



**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO**

**Colegio de Ciencias e Ingeniería**

**ESTUDIO SOBRE LA RECIRCULACIÓN DE AGUA DE PRODUCCIÓN  
UTILIZADA PARA LA EXTRACCIÓN DEL ACEITE CRUDO DE  
PALMA**

**Estefanía Elizabeth Narváez Guerrero**

**Ródney Peñafiel, Dr. Ing., Director de Tesis**

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título de Ingeniera Ambiental

Quito, abril de 2015

**Universidad San Francisco de Quito**

**Colegio Ciencias e Ingeniería**

**HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS**

**Estudio sobre la recirculación de agua de producción utilizada para la  
extracción del aceite crudo de palma**

Estefanía Elizabeth Narváez Guerrero

Ródney Peñafiel, Dr. Ing.

Director de Tesis

Miembro del Comité de Tesis

\_\_\_\_\_

Valeria Ochoa Herrera, Ph.D.

Miembro del Comité de Tesis

\_\_\_\_\_

Isabel Meza, M.Sc.

Miembro del Comité de Tesis

\_\_\_\_\_

Ximena Córdova, Ph.D.

Decana de la Escuela de Ingeniería

Colegio de Ciencias e Ingeniería

\_\_\_\_\_

Quito, abril de 2015

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma: \_\_\_\_\_

Nombre: Estefanía Elizabeth Narváez Guerrero

C. I.: 1718829433

Fecha: Quito, abril de 2015

## **AGRADECIMIENTO**

Esta tesis fue posible gracias a la colaboración de mi familia, amigos, compañeros y profesores. Quiero agradecer a mi familia, principalmente a mi padre y a mi madre por brindarme la mejor educación y apoyarme incondicionalmente en los estudios universitarios.

A mis hermanas por su preocupación y dedicación. A Esteban Torres por ayudarme, apoyarme, sobretodo acompañarme y compartir muchos momentos de alegría.

A mis compañeros por ayudarme a reforzar los conocimientos en el laboratorio.

A mi director de tesis Ródney Peñafiel por guiarme en la elaboración de la tesis.

A Valeria Ochoa, René Parra y Pablo Dávila por compartir sus conocimientos y demostrar interés en el progreso académico de sus estudiantes.

A la empresa extractora de aceite crudo de palma y su equipo de trabajo, por brindarme información e ilustrarme en el funcionamiento de la planta de producción, además de aportar los recursos que permitieron el desarrollo de la tesis.

## RESUMEN

La industria de la extracción de aceite crudo palma requiere en su proceso de producción grandes cantidades de agua la cual se contamina con elevadas concentraciones de materia orgánica. La industria extractora de aceite crudo de palma tiene un sistema de tratamiento de aguas residuales basado en lagunas biológicas para la remoción de la DQO. El estudio que se va a realizar es un tratamiento adicional (tratamiento avanzado de agua residual) para remover estrictamente los contaminantes restantes del agua tratada por el sistema de lagunaje como son DQO residual, sólidos y  $N-NH_4^+$ , con el objetivo de reciclar el agua hacia los procesos de extracción de aceite crudo de palma. Este estudio tiene como objetivos específicos la elaboración de un balance hídrico en la planta, la caracterización de agua de los procesos en la planta y del efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) y la operación de un sistema de tratamiento avanzado de aguas residuales en el laboratorio.

La caracterización del agua indica que la concentración de DQO presente en el efluente de la PTAR está alrededor de 509 mg/L y la concentración de amonio está en 67 mg/L. En los resultados se puede ver que los condensados de proceso tiene 7.02 mg/L de dureza total y 31.7 mg/L de hierro, en la purga continua de calderas presenta 0.48 mg/L y 0.26 mg/L de dureza total y hierro respectivamente. El sistema de tratamiento de agua consiste en un filtro lento de arena con un tanque de aireación para la eliminación de amonio y materia orgánica en términos de la Demanda Química de Oxígeno (DQO). El amonio y la carga orgánica se eliminan por acción microbológica en el filtro de arena y el tanque aireado. Mediante este sistema de tratamiento del agua se obtiene una remoción de 61% de la DQO y 100% para el amonio.

## ABSTRACT

The crude palm oil industry uses large quantities of water in the production process, meanwhile, manufacturing processes generate large quantities of wastewater to high organic matter. The treatment of palm oil mill effluent is based on biological lagoons for COD elimination. The wastewater treatment plant of palm oil extraction process is based of biological lagoon. This thesis is an additional advance treatment that removes leftover lagoon contaminants like COD residual, solids, and  $\text{N-NH}_4^+$ , with the point at a potential of industrial water recycling. The study shows a hydric balance of the industry, water characterization of different plant process and Water Treatment Plant (WTP) effluent, and laboratory reactor which will be treat wastewater effluent of treatment plant.

The water characterization showed 509 mg/L COD effluent, and ammonium concentration was 67 mg/L. The process condensates and the continuous boiler purge was between 7.02 mg/L y 31.7 mg/L, and 0.48 mg/L y 0.26 mg/L of total hardness and iron respectively. The laboratory study was a slow sand filter with an air tank, so it reduced ammonium concentration and COD. The organic matter and ammonium is adsorbed and consumed by sand and autotrophic bacteria respectively. Laboratory experiments showed 61% removal of organic matter and 100% removal of ammonium.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.	Introducción.....	16
1.1	Perspectivas generales .....	16
1.2	Justificación .....	19
1.3	Objetivos.....	20
1.3.1	Objetivo general .....	20
1.3.2	Objetivos específicos.....	20
2.	Marco teórico.....	21
2.1	Proceso de extracción de aceite crudo de palma.....	21
2.1.1	Esterilización .....	23
2.1.2	Desfrutado .....	23
2.1.3	Digestor .....	23
2.1.4	Prensado .....	23
2.1.5	Generación de vapor.....	26
2.2	Contaminantes emitidos en la industria de extracción de aceite crudo de palma.....	28
2.3	Funcionamiento de la PTAR de la extractora de palma .....	30
2.4	Recirculación de agua en la industria .....	32
2.4.1	Filtros de arena .....	34
2.4.2	Nitrificación y desnitrificación.....	37
2.5	Marco Legal.....	39
2.5.1	Constitución de la república del Ecuador. Título VII RÉGIMEN DEL BUEN VIVIR, Sección sexta – Agua .....	39
2.5.2	Ley orgánica y recurso hídrico, usos y aprovechamiento del agua .....	40
2.5.3	Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente.....	41
3.	Materiales y Métodos .....	41
3.1	Muestreo .....	41
3.2	Materiales.....	42
3.3	Métodos analíticos .....	47
3.4	Descripción de la instalación del filtro y la descripción de su operación.....	52
3.4.1	Tamizado .....	52



3.4.2	Características del inóculo microbiano, Laguna No.9 y medio basal mineral antes del tratamiento.....	52
3.4.3	Montaje del reactor.....	53
3.4.4	Operación del sistema.....	58
4.	Resultados y Discusiones .....	60
4.1	Balance hídrico de la industria extractora de aceite crudo de palma.....	60
4.1.1	Sectores principales que consumen agua para la generación de vapor y proceso de producción de aceite crudo.....	61
4.1.2	Cantidad de agua utilizada en la planta extractora de aceite crudo de palma .....	64
4.1.3	Balance de agua de la planta de producción extractora de aceite crudo de palma ..	65
4.2	Caracterización de agua en los procesos de extracción de aceite de crudo de palma, agua de río y agua residual tratada en la planta de tratamiento .....	69
	A continuación se presenta la caracterización del agua realizada a diferentes en procesos de la planta extractora.....	69
4.2.1	Caracterización de agua utilizada y generada en las calderas de la industria extractora de aceite de palma .....	69
4.2.2	Caracterización de agua en la industria extractora de aceite de palma y efluente de la planta de tratamiento de agua residual .....	72
4.3	Bioreactor.....	79
4.3.1	Caracterización de entrada y salida del reactor sin aireación y con aireación. ....	79
4.3.2	Caracterización de los efluentes y afluentes provenientes del reactor con medio basal (del día 1 al día 20) con aireación .....	83
4.3.3	Caracterización de los efluentes y afluentes provenientes del reactor con medio basal – Laguna No. 9 y solo Laguna No. 9 (del día 21 al día 60).....	96
5.	Conclusiones y Recomendaciones .....	104
6.	Anexos.....	108
6.1	Protocolo detallado .....	108
6.2	Desarrollo ecuaciones .....	109
6.3	Características físico químicos de proceso de producción .....	110
6.4	Fotos.....	111
7.	Bibliografía.....	116

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Parámetros límites para el agua de alimentación de caldera (ASME) .....	27
<b>Tabla 2.</b> Características del POME.....	29
<b>Tabla 3.</b> Características generales del agua industrial tratada para la recirculación (Ridzuan, Hassan, Shirai, Samsu, Ali, & Idris, 2013) (Lens, Hulshoff, Wilder, & Asano, 2002). .....	34
Tabla 4. Materiales utilizados en la caracterización y elaboración del filtro .....	42
<b>Tabla 5.</b> Parámetros medidos para la caracterización de agua de los procesos de extracción de aceite de palma en río, purgas de caldera, condensados, ablandada, PTAR y monitoreo del reactor .....	45
Tabla 6. Descripción de los métodos de los siguientes parámetros.....	47
<b>Tabla 7.</b> Caracterización del inóculo microbiano, laguna no. 9 y medio basal mineral antes del tratamiento .....	53
<b>Tabla 8.</b> Características generales de funcionamiento del sistema de filtración .....	55
<b>Tabla 9.</b> Control en la alimentación del reactor durante ocho horas .....	59
<b>Tabla 10.</b> Registro del consumo de agua en la planta extractora de aceite crudo de palma 2014	64
<b>Tabla 11.</b> Caracterización de río, agua ablandada, condensados de procesos y purga continua de calderas .....	69
<b>Tabla 12.</b> Características de parámetros físico-químicos del agua de producción, agua ablandada, agua de proceso sin ablandar y agua de laguna no.9.....	72
<b>Tabla 13.</b> Características de parámetros físico-químicos del agua de producción, ablandada, agua de proceso sin ablandar y agua de laguna No.9 .....	73
<b>Tabla 14.</b> Caracterización de metales y aceites y grasas de las laguna no. 9 y no. 10 .....	77

<b>Tabla 15.</b> Resultado del monitoreo de 20 días con agua de laguna/medio basal a partir del día 21 continuando el monitoreo anterior.....	97
<b>Tabla 16.</b> Resultado del monitoreo de 20 días con agua de laguna No. 9 a partir del día 41 continuando el monitoreo anterior.....	98
<b>Tabla 17.</b> Resumen del porcentaje de remoción obtenido en el filtro. ....	99
<b>Tabla 18.</b> Balance de amonio y nitrato en el sistema de tratamiento con agua de la laguna No.9 .....	102
<b>Tabla 19.</b> Notación para el flujo a través de un lecho empacado .....	109
<b>Tabla 20.</b> Características físico- químicas de condensados de esterilización y mezcla de condensados de calderas y esterilizados.....	110

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Diagrama general de la planta industria de extracción de aceite crudo de palma .....	22
<b>Figura 2.</b> Filtro de arena instalado en el laboratorio.....	53
<b>Figura 3.</b> Esquema general del sistema de tratamiento a escala laboratorio .....	56
<b>Figura 4.</b> Divisiones de vidrio a través del filtro vista frontal.....	57
<b>Figura 5.</b> Esquema de flujo y vapor de agua de la planta extractora de aceite (Erazo & Rosero, 2014) .....	62
<b>Figura 6.</b> Balance hídrico y de masa de la industria extractora de aceite de palma .....	66
<b>Figura 7.</b> Resumen del consumo de agua fresca y vapor de agua del proceso de producción aceite crudo de palma .....	67
<b>Figura 8.</b> Resumen de la generación de ar del proceso de producción de aceite crudo de palma	67
<b>Figura 9.</b> Concentración de DQO en función del tiempo, en un período previo a la aireación y después de la aireación realizado en el tanque de alimentación (□) indica la entrada (afluente) al filtro de arena y (◇) representa la salida (efluente) del filtro de arena.....	79
<b>Figura 10.</b> Concentración de amonio en función del tiempo, en un período previo a la aireación y después de la aireación realizado en el tanque de alimentación (◇) indica la entrada (afluente) al filtro de arena y (□) representa la salida (efluente) del filtro .....	80
<b>Figura 11.</b> Concentración de nitrato en función del tiempo, en un período previo a la aireación y después de la aireación realizado en el tanque de alimentación (◇) indica la entrada (afluente) al filtro de arena, (□) representa la salida (efluente) del filtro .....	81
<b>Figura 12.</b> Concentración de OD en función del tiempo, en un período previo a la aireación y después de la aireación realizado en el tanque de alimentación (◇) indica la entrada (afluente) al filtro de arena, (□) representa la salida (efluente) del filtro.....	81

**Figura 13.** Concentración de pH en función del tiempo, en un período previo a la aireación y después de la aireación realizado en el tanque de alimentación (◇) indica la entrada (afluente) al filtro de arena a 8:00 am; (□) representa la salida (efluente) del filtro.....82

**Figura 14.** Concentración de turbidez en función del tiempo, en un período previo a la aireación y después de la aireación realizado en el tanque de alimentación (◇) indica la entrada (afluente) al filtro de arena a 8:00 am; (□) representa la salida (efluente) del filtro .....82

**Figura 15.** Concentración de la DQO en función del tiempo, en un período después de la aireación realizado en el tanque de alimentación (◇) indica la entrada (afluente) al filtro de arena, (□) representa la salida (efluente) del filtro y (Δ) es la salida (efluente, s4). La línea es la concentración (dqo) de medio basal antes del tratamiento.....84

**Figura 16.** Variación de la concentración de amonio con respecto al tiempo. (◇) indica la entrada (afluente) al filtro de arena, (□) representa la salida (efluente) del filtro de arena y (Δ) es la salida (efluente, s4) del filtro de arena después de cuatro horas de la primera alimentación del reactor. (-) es la concentración (amonio) de medio basal.....86

