



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

**OPTIMIZACIÓN DE LA PLANTA DE  
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE  
UNA EMPRESA DE PRODUCTOS CÁRNICOS  
PARA LA REMOCIÓN DE NUTRIENTES**

Autor

Yaline Marín Totena

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2021



Optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales de una empresa de productos  
cárnicos para la remoción de nutrientes

**Yaline Marín Totena**

Trabajo final de semestre de industria, como requisito parcial para optar al título de:  
**Ingeniera Sanitaria**

Asesores (a):

Diana Catalina Rodríguez Loaiza (*Dra. Ingeniería*)  
(Asesor interno)

Sara Amaya (*Ingeniera ambiental Euro S.A.S*)  
(Asesor externo)

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería  
Escuela Ambiental  
Medellín, Colombia

2021

## TABLA DE CONTENIDO

1	Resumen .....	6
2	Abstract .....	6
3	INTRODUCCIÓN .....	7
4	OBJETIVOS.....	8
4.1	Objetivo general.....	8
4.2	Objetivos específicos .....	8
5	MARCO TEORICO .....	8
5.1	Planta de tratamientos de aguas residuales industriales.....	8
5.2	Tratamiento preliminar .....	8
5.3	Tratamiento primario .....	9
5.4	Tratamiento secundario.....	9
5.5	Tratamiento terciario.....	9
5.6	Planta de tratamiento de aguas residuales de Quality Beef .....	9
5.6.1	Tanque homogeneizador e igualación .....	9
5.6.2	Trampa de grasas .....	10
5.6.3	UASB .....	10
5.6.4	Reactor aerobio (Lodos activados).....	11
5.6.5	Clarificador.....	11
5.6.6	Tanque de bombeo o trasiego.....	12
5.6.7	Filtración descendente a presión.....	12
5.6.8	Desinfección en tanque de contacto .....	13
5.6.9	Tanque espesador de lodos .....	13
5.7	Proceso de remoción de nutrientes .....	14
5.7.1	Remoción de nitrógeno.....	14
5.7.1.1	Importancia de la remoción de nitrógeno en las aguas residuales .....	15
5.7.2	Remoción de fósforo .....	15
5.7.2.1	Eliminación biológica de fósforo .....	15
5.7.2.2	Eliminación química del fósforo .....	16

6	METODOLOGÍA .....	16
7	RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	17
7.1	Caudal de la PTARnD .....	17
7.2	Consumo de agua .....	17
7.3	Trampa de grasas y tanque homogeneizador .....	18
7.4	Reactor UASB .....	18
7.5	Tanque de lodos activados .....	19
7.6	Clarificador y tanque de trasiego .....	21
7.7	Filtro polyglass y tanque de contacto .....	21
7.8	Biodegradabilidad del agua residual .....	22
7.9	Resolución 0631 de 2015 .....	23
7.10	Comparación de las caracterizaciones realizadas en la Planta Quality Beef .....	24
7.11	Remoción de nutrientes .....	25
7.11.1	Tecnologías utilizadas para la remoción de Nutrientes .....	26
7.11.1.1	Biorreactores <b>A2O</b> de flujo ascendente de alta velocidad .....	26
7.11.1.2	SBR .....	28
7.11.1.3	MBR .....	29
7.11.1.3.1	Tipos de Biorreactores de Membrana (MBR) .....	30
7.11.1.3.2	Eliminación de nutrientes en los reactores MBR .....	31
8	PROPUESTA PARA LA ELIMINACIÓN DE NUTRIENTES EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES .....	32
8.1	Adaptación de la biomasa .....	33
8.2	pH óptimo .....	33
8.3	Temperatura .....	33
8.4	Tiempos de operación y secuencias anóxica-anaeróbica/aeróbica/anóxica .....	34
9	CONCLUSIONES .....	36
10	BIBLIOGRAFÍA .....	37

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Dimensiones del tanque homogeneizador .....	10
<b>Tabla 2.</b> Dimensiones y parámetros de trampa de grasas .....	10
<b>Tabla 3.</b> Datos históricos de los caudales ARI de la trampa de grasas.....	17
<b>Tabla 4.</b> Consumo de agua de los años 2017, 2018, 2019 y 2020.....	18
<b>Tabla 5.</b> Detergentes utilizados en la Planta Quality Beef. ....	19
<b>Tabla 6.</b> Biodegradabilidad del agua residual.....	22
<b>Tabla 7.</b> Caracterización del agua residual a la entrada de la trampa de grasa; año 2019...	22
<b>Tabla 8.</b> Biodegradabilidad del agua residual.....	23
<b>Tabla 9.</b> Valores máximos permisibles según la resolución 0631 de 2015 .....	23
<b>Tabla 10.</b> Comparación de caracterizaciones realizadas en la Planta Quality Beef .....	24
<b>Tabla 11.</b> Caracterización de aguas residuales provenientes de mataderos.....	25
<b>Tabla 12.</b> Valores máximos permisibles.....	26
<b>Tabla 13.</b> Temperatura requerida para la nitrificación .....	32
<b>Tabla 14.</b> Valores óptimos de parámetros de diseño de SBR.....	35

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Trampa de grasa de Quality Beef.....	10
<b>Figura 2.</b> Reactor aerobio .....	11
<b>Figura 3.</b> Clarificador .....	12
<b>Figura 4.</b> Tanque de trasiego .....	12
<b>Figura 5.</b> Filtro polyglass.....	13
<b>Figura 6.</b> Tanque de contacto .....	13
<b>Figura 7.</b> Tanque de espesador de lodos.....	14
<b>Figura 8.</b> Proceso de Nitrificación y Desnitrificación .....	15
<b>Figura 9.</b> Esquema del Biorreactor A2O de flujo ascendente .....	27
<b>Figura 10.</b> Secuencias de etapas de un SBR para la remoción de nutrientes. (Santa Cruz et al., s.f.) .....	28
<b>Figura 11.</b> Diferencia entre un sistema convencional de lodos activados y un MBR. (Vásquez , 2015).....	30
<b>Figura 12.</b> MBR con membrana sumergida (Puga, 2016).....	30
<b>Figura 13.</b> Combinación de un reactor MBR para la remoción de nitrógeno y fósforo (Rodríguez, 2020).....	32

# OPTIMIZACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UNA EMPRESA DE PRODUCTOS CÁRNICOS PARA LA REMOCIÓN DE NUTRIENTES

## 1 Resumen

Se realizó una revisión bibliográfica con el objetivo de buscar diferentes alternativas para la remoción de nutrientes en una empresa de productos cárnicos, en esta se encontró que los reactores discontinuos secuenciales (SBR) son una buena opción para efluentes de este tipo ya que se pueden adaptar fácilmente a las diferentes condiciones necesarias para la remoción de nutrientes las cuales son secuencias de condiciones anaerobias, posteriormente aerobias y por último anóxicas además de que es óptimo para empresas en dónde limitante es el espacio. Los parámetros necesarios para que haya una buena depuración de los nutrientes en las aguas es el Tiempo de Retención Celular (TRC) con un valor de 25 días, luego el Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) debe estar en un rango de 10 a 12 horas, la relación C/N debe ser 10:1 a 12:1, la concentración de oxígeno disuelto para la fase aerobia debe ser mayor de 2 mg/L y para la fase anóxica debe ser menor de 0,1 mg/L. Con estos valores se encontró en la literatura que los porcentajes de remoción de Nitrógeno Total y Fósforo Total son de aproximadamente de 85 % y 44,1% respectivamente.

**Palabras claves:** Efluente cárnico; Revisión Bibliográfica; Reactor por Carga Secuencial (SBR); Remoción de Nutrientes.

## 2 Abstract

A bibliographic review was carried out with the objective of looking for different alternatives for the removal of nutrients in a meat products company, in which it was found that sequential discontinuous reactors (SBR) are a good option for effluents of this type since they can be adapted easily to the different conditions necessary for the removal of nutrients, which are sequences of anaerobic conditions, later aerobic and finally anoxic, as well as being optimal for companies where space is limiting. The parameters necessary for there to be a good purification of the nutrients in the water is the Cellular Retention Time (TRC) with a value of 25 days, then the Hydraulic Retention Time (TRH) should be in a range of 10 to 12 hours, the C / N ratio should be 10: 1 to 12: 1, the dissolved oxygen concentration for the aerobic phase should be greater than 2 mg / L and for the anoxic phase it should be less than 0.1 mg / L. With these values, it was found in the literature that the removal percentages of Total Nitrogen and Total Phosphorus are approximately 85% and 44.1% respectively.

**Keywords:** Bibliographic Review; Nutrient Removal; Sequencing Batch Reactor (SBR); Slaughterhouse Wastewater.

### 3 INTRODUCCIÓN

Las aguas residuales industriales se caracterizan por tener una composición fisicoquímica muy diversa, debido a los diferentes sistemas productivos que existen, además, la carga de contaminantes que estas presentan es considerablemente mayor a las aguas residuales domésticas, por lo cual es de suma importancia la implementación de un conjunto de sistemas para el respectivo tratamiento (Carrasquero et al., 2015). Las aguas residuales generadas en la industria cárnica es un ejemplo, estas contienen gran cantidad de materia orgánica, grasas y aceites, sólidos suspendidos totales, nitrógeno y fosforo, que son contaminantes que pueden afectar gravemente los cuerpos de aguas, provocando eutrofización (Carrasquero et al., 2015), fenómeno que se da por la presencia excesiva de nutrientes en una fuente hídrica.

Actualmente la Resolución 0631 de 2015, establece los parámetros y valores máximos permisibles para los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público en Colombia, sin embargo, esta no exige la remoción de nutrientes, solo su análisis y reporte, lo que hace necesario una normatividad más rigurosa y así mismo la implementación de nuevos sistemas de tratamientos que logren remover este tipo de contaminantes por el bien del medio ambiente y de la salud humana.

Los reactores SBR son una buena alternativa para la remoción de nitrógeno y fosforo, estos funcionan mediante ciclos de manera secuencial, en los cuales, durante cada ciclo se llevan a cabo las etapas de llenado, reacción, sedimentación, vaciado y purga (Santa Cruz et al., s.f). Para la remoción de nutrientes deben ocurrir tres procesos principales, los cuales son; nitrificación (oxidación biológica de N-amoniacal a N-nitratos), desnitrificación (reducción de N-nitratos a  $N_2$  gaseoso) y remoción biológica del fósforo (RBP), involucrando distintos tipos de microorganismos (Santa Cruz et al., s.f).

