
26	7,34	8,37
29	7,2	8,35
30	7,24	8,35
33	7,46	8,27
35	7,44	8,36
37	7,52	8,28
40	7,5	8,38
42	7,64	8,27
44	7,46	8,27
47	7,55	8,34
49	7,48	8,28
51	7,4	8,23
54	7,38	8,26
56	7,37	8,41
58	7,34	8,5
61	7,59	8,2
63	7,7	8,64



Días de funcionamiento (d)	pH a la entrada	pH a la salida
65	7,35	8,23
68	7,54	8,22
70	7,78	8,45
72	7,24	8,11
75	7,29	8,27
77	7,29	8,17
79	7,22	8,05
82	7,35	8,17
84	7,3	8,18
86	7,34	8,24
89	7,38	8,37
91	7,42	8,36
93	7,31	8,33
96	7,4	8,27
98	7,38	8,35
100	7,38	8,36
103	7,69	8,29
105	7,5	8,33
107	7,68	8,42
110	7,72	8,4
112	7,73	8,39
114	7,59	8,48
117	7,37	8,44
119	7,74	8,39
121	7,54	8,39
124	7,44	8,44
126	7,57	8,43
128	7,57	8,37
131	7,56	8,43
135	7,46	8,39
138	7,53	8,31
140	7,53	8,36
142	7,54	8,48
145	7,21	8,36
147	7,5	8,68
149	7,62	8,48
152	7,17	8,36
154	7,15	8,38
156	7,61	8,49
161	7,14	8,39
163	7,5	8,42

Días de funcionamiento (d)	pH a la entrada	pH a la salida
166	7,19	8,43
168	7,13	8,43
170	7,08	8,43
173	7,23	8,43

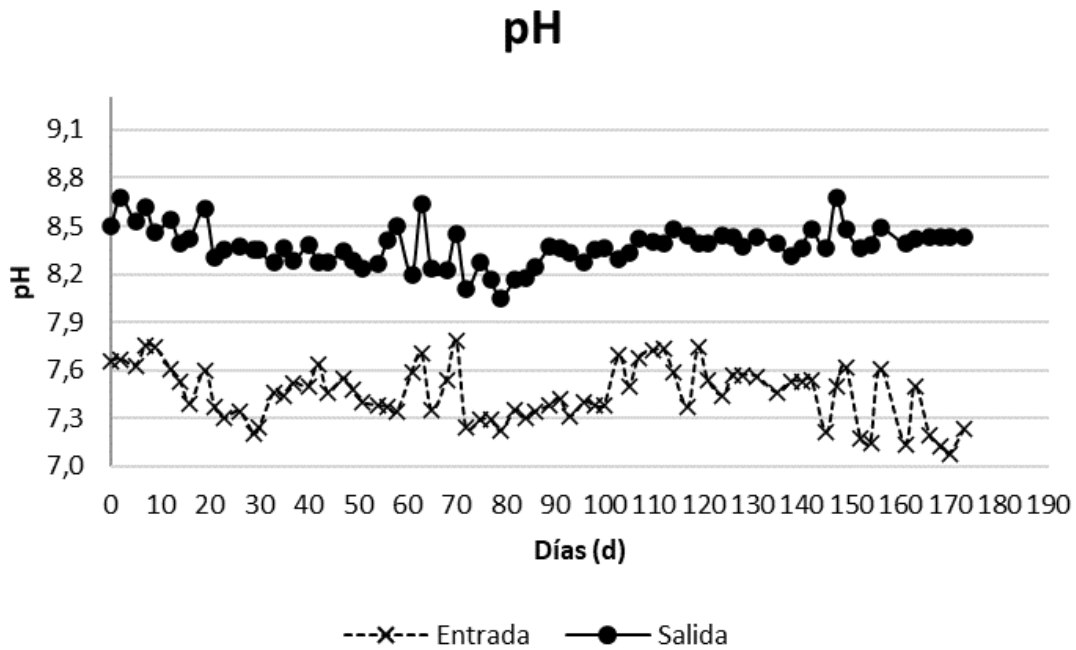


Figura 7. Evolución del pH en el tiempo

Como se puede observar en la Figura 7, el pH a la entrada de la planta piloto se encuentra en el rango de 7 a 7,8 y el pH a la salida del sistema está entre 8 y 8,7 por lo que está dentro del rango del proceso de tratamiento parecido al rango que se encuentra en [15]. Esto indica que el proceso de nitrificación se está realizando con el máximo rendimiento debido a que el proceso de nitrificación reduce su eficacia por debajo de pH 7 [15]. En un proceso de lodos activos, el stripping de CO₂ en el tanque aerobio tiende a subir el pH del licor mezcla, mientras que la nitrificación (que libera protones en la oxidación de amonio) tiende a disminuir el pH.

3.3. Análisis de sulfuros

A continuación se pueden ver los resultados de los análisis de las muestras de sulfuros en la entrada y salida de la planta piloto y en el sedimentador primario a lo largo del periodo experimental:



Tabla 3. Datos de las concentraciones de sulfuros.

Días de funcionamiento (d)	Concentración de sulfuros a la entrada (mg/L)	Concentración de sulfuros a la salida (mg/L)	Concentración de sulfuros en el sedimentador primario(mg/L)
0	20,34	0,23	
2	20,56	0,13	
5	22,30	0,16	
7	18,35	0,13	
9	12,92	0,15	
12	20,51	0,12	
14	21,89	0,18	
16	28,29	0,18	
19	35,90	0,13	
21	32,77	0,21	
23	29,41	0,08	
26	28,73	0,09	
29	15,30	0,07	
30	19,34	0,06	
33	25,09	0,11	
35	28,53	0,08	
37	36,18	0,06	
40	32,58	0,07	
42	25,72	0,14	6,26
44	39,11	0,11	24,04
47	42,12	0,13	18,42
49	37,09	0,14	17,93
51	30,83	0,12	10,92
54	39,98	0,18	15,57
56	40,14	0,27	11,52
58	26,12	0,16	12,30
61	21,60	0,06	28,58
63	36,85	0,10	18,09
65	25,80	0,06	21,26
68	37,53	0,10	27,06
70	24,33	0,19	25,19
72	34,04	0,11	25,15
75	29,33	0,06	16,58
77	23,42	0,22	16,83
79	24,02	0,10	15,07
82	33,17	0,14	17,17
84	16,41	0,17	5,95
86	29,60	0,08	16,77



Días de funcionamiento (d)	Concentración de sulfuros a la entrada (mg/L)	Concentración de sulfuros a la salida (mg/L)	Concentración de sulfuros en el sedimentador primario(mg/L)
89	27,27	0,09	21,21
91	12,61	0,08	17,07
93	11,38	0,14	8,94
96	19,78	0,23	13,14
98	22,12	0,08	13,57
100	30,52	0,07	16,03
103	19,62	0,10	13,19
105	27,62	0,05	12,97
107	22,95	0,18	16,50
110	42,96	0,07	23,77
112	39,67	0,10	23,90
114	34,83	0,38	19,35
117	40,74	0,10	25,60
119	25,68	0,08	14,84
121	15,42	0,06	11,98
124	30,00	0,10	19,56
126	21,28	0,10	14,06
128	18,95	0,13	12,97
131	23,50	0,14	9,07
135	27,86	0,13	15,58
138	20,93	0,13	10,65
140	22,63	0,05	14,42
142	21,88	0,10	12,08
145	15,10	0,17	15,50
147	18,79	0,18	12,82
149	26,83	0,07	13,58
152	18,07	0,05	8,80
154	27,46	0,05	15,00
156	42,16	0,11	22,67
161	12,25	0,09	8,16
163	31,70	0,10	16,20
166	12,13	0,10	7,42
168	14,94	0,13	9,69
170	16,89	0,05	9,07
173	15,26	0,10	5,34