**Figura 17.** Variación de la concentración de nitrato con respecto al tiempo de monitoreo. (◇) indica la entrada (afluente) al filtro de arena, (□) representa la salida (efluente) del filtro de arena y (Δ) es la salida (efluente, s4) del filtro de arena después de cuatro horas de la primera alimentación del reactor. (-) es la concentración (nitrato) de medio basal.....88

**Figura 18.** Variación de la concentración de cloruro con respecto al tiempo de monitoreo. (◇) indica la entrada (afluente) al filtro de arena, (□) representa la salida (efluente) del filtro de arena y (Δ) es la salida (efluente, s4) del filtro de arena después de cuatro horas de la primera alimentación del reactor. (-) es la concentración (cloruro) de medio basal.....89

- Figura 19.** Variación de la concentración de sulfatos con respecto al tiempo. ( $\diamond$ ) indica la entrada (afuente) al filtro de arena y ( $\square$ ) representa la salida (efluente) del filtro de arena. ....90
- Figura 20.** Variación de la concentración de pH con respecto al tiempo. ( $\diamond$ ) indica la entrada (afuente) al filtro de arena, ( $\square$ ) representa la salida (efluente) del filtro y ( $\Delta$ ) es la salida (efluente, s4) del filtro de arena después de cuatro horas. (-) es el ph de medio basal .....91
- Figura 21.** Variación de la conductividad con respecto al tiempo. ( $\diamond$ ) indica la entrada (afuente) al filtro de arena, ( $\square$ ) representa la salida (efluente) del filtro de arena y ( $\Delta$ ) es la salida (efluente, s4) del filtro de arena después de cuatro horas .....92
- Figura 22.** Variación del OD con respecto al tiempo de monitoreo. ( $\diamond$ ) indica la entrada (afuente) al filtro de arena, ( $\square$ ) representa la salida (efluente) del filtro de arena y ( $\Delta$ ) es la salida (efluente, s4) del filtro de arena después de cuatro horas .....93
- Figura 23.** Variación de la turbidez con respecto al tiempo de monitoreo. ( $\diamond$ ) indica la entrada (afuente) al filtro de arena y ( $\square$ ) representa la salida (efluente) del filtro de arena. ....94
- Figura 24.** Concentración de dco en comparación con medio basal antes del tratamiento por los primeros 30 días de funcionamiento del reactor .....95
- Figura 25.** Concentración de amonio en comparación con medio basal antes del tratamiento por los primeros 40 días de funcionamiento del reactor.....95
- Figura 26.** Concentración de nitrato en comparación con medio basal antes del tratamiento por los primeros 40 días de funcionamiento del reactor.....96

## LISTA DE ACRÓNIMOS

ANCUPA: Asociación Nacional de Cultivadores de Palma Aceitera

AR: Agua Residual

ASME: American Society of Mechanical Engineers (sociedad Americana de ingenieros mecánicos)

DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno

DQO: Demanda Química de Oxígeno

KW: kilovatios

m<sup>3</sup>: metros cubicos

MBM: Medio Basal Mineral

MK: Mega Wats

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>: Amonio

NO<sub>2</sub><sup>-</sup>: Nitrito

NO<sub>3</sub><sup>-</sup>: Nitrato

NTK: Nitrógeno Total Kjeldahl

OD: Oxígeno Disuelto

POM: Palm Oil Mill (aceite de palma)

POME: Palm Oil Mill Effluent (efluente del aceite de palma)

RFF: Racimo de Fruta Fresca

SST: Sólidos Suspendidos Totales

SSV: Sólidos Suspendidos Volátiles

ST: Sólidos Totales

TRH: Tiempo de Residencia Hidráulica

TULSMA: Texto Unificado Legislación Secundaria de Ministerio de Ambiente

## **1. Introducción**

### 1.1 Perspectivas generales

El desarrollo industrial genera desechos líquidos, sólidos y gaseosos. Los desechos líquidos son principalmente aguas residuales que constituyen un foco de contaminación que podrían alterar los sistemas acuáticos (NSW, 2014).

El cultivo de palma y la extracción de aceite de palma tiene una historia de más de 3 000 años de antigüedad (ANCUPA, Palma Ecuador país palmicultor, 2014). Con el transcurso del tiempo la industria extractora de palma y los cultivos de palma han crecido debido a la gran demanda de los derivados que la misma produce; en la actualidad los derivados de la palma son muy populares ya sea para consumo humano o para otros usos (ANCUPA, Palma Ecuador país palmicultor, 2014).

La extracción de aceite crudo de palma genera residuos sólidos y líquidos; la producción de aceite crudo de palma resulta en generación de agua residual conocida como Palm Oil Mill Effluent (POME) (Sontaya, Pitiyont, & Punsuvon, 2013), esta agua residual presenta altas concentraciones de materia orgánica (50 000 mg DQO/L), color y sólidos en suspensión de 18 000 mg/L SST. Estos compuestos perjudican el medio ambiente, es por este motivo, que el tratamiento de esta agua es importante antes de ser descargada al cuerpo de agua dulce. La normativa según el Texto Unificado Legislación Secundaria, Medio Ambiente (TULSMA) requiere que el DQO, ST y Nitratos y Nitritos no sean mayores a 250 mg/L, 1600 mg/L, 10 mg/L, respectivamente; antes de ser descargados a los cuerpos de agua dulce, valores mucho menores al agua residual sin tratamiento. En la recirculación de agua en la industria se necesita agua con buena calidad para el funcionamiento de las calderas aún más si se desea



reciclarla, por otro lado, los otros procesos no requieren agua de excelente calidad por lo general el agua tratada para recircular debe tener las siguientes características pH 5-9, DBO de 100 mg/L, de SS 400 mg/L, nitrógeno de 1-30 mg/L, fosforo de 1-20 mg/L, organismos patógenos de 1-200/ml (Ridzuan, Hassan, Shirai, Samsu, Ali, & Idris, 2013) (Lens, Hulshoff, Wilder, & Asano, 2002).

La industria de palma africana en el Ecuador se empieza a promover e introducir en 1962 (ANCUPA, Caracterización de Cultivo de la Palma Aceitera en el Ecuador , 2010), las primeras plantaciones de palma comienzan en el oeste en Santo Domingo, Quevedo, la Concordia y Quinindé. Estas dos últimas zonas son las mejores para la producción de palma en el Ecuador y consecuentemente alrededor el 83% de su superficie sirve para el cultivo de palma de aceite (FEDAPAL, 2005).

Quinindé es el centro de mayor producción de palma con 1900 productores (Potter, 2011). Dado a que en el país existe un número considerable de industrias que se dedican a la extracción de aceite de palma como Danec y la Fabril (Potter, 2011), el seguimiento ambiental a esta actividad es importante, en esta circunstancia se debe cumplir con las normas y leyes vigentes, que mencionan los límites máximos permisibles de descarga de los diferentes parámetros de contaminación a un cuerpo de agua dulce (Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Ministerio de Ambiente, TULSMA, Libro VI Anexo I Tabla 12). Para cumplir con las normas la industria nacional ha implementado sistemas de tratamiento de aguas residuales (Potter, 2011), sin embargo para viabilizar el reciclaje del agua residual tratada es necesario realizar estudios para investigar las opciones de tratamiento avanzado del efluente.

En la actualidad existen varias tecnologías de tratamiento avanzado como precipitación por adición de reactivos, procesos electroquímicos, intercambio iónico, adsorción como el carbón activado, RALF, etc. (Fernandez, et al., 2006); de agua residual que se pueden utilizar con el fin de reciclar el agua. El sistema de tratamiento que se investiga en este estudio es la aireación y filtración en un lecho de arena. Mediante este proceso se pretende remover la materia orgánica y amonio del agua residual.

En la primera parte del estudio se realiza un balance hídrico para determinar la cantidad de agua consumida en cada sub proceso de la extracción de aceite crudo de palma. Asimismo se establece la calidad requerida para la reutilización del agua. Adicionalmente se caracteriza el agua del proceso y el agua residual tratada proveniente de la PTAR. El agua residual proviene de una empresa extractora ubicada en Quinindé; los parámetros a evaluar son: pH, temperatura, conductividad, turbidez, OD, DQO<sub>total</sub>, ST, SV, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, alcalinidad además de metales como hierro, sílice, calcio, cobre, manganeso y zinc, dureza total y finalmente aceites y grasas.

En la segunda parte del estudio se instala y opera un sistema de tratamiento avanzado de agua residual que consiste en un filtro de arena y un tanque de aireación.

## 1.2 Justificación

La principal motivación para realizar este estudio, es reducir el consumo y contaminación de agua dulce por parte de las industrias extractoras de aceite de palma. Lo que se busca es determinar la viabilidad de la reutilización de aguas residuales tratadas mediante un sistema tratamiento avanzado. (Setiadi).

El problema que enfrenta la industria de aceite crudo de palma, es el consumo de grandes cantidades de agua fresca. En general, una tonelada de agua se usa en el proceso para una tonelada de fruta fresca (Ridzuan, et al., 2013), entonces al implementar un tratamiento de agua apto para la recirculación se dejaría de utilizar mucha agua del río.

Con ayuda de la recirculación del agua, el consumo de agua de proceso se puede cortar desde un 50% hasta un 95% (Visvanathan & Asano), lo cual se puede lograr mediante técnicas de reciclado que se rijan por factores tales como la disponibilidad de agua cruda y posibilidades de expansión en las unidades de procesamiento.

### 1.3 Objetivos

#### 1.3.1 Objetivo general

Identificar medidas adecuadas para la recirculación del efluente de la planta de tratamiento de agua residual a los procesos de extracción de aceite crudo de palma y estudiar el tratamiento de aireación y filtración para la recirculación del agua.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

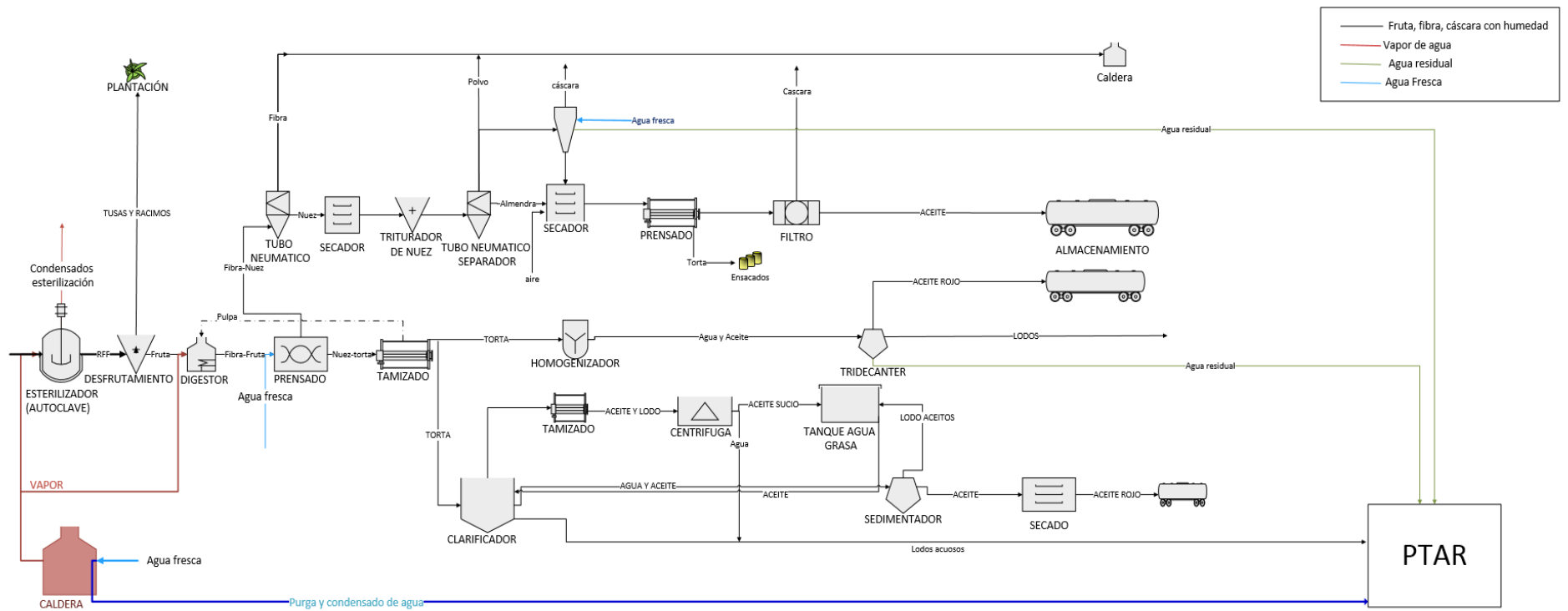
- Realizar un balance hídrico del proceso de extracción de aceite crudo de palma de una extractora.
- Caracterizar el agua de los diferentes procesos de la extracción de aceite crudo de palma como son: agua para uso en calderas, agua de los condensados del proceso de extracción, agua del río que suministra el agua cruda y agua residual tratada de PTAR.
- Estudiar el tratamiento del agua residual tratada mediante aireación y filtración para eliminación de materia orgánica y de amonio.

## 2. Marco teórico

El marco teórico explica en detalle el funcionamiento de todos los procesos de extracción de aceite crudo de palma que utilizan y no utilizan agua, seguido por las características físico-químicas y biológicas de los contaminantes líquidos emitidos en la industria de extracción de aceite crudo de palma debido al agua residual generada. Se detalla el tratamiento que se someten los efluentes en la planta de tratamiento de agua residual de la extractora de palma. Finalmente se indica el proceso de tratamiento avanzado adicional al tratamiento convencional utilizado en la industria, para la recirculación de agua en la industria.