Inversiones Euro S.A posee el centro de operaciones Quality Beef, donde su actividad se basa principalmente en el procesamiento y conservación de carne y productos fríos, asimismo se llevan a cabo actividades como el desposte y porcionado de res y cerdo, igualmente se realiza el empaquetado y la generación de carnes frías. Actualmente la planta Quality Beef cuenta con un sistema que trata las aguas residuales que son producidas por la empresa (Hidroasesores, 2018), el cual está compuesto por un sistema preliminar conformado por el cribado y trampa de grasas, seguido de un tanque de homogenización, el cual mediante un sistema de bombeo es enviado al reactor UASB que posteriormente es trasladado a un reactor aerobio de lodos activados, no obstante una porción de la materia orgánica no es removida por lo que se requiere un proceso de floculación de manto de lodo y una unidad de filtración en medio de gravas y arenas, terminando así su proceso (Eduardoño, 2015).

Este sistema lograr eliminar gran parte de la materia orgánica, sólidos suspendidos, grasas y aceites presentes en el agua, cumpliendo con la normatividad actual colombiana, sin embargo, en este proceso no se remueven los nutrientes producidos en el proceso industrial, dado a que no cuentan con el sistema para llevar a cabo esta acción por lo cual en este trabajo se propondrá un sistema que logre cumplir con los objetivos de la remoción de nutrientes, el cual en un futuro la norma colombiana exigirá un límite máximo permisible para el nitrógeno y fósforo.

## **4 OBJETIVOS**

### **4.1 Objetivo general**

Optimizar la planta de tratamiento de agua residual de una empresa de productos cárnicos para la remoción conjunta de nutrientes y materia orgánica.

### **4.2 Objetivos específicos**

- ✓ Analizar la información y las características realizadas previamente en el agua residual, con el fin de obtener información acerca de la cantidad de nutrientes producidos en la planta Quality Beef.
- ✓ Comparar diferentes alternativas para la remoción de nutrientes que se adapten de manera adecuada a las características del agua residual y posibilidades de la empresa.
- ✓ Proponer una adecuada alternativa para la remoción de nutrientes según lo analizado en la revisión bibliográfica.

## **5 MARCO TEORICO**

### **5.1 Planta de tratamientos de aguas residuales industriales**

Las plantas de tratamientos de aguas residuales industriales son un conjunto de sistemas que toman el agua contaminada con el objetivo de reducir sus cargas contaminantes a tal punto que sean menos perjudiciales para el medio ambiente y la salud humana. El agua residual debe pasar por diferentes tipos de tratamiento, los cuales están clasificados como se muestra a continuación:

### **5.2 Tratamiento preliminar**

En este primer tratamiento el agua residual es acondicionada con el principal objetivo de proteger las instalaciones. Las principales instalaciones que se utilizan en el tratamiento preliminar son (Rojas, 2002):

- Rejas o tamices, que tienen como objetivo la eliminación de sólidos gruesos.
- Trituradores, el cual es el encargado de triturar los sólidos.
- Desarenadores, que son utilizados para la eliminación de arenas y gravilla.
- Trampas de grasas, que tienen como objetivo eliminar los aceites y grasas.
- Homogeneización, el cual tiene como objetivo la amortiguación de las variaciones de cargas contaminantes que están entrando constantemente.

### **5.3 Tratamiento primario**

El objetivo del tratamiento primario es remover los sólidos en suspensión mediante sedimentación primaria, flotación, coagulación-floculación o filtración (Collazos, 2008).

### **5.4 Tratamiento secundario**

Tiene como objetivo la eliminación de la materia orgánica mediante procesos biológicos o fisicoquímicos, siendo los biológicos los comúnmente empleados en aguas biodegradables, debido a su bajo costo de operación, en este proceso se convierte la materia orgánica en sólidos que después se podrán sedimentar en tanques de decantación. Los tratamientos secundarios biológicos pueden ser filtros biológicos, lodos activados, lagunas, UASB, entre otros (Rojas, 2002).

### **5.5 Tratamiento terciario**

El tratamiento terciario o tratamiento avanzado es utilizado para conseguir una calidad del efluente superior a la del tratamiento secundario, este es utilizado para la remoción de nutrientes como el nitrógeno y el fosforo (Muñoz, 2008).

### **5.6 Planta de tratamiento de aguas residuales de Quality Beef**

La planta de desposte Quality Beef posee una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), la cual está conformada por unidades fabricadas por Eduardoño, por lo cual las siguientes descripciones fueron tomadas del manual de usuario del proveedor.

#### **5.6.1 Tanque homogeneizador e igualación**

Este tanque homogeniza las aguas residuales provenientes de la empresa, normalizando sus características fisicoquímicas del agua y estabilizando el caudal. Este tanque de igualación-homogenización (Tabla 1), es fundamental debido a que amortigua las variaciones del caudal, controla las sobrecargas hidráulicas y orgánicas que pueden interferir en el proceso biológico. Además, es útil debido que la Planta Quality Beef maneja caudales discontinuos debido a que los mayores consumos de agua se dan en los horarios de limpieza, los cuales son a las 12 pm y 4 pm, cuando la producción ya ha terminado y la empresa prestadora de aseo empieza sus labores de limpieza.

**Tabla 1.** Dimensiones del tanque homogeneizador

PARAMETRO	UNIDAD	VALOR
Largo	<i>m</i>	1,80
Ancho	<i>m</i>	1,80
Profundidad útil	<i>m</i>	1,15
Volumen	<i>m</i> <sup>3</sup>	3,73

### 5.6.2 Trampa de grasas

El agua es separada por diferencia de densidad del agua, es un pequeño tanque de flotación natural, allí la grasa se mantiene en la superficie del tanque y es fácilmente removida (Tabla 2).

**Tabla 2.** Dimensiones y parámetros de trampa de grasas

PARAMETRO	UNIDAD	VALOR
Número de cámaras	Adimensional	2
Largo/cámara	<i>m</i>	1,20
Ancho/cámara	<i>m</i>	0,80
Profundidad útil/cámara	<i>m</i>	0,95
Volumen /cámara	<i>m</i>	0,912
TRH de Diseño	<i>h</i>	1,86

La Figura 1 muestra el esquema de la trampa de grasas instalada en la empresa Quality Beef



**Figura 1.** Trampa de grasa de Quality Beef

### 5.6.3 UASB

Son reactores anaerobios en los que los microorganismos se agrupan formando gránulos. El agua entra por la parte inferior y atraviesa todo el perfil longitudinal y este sale por la parte superior. El reactor UASB consta de tres zonas, una zona de lecho de lodos en donde se encuentran todos los microorganismos que van a biodegradar la materia orgánica que se encuentra en el agua residual. La segunda zona es donde se encuentran dispersos los

microorganismos a lo largo UASB y por último está la zona de separación líquido-sólido. El tratamiento se da cuando el agua residual entra en contacto con el manto de lodos, produciendo gases de metano y dióxido de carbono, lo cual genera una circulación interior manteniendo los gránulos, por último, el gas libre asciende y es liberado por la parte superior del reactor (Obaya, 2006).

#### **5.6.4 Reactor aerobio (Lodos activados)**

Son aquellos realizados por determinado grupo de microorganismos que en presencia de oxígeno transforman la materia orgánica que existe en el agua residual, transformando en gases y materia celular, que puede separarse fácilmente mediante sedimentación, con este tanque también se pueden dar la eliminación de nitrógeno y fósforo (Figura 2).



**Figura 2.** Reactor aerobio

#### **5.6.5 Clarificador**

En esta unidad se separan los sólidos de líquidos para obtener un efluente clarificado (Figura 3).



**Figura 3.** Clarificador

#### **5.6.6 Tanque de bombeo o trasiego**

Su función es llevar las aguas por el filtro de operación, en este se encuentra una bomba sumergible para la elevación de las aguas residuales hacia el filtro (Figura 4).



**Figura 4.** Tanque de trasiego

#### **5.6.7 Filtración descendente a presión**

Se realiza en un lecho mixto conformado por gravas, arena y carbón activado. Allí las partículas que logran escapar del clarificador quedan retenidas por medio de transporte o mecanismos de adherencia (Figura 5).



**Figura 5.** Filtro polyglass

#### **5.6.8 Desinfección en tanque de contacto**

En esta unidad se remueve organismos patógenos con la presencia del cloro y el agua residual (Figura 6).



**Figura 6.** Tanque de contacto

#### **5.6.9 Tanque espesador de lodos**

El lodo es comprimido en la base del tanque mediante gravedad, mientras en la parte superior se produce una capa de agua que se extrae y recircula nuevamente (Figura 7).



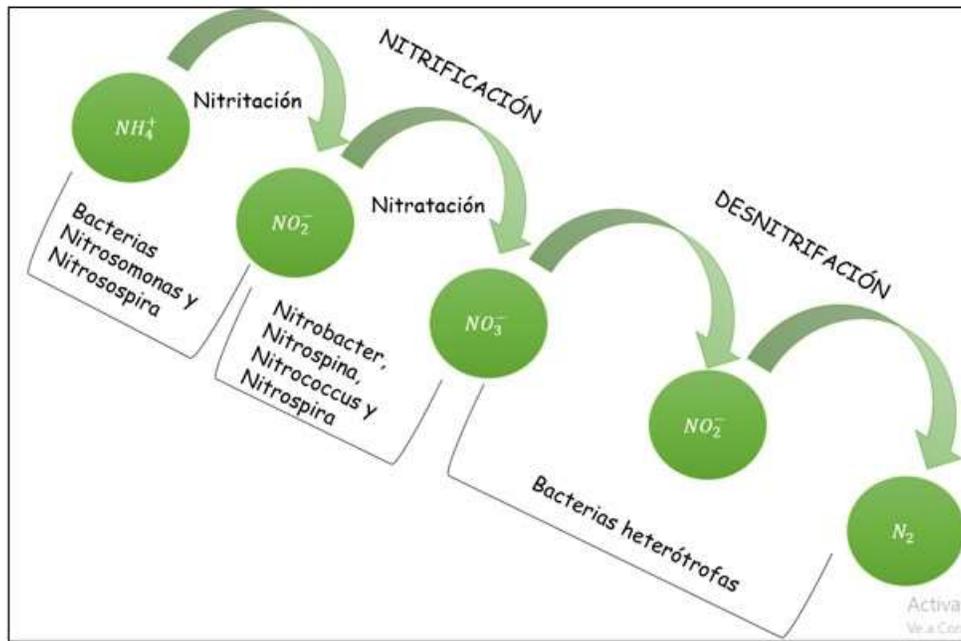
**Figura 7.** Tanque de espesador de lodos

## **5.7 Proceso de remoción de nutrientes**

La remoción de nutrientes es un proceso fundamental en el tratamiento de las aguas residuales industriales debido a que si no se realiza afecta a las fuentes hídricas provocando eutrofización y disminuyendo la calidad del agua, para que esto suceda se debe tener en cuenta la edad de los lodos, dado que este parámetro es el que determina el crecimiento de los microorganismos y por lo tanto condiciona la remoción conjunta de materia orgánica y nutrientes. Los sistemas SBR y MBR combinan condiciones aerobias, anaerobias y anóxicas que permiten remover de manera conjunta la materia orgánica, nitrógeno y fósforo.