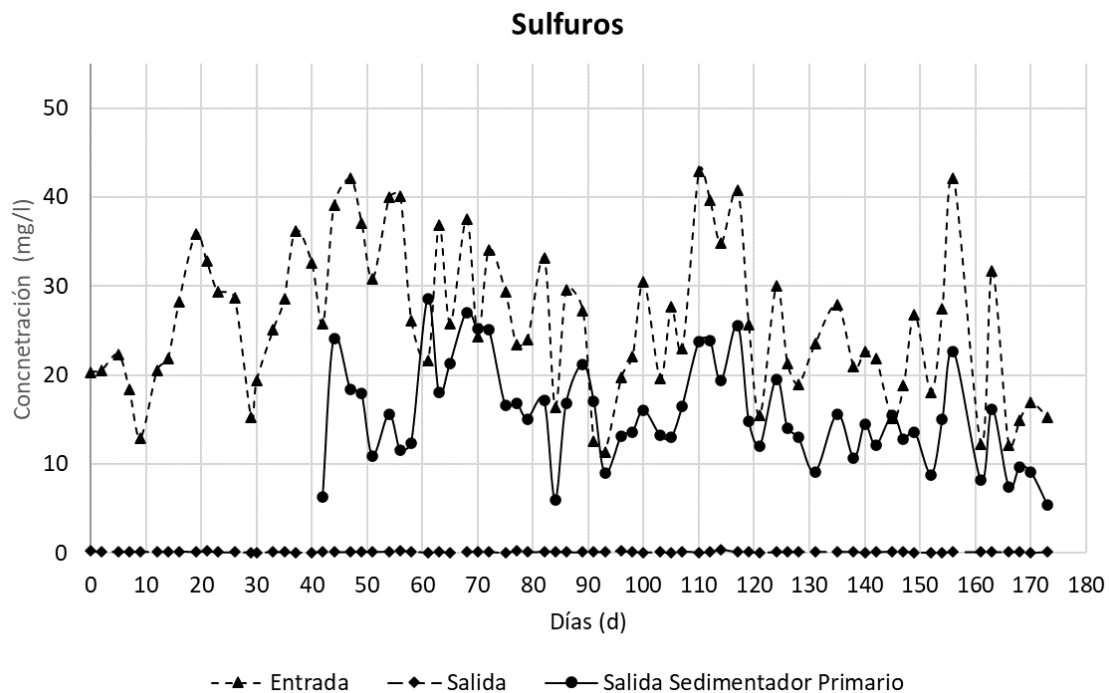
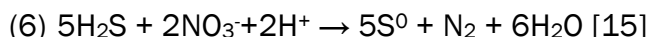


Figura 8. Evolución de la concentración de sulfuros.

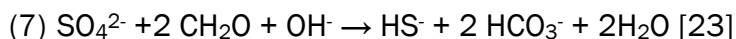
Como se puede observar en la Figura 8 la concentración de sulfuros que entra a la planta piloto varía entre 11,38 mg/L y 42,96 mg/L. La variación que tiene la concentración de sulfuros en la entrada se debe a que el reactivo que se utiliza para suplementar el contaminante se encuentra parcialmente oxidado haciendo que haya variaciones en la concentración del contaminante. La concentración de sulfuros a la salida del sedimentador primario varía entre los valores de 5,34mg/L y 28,28 mg/L. Estos valores son menores que los valores de la entrada debido a que parte de los sulfuros que están disueltos en el agua pasan a la fase gaseosa como H_2S haciendo que esta concentración de sulfuros sea menor. La concentración de sulfuros en la cabecera del sedimentador, que está cerrada herméticamente, no se ha podido medir debido a que el equipo que se necesita para medir estas concentraciones ha estado estropeado durante la realización de los experimentos por lo que es imposible de saber la concentración de H_2S que hay en el espacio de cabecera. La concentración de sulfuros a la salida está entre los valores de 0,05 mg/L y 0,38 mg/L lo que significa que la concentración de sulfuros se ha reducido en la planta piloto debido a la acción de las bacterias sulfooxidantes. De esta manera se ha conseguido reducir la concentración de sulfuros hasta un 99,54% del valor de la concentración de entrada. Toledo [15] obtuvo un porcentaje de eliminación mayor al 99% de los sulfuros, comparándolo con los resultados obtenidos se puede apreciar que el porcentaje de eliminación es comparable al obtenido en este estudio.

Se puede observar con gran claridad la variación de la concentración entre la entrada y la salida de la planta, lo que significa que la mayor contribución a la eliminación de H_2S proviene de las bacterias sulfooxidantes que convierten el sulfuro (S^{2-}) en SO_4^{2-} según las siguientes ecuaciones:



Las reacciones que están ocurriendo por parte de las bacterias sulfooxidantes son las ecuaciones que se están en la introducción en el apartado donde se describe el mecanismo de eliminación de las bacterias sulfooxidantes.

Esta gráfica es capaz de indicar que es posible llevar a cabo la eliminación de sulfuros de manera biológica que pueden provenir de las aguas domésticas además de reducir la concentración de sulfuros que pueda provenir de las bacteria sulfatoreductoras de tal manera que se reducen las emisiones de olores por impedir la producción de H₂S. Esto se debe a que las bacterias sulfatoreductoras son capaces de reducir el ion sulfato (SO₄²⁻) en el ion sulfuro (S²⁻) en presencia de materia orgánica, produciendo un aumento de los contaminantes odoríferos según la siguiente ecuación:



3.4. Análisis de sulfatos

Ahora se presentan los resultados de los análisis de aniones de sulfato a la entrada y a la salida de la planta piloto:

Tabla 4. Datos de concentraciones de sulfatos.

Días de funcionamiento (d)	Concentración de iones sulfato a la entrada (mg/L)	Concentración de iones sulfato a la salida (mg/L)
0	0,00	29,84
2	0,00	23,95
5	0,00	21,91
7	0,00	13,90
9	0,00	27,92
12	0,00	15,22
14	0,00	17,93
16	0,00	20,41
19	0,00	26,20
21	0,00	22,83
23	0,00	22,51
26	0,00	24,55
29	0,00	23,18
30	0,00	22,69
33	0,00	31,03
35	0,00	26,21
37	0,00	32,37
40	0,00	25,10
42	16,03	35,23
44	0,00	38,22
47	0,00	37,44



Días de funcionamiento (d)	Concentración de iones sulfato a la entrada (mg/L)	Concentración de iones sulfato a la salida (mg/L)
49	12,04	39,73
51	9,40	33,64
54	0,00	42,34
56	17,33	44,30
58	18,63	59,86
61	26,98	59,77
63	25,65	58,93
65	22,50	53,80
68	23,92	52,40
70	18,44	40,03
72	13,92	39,48
75	4,66	33,67
77	17,80	32,05
79	13,33	22,31
82	0,00	34,94
84	7,09	32,70
86	0,00	35,09
89	0,00	40,61
91	16,50	48,65
93	15,49	44,16
96	16,19	47,42
98	12,51	42,45
100	0,00	37,78
103	6,75	25,27
105	0,00	44,02
107	0,00	39,42
110	21,33	70,36
112	25,97	72,20
114	19,14	75,94
117	0,00	43,61
119	0,00	40,76
121	0,00	44,56
124	0,00	37,09
126	0,00	37,89
128	0,00	31,45
131	7,24	25,91
135	0,00	33,83
138	0,00	36,12
140	0,00	36,58
142	0,00	39,55
145	3,31	31,95
147	10,40	44,65

Días de funcionamiento (d)	Concentración de iones sulfato a la entrada (mg/L)	Concentración de iones sulfato a la salida (mg/L)
149	0,00	50,64
152	11,08	41,31
154	0,00	49,13
156	0,00	41,93
161	0,00	45,52
163	0,00	32,04
166	0,00	40,83
168	0,00	34,45
170	0,00	29,61
173	0,00	28,72

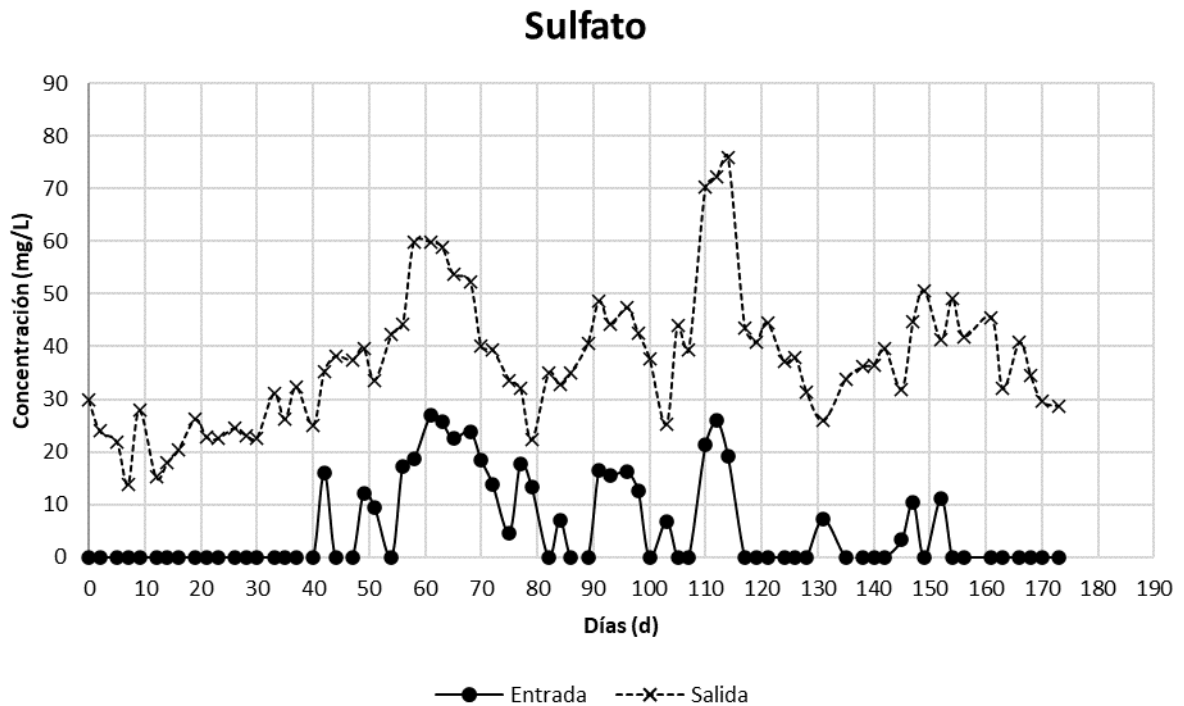


Figura 9. Evolución de la concentración de sulfatos.