### 2.1 Proceso de extracción de aceite crudo de palma

Existen varias etapas en los procesos de extracción del aceite de palma comenzando desde los racimos de fruta fresca hasta el producto final que es el aceite crudo. En este proceso se incluye la esterilización, el bunch stripping, la digestión, la extracción de aceite y finalmente la clarificación y purificación se indica un diagrama (Figura 1) del proceso industrial



**Figura 1.** Diagrama general de la planta industria de extracción de aceite crudo de palma

### 2.1.1 Esterilización

La primera etapa es la esterilización consiste en transportar los racimos de fruta recién cosechada hacia el molino que trabaja a baja presión de vapor a 3 bares y temperatura entre 125°C a 145°C y de esta manera acelera el proceso de ablandamiento entre el raquis y la tuza, además facilita el desgrane de la fruta de los racimos para ablandar el pericarpio en el proceso de extracción de aceite (Erazo & Rosero, 2014). En este proceso se generan condensados con alto contenido de materia orgánica.

### 2.1.2 Desfrutado

El siguiente paso es el bunch stripping o desfrutamiento. Aquí se separa la fruta esterilizada del tallo del racimo por medio de un pelador mecánico que consiste en un tambor rotatorio con velocidad de 21 y 24 rpm. Los racimos dentro del tambor caen por gravedad y los frutos por la combinación de gravedad y rotación son removidos por la fuerza centrípeta (Erazo & Rosero, 2014). En este proceso no se utiliza agua, sin embargo, la fruta llega con humedad del esterilizador.

### 2.1.3 Digestor

La fruta separada y esterilizada llega a un proceso de digestión que se da al calentar la fruta usando vapor a una temperatura de 80 a 90°C, en este procedimiento, se prepara a la fruta para la extracción del aceite mediante la ruptura de la nuez (Igwe & Onyegbado, 2007) preparando al fruto para el siguiente proceso de prensado.

### 2.1.4 Prensado

En esta etapa se aplica agua de dilución con la finalidad de lavar la fibra y extraer el aceite con mayor eficiencia, en esta parte la colada formada será adecuada para realizar la separación de

aceite en la clarificación. La extracción del líquido y la nuez se realiza por medio de un tornillo en prensa que gira rompiendo la nuez (Erazo & Rosero, 2014).

Del prensado se generan dos descargas; sólidos y líquidos, el sólido que son las fibras y nueces mientras que el líquido es la colada compuesta de aceite-agua-lodo (Alfaro & Ortiz, 2006).

#### 2.1.4.1 Aceite rojo

Derivado de la extracción de aceite de palma es el aceite rojo de origen vegetal, el color se da ya que el fruto presenta la tonalidad rojiza y el mismo proviene de la pulpa y representa el 18-26% (Alfaro & Ortiz, 2006) del peso fresco del racimo. Como alimento natural tiene alto contenido de vitamina A, es usado por lo general en el aceite de cocina. A continuación se describe con mayor detalle el proceso de extracción.

2.1.4.1.1 Tamizado: Las partículas de fibra provenientes del prensado se remueven primero porque pasan por una pantalla vibratoria debido a que la arena y suciedad se sedimentan. El aceite con agua pasa al proceso homogeneizador y clarificador, mientras que la pulpa tamizada regresa al digestor repitiendo el proceso.

2.1.4.1.2 Homogeneizador: Se encarga de subir la temperatura a 90°C para que se mezcle completamente de ahí pasa al tridecanter.

2.1.4.1.3 Clarificador: El agua se remueve mediante la sedimentación. Es importante recalcar que la humedad contenida en el clarificador es de 0.1 – 0.25 % de humedad (Alfaro & Ortiz, 2006).



2.1.4.1.4 Tridecanter: Por velocidad y densidad separa los compuestos de aceite, lodo y agua, los cuales son los últimos procesos para la recuperación del aceite (Igwe & Onyegbado, 2007).

El producto final es conocido como aceite crudo de palma que después es refinado (Igwe & Onyegbado, 2007). El aceite crudo contiene aún grandes cantidades de humedad que pueden deteriorar el producto una vez almacenado, por lo que la humedad se reduce por calentamiento y finalmente es almacenado.

Centrífuga: se rompe el cuesco con altas velocidades de rotación que permite la liberación de las almendras.

#### 2.1.4.2 Palmistería

El aceite de palmiste se extrae de la almendra de la semilla del fruto y representa el 3 al 6 % del peso del racimo. Su composición es semi- sólida a temperatura ambiente. Esta es utilizada generalmente para industria cosmética, química y fabricación de detergentes.

2.1.4.2.1 Tubo neumático: Los efluentes sólidos del prensado se dividen mediante una columna de aire conocida como tubo neumático, separando la fibra y la semilla o nuez. La fibra será enviada a las calderas que funciona como combustible para las calderas mientras que las nueces se dirigen al triturador.

2.1.4.2.2 Triturador de nuez: En el triturador se procede a quebrar la nuez donde se las clasifica por tamaño.

2.1.4.2.3 Tubo neumático 2: Separa la almendra de la cáscara o polvo por medio del hidrociclón. La almendra se dirige al secador y la cáscara a las calderas.

2.1.4.2.4 Secador: La almendra llega a este proceso que elimina la humedad a menos de 5% (Alfaro & Ortiz, 2006).

2.1.4.2.5 Prensado: La almendra secada se prensa con la finalidad de extraer aceite y la torta o harina de almendra, el aceite es almacenado y la torta es empacada en sacos de yute o costales.

### 2.1.5 Generación de vapor

En el proceso de extracción de aceite de palma es necesario grandes cantidad de vapor principalmente en las turbinas para generación de energía eléctrica. Para los demás procesos como esterilizador, digestor, homogenizador-tridecanter, Palmistería (secado de nuez y almendra) se usa menos cantidad de vapor de agua. El vapor utilizado para los procesos de esterilización, digestor, homogenizador y tridecanter es vapor de baja presión entre 2.5 y 3 bares. Por otro lado, es necesario vapor de alta presión entre 20 a 22 bares (vapor sobrecalentado) para el funcionamiento de las turbinas (energía eléctrica).

#### 2.1.5.1 Sistema de alimentación de agua

El agua de alimentación de la caldera es generalmente almacenada en un tanque con la capacidad de atender la demanda de la misma. En la empresa existen dos tanques de almacenamiento del agua de alimentación, con una bomba de presión se empuja el agua a la caldera.

Las calderas necesitan un pre tratamiento en el agua de alimentación enfocada principalmente en la reducción de dureza total, sólidos disueltos y alcalinidad para no perjudicar la eficiencia en el funcionamiento de las mismas. El ablandamiento se utiliza para tratar el agua de alimentación a las calderas y se efectúa mediante cal y bicarbonato de sodio, además de

intercambiadores de iones (Loma, n.d.). En la siguiente tabla 1 se mencionan los límites de concentración de agua de alimentación en varios parámetros a diferentes presiones de trabajo de calderas.

**Tabla 1** Parámetros límites para el agua de alimentación de caldera (ASME)

<b>Agua de alimentación</b>						
Presión	Dureza					
en vapor	Hierro	Cobre	Total	Sílice	Alcalinidad	Conductividad
(bares)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	total (mg/L)	(mS/cm)
0-20	0.1	0.05	0.3	150	350	3500
21-30	0.05	0.025	0.3	90	300	3000
31-42	0.03	0.02	0.2	40	250	2500
43-52	0.025	0.02	0.2	30	200	2000
53-63	0.02	0.015	0.1	20	150	1500
64-70	0.02	0.015	0.05	8	100	1000
71-105	0.01	0.01	ND	2	NS	150
106-140	0.01	0.01	ND	1	NS	100

(CONUEE, 2009)

En general la industria extractora de aceite de palma fabrica productos como aceites líquidos para freír, sustancias de grasas lácticas, margarina, surfactantes, lubricantes, combustibles (especialmente biodiesel), detergentes, productos fitosanitarios, jabones, cosméticos y velas. En el proceso de extracción de aceite crudo de palma, los subproductos generados son: la torta de palmiste que se utiliza para alimentar a los animales, la fibra para quemar en las calderas,

los racimos vacíos como fertilizantes, las hojas para la fabricación de papel y los troncos para la fabricación de muebles (Garcés & Sánchez, 1997) .

## 2.2 Contaminantes emitidos en la industria de extracción de aceite crudo de palma

Actualmente, como ya se ha mencionado, la producción de aceite de palma genera grandes cantidades de desechos líquidos, sólidos y gaseosos. Los residuos sólidos comunes son los racimos vacíos de fruta, hojas, troncos, torta decantadora, semillas y fibra (Rupani & Singh, 2010)(Othman et al., 2014). Estos sólidos por lo general son nombrados como lodos de la extracción de aceite de palma (POMS<sup>1</sup>).

Los efluentes líquidos se los considera más significativos debido a su cantidad por ejemplo, en 2010, 421 extractoras de aceite de palma en Malasia generaron aproximadamente 60 millones de toneladas de efluente de la extracción de aceite de palma conocido como (POME<sup>2</sup>). POME es un efluente que se genera al final de la fase de producción de aceite de palma, incluyen aceite residual y sólidos suspendidos. Los sólidos suspendidos inertes causan turbidez y sedimentación en el fondo. Como se indica la Tabla 2 el POME contiene concentraciones altas en material de celulosa, grasas y aceites, además de grandes cantidades de materia orgánica y sólidos totales (Pechsuth, Prasertsan, & Ukita, 2001).

---

<sup>1</sup> POMS: palm oil mill sludge (lodos de la extracción de aceite de palma)

<sup>2</sup> POME: palm oil mil efluente (efluentes de aceite de palma). Agua residual proveniente de la extracción de aceite de palma con alto contenido contaminante

**Tabla 2.** Características del POME

<b>Parámetros</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valores</b>
Temperatura	°C	80-90
pH		4.7
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> ) a 30 °C	mg/L	25 000
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L	50 000
Sólidos totales (ST)	mg/L	40 500
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	18 000
Sólidos totales volátiles (STV)	mg/L	34 000
Aceites y grasas	mg/L	4 000
Amonio (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N)	mg/L	35
Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK)	mg/L	750

Fuente: (Rupani & Singh, 2010)

El POME se forma principalmente en la extracción de aceite, lavado y procesos de limpieza en la extractora, en la esterilización, clarificación, condensación, lavado de la fruta, hidrociclón, caldera, tanques y decantadores. Principalmente se da en la esterilización y el clarificado aproximadamente de 1 a 1.5 toneladas de agua son requeridas para procesar 1 tonelada de RFF<sup>3</sup> (Racimos de Fruta Fresca) (Wang, Hung, Lo, & Yapijakis, 2006). La relación es de 2.5 a

<sup>3</sup> RFF: Racimo de Fruta Fresca

3.5 toneladas de POME por cada tonelada de aceite crudo producido (Othman et al., 2014). Este residuo sería la mayor fuente de contaminación si la descarga se va directamente a los cuerpos de agua y al no ser tratada correctamente.

Además existen sustancias tóxicas y metales pesados, aceites y materiales flotantes, sales disueltas como fosfatos, cloruros y nitratos (Igwe & Onyegbado, 2007), metales como Zinc, Hierro y Manganeseo que deben contener niveles aceptables antes de ser descargados al ecosistema. El POME contiene aceites emulsionados que al momento del tratamiento generan problemas a causa de su alta estabilidad.

Las descargas de esta gran cantidad de volumen de metales residuales, causados por el efluente, pueden ocasionar daños severos a la salud pública; es así que un apropiado tratamiento del efluente es importante (Shavandi, Haddadian, Ismail, & Abdullah, 2012). Por lo cual el principal objetivo de la industria es reducir la mayor cantidad de compuestos y llevarlos a niveles aceptables que estén acorde a la legislación ambiental local.

### 2.3 Funcionamiento de la PTAR de la extractora de palma

La extractora cuenta con un sistema de tratamiento de aguas residuales conformado principalmente por lagunas anaerobias y facultativas. El proceso inicia con cuatro tanques conocidos como florentinos, donde el agua residual ingresa a 70°C aproximadamente. Los florentinos poseen duchas de agua constantes que ayudan al enfriamiento del agua residual y

la separación de la grasa que se encuentra flotante para ser llevada nuevamente al proceso de extracción y recuperar contenido de aceite de las mismas.

El PTAR<sup>4</sup> consta de 10 lagunas de tratamiento. El agua residual se dirige hacia la primera laguna, su volumen de tratamiento es de 3003 m<sup>3</sup>, se descarga 408 m<sup>3</sup>/d de AR<sup>5</sup> a la laguna No. 1, tiempo hidráulico de retención de 3.3 días, esta laguna es usada de forma pasiva, es acidogénica y aeróbica, sirve para disminuir la temperatura. Luego, el agua se dirige hacia la segunda laguna, la cual posee una capacidad de 2549 m<sup>3</sup> de tratamiento, esta laguna es anaerobia y ácida debido a su pH ácido (4.3) sucede un proceso acidogénico.

Luego de cumplirse el tiempo hidráulico de retención (2.8 días), continúa hacia la laguna No. 3 que tiene una capacidad de almacenamiento de 1974 m<sup>3</sup> y tiempo de retención de 2.2 días; esta laguna también es anaerobia y se encuentra en la fase acidogénica por su pH 5.

Una vez alcanzado el TRH pasa hacia la laguna No. 4, que tiene un volumen de tratamiento de 8023 m<sup>3</sup>. Su pH es de 6.4 y tiempo de retención de 8.9 días, es anaerobia, condiciones que permiten el crecimiento de bacterias metanogénicas que empezarán la degradación de la materia orgánica generando metano y dióxido de carbono. El flujo continúa hacia la laguna No. 5, ésta posee una capacidad de 1917 m<sup>3</sup>, tiene pH de 7.2 y TRH de 2.1 días. La laguna pasa a ser facultativa (zona aerobia superior, zona anaerobia fondo) para los microorganismos

---

<sup>4</sup> Planta de tratamiento de agua residual

<sup>5</sup> Agua Residual

El agua residual se dirige hacia la laguna No. 6 mediante una bomba, el agua tiene un pH de 7.6 y la capacidad de almacenamiento de la laguna es de 1697 m<sup>3</sup>. Ésta laguna también es conocida como facultativa, su tiempo de retención es de 1.9 días. Continúa con un caudal hacia la laguna No. 7, que tiene un pH de 8.1, tiempo de retención de 1.7 días y volumen de tratamiento de 1530 m<sup>3</sup>. La laguna 8 tiene una capacidad de 2922 m<sup>3</sup> y tiempo hidráulico de retención de 3.2 días, se mantiene el pH de la laguna anterior.