### **5.7.1 Remoción de nitrógeno**

El nitrógeno es proveniente principalmente del uso de fertilizantes utilizados en la agricultura y la urea, para la remoción de nitrógeno en las aguas residuales se realiza tradicionalmente la nitrificación en la cual el  $NH_4^+$  (Amonio) es convertido en  $NO_2^-$  (Nitritos) por bacterias nitrificantes principalmente nitrosomonas y nitrospira, este proceso se da en condiciones aerobias y es llamado nitritación, luego ocurre la nitratación, en este proceso los  $NO_2^-$  (Nitritos) son convertidos a  $NO_3^-$  (nitratos) y es realizado por cuatro género de bacterias las cuales son las nitrobacter, nitrospina, nitrococcus y nitrospira, seguidamente se da la desnitrificación en donde se da una reducción desasimilatoria  $NO_3^-$  (nitratos) es convertido a  $NO_2^-$ , en condiciones anaerobias, por último se produce la desnitrificación heterótrofa en donde el  $NO_2^-$  es convertido a  $N_2$  (Figura 8) y de esta manera se da remoción de nitrógeno (Sánchez & Sanabria, 2009).



**Figura 8.** Proceso de Nitrificación y Desnitrificación

### 5.7.1.1 Importancia de la remoción de nitrógeno en las aguas residuales

La importancia en la remoción de nitrógeno en las aguas residuales radica en que este nutriente es fundamental para las algas por lo cual causa el fenómeno de eutrofización en las fuentes hídricas, además de que este se encuentra en forma de amoníaco libre el cual es tóxico para los peces, por último, en el proceso de transformación de amoníaco en nitrito y luego a nitrato consume oxígeno, disminuyendo el oxígeno disuelto que se encuentra en el cuerpo de agua receptor, siendo perjudicial para la vida acuática y disminuyendo la calidad del efluente (Sperling, 2007).

### 5.7.2 Remoción de fósforo

#### 5.7.2.1 Eliminación biológica de fósforo

El fósforo se encuentra presente en las aguas residuales en forma de polifosfatos y ortofosfatos, el cual proviene de los detergentes utilizados para la limpieza, es muy importante resaltar que el fósforo es un nutriente fundamental para los microorganismos que ayudan a estabilizar la materia orgánica, sin embargo, cuando es excesivo puede causar daños a las fuentes hídricas debido a que es esencial para el crecimiento de las algas provocando eutrofización en las fuentes receptoras (Sperling, 2007).

Para la remoción de fósforo es necesario un proceso anaerobio, donde están presentes las bacterias PAOs que son capaces de acumular P y las bacterias GAOs las cuales son capaces de acumular glicógeno. Las primeras absorben los ácidos grasos volátiles, acumulándolos en su interior en forma de polihidroxibuitrato (PHB) y polihidroxivalerato (PHV), seguidamente en condiciones aerobias, las bacterias Poli-P utilizan los compuestos orgánicos acumulados PHB y PVH para la generación de energía que posteriormente es utilizado para su crecimiento celular y para la acumulación de fósforo como polifosfato intracelular, luego en

condiciones anóxicas se encuentran presentes las bacterias desnitrificantes extra-asimiladoras de fósforo (DNPAOs), que remueven conjuntamente fósforo y nitrógeno (Saldarriaga et al., 2011).

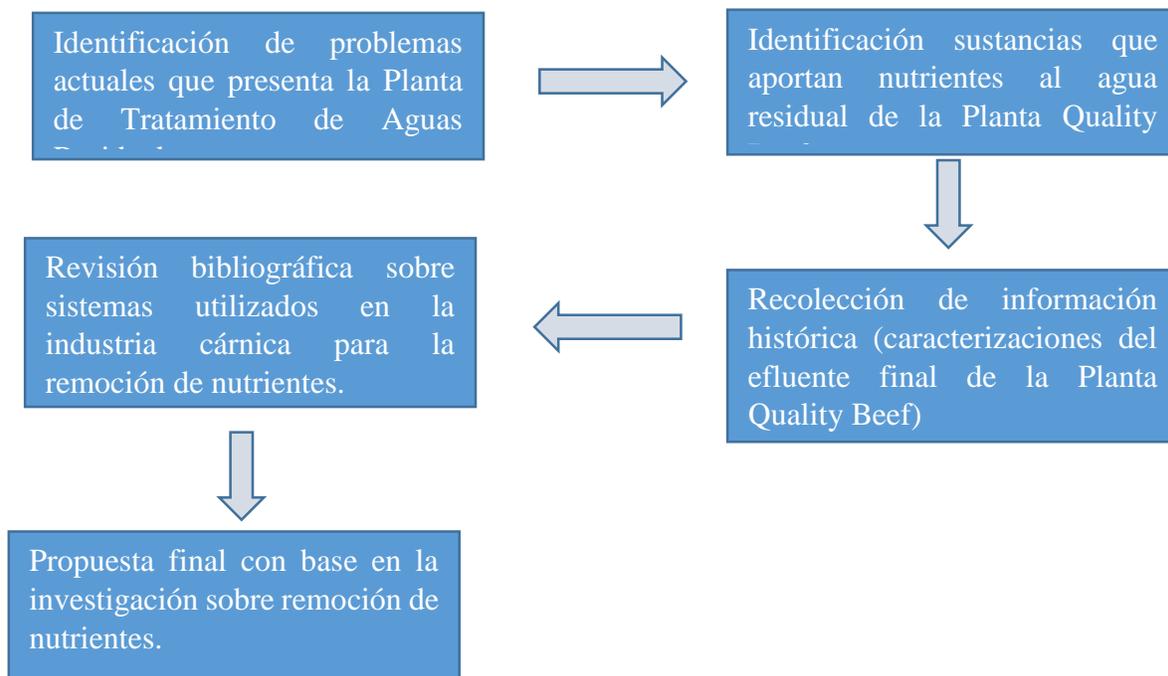
### 5.7.2.2 Eliminación química del fósforo

Para eliminar de manera química el fósforo de las aguas residuales es necesario agregar reactivos como son el Cloruro Férrico, policloruro de Aluminio, Sulfato Férrico y Sulfato de Aluminio. Estas sustancias reaccionan con el fósforo que se encuentra como ortofosfatos y al reaccionar con las cargas catiónicas genera un precipitado estable, el cual se puede remover posteriormente, cabe resaltar que el uso de estas sales aumenta el incremento de lodos residuales (Puga, 2016)

## 6 METODOLOGÍA

La metodología utilizada para el cumplimiento de los objetivos planteados se basó en realizar un diagnóstico general de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales, identificando los problemas que presenta actualmente y que afecta a la calidad del efluente, adicionalmente se realizó un inventario de las sustancias químicas utilizadas para las actividades de limpieza y desinfección que se llevan a cabo en la Planta Quality Beef identificando los detergentes que más aportan nutrientes al agua residual, posteriormente se revisaron las caracterizaciones realizadas durante 4 años con el fin de comparar la cantidad de nutrientes que aporta el efluente final de la Planta y por último se realizó una revisión bibliográfica en los cuales se investigó diferentes sistemas de remoción de Nitrógeno y Fósforo y en base a esta se presentó una propuesta para una futura implementación.

Diagrama de flujo 1. Metodología



## 7 RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 7.1 Caudal de la PTARnD

Se realizó un diagnóstico en la planta de tratamiento de aguas residuales de Quality Beef, en donde se evaluó el funcionamiento de la PTAR, por lo cual se consultaron datos históricos, en los cuales se encontró que el caudal de diseño actualmente ya fue superado, por lo cual se presentan algunos inconvenientes en el funcionamiento de la PTARnD. En la Tabla 3 se muestran el resumen de aforos realizados en la trampa de grasa de la Planta Procesadora de Productos cárnicos Quality Beef.

**Tabla 3.** Datos históricos de los caudales ARI de la trampa de grasas

<b>Datos históricos de los caudales ARI de la trampa de grasas</b>			
<b>Año</b>	<b>2015</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>
Caudal promedio (L/s)	0,17	0,35	0,47
Caudal máximo (L/s)	-	0,88	0,99

Los datos consignados en la Tabla 3, para el año 2015 fueron tomados del manual operativo de la PTARnD, ya que corresponde al caudal de diseño, para el año 2019 fueron tomados del aforo realizado por la practicante de Ingeniería Sanitaria Julieth Chaverra, asimismo se obtuvieron los datos del año 2020, dado a que la practicante de Ingeniería Sanitaria Manuela Pérez realizó nuevamente un aforo. Como se puede observar el caudal ha ido aumentando conforme pasa el tiempo, casi triplicando el caudal de diseño; por lo cual se puede determinar que la PTARnD no está funcionando bajo condiciones óptimas lo cual repercute en la calidad del efluente que es vertido al alcantarillado público.

### 7.2 Consumo de agua

Desde el año 2019 se viene llevando un reporte de los consumos de agua por día, los cuales son totalizados cada mes (Tabla 4), esto con el fin de determinar cómo es el consumo, y así implementar nuevas medidas de ahorro del agua. Cabe resaltar que en estos consumos no se hace la diferencia entre el consumo de aguas residuales domésticas y no domésticas.