En la Figura 9 se puede observar la evolución de la concentración de sulfato a lo largo del tiempo del experimento. Se puede observar que la concentración de sulfatos a la salida corresponde con la concentración de sulfuros que está entrando al reactor biológico. Los puntos de concentración de sulfato a la entrada de la planta piloto se deben a que el contaminante está hidratado en su preparación por lo que se pueden producir sulfatos por la oxidación debido a que el reactivo para la creación del contaminante lleva mucho tiempo abierto y se ha oxidado produciendo el ion sulfato.



3.5. Análisis de nitrógeno

A continuación se presenta una gráfica y una tabla con los resultados del análisis de nitrógeno total a la entrada y salida de la planta piloto:

Tabla 5. Datos de concentración de nitrógeno

Días de funcionamiento (d)	Concentración de nitrógeno a la entrada (mg/L)	Concentración de nitrógeno a la salida (mg/L)
0	71,268	10,792
2	74,342	11,920
5	78,107	5,835
7	71,422	6,677
9	62,271	6,072
12	68,497	10,089
14	68,612	9,302
16	70,125	9,170
19	75,464	9,460
21	67,368	9,816
23	68,487	11,331
26	76,931	10,513
29	79,673	4,289
30	66,223	7,467
33	75,854	7,113
35	62,187	8,693
37	53,468	7,134
40	60,216	7,813
42	66,874	8,703
44	62,782	5,774
47	81,124	10,159
49	66,884	7,575
51	88,438	7,690
54	83,024	15,442
56	64,939	15,928
58	72,523	8,643
61	83,995	13,241
63	62,039	7,718
65	65,044	7,826
68	80,380	13,570
70	68,715	14,647
72	64,224	13,647
75	76,024	15,250
77	70,612	14,118
79	60,616	18,050
82	78,193	24,207



Días de funcionamiento (d)	Concentración de nitrógeno a la entrada (mg/L)	Concentración de nitrógeno a la salida (mg/L)
84	66,967	16,233
86	64,921	14,590
89	83,888	11,442
91	80,434	13,972
93	66,745	8,610
96	74,849	8,284
98	73,338	9,585
100	79,126	8,590
103	69,565	9,187
105	70,999	10,344
107	76,462	9,185
110	71,049	9,917
112	89,321	12,192
114	77,640	9,845
117	72,981	9,319
119	70,941	8,678
121	61,480	8,155
124	62,821	7,169
126	70,952	7,398
128	66,383	9,013
131	82,900	19,640
135	64,895	7,876
138	67,646	6,989
140	77,646	10,180
142	66,872	8,790
145	71,277	8,753
147	64,340	7,983
149	73,048	8,232
152	65,917	8,519
154	66,763	6,320
156	71,268	10,792
161	74,342	11,920
166	62,511	7,359
168	65,174	8,359
170	76,297	7,396
173	68,504	8,689

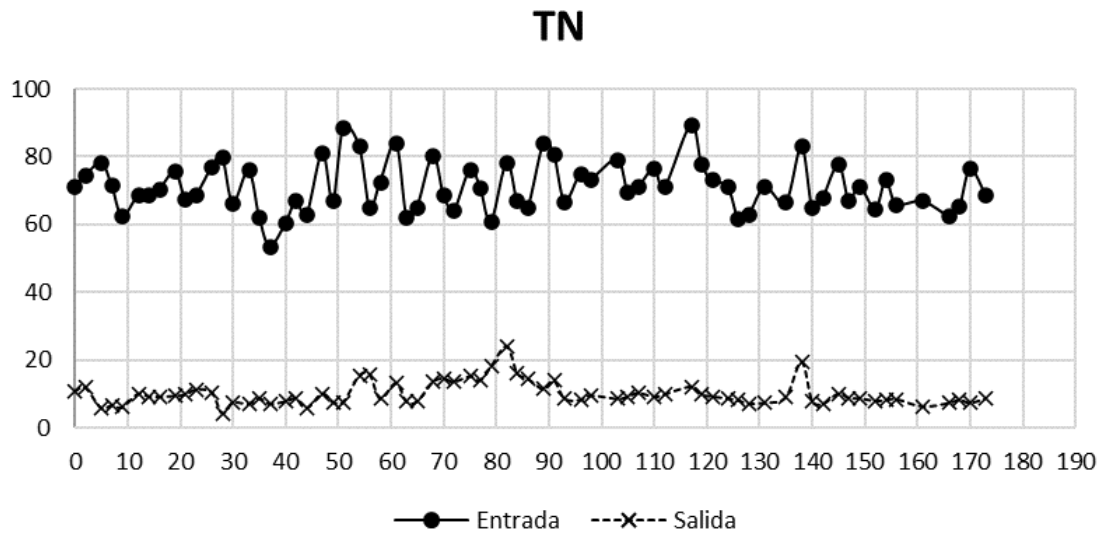


Figura 10. Evolución del nitrógeno en la planta piloto.

La Figura 10 muestra como la concentración de nitrógeno disminuye en la salida con respecto a la entrada, en concreto se produce una disminución de la concentración del 85,78%. Toledo [15] obtuvo un porcentaje de eliminación del 87% un poco mayor al obtenido. Esto se debe a que el proceso de nitrificación-desnitrificación elimina el nitrógeno que hay dentro del agua residual sintética, y como se reduce la concentración de nitrógeno total desde la entrada de la planta piloto hasta la salida de la planta piloto. El nitrógeno entra al sistema en forma de urea, que luego se transforma en amonio. Luego el amonio se transforma en nitrito por acción de las bacterias nitrosomonas y en nitrato por las bacterias Nitrobacter en presencia de oxígeno disuelto. El agua recircula a cabecera de reactor y entra en la cámara anóxica donde ocurre la desnitrificación, y el nitrato/nitrito pasan a nitrógeno gas[24].

De manera que las reacciones que están ocurriendo en el proceso de nitrificación-desnitrificación son las siguientes:

- (8) $\text{NH}_4^+ + 1,5 \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_2^- + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$
- (9) $\text{NO}_2^- + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^-$
- (10) $\text{NO}_3^- + 2\text{e}^- + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{NO}_2^-$
- (11) $\text{NO}_2^- + \text{e}^- + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{NO}$
- (12) $2\text{NO} + 2\text{e}^- + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2\text{O}$
- (13) $\text{N}_2\text{O} + 2\text{e}^- + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2(\text{g})$

A continuación se presenta una gráfica y una tabla con los resultados del análisis de amonio a la entrada y salida de la planta piloto, y a la salida del sedimentador primario:

Tabla 6. Datos de concentración de amonio



Días de funcionamiento (d)	Concentración de amonio a la entrada (mg/L)	Concentración de amonio a la salida (mg/L)	Concentración de amonio en el sedimentador primario(mg/L)
0	48,34	1,40	
2	46,75	1,00	
5	51,33	1,17	
7	44,18	2,26	
9	35,02	3,31	
12	38,74	0,91	
14	40,46	0,50	
16	36,24	1,35	
19	50,60	0,58	
21	43,75	0,40	
23	45,59	0,60	
26	50,72	1,28	
29	26,71	0,77	
30	38,01	0,63	
33	40,94	1,22	
35	37,95	0,50	
37	35,75	0,66	
40	35,81	0,76	
42	37,95	1,58	
44	43,75	0,65	
47	55,60	0,77	
49	54,08	1,03	
51	45,22	1,96	
54	53,77	12,31	
56	50,84	14,36	
58	46,44	3,75	
61	42,90	6,97	
63	42,59	1,33	
65	37,40	1,75	
68	52,12	9,89	
70	35,51	11,00	
72	38,26	10,71	
75	50,17	11,31	
77	31,05	13,15	
79	41,74	16,51	
82	44,00	17,60	
84	44,30	8,08	
86	43,75	1,30	
89	55,91	0,70	42,70
91	36,12	1,27	51,94