La laguna No. 9 tiene una capacidad de 3334 m<sup>3</sup> y 5.9 días de TRH. El volumen concentrado dentro de la laguna se instala bombas aireadoras que permiten la oxigenación del mismo. El tipo de tratamiento que posee la laguna es aeróbico la finalidad de la laguna es descomponer los residuos con ayuda de las bacterias aeróbicas. Son tanques de profundidad reducida donde permite la penetración de luz, este tipo de lagunas de estabilización aerobia están compuestas de algas y bacterias en suspensión. Es una laguna que tiene aireación continua y se emplea difusores convencionales (ver Anexo 3).

El tratamiento finaliza en la laguna No. 10 con volumen de 1792 m<sup>3</sup>, THR de 2 días y pH de 8.4. Las dos últimas lagunas son conocidas como de pulimiento. Una vez terminado el proceso pasa hacia la laguna 11 que es un paso anterior a la descarga hacia el estero Sabalito.

#### 2.4 Recirculación de agua en la industria

La reutilización del agua se ha practicado en varios sectores del mundo por siglos y existen industrias que han implementado tecnologías para la reutilización del agua, actualmente, en varias naciones industrializadas se han incrementado los problemas relacionados con el desarrollo adecuado de suministros de agua por los factores ambientales(Montgomery,



1981)(James, 1978). De igual manera, los costos de distribución y abastecimiento de agua municipal e industrial se están incrementando.

En países desarrollados, especialmente en las partes áridas son necesarias tecnologías para adquirir provisiones de agua y proteger el agua existente de fuentes de contaminación. En la implementación de recirculación de agua es necesario un tratamiento, métodos de distribución y aplicación. A medida que la tecnología mejora y la eficiencia del sistema de reutilización de agua se demuestre, se prevé que la recirculación del agua continuará y se expandirá en un futuro(Asano & Levine, 1996). A partir de los 90s se incrementa el interés de recirculación de agua por parte de los gobiernos y surge una presión para aumentar la calidad de agua en la agricultura, la industria y para consumo humano; actualmente, las tecnologías de tratamiento en aguas residuales y procesos de purificación existen con la finalidad de producir agua en la calidad deseada, por lo mismo, la recirculación de agua es un factor óptimo para su uso como reserva de agua.

Los avances tecnológicos en procesos físicos, químicos y biológicos de agua y agua residual permitió la “Era de agua residual reclamación, reciclaje y reúso”. La investigación permitió que evalúen los riesgos de la salud y diseños de sistemas de tratamiento para la reutilización de agua en la ingeniería(Asano & Levine, 1996). En la Tabla 3 se representa parámetros de recirculación apropiados para aguas industriales tratadas y para que se efectuó apropiadamente el tratamiento específico.

**Tabla 3.** Características generales del agua industrial tratada para la recirculación (Ridzuan, Hassan, Shirai, Samsu, Ali, & Idris, 2013) (Lens, Hulshoff, Wilder, & Asano, 2002).

Parámetros	Parámetros para reusar el agua tratada
pH	5-9
BOD (mg/L)	100
SS (mg/L)	400
Nitrógeno (mg/L)	1-30
Fosforo (mg/L)	1-20
Organismos patógenos	1-200/ml

#### 2.4.1 Filtros de arena

El proceso de filtración remueve partículas, microorganismos, bacterias y virus de agua no tratada (Zaidun & Assist, 2011). La filtración biológica se efectúa por medio de un flujo de agua sin tratar, a través de un lecho de arena. Durante el recorrido del agua las impurezas están en contacto con la superficie del grano de arena y son retenidas ahí mismo. El material inerte es retenido hasta que exista un proceso de limpieza, sin embargo, aquellas sustancias capaces de degradarse química y biológicamente se convierten en formas más sencillas que se descargan junto con el agua o permanecen con el material inerte para una posterior remoción. (Zaidun & Assist, 2011).

Una serie de complejas fuerzas contribuyen a cada uno de estos pasos como el transporte, la adhesión y mecanismos de purificación.

El mecanismo de transporte es uno de los principales procesos donde las partículas están en contacto con el grano de arena por screening, sedimentación, fuerzas inerciales y centrífugas, difusión, atracción de masas y atracción electrostática (Huisman & Wood, 1974).

En el proceso de screening se retiene partículas grandes pues no pasan a través de los espacios vacíos (poros) (Wilkes, 2008) que existe entre los granos de arena independiente de la tasa de filtración; mientras el flujo pasa a través del lecho de arena, las partículas pequeñas están en contacto con otras y se forma una agregación. Esta agregación de partículas crece y se retienen mediante screening por la aglomeración de las mismas conocida como formación *Scmutzdecke* o capa de *zoogloea* (Huisman & Wood, 1974). Estas bacterias derivadas principalmente del agua no tratada se multiplican y la materia orgánica que se deposita la utilizan como alimento. La bacteria oxida el alimento para generar energía para su metabolismo y su crecimiento.

Para que exista una eficiencia en la oxidación de materia orgánica es necesario tener suficiente tiempo, oxígeno y temperatura adecuada (Huisman & Wood, 1974).

La sedimentación es el asentamiento entre los poros por los cuales las partículas suspendidas se juntan en el grano (Wilkes, 2008). Los materiales en suspensión de origen orgánico tienen densidades ligeramente más superiores que la del agua, es así que la remoción de compuestos orgánicos por sedimentación ocurre. El material más pequeño o más liviano se introducirá más al lecho y puede que no sea removido por sedimentación (tamaño de partícula  $<1 \mu\text{m}$ ) (Huisman & Wood, 1974).

Las fuerzas inerciales actúan sobre partículas de elevada gravedad específica; gravedad específica más alta que otras alrededor causarán que dejen la línea de flujo y tengan contacto

con los granos de arena. En la difusión (movimiento Browniano) (Wilkes, 2008) donde las partículas en suspensión actúan independientemente a la tasa de filtración a través del filtro aun si no hay flujo de agua (Huisman & Wood, 1974).

La atracción en masa (fuerzas de Van der Waals) puede remplazar la fuerza inercial de las partículas que están muy cerca de la superficie del grano y por último las fuerzas electrostáticas que mantiene a las partículas en contacto una vez ya unidas en el grano de arena (Huisman & Wood, 1974).

En lo que respecta la filtración hidráulica, la tasa de movimiento en la filtración lenta de arena se da por un flujo laminar ( $Re < 1$ ), en este estudio es ( $Re = 0.64$ ), la resistencia para la limpieza del filtro es acorde a la ley de Darcy (Wilkes, 2008). Durante la filtración las impurezas del agua residual acumulada en el lecho reducirán el tamaño del poro y la resistencia incrementará.

El tiempo en el que ocurra la situación anteriormente mencionada depende de la cantidad de materia orgánica, la tasa de filtración y el tamaño de la arena, por lo mismo es necesario un flujo pequeño de agua (Huisman & Wood, 1974). La filtración lenta consiste en irrigar agua a paso lento a través de un lecho de arena u otro material poroso como la piedra pómez o roca como tratamiento de agua, que tienen la capacidad de remover materia orgánica e inorgánica y sólidos suspendidos (Manz, Ag, & Filter, n.d.). Además se ha demostrado que la filtración biológica o filtración lenta es uno de los métodos exitosos en la purificación de agua para su uso mediante oxidación aerobia microbiana (Bahgat, Dewedar, & Zayed, 1999).

Un proceso complementario en este estudio es la colocación de un tanque de aireación que trabaja mediante difusores de aire donde se lleva a cabo incorporación de oxígeno al agua.

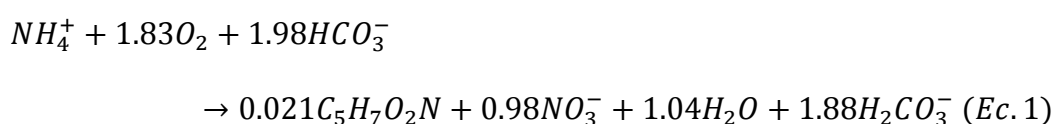
## 2.4.2 Nitrificación y desnitrificación

La remoción de nitrógeno del agua residual tiene por objeto evitar la eutrofización del cuerpo receptor. La nitrificación es un proceso en la cual se describe dos pasos biológicos en donde el amonio ( $\text{N-NH}_4^+$ ) se oxida en nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) donador inorgánico llamando a este proceso nitrificación, que causa una reacción autótrofa con oxígeno y el nitrito a nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) llamado nitrificación. Una vez que se remueve el DBO, empieza el proceso de nitrificación que se puede llevar a cabo por microorganismos en suspensión o por película biológica adherida en un biofilm. Debido a que las bacterias responsables de la nitrificación crecen con más lentitud que las que remueven materia orgánica y por ello el sistema diseñado generalmente tiene un tiempo de retención mayor (Tchobamoglous, Burton, F, & Stensel D, 2003). El crecimiento de las bacterias aeróbicas heterótrofas y autótrofas depende de los organismos y el sustrato. El agua residual generalmente contiene varios compuestos biodegradables orgánicos (DQO) con rápida y lenta fracción biodegradable, por lo general con una tasa de crecimiento de ( $0.25 \text{ h}^{-1}$ ) (Graddy, Daigger, & Lim, 1999). El crecimiento de las bacterias aeróbicas autótrofas (Nitrosomas/Nitrobacter) se ha reportado con una tasa de crecimiento de  $0.014 \text{ h}^{-1} / 0.06 \text{ h}^{-1}$  respectivamente (Graddy, Daigger, & Lim, 1999), con una tasa de crecimiento de 8 a 10 veces más las heterótrofas que las autótrofas. Las bacterias autótrofas aerobias son las responsables de la nitrificación en un proceso de biofilm.

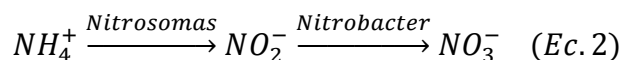
La reacción de oxidación de amonio a nitrito se realiza con un grupo de Nitrosomas mientras que la oxidación de nitrito a nitrato se efectúa mediante otro grupo de bacterias autótrofas (Nitrobacter). Durante la reacción generada es necesario el oxígeno para una completa oxidación de amonio, donador de electrones es el amonio y el oxígeno es el aceptor.

Las bacterias nitrificadoras necesitan de CO<sub>2</sub>, fósforo y elementos traza para el crecimiento celular; la tasa de nitrificación crece cuando la concentración OD es de 3 a 4 mg/L. Las bacterias nitrificadoras se distribuyen dentro de un flóculos con bacterias heterotróficas y otros sólidos, cuyos diámetros tienen un rango de 100 a 400 μm (Tchobamoglous, Burton, F, & Stensel D, 2003)

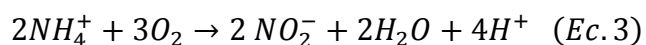
La ecuación completa del proceso de nitrificación se puede expresar de la siguiente manera:



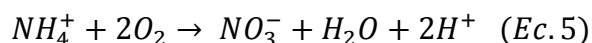
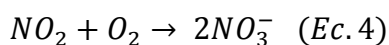
Según la Ecuación No. 1 el  $C_5H_7O_2N$  se representa como la expresión química de la célula bacteriana (Nitrosomas/Nitrobacter). Para cada nitrógeno total de amonio (NTA) oxidado aproximadamente 4.18 g de oxígeno y 7.07 g de alcalinidad (CaCO<sub>3</sub>) se consume y 0.17 g de biomasa bacteria se produce (Chen, Ling, & Blancheton, 2006).



La Ecuación No. 2 es la reacción general de la nitrificación en donde el amonio se oxida a nitrito y posteriormente a nitrato.



Según la Ecuación No. 3, la nitratación consume 3.43 mg de OD y 7.14 mg de alcalinidad cuando 1 mg NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N se removido.



Según la Ecuación No. 3, 4 y 5 la nitrificación consumirá 4.57 mg de OD 7.14 mg de alcalinidad cuando 1 mg  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  se removido (Feng et al., 2012).

## 2.5 Marco Legal

Con el propósito de cumplir con las actividades industriales en el Ecuador, generadores de impactos ambientales en el área de influencia directa, el gobierno investiga alternativas legislativas que busquen reducir y controlar los problemas ambientales que puede generarse debido al consumo y contaminación del agua. Es así que el país desarrollo normas generales y reglamentarias correspondientes a la Ley de Gestión Ambiental, Ley de Prevención y control de la Contaminación Ambiental, Ley orgánica y recurso hídrico, usos y aprovechamiento del agua, Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA, libro VI).

### 2.5.1 Constitución de la república del Ecuador. Título VII RÉGIMEN DEL BUEN VIVIR, Sección sexta – Agua

**Art. 411.-** El Estado garantizará la conservación, recuperación y manejo integral de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas y caudales ecológicos asociados al ciclo hidrológico. Se regulará toda actividad que pueda afectar la calidad y cantidad de agua, y el equilibrio de los ecosistemas, en especial en las fuentes y zonas de recarga de agua. La sustentabilidad de los ecosistemas y el consumo humano serán prioritarios en el uso y aprovechamiento del agua (Constituyente).

### 2.5.2 Ley orgánica y recurso hídrico, usos y aprovechamiento del agua

**Artículo 64.-** Conservación del agua. La naturaleza o Pacha Mama tiene derecho a la conservación de las aguas con sus propiedades como soporte esencial para todas las formas de vida.