**Tabla 4.** Consumo de agua de los años 2017, 2018, 2019 y 2020

MES	2017	2018	2019	2020	2021
ENERO	196	145	91	395	363
FEBRERO	145	210	116	415	474
MARZO	158	210	142	421	429
ABRIL	224	130	140	390	
MAYO	188	178	179	388	
JUNIO	357	39	215	497	
JULIO	117	0	256	413	
AGOSTO	182	1	314	468	
SEPTIEMBRE	242	149	462	354	
OCTUBRE	366	139	383	391	
NOVIEMBRE	190	140	316	394	
DICIEMBRE	184	116	421	405	
<b>TOTAL</b>	<b>2549</b>	<b>1457</b>	<b>3035</b>	<b>4931</b>	

Como se puede observar en la Tabla 4 los consumos de agua han aumentado en los años 2017, 2019 y 2020, generando problemas en la PTARnD debido al aumento del caudal. Se puede notar que el año 2018, hubo una reducción del consumo, esto se debe a que no hubo información concreta de algunos meses y tampoco se encontraron las facturas de EPM, para corroborar información, por lo cual se asume que este año no es representativo.

### 7.3 Trampa de grasas y tanque homogeneizador

Esta parte del sistema se ve afectado debido al aumento del caudal ya que la trampa de grasas no fue diseñada para recibir un caudal mayor de 0,17 L/s, por esta razón se presentan rebosamientos inundando la zona de descargue, lo cual genera que no se remuevan grasas disminuyendo la eficiencia de esta unidad. Desde el transcurso del año 2021 solo ha ocurrido un rebosamiento de esta unidad, por lo cual con ayuda de mantenimiento se inspeccionaron las bombas que se encuentran en el tanque de homogeneización y se encontraron algunas fallas en una de las bombas, por lo cual fue reemplazada por una nueva, a partir del cambio realizado no se ha vuelto a presentar ningún rebosamiento.

### 7.4 Reactor UASB

El reactor UASB se ve afectado por el aumento del caudal debido a que disminuiría la eficiencia, provoca reboses y además disminuye el tiempo de retención hidráulico, por lo cual los microorganismos no tendrán el tiempo necesario para degradar toda la materia orgánica que contiene el agua residual, lo que afecta la calidad del efluente, además de que

interrumpe en el proceso de remoción de nutrientes ya que el agua residual no permanecería el tiempo necesario para que se dé el proceso de desnitrificación y con el aumento de la velocidad ascensional se puede dar un lavado de microorganismos, debido al caudal mayor, estos pueden salir por el efluente lo que disminuiría la cantidad de microorganismos en el UASB.

## 7.5 Tanque de lodos activados

Actualmente el tanque lodos activados presenta problemas de rebose debido al aumento del caudal, adicionalmente, se presentan problemas de espuma, por lo cual se realizó una prueba de Cono Imhoff, para determinar la cantidad de lodos que hay actualmente, en esta se encontró que el tanque aerobio tiene muy poco lodo, por lo cual se descartan que existan bacterias filamentosas que estén provocando el problema de espumas. Otra razón por la que se esté generando el problema de espuma puede ser por la baja carga de lodos, esto quiere decir que hay muy poca concentración de sólidos de licor mezclado, estos deben estar en una concentración de 3000 mg/l, sin embargo, cuando la espuma aumenta ocurre un rebosamiento y por ende una pérdida de lodo, para regular este problema se debe disminuir el ingreso de aire disuelto para evitar la formación de espuma y por ende la pérdida de lodo del reactor. Cabe resaltar que el rango óptimo aire disuelto para favorecer de crecimiento de las bacterias aerobias debe estar entre  $0,8 \text{ mg } O_2/l$  y  $1,5 \text{ mg } O_2/l$ .

Otra razón por la que ocurra este problema de espumas puede ser por una alta concentración de detergentes, sin embargo, los detergentes utilizados en la Planta Quality Beef son biológicamente degradables y algunos no contienen de fosforo, por lo cual previene que la concentración de detergentes alcance un nivel alto dentro del sistema. En la Tabla 5, se muestra los detergentes utilizados Quality Beef.

Actualmente en el tanque de lodos activados no se puede generar el proceso de nitrificación debido a que el tiempo de retención del agua a tratar sería muy poco gracias a los reboses que ocurren constantemente en esta parte del sistema, adicionalmente otro factor importante para que no suceda el proceso de nitrificación es la poca cantidad de lodo que tiene el tanque aerobio, por lo cual con los problemas que actualmente tiene la PTARnD no se podría remover una cantidad considerable de nutrientes.

**Tabla 5.** Detergentes utilizados en la Planta Quality Beef.

<b>Detergentes utilizados en la Planta Quality Beef</b>			
<b>Nombre</b>	<b>Descripción general</b>	<b>Aspecto ambiental</b>	<b>Aplicación</b>
<b>BIOCORY QUAT-P</b>	Desinfectante en polvo con amonio cuaternario	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biodegradable.</li> <li>• No tiene fósforo.</li> </ul>	Desinfección de botas y superficies no porosas.

	como principio activo.		
<b>SOLUC-DES</b>	Desinfectante líquido a base de amonio cuaternario de quinta generación al 10%.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biodegradable.</li> </ul>	Utilizados en procesos de desinfección y limpieza de áreas y superficies en general.
<b>OXISAN</b>	Desinfectante líquido de alto nivel a base de ácido peracético, no genera espuma.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biodegradable.</li> </ul>	Desinfección de equipos, torres de enfriamiento y en general todas las superficies.
<b>OXI-DESPLUS</b>	Desinfectante líquido translúcido, incoloro. Este produce radicales libre hidroxilos que al actuar con los lípidos, desintegra el DNA y otros componentes fundamentales para las células microbianas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biodegradable.</li> </ul>	Desinfectante para todo tipo de superficies, equipos, utensilios y ambientes.
<b>GRASOFF ESPUMA CLORADA</b>	Líquido levemente viscoso de olor característico.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biodegradable.</li> <li>• Libre de fosfatos.</li> </ul>	Diseñado para limpieza, desengrase y desinfección de equipos industriales y de todo tipo de superficies como pisos y paredes.
<b>DESENGRASANTE EXTRA PLUS</b>	Desengrasante líquido alcalino con alta actividad de detergencia.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biodegradable.</li> <li>• Libre de fosfatos.</li> </ul>	Efectivo para la remoción de grasa de origen animal, vegetal y mineral. No ataca ni corroe las superficies y es fácil de enjuagar.
	Líquido ligeramente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fotodegradable.</li> </ul>	Es un desinfectante de medio-alto nivel,

<b>CLORTEX</b>	amarillo, de olor característico. El principio activo es el hipoclorito de sodio al 13%.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Libre de fosfatos.</li> </ul>	desodorizante y blanqueador en diferentes áreas. Es efectivo para la descontaminación sanitaria de áreas, superficies y utensilios donde se manejan los residuos peligrosos de riesgo biológico.
<b>BIODES ULTRA</b>	Líquido traslúcido de olor característico. Su principio activo son extractos de cítricos y mezcla de ácidos orgánicos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biodegradable.</li> <li>• No contiene fósforo.</li> </ul>	Inhibe o retarda el crecimiento de microorganismos.

## 7.6 Clarificador y tanque de trasiego

Estas unidades también tienen problemas debido al aumento del caudal, ya que se presenta que el tanque de trasiego se llena hasta el punto de que el agua que va del clarificador no fluye, es decir que ocurre un estancamiento, por lo cual la capacidad del clarificador es superada ocasionando que los sólidos suspendidos no sedimenten correctamente y se dirijan al tanque de trasiego, disminuyendo la calidad del efluente.

## 7.7 Filtro polyglass y tanque de contacto

El filtro ayuda a retener los sólidos suspendidos que no hayan sido removido en los anteriores procesos. Actualmente no se ha presentado ningún problema con el filtro. Cabe resaltar que se deben eliminar organismos patógenos, por lo cual se adiciona pastillas de cloro en la bomba dosificadora, así el agua pasaría al tanque de contacto y de este al alcantarillado público.

## 7.8 Biodegradabilidad del agua residual

Para determinar el tipo de tratamiento es adecuado para el agua residual a tratar, se utiliza el criterio de Biodegradabilidad, en donde se determina si es necesario realizar un tratamiento fisicoquímico, biológico o ambos (Tabla 6).

**Tabla 6.** Biodegradabilidad del agua residual

<b>Criterio de biodegradabilidad de agua residual</b>	
<b>Criterio</b>	<b>Descripción</b>
<b>DBO/DQO &lt; 0,5</b>	Baja biodegradabilidad. Tratar el agua residual con tratamiento fisicoquímico
<b>DBO/DQO &gt; 0,5</b>	Alta biodegradabilidad. Tratar el agua residual con tratamientos biológicos.
<b>DBO/DQO = 0,5</b>	Combinar ambos tratamientos. (fisicoquímico y biológico)

El agua residual que sale de la Planta Quality Beef, es tratada con procesos biológicos, sin embargo, tomando como referencia las caracterizaciones que se realizaron en el año 2019 a la entrada de la trampa de grasa se puede observar que el agua residual tiene una baja Biodegradabilidad, lo cual es inusual en este tipo de agua residual, ya que generalmente contienen alta cantidad de materia orgánica, sin embargo, puede que esto ocurra ya que en la planta no se genera el sacrificio de las canales, solo se realiza el desposte. Además, según Asad et al., 2019, el tratamiento fisicoquímico aumenta el costo del tratamiento de las aguas, por lo cual lo vuelve antieconómico y desfavorable. A continuación, se muestra los resultados de las caracterizaciones realizadas en el año 2019 (Tabla 7) y el criterio de Biodegradabilidad calculado (Tabla 8).

**Tabla 7.** Caracterización del agua residual a la entrada de la trampa de grasa; año 2019

<b>Parámetro</b>	<b>Entrada a la trampa de grasas</b>					
	<b>28-ene-19</b>	<b>27-mar-19</b>	<b>10-abr-19</b>	<b>24-abr-19</b>	<b>8-may-19</b>	<b>Promedio</b>
<b>pH</b>	6,3	6,8	6,6	7,0	7,9	6,9
<b>T (°C)</b>	22,7	25,4	23,7	25,0	24,4	24,2
<b>DQO (mg O<sub>2</sub> /L)</b>	618,0	533,2	560,4	723,6	297,5	546,5
<b>DBO (mg/L)</b>	288,0	127,9	153,4	263,0	126,4	191,7
<b>SST (mg SST/L)</b>	332,0	300,0	260,0	460,0	110,0	292,4
<b>SSED (mL/L)</b>	0,7	0,2	0,5	< 0,1	1,0	0,6
<b>Grasas y Aceites (mg/L)</b>	157,0	169,0	641,5	476,0	215,1	331,7
<b>Cloruros (mg/L)</b>	12,2	58,8	95,4	68,0	71,2	61,1

<b>Sulfatos (mg/L)</b>		71,7	36,1	101,8	38,6	62,0
<b>Alcalinidad Total (mg CaCO<sub>3</sub>/L)</b>	114,0	46,5	88,0	106,6	63,6	83,7
<b>SSV (mg/L)</b>	322,0	-33,1	249,0	407,0	303,0	249,6

**Tabla 8.** Biodegradabilidad del agua residual

<b>Biodegradabilidad del agua residual</b>		<b>Tratamiento adecuado</b>
<b>DBO5/DQO</b>	0,350804519	<b>Fisicoquímico</b>

### 7.9 Resolución 0631 de 2015

Actualmente la disposición de las aguas residuales de la Planta Procesadora de productos Cárnicos Quality Beef funciona bajo la resolución 0631 de 2015 según el artículo 9, en donde determina los parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas –ARnD a cuerpos de aguas superficiales de actividades productivas de agroindustria y ganadería– Ganadería de Bovino, bufalino, equino, ovino y/o caprino – Beneficio”. Y en el artículo 16 Vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas – ARnD al alcantarillado público (Tabla 9).