Días de funcionamiento (d)	Concentración de amonio a la entrada (mg/L)	Concentración de amonio a la salida (mg/L)	Concentración de amonio en el sedimentador primario(mg/L)
93	38,44	1,16	48,34
96	54,75	0,53	63,42
98	42,78	0,51	56,15
100	48,76	0,55	57,50
103	52,43	0,64	61,29
105	52,86	0,82	56,70
107	54,63	0,83	62,94
110	62,94	1,02	71,49
112	61,35	1,30	68,13
114	58,78	1,89	67,70
117	53,22	0,67	62,14
119	56,15	1,21	59,88
121	46,50	0,88	56,09
124	53,96	1,37	62,81
126	55,91	0,62	64,03
128	45,22	0,61	56,89
131	55,79	6,81	60,19
135	48,89	14,03	54,38
138	54,63	6,38	67,70
140	46,38	1,45	64,03
142	48,15	4,35	48,34
145	52,49	2,77	62,94
147	43,08	1,89	64,46
149	43,20	1,73	51,70
152	54,63	1,78	67,03
154	59,58	3,34	66,54
156	57,99	1,21	57,86
161	51,88	1,20	60,80
163	54,38	0,64	58,96
166	47,54	0,85	57,80
168	48,27	0,57	58,17
170	46,75	0,66	58,05
173	48,64	1,30	57,25

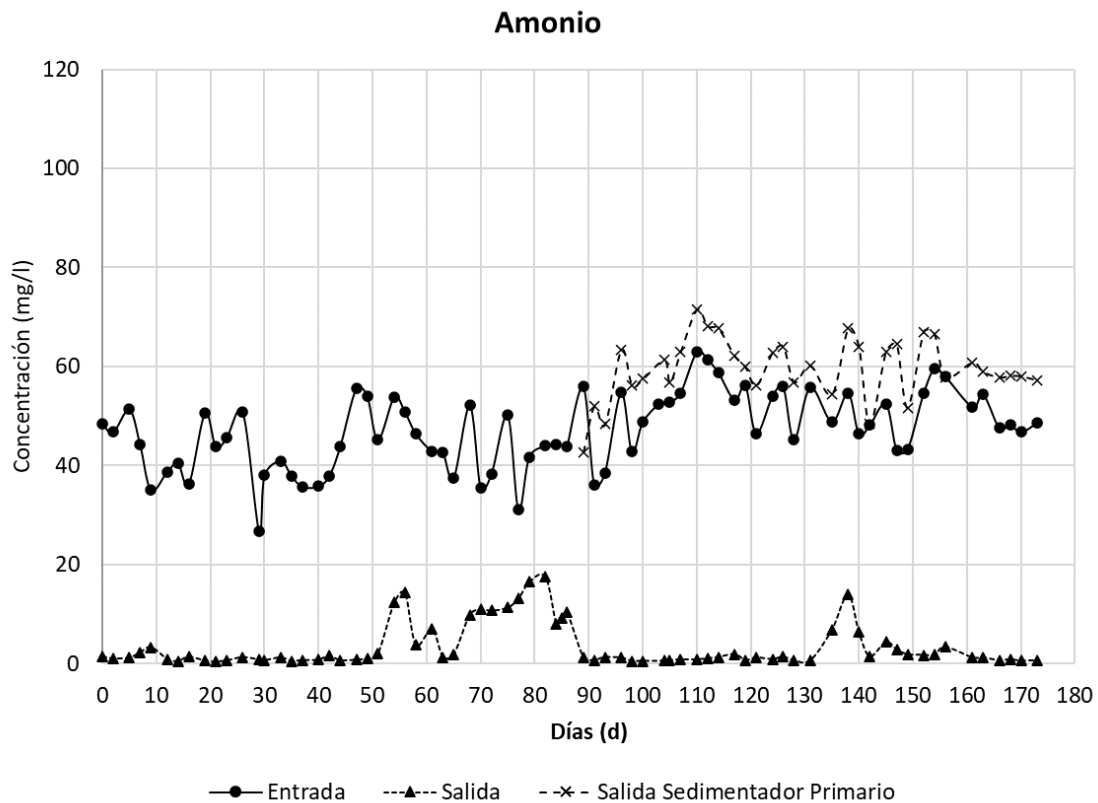


Figura 11. Evolución de la concentración de amonio en el tiempo.

Como se puede observar en la Figura 11, la concentración de amonio en la planta piloto aumenta a la salida del sedimentador primario frente a la concentración a la entrada de la planta piloto. Esto se debe a que la urea se está transformando a amonio desde la entrada y sigue transformándose en el sedimentador primario haciendo que su concentración de amonio sea mayor que la concentración de amonio a la entrada del sedimentador.

También se puede observar en la Figura 11 que hay dos o tres momentos donde el proceso de nitrificación se ha perdido. El primer momento de la pérdida de la nitrificación, que va desde el día 50 hasta el día 62, se debe a una disminución de la biomasa en el reactor biológico haciendo que el proceso de nitrificación no fuera completo. Esto se puede observar en la Figura 14, donde la concentración de la biomasa en el reactor biológico disminuye en este momento. El segundo evento, que va desde el día 64 hasta el día 90, se debe a que las bacterias encargadas del proceso de la nitrificación estaban muriendo por lo que hubo que hacer una reinoculación de bacterias nitrificantes para que el proceso volviera a funcionar. El tercer momento, que va desde el día 130 hasta el día 140, se debe a una disminución de la concentración de la biomasa en el reactor biológico causando los mismos problemas que ocurrieron en el primer momento. Esto se puede observar en la Figura 14, donde la concentración de la biomasa en el reactor biológico disminuye en este momento como en el primer momento.



Otra cosa que se puede observar es que la concentración de amonio a la salida de la planta es mucho menor que a la entrada de la planta consiguiéndose una reducción del 97,44%. Comparando el valor obtenido con el valor de reducción que consiguió Toledo[15] se puede observar que el valor obtenido es similar al valor obtenido por Toledo[15] Esto significa que el proceso de nitrificación-desnitrificación está funcionando y las bacterias que se dedican a este proceso se encontraron activas.

Para comprobar la viabilidad del proceso de nitrificación- desnitrificación se han hecho análisis de determinación de concentración de nitratos y nitritos en la entrada y la salida de la planta piloto. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente gráficas y tablas:

Tabla 7. Datos de concentración de nitrato

Días de funcionamiento (d)	Concentración de nitrato a la entrada (mg/L)	Concentración de nitrato a la salida (mg/L)
0	0,00	21,09
2	0,00	23,59
5	0,00	5,29
7	0,00	11,31
9	0,00	8,20
12	0,00	17,10
14	0,00	17,98
16	0,00	16,03
19	0,00	18,95
21	0,00	21,61
23	0,00	22,65
26	0,00	30,50
29	0,00	14,14
30	0,00	12,02
33	0,00	17,26
35	0,00	16,70
37	0,00	12,66
40	0,00	7,06
42	0,00	7,31
44	0,00	7,49
47	0,00	9,06
49	0,00	6,55
51	0,00	2,69
54	0,00	5,82
56	0,00	2,89
58	0,00	4,43
61	0,00	1,12
63	0,00	3,59
65	0,00	5,46



Días de funcionamiento (d)	Concentración de nitrato a la entrada (mg/L)	Concentración de nitrato a la salida (mg/L)
68	0,00	2,61
70	0,00	0,00
72	0,00	2,05
75	0,00	0,00
77	0,00	0,00
79	0,00	2,02
82	0,00	0,90
84	0,00	0,00
86	0,00	3,02
89	0,00	4,72
91	0,00	25,32
93	0,00	23,48
96	0,00	16,36
98	0,00	19,71
100	0,00	17,20
103	0,00	16,55
105	0,00	15,14
107	0,00	10,77
110	0,00	11,73
112	0,00	11,23
114	0,00	13,40
117	0,00	16,32
119	0,00	16,30
121	0,00	15,35
124	0,00	12,20
126	0,00	8,50
128	0,00	7,70
131	0,00	8,06
135	0,00	0,00
138	0,00	4,85
140	0,00	7,81
142	0,00	6,55
145	0,00	3,72
147	0,00	4,97
149	0,00	4,21
152	0,00	6,04
154	0,00	0,00
156	0,00	4,65
161	0,00	2,93
163	0,00	2,57
166	0,00	0,00
168	0,00	3,80



Días de funcionamiento (d)	Concentración de nitrato a la entrada (mg/L)	Concentración de nitrato a la salida (mg/L)
170	0,00	0,00
173	0,00	1,45