En la conservación del agua, la naturaleza tiene derecho a:

b) El mantenimiento del caudal ecológico como garantía de preservación de los ecosistemas y la biodiversidad; c) La preservación de la dinámica natural del ciclo integral del agua o ciclo hidrológico; d) La protección de las cuencas hidrográficas y los ecosistemas de toda contaminación; y,

#### Sección Segunda Objetivos de Prevención y Control de la Contaminación del Agua

**Artículo 79.** Objetivos de prevención y conservación del agua.- Preservar la cantidad del agua y mejorar su calidad; Controlar las actividades que puedan causar la degradación del agua y de los ecosistemas acuáticos y terrestres con ella relacionados y cuando estén degradados disponer su restauración;

**Artículo 80.-** Vertidos: prohibiciones y control. Se consideran como vertidos las descargas de aguas residuales que se realicen directa o indirectamente en el dominio hídrico público. Queda prohibido el vertido directo o indirecto de aguas o productos residuales, aguas servidas, sin tratamiento y lixiviados susceptibles de contaminar las aguas del dominio hídrico público.

**Artículo 107.-** Aprovechamiento industrial. Para toda actividad industrial en la que se utilice agua de fuentes hídricas, se solicitará la autorización de aprovechamiento productivo a la Autoridad Única del Agua (...)Las aguas destinadas para el aprovechamiento industrial, una



vez utilizadas, serán descargadas por el usuario, previo su tratamiento, cumpliendo con los parámetros técnicos que dicte la Autoridad Ambiental Nacional (Nacional, 2014).

### 2.5.3 Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente

La presente norma técnica ambiental es dictada bajo el amparo de la Ley de Gestión Ambiental y del Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental...

La presente norma técnica determina o establece: a) Los límites permisibles, disposiciones y prohibiciones para las descargas en cuerpos de aguas o sistemas de alcantarillado; b) Los criterios de calidad de las aguas para sus distintos usos; y, c) Métodos y procedimientos para determinar la presencia de contaminantes en el agua (TULSMA, libro VI)..

## 3. Materiales y Métodos

En esta sección se describe la metodología que se efectuó para la caracterización de agua procedente de la industria de extracción de aceite crudo de palma, de igual manera los equipos y métodos utilizados. De igual manera se describe la realización de los experimentos a escala laboratorio.

### 3.1 Muestreo

La recolección de datos (balance hídrico) y el efluente se efectuó en una industria extractora de aceite crudo de palma ubicada en Quinindé. Se recolectó agua del proceso industrial de extracción de aceite y del proceso de tratamiento de agua. Los efluentes se almacenaron en recipientes de 1 litro, en botellas ámbar. Estas botellas son de vidrio, lo cual permite que no haya reacción química con el contenido, además el color ámbar evita que la radiación solar no ingrese al líquido. Los efluentes muestreados fueron: agua cruda (río), agua ablandada, agua

sin ablandar, agua de condensados de las calderas y agua del efluente de la Laguna No. 9 del PTAR.

### 3.2 Materiales

A continuación, en la tabla 4 se detallan los equipos y reactivos utilizados en esta investigación para realizar la caracterización de agua residual.

Se caracterizaron los siguientes parámetros: pH, oxígeno disuelto (mg/L), conductividad ( $\text{mScm}^{-1}$ ), turbidez (NTU), DQO (mg/L), amonio (mg/L), nitrato (mg/L), cloruro (mg/L), sulfatos (mg/L) y fosfato (mg/L), alcalinidad (mg/L) caudal, porosidad.

Además se indica los materiales utilizados para la elaboración del sistema de tratamiento con filtro y aire.

**Tabla 4.** Materiales utilizados en la caracterización y elaboración del filtro

<b>PARÁMETROS</b>	<b>MATERIALES</b>
Medición de pH	Tríodo de pH Thermo Specific pH Electrode, Orion (Beverly, MA 01915, USA )
	Buffers de calibración de pH de 7, 4, y 10 (Thermo Scientific, Beverly, MA, USA)
Medición de Turbidez	Turbidímetro AQUAfast AQ4500 (Thermo Scientific, Beverly, MA, USA)
Medición de oxígeno disuelto	Electrodo de oxígeno disuelto ( Thermo Scientific)
Medición de conductividad	Electrodo de conductividad (Thermo Specific pH Electrode, Orion)(Baverly, MA 0915, USA)

**Tabla 4.** Materiales utilizados en la caracterización y elaboración del filtro

<b>PARÁMETROS</b>	<b>MATERIALES</b>
	Estándar de conductividad (1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) (Thermo Specific pH Electrode, Orion) (Beverly, MA 01915, USA)
Medición de	Probeta de 100 ml
porosidad	Soporte universal
	Pipeta de 25 ml
Medición de	Solución de digestión ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) y ácido sulfúrico concentrado ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )
Demanda	con nitrato de plata a 95-97 % (Reactivo H.V.O, Ecuador)
Química de	Vortex Deville 59A (Denville Scientific Inc., USA)
Oxígeno	Espectrofotómetro Spectronic 20D+ (Thermo Fisher Scientific Inc. Altham, MA, USA)
Medición de	Cloruro de Amonio $\text{NH}_4\text{Cl}$ (Reactivos H.V.O, Ecuador)
Nitrógeno	Electrodo selectivo de amonio (Thermo Specific Ion Selective Electrode, ISE Orion (Beverly, MA 01915, USA))
Amoniacal	Electrodo de referencia (Thermo Specific pH Electrode, Orion (Beverly, MA 01915, USA))
	Multiparámetro (Orion)
Medición de	Nitrato de Sodio $\text{NaNO}_3$
Nitrato	ISA nitrato Orion (Beverly, MA 01915, USA)
	Electrodo selectivo de nitrato (Thermo Specific Ion Selective Electrode, ISE Orion (Beverly, MA 01915, USA))

**Tabla 4.** Materiales utilizados en la caracterización y elaboración del filtro

<b>PARÁMETROS</b>	<b>MATERIALES</b>
Medición de cloruro	ISA cloro Electrodo de cloruro (Thermo Specific Ion Selective Electrode, ISE Orion (Beverly, MA 01915, USA)) Cloruro de sodio NaCl (Reactivos H.V.O, Ecuador)
Medición de sulfatos	Triodo de pH (Thermo Specific pH Electrode, Orion (Beverly, MA 01915, USA)) Horno (40 GC Lab Oven, Chicago, Illinois, USA) Filtro de microfibra de vidrio 934-AH (Whatman, Piscataway, NJ, USA) Equipo de filtración Cloruro de Bario (BaCl <sub>2</sub> . 2H <sub>2</sub> O) (Reactivo H.V.O, Ecuador)
Medición de alcalinidad	NaOH 0.10 N (Reactivos, H.V.O, Ecuador) H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0.02 N (Reactivos, H.V.O, Ecuador) Probeta de 100 ml
Medio Basal mineral (MBM)	NaHPO <sub>4</sub> (Reactivos, H.V.O, Ecuador) NH <sub>4</sub> Cl (Reactivos, H.V.O, Ecuador) MgSO <sub>4</sub> . 7 H <sub>2</sub> O (Reactivos, H.V.O, Ecuador) CaCl <sub>2</sub> .2 H <sub>2</sub> O (Reactivos, H.V.O, Ecuador) Extracto de levadura (Reactivos, H.V.O, Ecuador) NaNO <sub>3</sub> (Reactivos, H.V.O, Ecuador) NaHCO <sub>3</sub> (Reactivos, H.V.O, Ecuador)

**Tabla 4.** Materiales utilizados en la caracterización y elaboración del filtro

PARÁMETROS	MATERIALES
	Glucosa (Reactivos, H.V.O, Ecuador )
Bioreactor	Recipiente verde (Kywi) y tapas de plástico.
	Pecera de vidrio, divisiones de vidrio, tapa de vidrio.
	Arena (1mm - 0.7 mm)
	Mangueras (7/16'' OD x 5/16''ID y 7/8'' OD x 5/8'' ID)
	Llave de agua (Toyo)
	Bombas de aireación (Air-Pump SC7500)
	Bomba sumergible de agua (Evans 30W)

**Tabla 5.** Parámetros medidos para la caracterización de agua de los procesos de extracción de aceite de palma en río, purgas de caldera, condensados, ablandada, PTAR y monitoreo del reactor

Parámetros	Unidades	Caracterización de	Monitoreo del estudio
		agua de los diferentes procesos	de aireación y filtración
pH		X	X
Oxígeno disuelto	mg/L	X	X
Conductividad	mS/cm	X	X
Turbidez	NTU	X	X
DQO	mg/L	X	X
Amonio (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	mg/L	X	X

**Tabla 5.** Parámetros medidos para la caracterización de agua de los procesos de extracción de aceite de palma en río, purgas de caldera, condensados, ablandada, PTAR y monitoreo del reactor

Parámetros	Unidades	Caracterización de	Monitoreo del estudio
		agua de los diferentes procesos	de aireación y filtración
Nitrato (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	X	X
Cloruro (Cl <sup>-</sup> )	mg/L	X	X
Sulfatos	mg/L	X	X
Fosfato	mg/L	X	
Caudal	L/h		X
Porosidad			X
Temperatura	°C	X	
Alcalinidad	mg/L	X	X
Sólidos totales	mg/L	X	
Sólidos suspendidos	mg/L	X	
*Sílice, Calcio, Dureza Total	mg/L	X	
*Hierro, Cobre, Manganeso, Zinc	mg/L	X	
*Aceites y grasas	mg/L	X	

(\*Parámetros medidos en laboratorio acreditado CorpLab)

### 3.3 Métodos analíticos

Se describirá los métodos analíticas que se utilizó para la caracterización de agua residual en la planta industrial, planta de tratamiento y desarrollo del sistema de Bioreactor.

**Tabla 6.** Descripción de los métodos de los siguientes parámetros

PARÁMETROS	MÉTODOS
Medición de pH	La determinación de pH de la muestras se realizó de acuerdo al método de referencia SM 4500-H+B (APHA, Standar Methods For the Examination of Water and Wastewater, 2012) usando el multiparámetro Thermo Scientific Orion 5-Star (Thermo Scientific, Beverly, MA, USA) que fue previamente calibrado mediante soluciones buffer con un pH de 4, 7 y 10. Una vez calibrado se introduce el electrodo en la muestra proveniente del reactor de arena en el afluente, efluente y el efluente después de 4 horas.
Medición de Turbidez	La turbidez se determinó empleando el método de referencia EPA 180.1 Rev. 2.0 (EPA).
Medición de oxígeno disuelto	El oxígeno disuelto presente en las muestras de agua se estableció usando el método de referencia SM 4500 O G (APHA, Standar Methods For the Examination of Water and Wastewater, 2012). Una sonda de oxígeno disuelto (Thermo Scientific Orion 5-Star) que fue calibrado mediante air solución (agua destilada). Al estar listo el electrodo se colocó en las muestras y se determinó su valor.
Medición de	La conductividad presente en las muestras se determinó con el

**Tabla 6.** Descripción de los métodos de los siguientes parámetros

PARÁMETROS	MÉTODOS
conductividad	<p>método de referencia SM 2510 B (APHA, Standar Methods For the Examination of Water and Wastewater, 2012). Con el uso del multiparámetro (Thermo Scientific Orion 5- Star) y la célula de conductividad se calibró con el estándar 1413 <math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>. La célula de conductividad se conecta al plug in de conductividad y se procede a medir.</p>
Medición de porosidad.	<p>La porosidad se efectuó se llenó una probeta de 100 ml con 100 ml de arena y se agregó agua destilada con una pipeta poco a poco hasta que el nivel del agua sea igual al nivel de la arena.</p>
Medición de la Demanda Química de Oxígeno	<p>La demanda química de oxígeno se evaluó mediante un método colorimétrico con una longitud de onda de 600 nm utilizando como referencia el método SM 5220 B (APHA, Standar Methods For the Examination of Water and Wastewater, 2012). Para determinar las concentraciones se realizó una curva de calibración a partir de la solución madre de 1000 <math>\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1}</math> de KHP. A partir de la solución madre se realizó dilución de un rango de 50, 100, 250, 500 750 <math>\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1}</math>. Se empleó solución de ácido sulfúrico (<math>\text{H}_2\text{SO}_4</math>) concentrado, ácido sulfúrico con nitrato de plata en una relación de 6g <math>\text{AgNO}_3</math> por kg <math>\text{H}_2\text{SO}_4</math> y solución de digestión con dicromato de potasio (<math>\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7</math>). La digestión de estándares y muestra se realizó</p>



**Tabla 6.** Descripción de los métodos de los siguientes parámetros

PARÁMETROS	MÉTODOS
	<p>con 2.5 mL (estándar o muestra), 1.5 mL de solución de digestión y finalmente 3.5 mL de ácido sulfúrico con nitrato de plata por 2 horas en el horno GC- Series Lab Ovens a 150 °C. Después de que las muestras estuvieron digeridas se midió la absorbancia mediante el espectrofotómetro Spectronic 20D+. Los valores determinados en el equipo se dan en absorbancia por lo que es necesario realizar una curva de calibración establecido por la ley de Beer. En la curva de calibración se determina un RSQ de 0.99. Las muestras del reactor no se diluyeron y se tomó directamente del afluente y efluente del reactor.</p>
<p>Medición de Nitrógeno Amoniacal</p>	<p>El amonio presente en la muestras de agua se determinó empleando un electrodo selectivo de amonio Orion (Thermo Scientific, Beverly, MA, USA) y un electrodo de Referencia Orion (Thermo Scientific, Beverly, MA, USA) a partir del método de referencia SM 4500-NH<sub>3</sub> D (APHA, Standar Methods For the Examination of Water and Wastewater, 2012). La curva de calibración se empleó a partir de una solución madre de 1000 mg/L NH<sub>4</sub><sup>+</sup> realizado con cloruros de amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>Cl). A partir de la solución se realizó un rango de estándares de baja concentración de 1, 2.5, 5, 7.5, 10 mg NH<sub>4</sub><sup>+</sup> L<sup>-1</sup> y un rango de alta concentración de 100, 250, 500, 750 y</p>