**Tabla 9.** Valores máximos permisibles según la resolución 0631 de 2015

<b>PARÁMETRO</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>ARTÍCULO 9</b>
pH	-	6 a 9
Demanda Química de oxígeno (DQO)	mg/L O <sub>2</sub>	900
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	mg/L O <sub>2</sub>	450
Sólidos suspendidos totales	mg/L	200
Sólidos sedimentables	mg/L	5
Grasas y aceites	mg/L	50
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y reporte
Ortofosfatos	mg/L	Análisis y reporte
Fósforo total	mg/L	Análisis y reporte
Nitratos	mg/L	Análisis y reporte

Nitritos	mg/L	Análisis y reporte
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	Análisis y reporte
Nitrógeno total	mg/L	Análisis y reporte
Cloruros	mg/L	500
Sulfatos	mg/L	500
Acidez total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y reporte
Alcalinidad total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y reporte
Dureza Cálctica	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y reporte
Dureza Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y reporte
Color real	m <sup>-1</sup>	Análisis y reporte

### 7.10 Comparación de las caracterizaciones realizadas en la Planta Quality Beef

Actualmente en la Planta Quality Beef se han realizado 4 caracterizaciones y según sus resultados cumple para todos los años los parámetros de DBO<sub>5</sub>, DQO, Sólidos Suspendidos Totales, Grasas y Aceites. Sin embargo, los resultados correspondientes a Nitrógeno y Fosforo Total se tienen en duda debido a sus variaciones considerables, no obstante, se debe tener en cuenta que las caracterizaciones correspondientes a los años 2017 y 2018 fueron realizadas por Hidroasesores y Acuambiente respectivamente. Los años 2019 y 2020 se realizaron con el laboratorio HidroQuímica, aunque el resultado del fosforo total disminuyó considerablemente en el año 2020, sin embargo, se debe tener en cuenta que todos los productos de limpieza fueron reemplazados por productos biodegradables y algunos son libres de fosfatos.

En la actualidad la norma colombiana no tiene un límite máximo para los nutrientes nitrógeno y fosforo, sin embargo, según Romero (2005), en los cuerpos de agua la concentración máxima para Nitratos debe ser de 30 mg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/L, lo cual no cumple para los años 2017 pero sí para los años 2019 y 2020 (Tabla 10).

**Tabla 10.** Comparación de caracterizaciones realizadas en la Planta Quality Beef

Parámetros	Unidades	2017	2018	2019	2020
<b>DBO<sub>5</sub></b>	mg/L	156	295	155	<b>185</b>
<b>DQO</b>	mg O <sub>2</sub> /L	352	543	386	<b>439</b>
<b>Sólidos Suspendidos Totales</b>	mg SST/L	42,2	104	26,4	<b>43,6</b>
<b>Grasas y aceites</b>	mg/L	37,6	38	22,3	<b>43,2</b>
<b>Fósforo Total</b>	mg/L P	-	53,8	45,31	<b>3,87</b>

<b>Ortofosfatos</b>	mg P-PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> /L	6,50	-	-	<b>3,65</b>
<b>Nitrógeno Total</b>	mg N/L	-	550	57	<b>36,147</b>
<b>Nitritos</b>	mg N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> /L	0,021	-	<0,01	<b>0,047</b>
<b>Nitratos</b>	mg N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /L	33,1	-	19,6	<b>12,90</b>

### 7.11 Remoción de nutrientes

Durante las últimas décadas, la industria cárnica ha aumentado considerablemente, por lo cual las aguas residuales provenientes de esta son una gran fuente de contaminación debido a la cantidad considerable que se utiliza para el procesamiento de la carne, según Bustillo & Mehrvar (2015), la industria de procesamiento de carne utiliza el 24% del total de agua dulce consumida por la industria de alimentos y bebidas y un 29% del total consumido del sector agrícola, lo cual es una cantidad de agua considerable que debe ser tratada antes de ser vertida a un fuente hídrica natural.

Las aguas residuales de la industria cárnica son caracterizadas por tener una gran carga de materia orgánica, sólidos en suspensión, grasas y aceites y nutrientes (Aziz et al., 2019), sin embargo se han implementado muchos procesos para la depuración de estas aguas residuales, las cuales han sido muy efectivos, ya que se han utilizado procesos biológicos, fisicoquímicos e incluso la combinación de ambos, no obstante aún falta investigación sobre la remoción de nutrientes en este tipo de aguas ya que el tratamiento se basa sobre todo en remoción de DBO<sub>5</sub>, DQO y Sólidos Suspendidos Totales, dejando a un lado la remoción y recuperación de nutrientes, siendo estos un agente contaminante importante para las fuentes hídricas. En la Tabla 11, se muestra las características de las aguas residuales provenientes de la industria cárnica, de 2 diferentes autores.

**Tabla 11.** Caracterización de aguas residuales provenientes de mataderos.

<b>Símbolos, Unidades</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Rango Autor 1 (Mehrvar, 2015)</b>	<b>Rango Autor 2 (Asad Aziz, 2019)</b>	<b>Autor 1 (Mehrvar, 2015)</b>
<i>COT(mg/L)</i>	Carbono orgánico total	70-1200	-	72,5-1718
<i>DBO<sub>5</sub> (<math>\frac{mg}{L}</math>)</i>	Demanda biológica de oxígeno	150-4635	600-3900	200-8231
<i>DQO (mg/L)</i>	Demanda química oxígeno	500-15900	1100-15000	527-15256

$SST \left(\frac{mg}{L}\right)$	Sólidos suspendidos totales	270-6400	220-6400	0.39-99.38
$TN \left(\frac{mg}{l}\right)$	Nitrógeno total	50-841	50-840	60-339
$TP \left(\frac{mg}{l}\right)$	Fósforo total	25-200	15-200	25,7-75,9
$Ortho PO_4$	Ortofosfato	20-100	8-120	30,1-77,3

Las descargas de este tipo de agua pueden generar desoxigenación de las fuentes hídricas y contaminación de aguas subterráneas (Bustillo & Mehrvar., 2015), por lo cual debe haber unos niveles estándar de concentración para las descargas a los cuerpos de agua, en la Tabla 12, se muestran los valores máximos permisibles recomendados por distintas agencias mundiales.

**Tabla 12.** Valores máximos permisibles

Parámetro	Estándar del banco mundial (Mehrvar, 2015)	EU estándar (Unión Europea) (Asad Aziz, 2019)	US estandar (Mehrvar, 2015)	Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (Maldonado, 2019)
DBO (mg/L)	30	25	26	
DQO (mg/L)	125	125	N/A	
SST (mg/L)	50	35-60	30	
NT (mg/L)	10	10-15	8	
TP (mg/L)	-	1-2	-	0,1
Nitratos (mg/L)				1
Nitritos (mg/L)				0,5

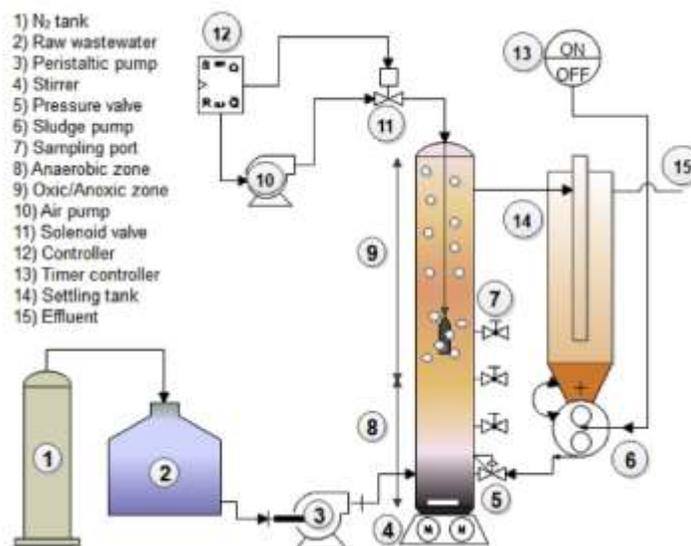
### 7.11.1 Tecnologías utilizadas para la remoción de Nutrientes

#### 7.11.1.1 Biorreactores $A_2O$ de flujo ascendente de alta velocidad

Existen diferentes alternativas para la eliminación de nutrientes de las aguas residuales industriales, una de ellas se encuentra los biorreactores  $A_2O$  de flujo ascendente de alta velocidad.

Este tipo de reactores están caracterizados por poseer 3 zonas, la primera es la anaeróbica la cual se encuentra en la parte inferior del reactor, esta debe tener un mezclador para asegurar el que el contenido de licor mezclado se combine en toda esta zona, en esta etapa se encuentran dos grupos de bacterias, el primero es capaz de acumular fósforo (PAO,

*phosphotus accumulating organism*) y el otro es capaz de acumular glicógeno (GAO, *glycogen accumulating organism*), el primer grupo toma la materia orgánica que se biodegrada fácilmente en forma de ácidos grasos volátiles (AGV) y acumula en su interior como material de reserva (polihidroxibutirato PHB y polihidroxivalerato PHV) (Saldarriaga et al., 2011). En la parte anóxica se debe garantizar que el oxígeno disuelto sea inferior a 0,1 mg/L, por esta razón se airea de manera intermitente, en esta zona los oxidantes de amoníaco utilizan nitrato como aceptor de electrones para producir nitrógeno gaseoso. Por último, en la zona aerobia se debe procurar que el oxígeno disuelto sea mínimo 2 mg/L para garantizar el crecimiento microbiano, además en esta etapa las bacterias toman el PHB y el PHV para generar energía que es utilizada para el crecimiento y acumulación de fósforo en forma de polifosfato intracelular, y a su vez ocurre el proceso de nitrificación, en donde el amonio es convertido en nitritos y nitratos (Saldarriaga & González, 2008). En la figura 9, se muestra un esquema del biorreactor  $A_2O$  de flujo ascendente de alta velocidad.