Nitrato

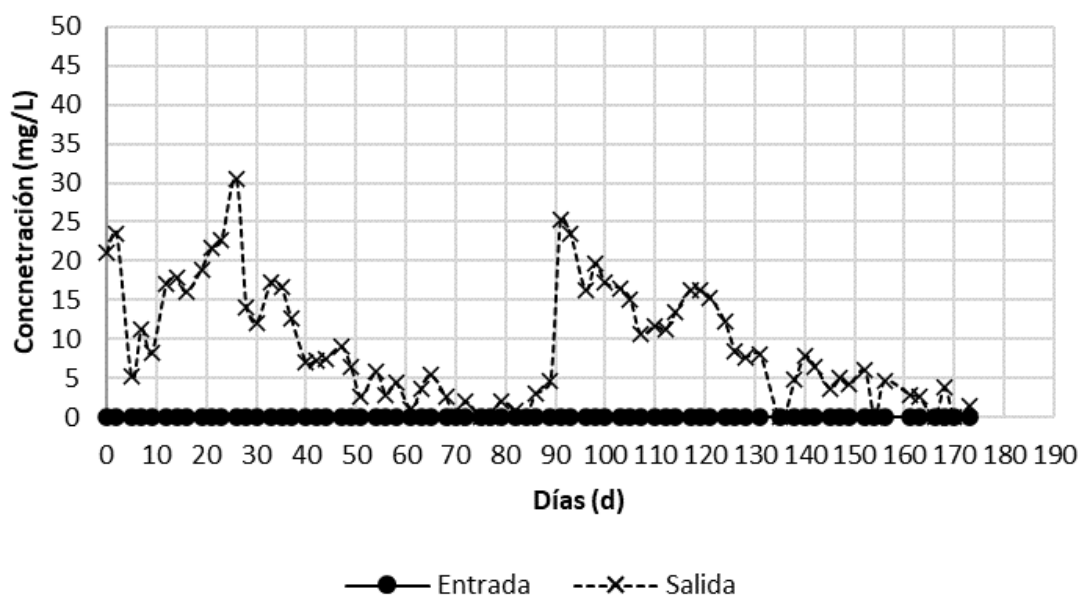


Figura 12. Evolución de la concentración de iones nitrato en el tiempo

Tabla 8. Datos de concentración de nitrato

Días de funcionamiento (d)	Concentración de nitrato a la entrada (mg/L)	Concentración de nitrato a la salida (mg/L)
0	0,00	17,60
2	0,00	20,12
5	0,00	15,39
7	0,00	13,90
9	0,00	4,68
12	0,00	19,96
14	0,00	17,38
16	0,00	15,98
19	0,00	17,16
21	0,00	15,67
23	0,00	16,22
26	0,00	11,51
29	0,00	12,73
30	0,00	14,87



Días de funcionamiento (d)	Concentración de nitrito a la entrada (mg/L)	Concentración de nitrito a la salida (mg/L)
33	0,00	14,61
35	0,00	17,38
37	0,00	18,80
40	0,00	22,62
42	0,00	21,39
44	0,00	23,56
47	0,00	28,90
49	0,00	19,91
51	0,00	17,47
54	0,00	14,67
56	0,00	18,18
58	0,00	19,37
61	0,00	23,23
63	0,00	24,79
65	0,00	24,52
68	0,00	22,40
70	0,00	22,71
72	0,00	21,51
75	0,00	25,68
77	0,00	21,99
79	0,00	19,84
82	0,00	16,37
84	0,00	26,43
86	0,00	17,85
89	0,00	21,57
91	0,00	20,48
93	0,00	16,10
96	0,00	18,93
98	0,00	17,99
100	0,00	19,36
103	0,00	11,41
105	0,00	18,56
107	0,00	19,14
110	0,00	19,60
112	0,00	19,40
114	0,00	18,97
117	0,00	22,52
119	0,00	14,85
121	0,00	16,91
124	0,00	20,43
126	0,00	16,07
128	0,00	16,35

Días de funcionamiento (d)	Concentración de nitrito a la entrada (mg/L)	Concentración de nitrito a la salida (mg/L)
131	0,00	16,09
135	0,00	14,28
138	0,00	14,98
140	0,00	16,67
142	0,00	22,04
145	0,00	24,00
147	0,00	22,35
149	0,00	24,16
152	0,00	20,98
154	0,00	20,78
156	0,00	19,60
161	0,00	21,98
163	0,00	25,55
166	0,00	26,12
168	0,00	21,64
170	0,00	20,78
173	0,00	20,39

Nitrito

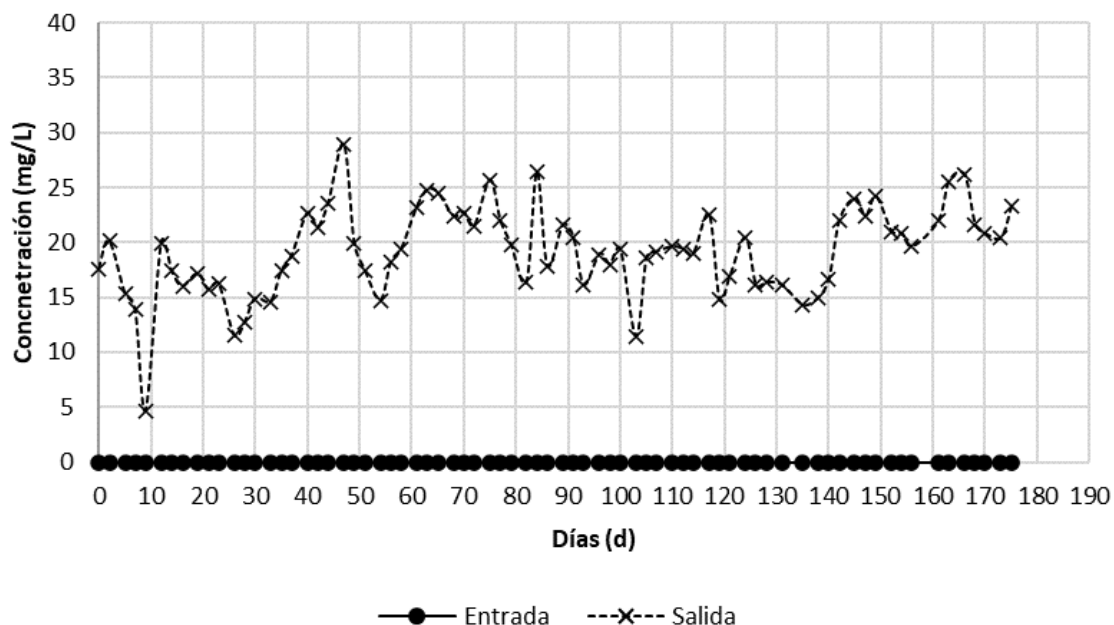


Figura 13. Evolución de la concentración de iones nitritos en el tiempo.

Como se puede observar en las Figura 12 y Figura 13, el proceso de nitrificación-desnitrificación funciona dado que la concentración de nitritos a la salida es mayor



que la concentración de nitratos indicando que los nitratos se están transformando en nitritos y al final en nitrógeno gas debido a las bacterias desnitrificantes. También se puede observar que estas gráficas corroboran los puntos donde se ha perdido el proceso de nitrificación- desnitrificación. Toledo [15] obtiene en su estudio que las concentraciones medias de NO_2^- son mayores que las concentraciones medias de NO_3^- , comparando esos resultados con los obtenidos en este estudio se puede observar que sigue la misma tendencia aunque las medias obtenidas en este estudio son menores que las obtenidas por Toledo[15].

3.6. Análisis de sólidos suspendidos volátiles.

La siguiente gráfica y la siguiente tabla muestran la evolución de la concentración de sólidos suspendidos volátiles dentro del reactor y en el sedimentador secundario:

Tabla 9. Datos de concentración de sólidos suspendidos volátiles.

Días de funcionamiento (d)	Concentración de sólidos suspendidos volátiles en el reactor(mg/L)	Concentración de sólidos suspendidos volátiles en el sedimentador secundario(mg/L)
0	2,56	6,14
2	2,28	8,50
5	1,85	12,04
7	1,57	8,34
9	2,60	6,98
12	3,12	7,59
14	3,38	9,62
16	2,33	11,88
19	4,48	9,86
21	3,04	13,16
23	3,27	12,40
26	3,10	6,26
29	3,55	6,20
30	1,96	6,68
33	2,23	7,84
35	2,50	8,48
37	3,14	10,38
40	2,58	11,18
42	2,53	6,78
44	2,94	8,22
47	3,38	9,40
49	3,70	7,20
51	4,14	9,14
54	1,72	9,78
56	2,58	9,56
58	2,44	10,06