**Tabla 6.** Descripción de los métodos de los siguientes parámetros

<b>PARÁMETROS</b>	<b>MÉTODOS</b>
	1000 mg NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> L <sup>-1</sup> . Para mayor detalle se encuentra en el anexo.
Medición de Nitrato	La medición de nitrato se realizó empleando el método de referencia SM 4500 NO <sub>3</sub> D (APHA, Standar Methods For the Examination of Water and Wastewater, 2012) con un electrodo selectivo de nitrato (Thermo Scientific, MA, USA). La curva de calibración fue realizada utilizando estándares con un rango de 1, 2.5, 5, 7.5, 10, 25, 50, 75, 100, 250, 500, 750, 1000 mg/L NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> . Los estándares se prepararon a partir de la solución madre de 1000 mg/L NaNO <sub>3</sub> . En el anexo se especifica a mayor detalle.
Medición de cloruro	La determinación de cloruro presente en el agua residual se efectuó empleando un electro selectivo de cloruro Orion (Thermo Scientific, Beverly, MA, USA) con el método de referencia ASTM D512-89 (99) (C) (ASTM). Se realizó una curva de calibración efectuando un rango de estándares de 100, 250, 500, 750 y 1000 mg Cl <sup>-</sup> , a partir de una solución madre de 1000 mg/L de cloruro de sodio.
Medición de sulfatos	La medición de sulfato se realizó utilizando el método de referencia SM 426 C (APHA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 2012) con 25 ml de muestra. El pH de la muestra se ajustó a 2 o menor a 3 con HCl al 30 %. Con el pH indicado se

**Tabla 6.** Descripción de los métodos de los siguientes parámetros

<b>PARÁMETROS</b>	<b>MÉTODOS</b>
	aplicó 25 ml de 0. 1M de cloruro de bario ( $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) a la muestra. La mezcla se deja reposar por 1 hora. En el anexo se especifica la determinación de la mismo.
Medición de ST y SV	Se utilizó el método gravimétrico (2540-B)
Determinación de caudales	Se toma una probeta de 500 ml. Con agua de la manquera se toma el tiempo que toma la probeta en llenarse a 500 ml, evitando mover la llave de paso. Se repite el procedimiento regulando la llave de paso que se dirige a la probeta hasta tener el caudal deseado. Una vez obtenido el caudal se repite las mediciones por triplicado.
Medición de alcalinidad	La acidez/alcalinidad se realizó con el método de referencia 2320 B (APHA, 2012). Se mide la alcalinidad para las muestras que tengas pH mayor a 6. 50 ml de muestra se titula con $\text{H}_2\text{SO}_4$ 0.02N hasta que el pH disminuya a 4.5.
Medio Basal mineral (MBM)	$\text{NH}_4 \text{Cl}$ (280), $\text{Mg SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (626), $\text{CaCl}_2$ (10), $\text{NaNO}_3$ (12), $\text{NaHCO}_3$ (3000), glucosa (178.5), $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ (148), elementos traza (1 ml)

### 3.4 Descripción de la instalación del filtro y la descripción de su operación

Se planteó realizar un estudio de filtración de arena, por lo que para realizar el estudio en el laboratorio fue necesario montaje que a continuación se describe.

#### 3.4.1 Tamizado

La arena necesaria para el reactor se tamiza para obtener un tamaño de partícula uniforme; para el filtro se utilizó un tamaño de partícula entre 1 mm hasta 0.5 mm. Una vez obtenido el tamaño deseado de la arena se lavó varias veces y se secó en el horno a 105°C por 12 horas, con la finalidad de retirar impurezas.

#### 3.4.2 Características del inóculo microbiano, Laguna No.9 y medio basal mineral antes del tratamiento

La Tabla 7 indica las características generales del agua que se va a tratar en los Bioreactor y las del inóculo microbiano. El inóculo microbiano proviene de una PTAR de una industria productora de quesos, que realiza desnitrificación y nitrificación (Chamorro, 2014). La composición de  $DQO_{total}$  del inóculo corresponde a 12387 mg/L; como se puede observar existe una gran cantidad de materia orgánica.

**Tabla 7.** Caracterización del inóculo microbiano, laguna no. 9 y medio basal mineral antes del tratamiento

Parámetros	Unidades	Laguna No. 9	Medio basal	Inóculo
pH	mg/L	8.40	7.20	9.00
DQO	mg/L	509	430	12387
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	4.83	10	2.52
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/L	66	93	9.00
Cl <sup>-</sup>	mg/L	392	393	884

### 3.4.3 Montaje del reactor

El ensayo se llevó a cabo en un recipiente de vidrio (0.99 x 0.20 x 0.093 m) que fue previamente lavado y limpiado (Figura 2); luego se colocó los 26 litros de arena de manera uniforme hasta que esté completamente lleno; para el arranque del sistema de filtración se colocó un el tanque de recirculación de agua con 20 litros de medio basal (tabla 6) y 60 mL de inóculo microbiano (tabla 7)



**Figura 2.** Filtro de arena instalado en el laboratorio

El reactor trabajó durante aproximadamente 60 días. El volumen de agua en el filtro de arena se calcula a continuación:

$$V_{arena} = (0.99 * 0.20 * 0.093) = 0.027 m^3 = 26.4 L$$

$$\epsilon \approx 0.4; V_{filtroH2O} = 26.4 * 0.4 \approx 10L$$

Donde  $\epsilon$  es la porosidad de la arena que se obtuvo mediante mediciones en el laboratorio.

$$V_{tanque} = 20 \text{ litro}$$

$$V_{total} = 20 + 10 = 30 L$$

Se alimenta con 1500 ml de agua de MBM y Laguna No. 9 (tabla 7 y Tabla 9) al día en el tanque.

$$\tau_{total} = \frac{30L}{1.5L/d} = 20 \text{ dias}$$

Donde  $\tau_{total}$  es el tiempo de residencia hidráulico total en el sistema.

$$\tau_{filtro} = \frac{10L}{1.5L/d} = 6.67 \text{ dias}$$

$$\tau_{tanque} = \frac{20L}{1.5L/d} = 13.3 \text{ dias}$$

Caudal de recirculación entre el filtro y el tanque, para 4 horas de tiempo de residencia en el filtro de arena. En el filtro la velocidad de flujo para tratamiento en un filtro lento debe ser inferior a 0.25 m/h.

$$Q = \frac{10L}{4h} = 2.67 \frac{L}{h}$$

En la Tabla 8 se presenta un resumen de las características generales del funcionamiento del sistema de filtración. Se indica las características físicas generales del reactor, condiciones iniciales para su funcionamiento y montaje.

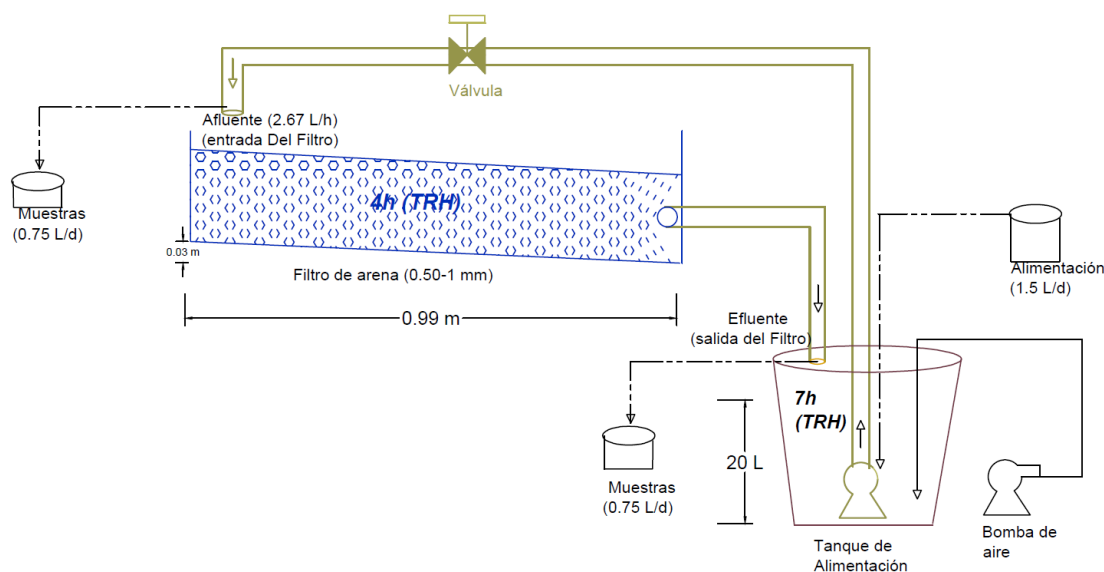
**Tabla 8.** Características generales de funcionamiento del sistema de filtración

Características	Unidad	Valor
Diámetro de arena	mm	1-0.5
Porosidad arena		0.4
Volumen arena	L	26.7
Volumen agua	L	10.7
Volumen agua en tanque	L	20
Volumen total agua	L	30.7
TRH filtro de arena	h	4
TRH tanque	h	7.5
TRH total	h	11.5
Caudal entrada	L/h	2.67
Caudal total	L/d	1.5
Tiempo de residencia total en el sistema de filtración	d	20

El tanque de alimentación del reactor contiene 4 bombas de aireación y mantiene el OD entre 2 a 4 mg/L, la arena presenta una porosidad de 0.4, el volumen de agua en la arena es de 10.7 L, el volumen del tanque aireado es de 20 L generando un volumen total de circulación de

30.7 L; el tiempo de residencia de agua en el filtro de arena es de 4 horas (tiempo que se demora el agua en entrar y salir del filtro una vez) y en el tanque es de 7.5 horas (tiempo que se demora el tanque en alimentar el filtro una sola vez) aproximadamente. Sin embargo, ya que el agua recircula muchas veces, el tiempo de residencia de la alimentación es de 20 días en el sistema de tratamiento (filtro y tanque de aireación). Finalmente el caudal de entrada en el reactor es de 2.67 L/h (44.5 ml/min). El reactor se alimentó con diferentes tipos de aguas: medio basal (durante primeros 20 días), medio basal con agua laguna 9 (20 días), agua Laguna No. 9 (20 días). El caudal de alimentación fue (1500 mL/d- Tabla 9).

El funcionamiento de los reactores y el alcance del mismo fueron evaluados por monitoreos diarios en el tanque de alimentación y en el efluente y afluente del filtro respectivamente (Figura 3) se midieron parámetros físico-químicos, dentro de estos análisis se determinó: DQO, nitrato, amonio, cloruro, sulfato, pH, conductividad, oxígeno disuelto y turbidez (Figura 3).

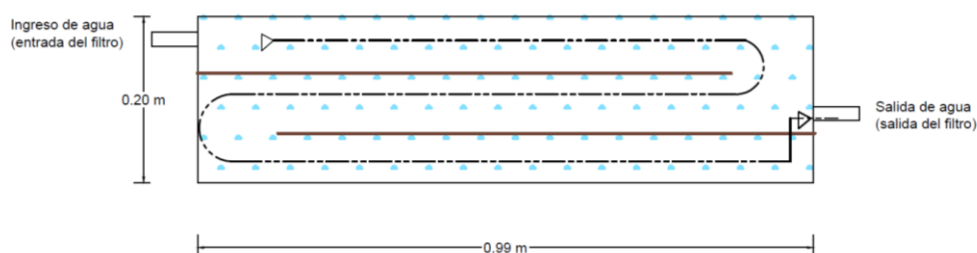


**Figura 3.** Esquema general del sistema de tratamiento a escala laboratorio



En la Figura 3 indica que el sistema de operación funciona en base a una recirculación donde el filtro de arena recibe el afluente de agua (entrada) del tanque de alimentación, el afluente pasa por el lecho de arena con un tiempo de residencia de cuatro horas aproximadamente. Después de las cuatro horas se descarga el efluente (salida) en el mismo tanque de alimentación, repitiéndose el proceso una y otra vez. En el tanque de alimentación hay 20 litros de agua que está en constante aireación con 4 bombas. La aireación permite que el nivel de oxígeno disuelto sea de 2 mg/L a 4 mg/L, este tanque recibe alimentación cada 2 horas, al mismo tiempo que se está alimentando al tanque se procede a retirar la misma cantidad de agua en el canal de salida (efluente), para mantener el volumen constante en el reactor, y para realizar los monitoreos respectivos en el laboratorio. (Más adelante se describirá detalladamente el proceso de alimentación del reactor).

En el filtro de arena se instaló divisiones de vidrio que permite que el flujo de agua recorra por toda su área (Figura 4), de esta manera se aprovechan todo el volumen de arena del reactor. El filtro de arena y el tanque de agua se encuentran cubiertos con tapa de vidrio y de plástico respectivamente, así se evita la evaporación del agua. Para evitar el paso de luz y el crecimiento de algas en el reactor y en las mangueras se los forró con papel aluminio. La válvula instalada sirve para regular el caudal, las mangueras transportan el agua del tanque al filtro gracias a la bomba sumergible.



**Figura 4.** Divisiones de vidrio a través del filtro vista frontal

### 3.4.4 Operación del sistema

El 30 de julio del 2014 comenzó la operación del reactor y finalizó el 27 de noviembre (120 días de operación). En los primeros días de funcionamiento únicamente se pasó agua potable para realizar un pre-lavado a la arena hasta que el efluente salga transparente. A partir del 30 de julio se colocó el medio basal e inóculo. El MBM (medio basal mineral) se realizó con una receta extraída de la tesis de la ingeniera Natazha Valerzo con varias modificaciones, para que tenga las características similares al agua residual de la Laguna No. 9 (Tabla 7). En los primeros días el reactor es inestable en factores como el caudal, el pH y OD por lo que tomó tiempo para la estabilización. Se colocó medio basal y agua potable (1500 ml) cada día y así mantener los 20 litro en el tanque. El pH del reactor aumento de valores neutrales a 9.06 durante los primeros días de funcionamiento debido al inóculo incorporado. Se incorporó estos lodos ya que estos hay generado desnitrificación y nitrificación con éxito en otros ensayos (Chamorro, 2014). El caudal se ajusta a  $(2.67 \text{ L h}^{-1})$  generando un tiempo de residencia de 4 horas en el filtro. Por último, se colocó bombas de aireación en el tanque de recirculación para mantener el OD en niveles entre 2 y 4 mg/L condiciones adecuadas para el crecimiento bacteriano.