**Figura 9.** Esquema del Biorreactor  $A_2O$  de flujo ascendente (Hajar Abyar, 2018)

Es importante resaltar que la Planta Quality Beef, posee un sistema biológico que combina condiciones anaerobias y aerobias, similar al descrito anteriormente, exceptuando el tanque anóxico, sin embargo, este se podría adecuar para que el tanque de lodos activados funcione como un tanque anóxico y aerobio al tiempo, esto se puede lograr aireando de manera intermitente, como se ha venido haciendo, no obstante los tiempos de aireación actuales están configurados para que el tanque de lodos activados tenga suficiente oxígeno disuelto para el crecimiento microbiano. Una manera para que esta unidad funcione de manera anóxica es controlando los tiempos de aireación, en donde 40 minutos se airee y 20 minutos el difusor

este apagado, cabe resaltar que solo se encontraran los tiempos óptimos cuando el oxígeno disuelto en el tanque en el momento en que el difusor este apagado sea alrededor de 0,1 mg/L.

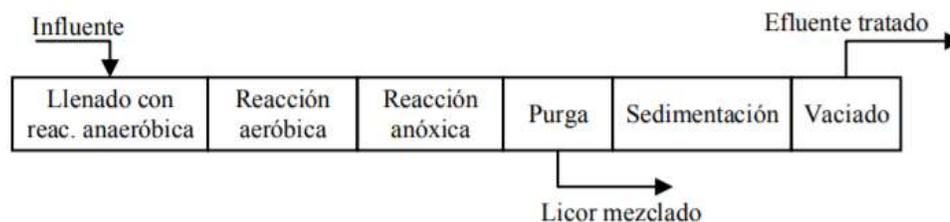
En el estudio realizado por Abyar et al. (2018), se encontró que para obtener una remoción de DQO, nitrógeno Kjeldahl (TKN), nitrógeno total (TN) y fósforo total (TP), del 96,43%, 96,57%, 93,71%, 71,68 % respectivamente, las condiciones óptimas son que el TRH= 8 h, la relación DQO/NT= 100:14 y que la fracción de volumen aireado sea del 65%. Además, para la remoción de fósforo se encontró que existe una relación entre DQO/TN, ya que el nitrato actúa como aceptor de electrones para la absorción de fósforo.

### 7.11.1.2 SBR

Una opción para la eliminación conjunta de nitrógeno y fósforo son los reactores discontinuos secuenciales SBR, los cuales son descritos como un sistema de lodos activados en donde están presentes los sistemas de mezcla, reacción y sedimentación, sin embargo, el funcionamiento del reactor SBR se basa en la secuencia de llenado y vaciado en un mismo tanque (Muñoz & Ramos, 2014)

Los reactores SBR tienen las siguientes etapas (Figura 10):

- **Etapa de llenado:** En esta etapa el SBR es llenado con el agua residual a tratar y puede ser estática, mezclada o aireada. Cuando el llenado es estático se puede presentar desnitrificación con la presencia de nitratos y generar las condiciones óptimas para la remoción del fósforo.
- **Etapa de reacción:** En esta etapa se realiza la mezcla del agua residual y se puede dar en condiciones aerobias, anóxicas o anaerobias (Cárdenas et al., 2006).
- **Etapa de sedimentación:** En esta etapa se da la separación sólida-liquida, lo que da como resultado a un sobrenadante clarificado que es posteriormente descargado como efluente.
- **Etapa de vaciado:** El sobrenadante es descargado como efluente del reactor SBR, en esta etapa se debe tener cuidado en que el lodo no salga por el efluente.



**Figura 10.** Secuencias de etapas de un SBR para la remoción de nutrientes. (Santa Cruz et al., s.f.)

Para poder remover los nutrientes el reactor SBR se puede configurar para que se den procesos aerobios, anaerobios y anóxicos, dado que el nitrógeno es eliminado como nitrógeno gaseoso gracias a los microorganismos autótrofos en condiciones aerobias bajo el proceso de nitrificación, y para que se dé el proceso de la desnitrificación es necesario microorganismos heterótrofos y condiciones anaerobias. Asimismo, el fósforo se libera en

condiciones anaerobias y se asimila por los microorganismos en condiciones aerobias (Muñoz & Ramos, 2014).

En un estudio realizado por Carrasquero et al. (2015), se determinó los parámetros y los valores óptimos para el tratamiento de aguas residuales provenientes de mataderos, cabe resaltar que en la Planta Quality Beef, las características no son propias de un matadero de reses, sin embargo, se podría tomar como un punto de referencia para el tratamiento de estas aguas. En el primer estudio se trabajó con un tiempo de tención celular de 25 días y un tiempo retención hidráulico de 11 horas, además las duraciones de las fases fueron: para la fase anaerobia, 1,5 hora, fase aerobia 10 h, y fase anóxica 2,5 h; por último, las fases de llenado, sedimentación y descarga fueron de 0,25 h, 0,5 h y 0.25 h respectivamente. En este primer experimento se obtuvieron eficiencias de remoción de 85 % y 44,1% de nitrógeno total (NT) y fósforo total (TP) respectivamente.

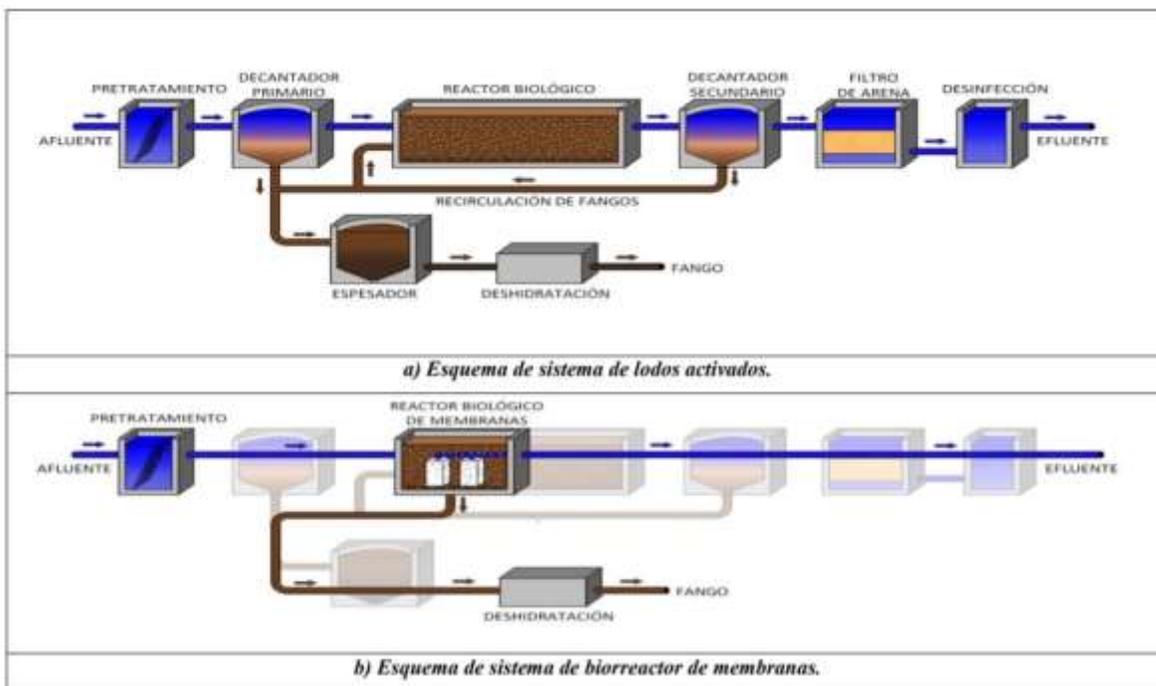
Cabe resaltar que existen dos parámetros importantes que afectan la eficiencia en la remoción de nutrientes, una de ellos es el TRH debido a que, a mayor tiempo, aumenta la eficiencia de nitrificación y desnitrificación por lo cual aumenta la eficiencia en la remoción de nutrientes. El otro es la relación entre la demanda de oxígeno y nitrógeno, debido a altas concentraciones de C/N, el proceso de nitrificación se inhibe.

#### **7.11.1.3 MBR**

El biorreactor de membrana combina el tratamiento de biodegradación por lodos activados y la separación por membrana en un solo proceso, los sólidos en suspensión y microorganismos responsables de biodegradación son separados del agua tratada por medio de una membrana. (Navajas, 2015)

Las ventajas de este sistema es que los reactores MBR son más compactos por lo cual necesita menor requerimiento de espacio, también permite el reúso del agua, debido a que la membrana retiene los sólidos en suspensión y sustancias coloidales, independientemente de la sedimentabilidad del lodo, además no es necesario un decantador secundario, (Rodríguez, 2020) la retención de los lodos activados permite que la concentración sólidos de licor mezclado sea alta igualmente que la retención de sólidos, lo que permite el desarrollo de los microorganismos de crecimiento lento (bacterias nitrificantes) lo que da como resultado la nitrificación total, pasando de amoníaco a nitrito y luego a nitrato (Le-Clech, 2010). El reactor MBR también se puede programar para crear condiciones anóxicas con el uso de aireación intermitente, este tanque se debe encontrar antes de la zona aeróbica, con esto se garantiza la disponibilidad de material carbonoso para las bacterias heterótrofas desnitrificantes, además se puede incorporar alumbre para garantizar la coagulación química y así remover el fosforo, cabe resaltar que se podría crear una zona anaeróbica para la eliminación biológica del fósforo (Le-Clech, 2010). Caber resaltar que para la remoción de nutrientes se tienen que dar procesos de nitrificación en donde el amoníaco se transforma en nitrito o nitrato con ayuda de las bacterias oxidantes de amoníaco (AOB) y las bacterias oxidantes de nitrito (NOB), luego se da el proceso de desnitrificación, en el que se utilizan los compuestos orgánicos como donantes de electrones (Zinatizadeh & Ghaytooli 2015). A

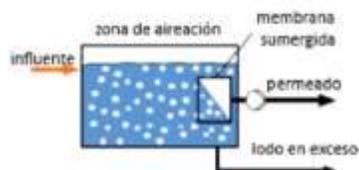
continuación, se muestra en esquema en donde se compara un sistema de lodos activados y un reactor MBR (Figura 11).