Días de funcionamiento (d)	Concentración de sólidos suspendidos volátiles en el reactor(mg/L)	Concentración de sólidos suspendidos volátiles en el sedimentador secundario(mg/L)
61	3,16	12,10
63	2,76	9,28
65	2,83	9,68
68	4,28	9,94
70	3,50	9,14
72	3,84	8,76
75	3,88	9,16
77	3,44	8,68
79	3,70	8,96
82	3,64	8,70
84	3,78	9,30
86	2,81	8,16
89	3,78	8,70
91	3,01	8,46
93	2,64	9,18
96	2,85	9,64
98	4,04	8,48
100	2,96	6,20
103	4,44	11,14
105	2,74	9,04
107	4,50	12,30
110	3,34	5,62
112	3,60	8,08
114	4,04	7,84
117	4,56	8,66
119	2,54	10,88
121	2,92	9,22
124	2,88	11,02
126	2,76	9,34
128	3,46	8,64
131	2,58	7,03
135	3,26	8,12
138	4,02	10,16
140	2,90	8,46
142	3,45	10,12
145	3,12	7,98
147	3,42	10,48
149	3,48	8,26
152	2,78	11,30
154	3,28	9,84

Días de funcionamiento (d)	Concentración de sólidos suspendidos volátiles en el reactor(mg/L)	Concentración de sólidos suspendidos volátiles en el sedimentador secundario(mg/L)
156	3,16	13,78
161	2,97	11,06
163	3,03	9,46
166	3,14	8,80
168	2,24	8,92
170	2,62	9,52
173	2,56	6,14

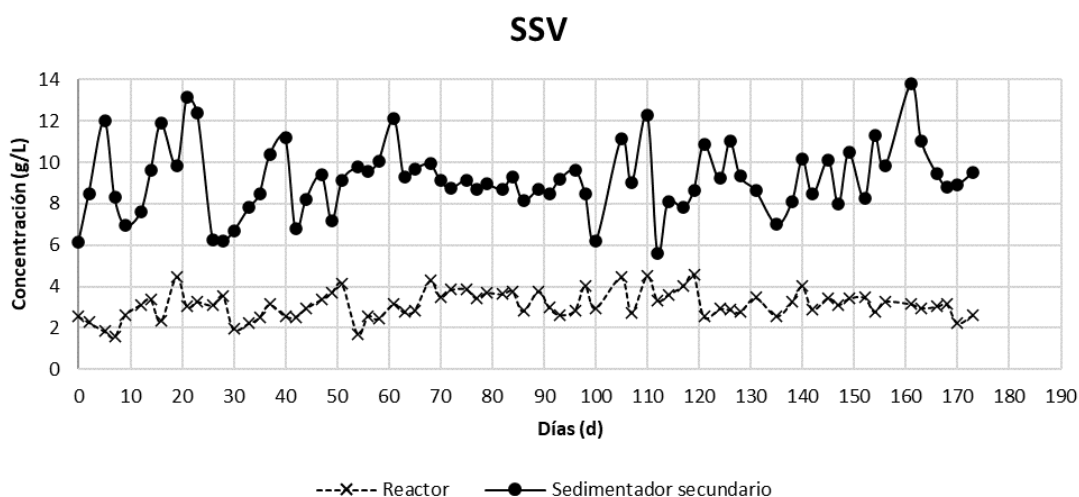


Figura 14. Evolución de los sólidos suspendidos volátiles en el tiempo.

En la Figura 14 se puede observar que los sólidos suspendidos volátiles o la biomasa que hay en el reactor biológico se mantiene en el rango entre 2 g/L y 4 g/L de tal manera que la concentración de biomasa en el reactor se mantiene estable a lo largo del tiempo. También se puede observar que la concentración de biomasa en el sedimentador secundario es mayor que en reactor biológico de manera que la biomasa que se produce en el reactor biológico va al sedimentador secundario donde sedimenta y se recircula al reactor biológico o bien se purga. Se puede observar que estos rangos de concentración de biomasa son parecidos a los obtenidos por Toledo[15].

3.7. Análisis de la concentración de materia orgánica.

La siguiente gráfica y la siguiente tabla representan la concentración de carbono total que hay en las muestras que se ha mandado a analizar en el TOC:



Tabla 10. Datos de concentración de carbono total

Días de funcionamiento (d)	Concentración de carbono total a la entrada (mg/L)	Concentración de carbono total a la salida (mg/L)
0	424,04	188,78
2	412,23	178,27
5	469,78	206,07
7	427,83	198,59
9	404,71	198,55
12	466,59	206,45
14	439,05	196,22
16	416,10	188,33
19	490,53	214,24
21	418,14	193,03
23	415,75	192,64
26	439,83	208,86
28	470,41	198,37
30	436,14	193,38
33	434,50	208,38
35	399,35	196,96
37	383,93	200,86
40	400,71	208,28
42	385,56	192,15
44	400,23	190,13
47	410,73	206,21
49	366,33	194,38
51	422,36	188,06
54	466,22	206,82
56	373,23	194,55
58	372,97	174,58
61	402,21	190,23
63	372,75	179,29
65	394,20	172,73
68	413,09	185,68
70	399,75	175,74
72	385,45	182,04
75	418,24	193,50
77	361,72	177,62
82	412,86	211,84
84	370,23	184,32
86	372,26	178,42
89	420,13	168,07



Días de funcionamiento (d)	Concentración de carbono total a la entrada (mg/L)	Concentración de carbono total a la salida (mg/L)
91	381,40	171,79
93	392,42	161,61
96	423,81	179,91
98	375,97	162,19
103	448,99	212,99
105	397,61	172,36
107	374,87	164,66
110	418,60	191,57
114	421,02	197,46
117	435,12	203,13
119	377,82	191,47
121	380,44	183,85
124	305,30	150,80
126	346,69	168,51
128	361,19	154,56
131	455,04	179,10
135	348,83	171,65
138	455,04	179,10
140	373,57	185,79
142	383,78	180,89
145	403,72	188,57
147	400,24	188,80
149	381,30	186,05
152	392,91	197,84
154	430,75	187,71
156	382,39	195,33
161	383,53	183,01
166	371,96	199,50
168	390,20	183,90
170	462,06	176,85
173	369,52	192,21

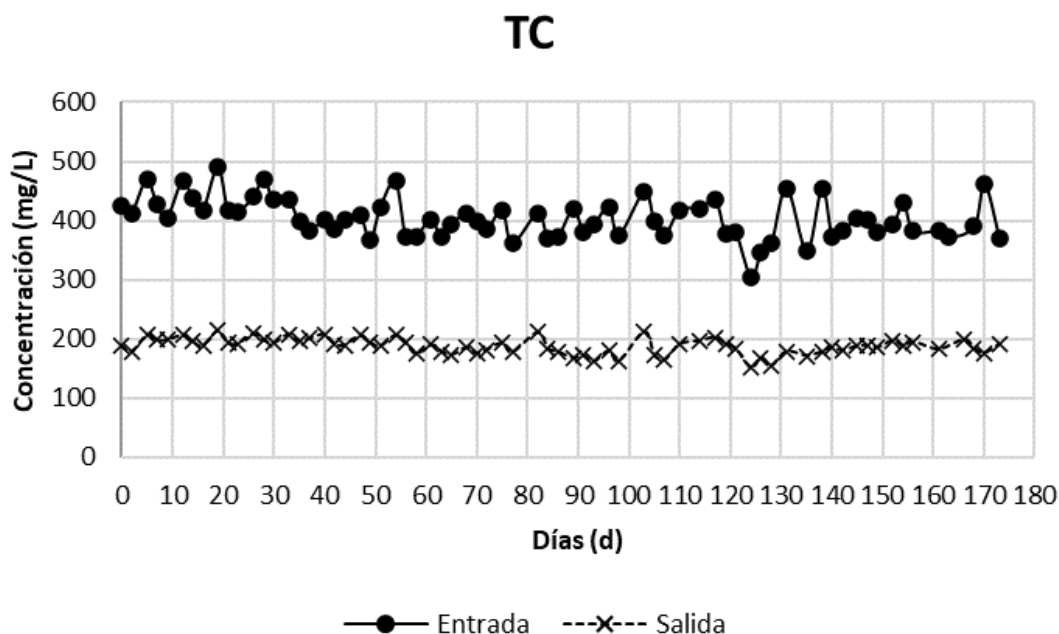


Figura 15. Evolución de la concentración del materia total.

La Figura 15 representa la evolución del carbono total que se ha añadido a lo largo del tiempo experimental. Se puede observar que la concentración de materia de la entrada es mayor que la concentración de materia total a la salida. Esto se debe a que está ocurriendo la degradación aerobia y anóxica de la materia orgánica dentro del reactor biológico.