Una vez controlado todos los factores en el sistema, el 23 de septiembre opera el reactor constantemente como se indica en la Tabla 9 y se controla el caudal de la alimentación en el tanque, de tal manera, que se trabaje 20 días para cada tipo de alimentación (medio basal, medios basal y Laguna No. 9, y Laguna No. 9).

**Tabla 9.** Control en la alimentación del reactor durante ocho horas

Tiempo	MBM (ml)	MBM/ Laguna No.9 (ml)	Laguna No.9 (ml)
8:00	500	250	250
10:00	250	125	125
12:00	250	125	125
14:00	250	125	125
16:00	250	125	125
Total	1500	1500	1500

La alimentación del reactor se la realizó cada dos horas para simular la operación de descarga de la Laguna No. 9. En los primeros 20 días de seguimiento se colocó 500 ml medio basal a primera hora (8:00 am aprox.), luego se colocó 250 ml más y así sucesivamente hasta finalizar las 8 horas de trabajo y completar los 1500 ml. Este procedimiento se lo realizó diariamente.

Para la investigación se tomó como base y control el medio basal, con la finalidad de estabilizar el reactor y determinar el comportamiento del mismo en los primeros días de montaje. El seguimiento realizado con medio basal se ejecutó diariamente por 20 días, para evidenciar la tendencia y el funcionamiento del mismo. Una vez observado la eficacia del mismo, se optó por monitorear el reactor cada 10 días.

A partir del día 21 se cambió la alimentación colocando 50% de agua de la laguna de la PTAR y 50% de medio basal, el cambio fue paulatino para que las bacterias puedan adaptarse poco a

poco. Se realizó el mismo procedimiento de alimentación, en las primeras horas se colocó 250 ml de medio basal y 250 ml de agua de la Laguna No. 9 de la PTAR de la extractora; posteriormente se alimentó cada dos horas hasta llegar al caudal de 1500 mL/d.

En el día 41 se suprimió el medio basal y se colocó únicamente agua de la Laguna No. 9, con el mismo procedimiento de alimentación, con un monitoreo cada 10 días. Se removió del tanque la misma cantidad de agua que ingresó al tanque para no variar su volumen.

#### 3.4.4.1 Toma de muestra del reactor

La toma de muestra de agua sintética o medio basal de los primeros 20 días del proceso, fue diaria. Luego se comenzó a tomar muestra cada 10 días para monitoreo de las fases posteriores, es decir el proceso a partir del día 21 hasta el final de la experimentación.

Las primeras muestras se tomaron a las 8:00 am, se sacaron 250 ml de la entrada del reactor (afluente) y 250 ml en la salida del reactor (efluente) al mismo tiempo, después de 4 horas se toma la muestra en la salida del reactor (ST). A partir de estos tres puntos se efectúa los análisis de los parámetros previamente mencionados que se indican en la tabla 9.

## 4. Resultados y Discusiones

A continuación se indica los valores obtenidos del balance hídrico consumo de agua de la planta industrial, seguidos por los resultados de la caracterización de la misma y del efluente de agua residual del PTAR (Laguna No. 9). Por último se presenta los resultados del tratamiento avanzado de agua residual realizado a escala laboratorio (filtro de arena).

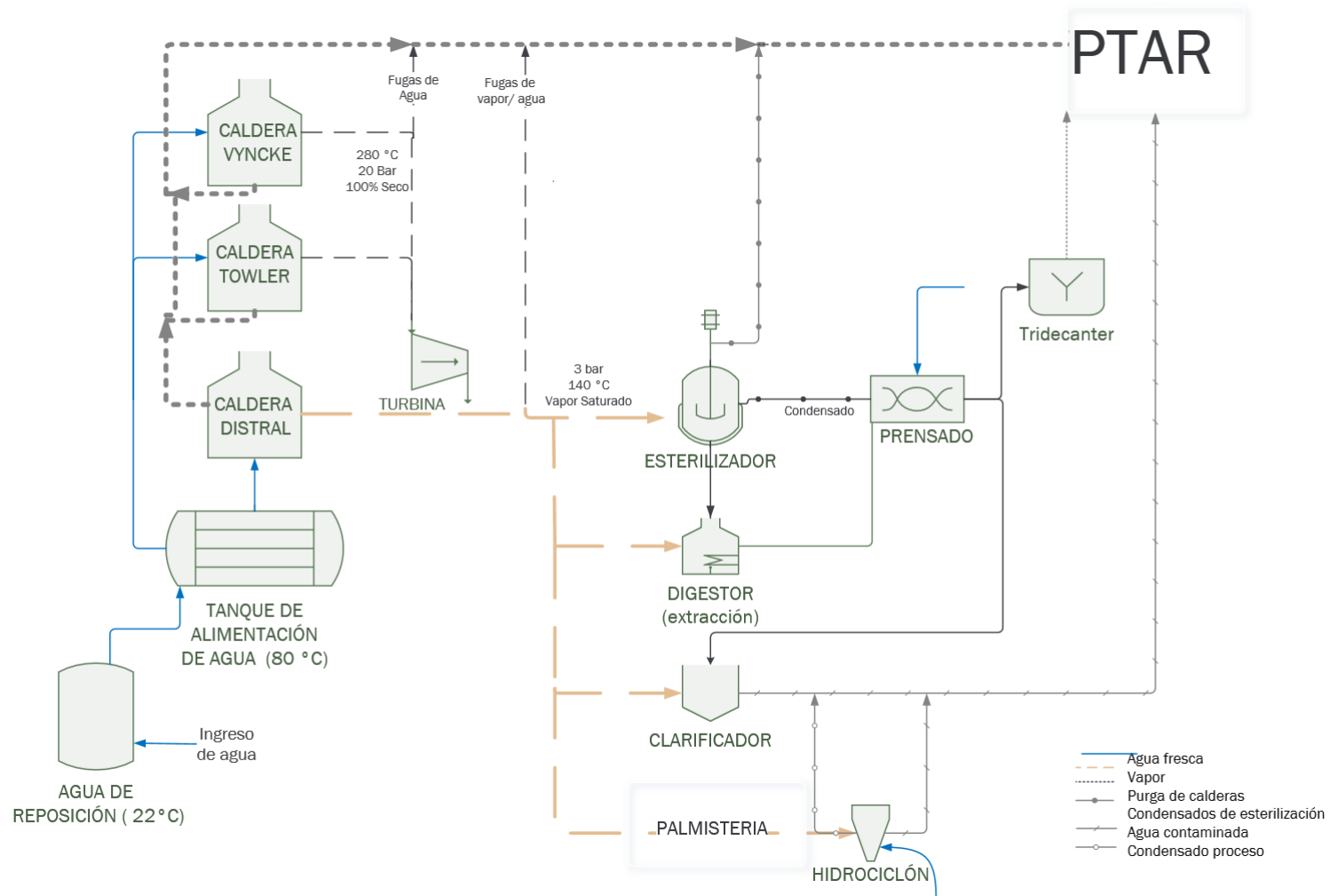
### 4.1 Balance hídrico de la industria extractora de aceite crudo de palma

El balance hídrico permite determinar la cantidad de agua que se consume y se desecha de cada subproceso de la extracción de aceite crudo de palma, además ayuda a identificar las

alternativas ahorro y recirculación de agua. A continuación se describe el consumo de agua los procesos de la extracción.

#### 4.1.1 Sectores principales que consumen agua para la generación de vapor y proceso de producción de aceite crudo

El principal proceso donde se consume agua es en la producción de vapor (calderas). La extracción de aceite de palma requiere cantidades importantes de vapor para la generación eléctrica y para la producción.



**Figura 5.** Esquema de flujo y vapor de agua de la planta extractora de aceite (Erazo & Rosero, 2014)

En la Figura 5 se observa un esquema de la generación eléctrica y de flujo de agua en la planta extractora de aceite. La empresa cuenta con tres calderas, 2 de alta presión y 1 de baja presión. Las calderas Towler y Vyncke (alta presión) tienen las siguientes características: presión 20 bares, temperatura 280°C, capacidad de almacenamiento de agua 14 a 12 m<sup>3</sup>, combustible 100% cascarilla y 90% fibra y cascarilla, temperatura de gases de combustión 194, 33 y 202.26 °C y con O<sub>2</sub> 14.47% y 12.52%, respectivamente (Erazo & Rosero, 2014).

La caldera Distral (baja presión) con capacidad de 5000 kg/h, presión 8 bares, flujo de vapor 8 TPH, combustible 100% fibra, con temperatura gases de combustión de 125,60 °C, capacidad de almacenamiento de agua 14 a 12 m<sup>3</sup> y O<sub>2</sub> 19.70%. Las calderas de alta presión son responsables de la generación de energía eléctrica y la de baja presión para los procesos de extracción de aceite.

La fábrica cuenta con tres turbinas de contra presión, pero se utiliza solamente una turbina que expande el vapor generado por las calderas (Towler y Vyncke) de alta presión. La potencia generada es de 1 GW. El vapor residual de alta presión se utiliza en la planta especialmente en la esterilización (Figura 5), siendo el vapor de baja presión el más utilizado para este proceso. Entre los otros usos del vapor de baja presión también se encuentran los procesos de clarificación, purificación (esterilizador), despulpado (digestor), recuperación y secado de nueces y almendras.

Durante el funcionamiento de estos procesos se genera la purga de las calderas (continua y no continua) y los condensados. Se condensa una vez que pasa al proceso de esterilización y secado de almendra (palmistería). El condensado de esterilización se encuentra contaminado (Anexo 6.3, página 110), aunque se utiliza una parte para el prensado, el resto no se puede

reutilizar por lo que se descargan al PTAR. Los demás procesos de palmistería, clarificador, tridecanter, secado, sedimentador forman agua residual con altas cantidades de carga orgánica (POME).

#### 4.1.2 Cantidad de agua utilizada en la planta extractora de aceite crudo de palma

El agua fresca que utiliza la planta extractora de aceite proviene del estero Saladito de Quinindé. La cantidad de agua que la planta consume para proceso (prensado e hidrociclón), calderas y baños se indica en la siguiente tabla, cabe recalcar que el consumo de agua depende de la fruta procesada.

**Tabla 10.** Registro del consumo de agua en la planta extractora de aceite crudo de palma 2014

Mes	Fruto Procesado ton	Consumo de agua para proceso m <sup>3</sup>	Consumo de agua para calderos m <sup>3</sup>	Consumo de agua para baños m <sup>3</sup>
Enero	20299	2232.89	14209.3	72
Febrero	16974	1867.14	11881.8	72
Marzo	16130	1774.3	11291	72
Abril	16024	1762.64	11216.8	72
Mayo	15998	1759.78	11198.6	72
Junio	13226	1454.86	9258.2	72
Julio	12408	1364.88	8685.6	72
<b>TOTALES</b>	<b>111,059</b>	<b>12,216</b>	<b>77,741</b>	<b>504</b>
<b>CONSUMO PROMEDIO DE AGUA POR TONELADA PROCESADA (m<sup>3</sup>)</b>				<b>0.81</b>

Fuente: Planta Extractora de Aceite Crudo de Palma, 2014



La Tabla 10, se refiere al registro del consumo de agua en los meses de Enero a Julio del 2014 de calderas, proceso y baños para lo cual se tomó en cuenta que el número de trabajadores que laboran en la planta es de 60 a 75 personas por día. Los datos que se observan se basan en comparación con los del año pasado. Se puede identificar que en el mes de enero se dio un mayor consumo de agua. El consumo constante de agua de baños se basa en el número de trabajadores que se encuentran en la planta industria, como los trabajadores no cambia tampoco el uso de agua entre ellos.

En general la industria extractora de aceite crudo de palma utiliza el agua en la planta extractora para la generación de vapor y para el proceso de producción de lavado, esterilizador e hidrociclón. La planta necesita  $0.81 \text{ m}^3$  de agua por tonelada de fruta fresca; en la caldera usa alrededor de  $0.70 \text{ m}^3$  de agua por tonelada y para el prensado y otros utiliza  $0.11 \text{ m}^3$  de agua por tonelada de fruto. Dentro del valor asignado de agua que se usa en las calderas, también está estipulada la cantidad de agua para las cocinas y para los procesos de producción.

#### 4.1.3 Balance de agua de la planta de producción extractora de aceite crudo de palma

Se elaboró un balance que muestra todos los procesos que componen, utilizan y generan agua. Con ayuda del balance de masa se puede identificar los sectores donde más generan agua residual.