**Figura 11.** Diferencia entre un sistema convencional de lodos activados y un MBR. (Vásquez , 2015)

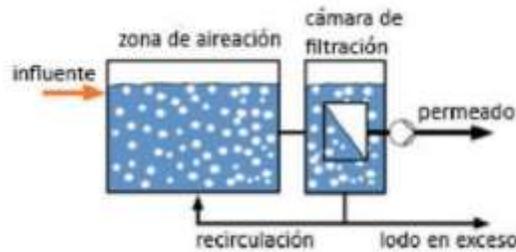
#### 7.11.1.3.1 Tipos de Biorreactores de Membrana (MBR)

- **MBR con membrana integrada o sumergida:** La membrana se encuentra sumergida en el tanque biológico, generalmente se coloca el difusor de aire debajo del módulo de la membrana con el fin de mezclar y evitar la formación de biopelículas (Figura 12), cabe resaltar que el agua a presión atraviesa la membrana obteniendo un efluente de mayor calidad (Puga, 2016).



**Figura 12.** MBR con membrana sumergida (Puga, 2016)

- **MBR con membrana externa:** El lodo es recirculado desde el biorreactor hasta donde la unidad donde se encuentra la membrana por medio de una bomba generando una presión que ayuda a la limpieza de esta (Figura 13) (Bohórquez & Sarmiento, 2017)



**Figura 12.** MBR con membrana externa (Puga, 2016)

Existen diferentes tipos de proceso de membrana, las cuales son:

- **Microfiltración:** Tienen un tamaño de poro de 100-1000 nm, y es capaz de eliminar sólidos suspendidos, partículas finas, bacterias, virus, macromoléculas y partículas coloidales.
- **Ultrafiltración:** Tienen un tamaño del poro de 10-100 nm, es capaz de retener macromoléculas, virus, bacterias y coloides.
- **Nanofiltración:** Tienen un tamaño del poro de 1-10 nm, este tipo de membrana es capaz de retener iones polivalentes (calcio y magnesio), también elimina quistes, bacterias, virus, materia orgánica, sales, patógenos, pesticidas y turbidez.

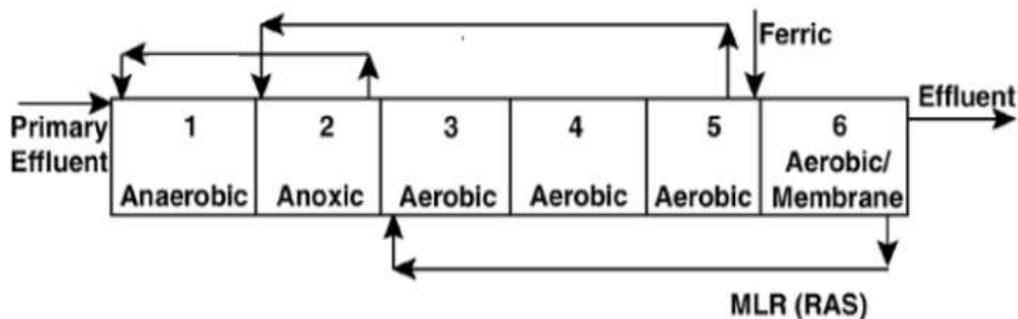
#### 7.11.1.3.2 Eliminación de nutrientes en los reactores MBR

Como se ha explicado anteriormente, los nutrientes como el nitrógeno y fósforo se pueden eliminar de las aguas residuales por medio de procesos biológicos de nitrificación y desnitrificación, sin embargo, el fósforo también se puede eliminar adicionando sales de hierro como el cloruro férrico, lo que provoca que este se convierta en un compuesto estable en forma sólida (Puga, 2016). En el proceso de eliminación de nitrógeno es necesario que ocurra la nitrificación, sin embargo, esta parte es crítica debido a la baja tasa de crecimiento de bacterias autótrofas nitrificantes, ya que son extremadamente sensibles frente a cambios del sistema y a sustancias inhibitoras que limitan su crecimiento y su actividad. Por ejemplo, la temperatura es un factor principal, esta debe estar entre los 8 a 30°C (Puga, 2016)., cabe resaltar que en Medellín las temperaturas se encuentran entre 24 a 25°C, por lo cual no se presentarían problemas con respecto a este punto (Tabla 13).

**Tabla 13.** Temperatura requerida para la nitrificación

Temperatura	Efecto sobre la nitrificación
>45°C	La nitrificación se detiene
28-32°C	Rango de temperatura óptimo
16°C	Aproximadamente el 50% de la velocidad óptima
10°C	Reducción significativa de la velocidad de nitrificación
<5°C	La nitrificación se detiene

Otro factor importante es la cantidad de oxígeno disuelto que se encuentra presente en el agua residual, este debe estar entre 2 a 3 mg/L y por último se encuentra el pH, ya que este debe estar entre 7,2 a 8,5 para mantener la velocidad de las bacterias autótrofas. Para la eliminación del fósforo de manera biológica es necesario la alternancia de condiciones anaerobias y aerobias. En el reactor MBR se puede hacer combinaciones de varias maneras para la eliminación de nutrientes de manera biológica, como ya se explicó anteriormente para la remoción de nitrógeno y fósforo es necesario combinar etapas aerobias, anoxicas y anaerobias, por ejemplo, para la eliminación de nitrógeno se recomienda trabajar con concentraciones de sólidos suspendidos totales de licor mezclados de 8-12 mg/L (Puga, 2016), una edad lodo de 23 días, una concentración de oxígeno para el caso anóxico de 0,2 a 0,3 mg/L y en los tanques aerobios de 0,7 a 1,5 mg/L (Bohórquez & Sarmiento, 2017) y un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 5 a 7 horas (Zinatizadeh & Ghaytooli, 2015). A continuación, se muestra la combinación de un reactor MBR para la eliminación simultánea de nitrógeno y fósforo (Figura 13).



**Figura 13.** Combinación de un reactor MBR para la remoción de nitrógeno y fósforo (Rodríguez, 2020)

## 8 PROPUESTA PARA LA ELIMINACIÓN DE NUTRIENTES EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

La PTARnD de la Planta Procesadora de Productos Cárnicos de Inversiones Euro presenta problemas de funcionamiento dado a que el caudal que actualmente trata ya superó el caudal de diseño por lo cual no es posible realizar una adecuada remoción de nutrientes (Nitrógeno

y Fósforo) con los sistemas actuales, debido a esto una alternativa que es utilizada para la remoción de nutrientes en Plantas Procesadoras de Productos Cárnicos son los reactores discontinuos secuenciales SBR, además se han realizado estudios donde se ha comprobado que este sistema es capaz de eliminar la DBO<sub>5</sub> y DQO en un 82% y 95% (Kundu et al., 2016) respectivamente, lo cual es sumamente importante ya que actualmente la norma colombiana exige valores máximos permisibles para los vertimientos en alcantarillado público para estos parámetros, otra ventaja que se tiene con este sistema es la poca capacidad de espacio que se requiere debido a que el funcionamiento básico del SBR implica una etapas de llenado, sedimentación y extracción en un solo reactor, así que este funciona en modo discontinuo cambiando la condición de operación de aeróbica, anaeróbica y anóxica en el mismo tanque por lo cual el requerimiento de espacio es mucho menor lo cual es ideal para la Planta Procesadora de Productos Cárnicos de Inversiones Euro S.A.

### **8.1 Adaptación de la biomasa**

Para que el sistema SBR funcione adecuadamente es necesario proporcionarle una biomasa adaptada a las características del efluente industrial por lo cual se podría adquirir de empresas como Colanta debido a que también comercializan carne y es probable que el lodo utilizado en la PTARnD se adecue fácilmente al reactor SBR, según Carrasquero et al., 2017 es conveniente inocular el reactor con 30% de biomasa y 70% del agua residual a tratar, posteriormente es necesario someterlo a un proceso de aireación continua con un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 24 horas y un tiempo de retención celular (TRC) de 25 días, luego se establece un tiempo de sedimentación se 0,5 h y posteriormente se descarga el efluente clarificado, se sugiere que la adaptación de la biomasa y la estabilización del reactor se realice hasta que la remoción de la DQO sea superior al 80%.

Es importante aclarar que una de los principales parámetros que se deben monitorear es el tiempo de retención celular (TRC), en un estudio realizado por Kundu et al., 2016 se determinó que el TRC óptimo se encuentra entre 20 a 25 días, así mismo lo determinó Carrasquero et al., 2015 en donde encontró que el TRC ideal es de 25 días.

### **8.2 pH óptimo**

Otro parámetro a controlar es el pH dado que la biomasa que se encuentra en el reactor vive en condiciones específicas, según Kundu et al., 2016 el pH óptimo se encuentra entre 6,8 a 8 unidades, sin embargo, Carrasquero et al., 2017 encontró que este parámetro se encuentra entre el rango de 6,5 a 8,5 unidades, por lo cual estos valores favorecen el crecimiento de los microorganismos específicos que intervienen en los procesos de degradación y estabilización de la materia orgánica.

### **8.3 Temperatura**

La temperatura es un factor muy importante a controlar ya que si no se encuentra en el rango óptimo puede causar un efecto negativo sobre la remoción de nutrientes en un

estudio realizado por Jia et al., 2012 demostró que la eficiencia en la remoción de DQO aumenta con la temperatura, en este estudio se encontró que para temperaturas de 10°C, 20°C y 30°C la eliminación de DQO fue aproximadamente de 78%, 92 % y 96% respectivamente, asimismo se encontró que para la eliminación de Amoníaco el porcentaje de remoción fue de 67%, 83% y 92% en los mismos rangos de temperatura, igualmente los valores de remoción de  $PO_4^{3-}P$  fueron de 63%, 86% y 91% para los mismos valores de temperatura.

En conclusión, las eficiencias de remoción aumentan conforme aumenta la temperatura y su valor óptimo es de 30°C, cabe resaltar que en un estudio realizado por Puga, 2016 determinó que los rangos óptimos deben estar entre 8 a 30°C, sin embargo, en Medellín las temperaturas se encuentran entre 24 a 25°C, las cuales se encuentran en los rangos ideales por lo cual no se presentarían problemas con respecto a este parámetro.