Para probar que se está degradando la materia orgánica se analiza el carbono orgánico y el carbono inorgánico en las siguientes gráficas y tablas:

- **Carbono orgánico total (TOC).**

Tabla 11. Datos de concentración de materia orgánica biodegradable

Días de funcionamiento (d)	Concentración de materia orgánica biodegradable a la entrada (mg/L)	Concentración de materia orgánica biodegradable a la salida (mg/L)
0	262,39	13,78
2	256,73	12,90
5	303,57	18,07
7	265,53	18,14
9	240,50	16,43
12	308,03	16,40
14	292,43	17,50
16	237,64	12,78
19	308,34	19,22
21	258,26	18,14



Días de funcionamiento (d)	Concentración de materia orgánica biodegradable a la entrada (mg/L)	Concentración de materia orgánica biodegradable a la salida (mg/L)
23	229,62	8,33
26	266,83	20,95
28	312,18	21,65
30	267,64	14,38
33	247,33	16,83
35	222,01	16,48
37	211,23	23,48
40	205,08	18,36
42	205,69	9,44
44	219,85	11,25
47	215,23	15,43
49	175,22	14,82
51	250,75	18,55
54	273,66	3,51
56	187,62	6,85
58	192,06	0,00
61	197,19	0,00
63	185,49	0,00
65	227,96	3,27
68	216,21	0,00
70	226,38	0,00
72	202,38	0,00
75	227,01	0,00
77	171,63	0,00
82	182,18	0,00
84	206,89	8,46
86	201,34	0,00
89	226,35	0,00
91	203,34	0,00
93	222,40	0,00
96	242,80	0,00
98	215,30	0,00
103	260,57	6,89
105	221,92	0,00
107	212,26	0,00
110	224,96	20,64
114	232,45	16,94
117	243,22	9,42
119	172,94	8,91
121	199,31	5,64
124	185,89	7,66

Días de funcionamiento (d)	Concentración de materia orgánica biodegradable a la entrada (mg/L)	Concentración de materia orgánica biodegradable a la salida (mg/L)
126	162,28	0,00
128	205,07	0,00
131	289,04	0,00
135	175,76	0,00
138	289,04	0,00
140	210,22	9,09
142	216,82	11,16
145	205,97	0,00
147	213,90	15,87
149	203,78	11,27
152	207,49	10,19
154	224,21	8,22
156	188,61	12,43
161	208,44	14,77
166	187,28	21,52
168	222,23	22,20
170	279,64	9,60
173	193,89	6,30

Tabla 12. Datos de concentración de materia orgánica biodegradable.

TOC

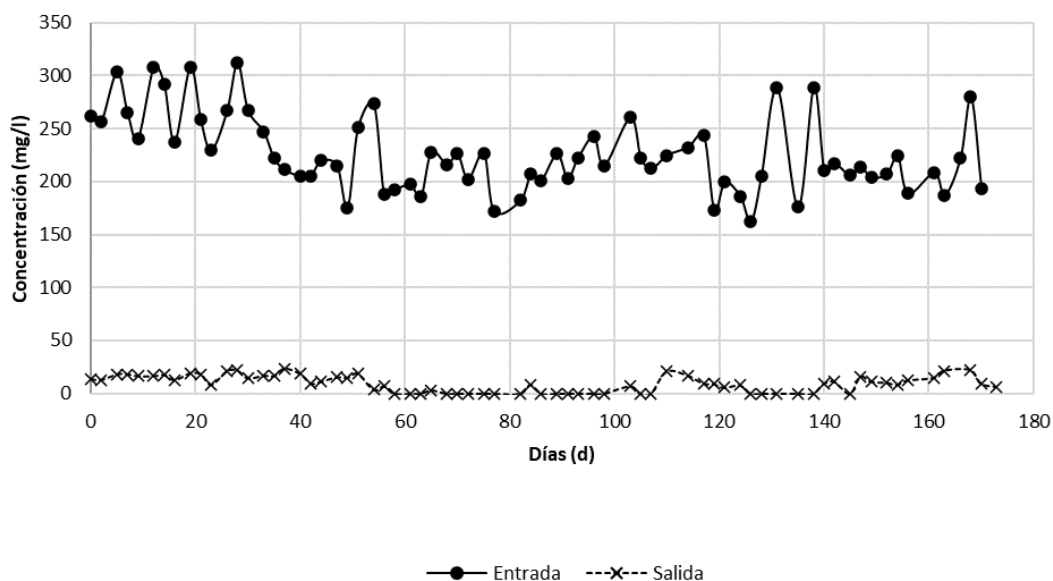


Figura 16. Evolución de la materia orgánica biodegradable.

Como se puede observar en la Figura 16 la concentración de materia orgánica biodegradable es mayor a la entrada de la planta piloto que a la salida de la planta



piloto. Esto se debe a que las bacterias consumen la materia orgánica biodegradable en el agua residual sintética, con buenos rendimientos de eliminación de materia orgánica de aproximadamente el 96%. Toledo[15] obtiene valores de eliminación de materia orgánica del $96\% \pm 2\%$. comparándolo con los resultados obtenidos se puede apreciar que el porcentaje de eliminación es comparable al obtenido en este estudio.

- **Carbono inorgánico.**

Tabla 13. Datos de concentración de materia inorgánica.

Días de funcionamiento (d)	Concentración de carbono inorgánico a la entrada (mg/L)	Concentración de carbono inorgánico a la salida (mg/L)
0	161,65	174,99
2	155,50	165,37
5	166,21	188,00
7	162,30	180,45
9	164,21	182,12
12	158,56	190,05
14	146,62	178,72
16	178,46	175,56
19	182,20	195,03
21	159,88	174,89
23	186,12	184,31
26	173,01	187,91
28	158,22	176,72
30	168,50	179,00
33	187,17	191,55
35	177,34	180,49
37	172,70	177,38
40	195,63	189,92
42	179,86	182,71
44	180,39	178,88
47	195,50	190,78
49	191,10	179,55
51	171,61	169,51
54	192,56	203,30
56	185,61	187,70
58	180,91	181,43
61	205,02	191,71
63	187,25	179,70
65	166,24	169,47
68	196,87	197,66
70	173,37	182,88
72	183,07	184,20



Días de funcionamiento (d)	Concentración de carbono inorgánico a la entrada (mg/L)	Concentración de carbono inorgánico a la salida (mg/L)
75	191,22	200,00
77	190,09	177,95
82	230,68	151,10
84	163,33	175,86
86	170,91	178,93
89	193,78	178,40
91	178,06	171,83
93	170,02	163,14
96	181,01	181,48
98	160,67	175,32
103	188,42	206,09
105	175,69	172,54
107	162,61	165,54
110	193,65	170,93
114	188,57	180,52
117	191,90	193,71
119	204,88	182,56
121	181,13	178,22
124	119,41	143,15
126	184,41	181,08
128	156,12	170,05
131	166,00	186,11
135	173,06	177,89
138	166,00	186,11
140	163,35	176,70
142	166,96	169,72
145	197,75	191,61
147	186,33	172,93
149	177,53	174,78
152	185,42	187,65
154	206,54	179,49
156	193,78	182,90
161	175,09	168,24
166	184,68	177,99
168	167,97	161,71
170	182,42	167,25
173	175,63	185,91

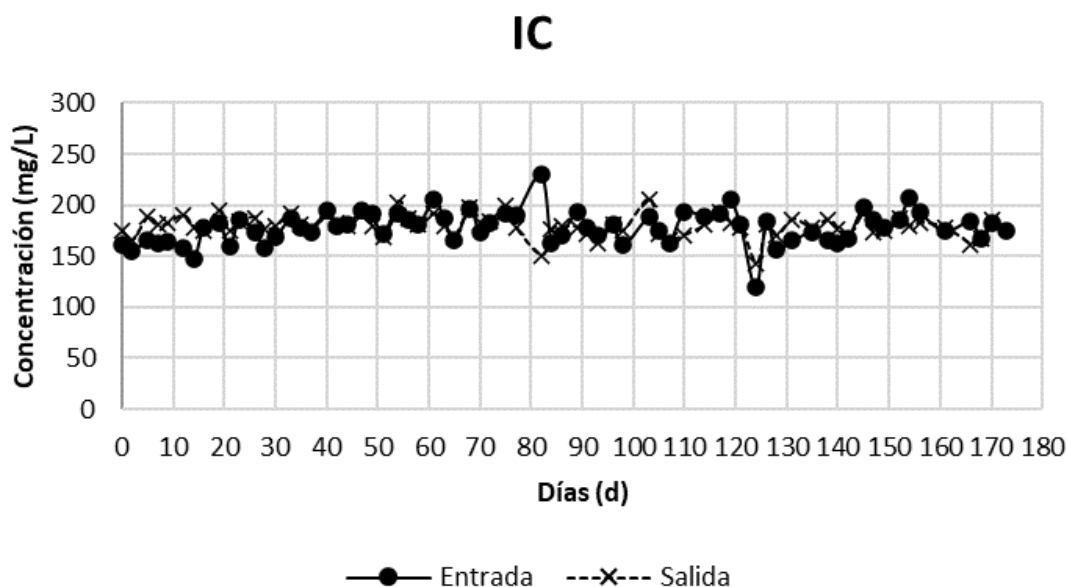


Figura 17. Evolución de la concentración de carbono inorgánico

En la Figura 17 se puede ver que la variación de la concentración de carbono inorgánico en la duración del experimento varía muy poco entre la entrada y la salida de la planta piloto por lo que siempre está entrando y saliendo de la planta piloto una concentración parecida de materia inorgánica. El carbono inorgánico se libera durante la oxidación aerobia de materia orgánica, y es consumido por las bacterias nitrificantes durante el proceso de oxidación de amonio a nitrato y nitrito. Toledo [15] observa que la concentración de carbono inorgánico se mantiene cerca de los 200 mg/L y no se aprecia variación de la concentración entre la entrada y a salida como ocurre en este estudio.