#### **8.4 Tiempos de operación y secuencias anóxica-anaeróbica/aeróbica/anóxica**

Para que ocurra una adecuada remoción de nitrógeno y fósforo es necesario que se den diferentes condiciones en el sistema, por lo cual es el reactor SBR es adecuado ya que en un mismo tanque se puede llevar a cabo estas combinaciones, según Carrasquero et al., 2015 las condiciones adecuadas son primeramente una fase anaeróbica en donde no se debe proporcionar ni aire ni agitación, en esta fase los microorganismos se encargan de oxidar tanto la materia orgánica presente en el agua, asimismo una parte del nitrógeno es removido por asimilación bacteriana y la otra es convertida a través de la descomposición bacteriana e hidrólisis en nitrógeno amoniacal, igualmente para la remoción del fósforo las bacterias PAOs que son capaces de acumular P y las bacterias GAOs las cuales son capaces de acumular glicógeno. Las primeras absorben los ácidos grasos volátiles, acumulándolos en su interior en forma de polihidroxibutirato (PHB) y polihidroxivalerato (PHV) (Saldarriaga et al., 2011). Seguidamente se da una fase aeróbica en donde se debe garantizar una concentración mínima de 2 mg/L de oxígeno disuelto (Carrasquero et al., 2017), en esta parte ocurre el proceso de nitrificación en donde el  $NH_4^+$  (Amonio) es convertido en  $NO_2^-$  (Nitritos) y luego estos son convertidos a  $NO_3^-$  (nitratos) (Sánchez & Sanabria, 2009), igualmente en estas mismas condiciones, las bacterias Poli-P utilizan los compuestos orgánicos acumulados PHB y PVH para la generación de energía que posteriormente es utilizado para su crecimiento celular y para la acumulación de fósforo como polifosfato intracelular, por último en condiciones anóxicas se encuentran presentes las bacterias desnitrificantes extra-asimiladoras de fósforo (DNPAOs), que remueven conjuntamente fósforo y nitrógeno. En esta etapa la concentración de oxígeno disuelto debe estar alrededor de 0,1 mg/L (Saldarriaga & González, 2008).

El Tiempo de Retención hidráulico es otro factor influyente a la hora de remoción de nutrientes, según estudios realizados por Carrasquero et al., 2017 se encontró que el TRH óptimo es de 10 a 12 horas ya que se observó que la eficiencia de remoción de nitrógeno amoniacal aumenta a medida que el TRH es mayor, además se encontró que la relación C/N óptima es de 10:1 a 12:1 (Carrasquero et al., 2015). Por último, se propone los siguientes

tiempos de operación para el reactor SBR: para la fase anaerobia, 1,5 hora, fase aerobia 10 h, y fase anóxica 2,5 h; por último, las fases de llenado, sedimentación y descarga son de 0,25 h, 0,5 h y 0.25 h respectivamente.

**Tabla 14.** Valores óptimos de parámetros de diseño de SBR

<b>Parámetro de Diseño</b>	<b>Valor óptimo</b>	<b>Observaciones</b>
Porcentaje de Biomasa	30% de Biomasa para inocular	La biomasa adaptada a las características del efluente industrial.
pH	6,5 a 8,5 Unidades	-
Temperatura	20°C a 30°C	-
Tiempo de Retención Celular (TRC)	25 días	-
Tiempo de Retención Hidráulico (TRH)	10 a 12 horas	-
C/N	10:1 a 12:1	-
Tiempo para la fase de llenado	0,25 horas	-
Tiempo para la fase de sedimentación	0,5 horas	-
Tiempo para la fase de descarga	0,25 horas	-
Tiempo para la fase Anaerobia	1,5 horas	-
Tiempo para la fase Aerobia	10 horas	-
Tiempo para la fase Anóxica	2,5 horas	-
Oxígeno disuelto en fase Aerobia	> 2 mg/L	-
Oxígeno disuelto en fase Anóxica	< 0,1 mg/L	-

## 9 CONCLUSIONES

- El reactor SBR es una alternativa viable para la remoción de nutrientes, DBO y DQO, debido a que según estudios se ha demostrado que es muy eficiente en la remoción de materia orgánica y nutrientes, además de adaptarse fácilmente a distintas condiciones de operación y necesitar poco espacio lo cual es ideal para la Planta Procesadora de Productos cárnicos Quality Beef ya que este es un factor limitante en esta.
- El Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) es uno de los parámetros que más afecta a la remoción de nutrientes ya que se notó que tiene una relación proporcional con esta, es decir que a mayor Tiempo de Retención Hidráulico mayor es la eficiencia de remoción de nutrientes.
- Actualmente los tratamientos Biológicos son una muy buena alternativa para la remoción de nutrientes debido a que son más económicos que los tratamientos Físico Químicos.
- La norma colombiana actualmente no establece cuales son los valores máximos permisibles para el vertimiento de nutrientes en las aguas residuales, sin embargo, es importante buscar alternativas como empresa para la remoción de estos debido a que los nutrientes provocan eutrofización la cual causa impactos ecológicos a los efluentes naturales y además condiciona su utilización.

## 10 BIBLIOGRAFÍA

- AAL Zinatizadeh & \*, E. G. (2015). Simultaneous nitrogen and carbon removal from wastewater at different operating conditions in a moving bed biofilm reactor (MBBR): Process modeling and optimization. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 14.
- Asad Aziz, F. B. (2019). Tecnologías de tratamiento biológico de aguas residuales (anaeróbico-aeróbico) para la descarga segura de mataderos y carnes tratadas. *Ciencia del Medio Ambiente Total*, 28.
- Bohórquez Rincón, C. G., & Sarmiento Higuera, D. A. (2017). *Análisis del uso de biorreactores de membrana para tratamiento de aguas residuales y posible implementación en Colombia*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
- Cárdenas, C., Perruolo, T., Tarre, Y., Flores, K., Trujillo, A., Saules, L., . . . Yabroudi, S. (2006). Remoción de nutrientes en un reactor discontinuo secuencial. *Interciencia*, 7.
- Carrasquero Ferrer, S., Marquina Gelvez, D., Soto López, J., Viloría Rincón, S., Pire Sierra, M., & Díaz Montiel, A. (2015). Remoción de nutrientes en aguas residuales de un matadero de reses usando un reactor biológico secuencial. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 18.
- Carrasquero Ferrer, S., Rodríguez Ortiz, M., Bernal Vergara, J., & Díaz Montiel, A. (2017). Eficiencia de un Reactor Biológico Secuencial en el tratamiento de efluentes de una Planta Procesadora de Productos cárnicos . *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 11.
- Collazos, C. J. (2008). *Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas e industriales*. Universidad Nacional de Colombia.
- Eduardoño, S. A. (2015). *Manual de Usuario, Operación y Mantenimiento de la Planta de Tratamiento de Agua Residual*. Medellín.
- Hajar Abyar, H. Y. (2018). Eliminación biológica de CNP de las aguas residuales del procesamiento de carne en un innovador biorreactor A2O de flujo ascendente de alta velocidad. *Chemosphere*, 8.
- Hidroasesores, I. q. (2018). *Informe de resultados de monitoreo N° 750*. Medellín.
- Jia, Y., Gao, C., Zhang, L., & Jiang, G. (2012). Effects of Pre-fermentation and Influent Temperature on the Removal Efficiency of COD, NH<sub>3</sub>-N and PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P in Slaughterhouse Wastewater by Using SBR. *Energy Procedia*, 8.
- Julio César Saldarriaga, D. Á. (2011). Evaluación de procesos biológicos unitarios en la remoción simultánea de nutrientes para minimizar la eutrofización. *Escuela de Ingeniería de Antioquia*, 12.
- Kundu, P., Debsarkar, A., & Mukherjee, S. (2016). Anoxic-oxic treatment of abattoir wastewater for simultaneous removal of carbon, nitrogen and phosphorous in a sequential batch reactor (SBR). *Materials Today: Proceedings*, 14.

- Le-Clech, P. (2010). *Membrane bioreactors and their uses in wastewater treatments*. Springer, 8.
- Maldonado, V. V. (2019). *Contenido de fósforo, nitritos y nitratos en un tramo de la cuenca del río Bogotá; aporte investigativo al proyecto sobre la autodepuración de las corrientes superficiales*. Bogotá.
- Mehrvar, C. F. (2015). Características, tratamiento y gestión de las aguas residuales de los mataderos en la industria de procesamiento de carne: una revisión de las tendencias y los avances. *Revista de Gestión Ambiental*, 16.
- Muñoz Cruz, A. (2008). *Caracterización y Tratamiento de Aguas Residuales*.
- Muñoz Paredes, J. F., & Ramos Ramos, M. (2014). Reactores discontinuos secuenciales: una tecnología versátil en el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e ingeniería Neogranadina*, 18.
- Navajas, R. L. (2015). *Diseño de un sistema de tratamiento de aguas en una industria cárnica*. Madrid.
- Obaya, Y. L. (2006). La digestión anaerobia y los reactores UASB. Generalidades. *Redalyc.org*, 10.
- Puga Usucachi, E. V. (2016). *Evaluación técnica-económica de alternativas para la eliminación de nutrientes fósforo y nitrógeno, de la estación depuradora de aguas residuales (EDAR) Camp de Turia II-Comunidad valenciana*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Rodríguez Loaiza, D. (2020). *Reactores biológicos de membrana (MBR)*. Medellín.
- Rojas, R. (2002). Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales. *Gestión Integral de Tratamiento de Aguas Residuales*, (pág. 19).
- Saldarriaga, J., & González, M. (2008). Remoción biológica de materia orgánica, nitrógeno y fósforo en un sistema tipo Anaerobio-Anóxico-Aerobio. *Escuela de Ingeniería de Antioquia*, 9.
- Sanchez, J., & Sanabria, J. (2009). Metabolismos microbianos involucrados en procesos avanzados para la remoción de Nitrógeno, una revisión prospectiva. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 12.
- Santa Cruz, J., Mores, P., Scenna, N., Mussati, S., Gernaey, K., & Mussati, M. (s.f.). *Estudio comparativo de sistemas SBR para la eliminación de C, N y P. Convencional versus nitrificación externa*.
- Sperling, M. v. (2007). *Biological Wastewater Treatment Series*. London: IWA Publishing,.
- Vásquez, E. (2015). *Estudio de biorreactor de membrana para el tratamiento de aguas residuales urbanas*. Universidad de Alicante.

Zinatizadeh, A., & Ghaytooli, E. (2015). simultaneous nitrogen and carbon removal from wastewater at different operating conditions in a moving bed biofilm reactor (MBBR): Process modeling and optimization. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 14.