Universidad de Valladolid

Prevención de
contaminantes
odoríferos en
EDARs



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL



4. Conclusiones y trabajo futuro

- Conclusiones

Se puede concluir que se pueden utilizar bacterias sulfooxidantes en los reactores biológicos para la eliminación de sulfuros que se encuentren disueltos en aguas residuales urbanas con un rendimiento mayor al 99%. Estas bacterias son capaces de oxidar los sulfuros en SO_4^{2-} de forma aerobia, haciendo que se reduzcan los contaminantes odoríferos producidos por la emisión de sulfuros por las aguas sépticas residuales.

Otra conclusión que se puede sacar con respecto al pH es que aumenta desde la entrada de la planta piloto hasta la salida de la planta piloto. Esto se debe a que la biomasa está neutralizando la disminución del pH provocada por la producción de los iones sulfato, nitrato y nitrito.

También se puede concluir que durante la duración del TFM la degradación de materia orgánica ha tenido un rendimiento medio superior al 96% y el proceso de nitrificación-desnitrificación ha superado un rendimiento del 85% haciendo gran parte de la concentración de amonio que entra en la planta piloto se transforme en nitrógeno gas y la otra parte en nitrato y nitrito, siendo mayor la concentración de nitrito mientras se mantiene la concentración de biomasa en el reactor biológico.

- Trabajo futuro

Una vez arreglado el problema con el espectrómetro de masas se pueden empezar a hacer análisis de los gases de cabecera del decantador primario, además de introducir un equipo de dosificación de cloruro férrico (Fe_3Cl) para producir la precipitación de sulfuros y tener una implementación de eliminación de sulfuros tanto de manera biológica como de manera físico-química. Una vez introducido el equipo se pueden comparar las eficacias de eliminación entre tener solo un tratamiento biológico o tener tanto tratamiento físico-químico y biológico.



Universidad de Valladolid

Prevención de
contaminantes
odoríferos en
EDARs



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL



5. Bibliografía

- [1] “Los procesos de depuración de aguas residuales | Formación de ingenieros.” <https://www.tecpa.es/tratamientos-procesos-depuracion-aguas-residuales/> (accessed Jul. 06, 2023).
- [2] “Linea de agua.” <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/saneamiento-depuracion/sistemas/edar/linea-agua/default.aspx> (accessed Jul. 06, 2023).
- [3] “Reactores biológicos para tratar aguas residuales.” <https://condorchem.com/es/tratamiento-biologico-aguas-residuales/> (accessed Jul. 07, 2023).
- [4] “Tratamiento terciario de aguas residuales - Telwesa.” <https://telwesa.com/tratamiento-terciario-de-aguas-residuales/> (accessed Jul. 07, 2023).
- [5] “Estación depuradora de aguas residuales (EDAR).” <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/saneamiento-depuracion/sistemas/edar/default.aspx> (accessed Jul. 06, 2023).
- [6] P. Stellacci, L. Liberti, M. Notarnicola, and C. N. Haas, “Hygienic sustainability of site location of wastewater treatment plants. A case study. I. Estimating odour emission impact,” *Desalination*, vol. 253, no. 1–3, pp. 51–56, Apr. 2010, doi: 10.1016/j.desal.2009.11.034.
- [7] D. González, D. Gabriel, and A. Sánchez, “Odors Emitted from Biological Waste and Wastewater Treatment Plants: A Mini-Review,” *Atmosphere*, vol. 13, no. 5. MDPI, May 01, 2022. doi: 10.3390/atmos13050798.
- [8] J. Bak, K. Barbusiński, and M. Thomas, “Review of Methods for Assessing the Impact of WWTPs on the Natural Environment,” *Clean Technologies*, vol. 3, no. 1. MDPI, pp. 98–122, Mar. 01, 2021. doi: 10.3390/cleantechnol3010007.
- [9] J. M. Estrada, N. J. R. B. Kraakman, R. Muñoz, and R. Lebrero, “A comparative analysis of odour treatment technologies in wastewater treatment plants,” *Environ Sci Technol*, vol. 45, no. 3, pp. 1100–1106, Feb. 2011, doi: 10.1021/es103478j.
- [10] “Olfactometría Dinámica | Observatorio de olores.” <https://odourobservatory.org/es/dynamic-olfactometry/> (accessed Jul. 06, 2023).
- [11] H. Kim *et al.*, “Characterization of odor emission from alternating aerobic and anoxic activated sludge systems using real-time total reduced sulfur analyzer,” *Chemosphere*, vol. 117, no. 1, pp. 394–401, 2014, doi: 10.1016/j.chemosphere.2014.08.008.



- [12] M. Toledo and R. Muñoz, "Odour Control Strategies in Wastewater Treatment Plants: Activated Sludge Recycling and Oxidized Nitrogen Recycling," *Chem Eng Trans*, vol. 95, pp. 253–258, 2022, doi: 10.3303/CET2295043.
- [13] M. Toledo and R. Muñoz, "Optimization of activated sludge recycling and oxidized ammonium recycling as odour control strategies in wastewater treatment plants," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 47, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.jwpe.2022.102655.
- [14] M. Toledo and R. Muñoz, "Optimization of activated sludge recycling and oxidized ammonium recycling as odour control strategies in wastewater treatment plants," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 47, p. 102655, 2022, doi: 10.1016/j.jwpe.2022.102655.
- [15] M. Toledo and R. Muñoz, "Odour prevention strategies in wastewater treatment plants: A pilot scale study of activated sludge recycling and oxidized nitrogen recycling," *J Environ Chem Eng*, vol. 11, no. 5, p. 110366, Oct. 2023, doi: 10.1016/J.JECE.2023.110366.
- [16] M. Dębowski, J. Kazimierowicz, and M. Zieliński, "Advanced Oxidation Processes to Reduce Odor Emissions from Municipal Wastewater—Comprehensive Studies and Technological Concepts," *Atmosphere (Basel)*, vol. 13, no. 10, Oct. 2022, doi: 10.3390/atmos13101724.
- [17] C. Alfonsín *et al.*, "Selection of odour removal technologies in wastewater treatment plants: A guideline based on Life Cycle Assessment," *J Environ Manage*, vol. 149, pp. 77–84, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.jenvman.2014.10.011.
- [18] L. Ghorbel, L. Coudert, Y. Gilbert, G. Mercier, and J. F. Blais, "Determination of critical operational conditions favoring sulfide production from domestic wastewater treated by a sulfur-utilizing denitrification process," *J Environ Manage*, vol. 198, pp. 16–23, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.jenvman.2017.04.058.
- [19] A. F. L. Godoi *et al.*, "Human exposure to hydrogen sulphide concentrations near wastewater treatment plants," *Science of the Total Environment*, vol. 610–611, pp. 583–590, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.07.209.
- [20] H. Li, H. Wang, X. Yang, Q. Zhang, and Y. Wang, "Effect of exogenous CaO addition on H₂S production from waste activated sludge and its influence mechanism," *Water Res*, vol. 241, p. 120171, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.watres.2023.120171.
- [21] D. D. Meyer, P. A. M. de Andrade, A. Durrer, F. D. Andreote, G. Corção, and A. Brandelli, "Bacterial communities involved in sulfur transformations in wastewater treatment plants," *Appl Microbiol Biotechnol*, vol. 100, no. 23, pp. 10125–10135, Dec. 2016, doi: 10.1007/s00253-016-7839-3.



- [22] J. Espinosa Márquez *et al.*, “RUTAS METABÓLICAS DE OXIDACIÓN DEL AZUFRE EN BACTERIAS QUIMIOLITOAUTÓTROFAS, RELEVANCIA AMBIENTAL Y BIOTECNOLOGÍA,” vol. XXXIV, pp. 101–120, 2010, Accessed: Jun. 14, 2023. [Online]. Available: <http://bq.unam.mx/mensajebioquimico>
- [23] L. K. Baumgartner *et al.*, “Sulfate reducing bacteria in microbial mats: Changing paradigms, new discoveries,” *Sediment Geol*, vol. 185, no. 3–4, pp. 131–145, Mar. 2006, doi: 10.1016/J.SEDGEO.2005.12.008.
- [24] V. Van Huynh *et al.*, “Dynamic of microbial community in simultaneous nitrification and denitrification process: A review,” *Bioresour Technol Rep*, vol. 22, p. 101415, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.BITEB.2023.101415.