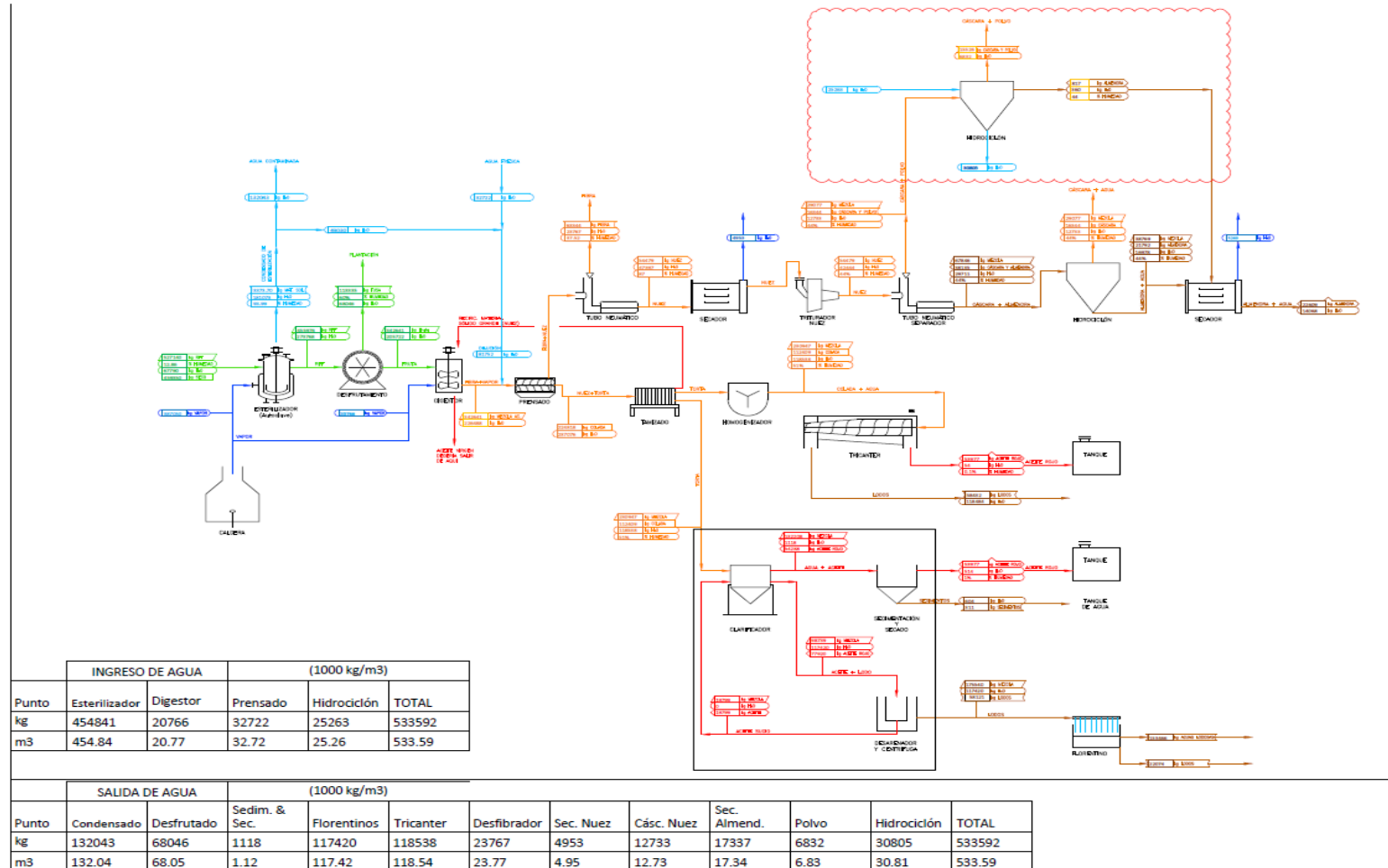
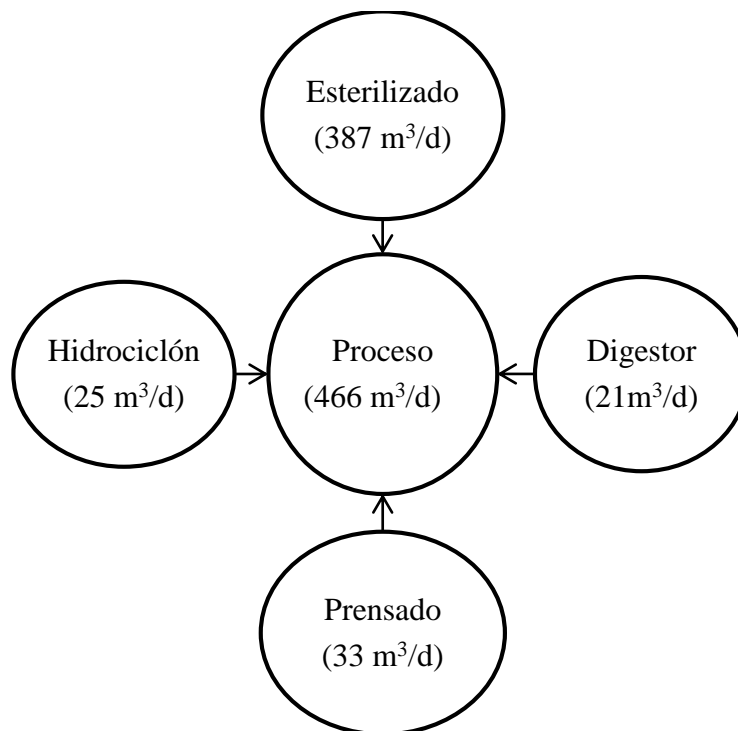
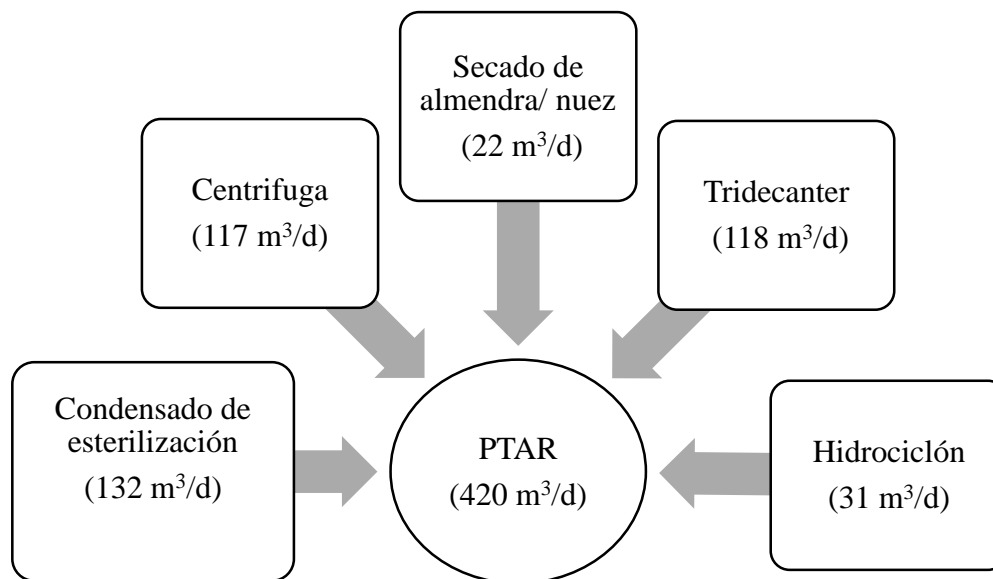


Figura 6. Balance hídrico y de masa de la industria extractora de aceite de palma



**Figura 7.** Resumen del consumo de agua fresca y vapor de agua del proceso de producción  
aceite crudo de palma



**Figura 8.** Resumen de la generación de AR del proceso de producción de aceite crudo de  
palma

En general para todo el proceso de producción de extracción de aceite crudo de palma se requiere  $0.88 \text{ m}^3$  agua fresca/tRFF y se genera  $0.80 \text{ m}^3$  agua residual/tRFF. Con respecto a la extractora de aceite crudo de palma en Colombia Central S.A. Se utiliza  $0.82 \text{ m}^3$ /tRFF (Rueda, Gonzales, & Cardenas, 2009) valor muy similar a lo obtenido en el balance.

En la esterilización para poder cocinar 1 tonelada de RFF es necesario 1 tonelada de vapor de agua, si existen más toneladas de fruta procesada habrá mayor consumo de agua y por lo tanto habrá más generación de agua residual. En otros estudios se ha determinado que en general una tonelada de vapor de agua se usa en el proceso de esterilización para una tonelada de fruta fresca (Ridzuan, et al., 2013).

En el proceso se utiliza agua en el prensado, donde se trabaja con 10 toneladas de fruta/hora por lo que se utiliza alrededor de  $82 \text{ m}^3$ /d de agua que proviene de los condensados de esterilización ( $49 \text{ m}^3$ /d) y de los ríos ( $33 \text{ m}^3$ /d) (Figura 6 y Figura 7), en la planta extractora existen 5 prensas: 2 prensas con una capacidad de 15 toneladas y 3 prensas con 10 toneladas de capacidad, la empresa únicamente utiliza 3 de las 5 prensas por lo cual también utiliza solo 3 digestores. El agua fresca que se utiliza son 387, 21, 33, 25  $\text{m}^3$ /d (Figura 8) en el esterilizador, digestor, prensado, hidrociclón, respectivamente.

El agua fresca utilizada para el proceso de producción se contamina y se transporta hacia la planta de tratamiento de agua residual. Se genera 157, 1, 117, 8, 118, 5  $\text{m}^3$ /d condensado de esterilización, sedimentado y secado de aceite rojo, clarificador, secado de almendra y nuez, tridecanter e hidrociclón, respectivamente (Figura 9). Aproximadamente  $420 \text{ m}^3$ /d de agua contaminada se descarga hacia las piscinas de tratamiento. Con el balance se puede observar que hay menos agua que sale a las PTAR de la que entra, esto se debe a que el resto del agua

(46 m<sup>3</sup>/d) se encuentra en la tusa, racimos, cascaras y polvo de la fruta, aparte el aceite contiene porcentaje de humedad que se van en las plantaciones, calderas, ensacados y almacenamiento respectivamente.

#### 4.2 Caracterización de agua en los procesos de extracción de aceite de crudo de palma, agua de río y agua residual tratada en la planta de tratamiento

A continuación se presenta la caracterización del agua realizada a diferentes en procesos de la planta extractora.

##### 4.2.1 Caracterización de agua utilizada y generada en las calderas de la industria extractora de aceite de palma

En estos resultados, se presenta las características del agua cruda, ablandada, de condensados de calderas y purga continua de la caldera.

**Tabla 11.** Caracterización de río, agua ablandada, condensados de procesos y purga continua de calderas

Parámetros	Unidades	Agua de río	Agua ablandada	Condensado proceso	Purga continua caldera	ASME
Hierro	mg/L	1.05	0.18	0.48	0.26	0.1
Sílice	mg/L	< 0.1	<0.1	<0.1	<0.1	150
Calcio	mg/L	5.82	<2	<2	3.1	-
Dureza Total	mg/L	23.8	< 5.0	7.02	31.7	0.3
Conductividad,	μS/cm	48	57	1.86	1867	3500

Como se puede observar las concentraciones de hierro, sílice, calcio y dureza total, del río, el agua ablandada y los condensados varían significativamente, es importante determinar estos parámetros para identificar la eficiencia de la operación de las calderas de vapor, que dependen principalmente de la calidad de agua con la que se alimenta a las mismas.

La concentración de sílice en el río, en el agua ablandada, condensados y purga continua de calderas está por debajo de 2 mg/L, el sílice produce incrustaciones y un recubrimiento duro y vidrioso en las superficies internas de las calderas, provocando que se depositen en los alabes de las turbinas una vez evaporizados. La Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME) menciona que las concentraciones de sílice en el agua de calderas deben ser menor 150 mg/L (ASME, n.d.); según la tabla el valor medido no representa un problema para el funcionamiento de los mismos.

La dureza ( $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{MgSO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ) obtenida en los análisis es de 23 mg/L para el río, 31mg/L de la purga continua de caldera, menor a 7 mg/L para el agua ablandada y los condensados. Este valor está fuera de los límites comprendidos en el agua de alimentación propuesto por la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME), que especifica un rango límite de alimentación de dureza de 0.300 mg/L como  $\text{CaCO}_3$ , en el proceso, valores mayores de dura esto provoca incrustaciones en los tubos de las calderas (Yanez). La dureza en el agua se constituye de impurezas como sólidos disueltos, gases disueltos y sólidos suspendidos, cuando las calderas empiezan a calentarse, las impurezas se precipitan más rápido por su menor solubilidad a temperaturas altas, generándose así incrustaciones (CONUEE, 2009). La dureza en el agua normal puede variar desde algunas partes por millón hasta más de 500 mg/L (Orellana, 2005). En el caso del agua cruda presente en la planta extractora de aceite, la dureza es de 23.8 mg/L dentro de los valores de agua normal; la purga

continua de los calderos permite identificar un mecanismo para la operación limpia y segura. Además, el agua que se descarga de los calderos contiene gran cantidad de energía y para ahorrar la energía de la misma es importante mantener la cantidad de ciclos de concentración permitidos en el agua de las calderas, por lo tanto es preciso incrementar en cierto grado la cantidad de sólidos disueltos (CONUEE, 2009).

Los condensados presentan un dureza total de 7.02 mg/L menor a la del río, por lo que, con un tratamiento previo se podrían retornar los condensados para ahorrar energía. Sin embargo, un problema que se ejerce al retornar los condensados es la producción de corrosión debido a la presencia de oxígeno y de bióxido de carbono. El oxígeno se encuentra disuelto en el agua y el bióxido de carbono se genera por la transformación de bicarbonatos contenidos en el agua, cuando la temperatura sube, se convierten en carbonatos (CONUEE, 2009). El valor obtenido es menor a la concentración del río, por lo que aún se puede recircular el agua de los condensados al tanque de alimentación de los calderos, previamente realizando un tratamiento similar al del río.

Con respecto al hierro, el contenido en los condensados es de 0.48 mg/L, la presencia de hierro en el agua forma depósitos que perjudican en la transferencia de calor (Pardillos, 2010). Según el ASME los límites de hierro del agua de alimentación para calderas debe ser menor a 0.1 mg/L. El agua ablandada contiene un valor de 0.18 mg/L por lo que se encuentra ligeramente sobre el rango recomendado por la ASME. Para la EPA el límite permisible de hierro para cuerpos de agua dulce es 1000 µg/l (1 mg/L), según los resultados el río en Quinindé contiene 1.05 mg/L valor que sobrepasa lo sugerido por la EPA. En el TULSMA el límite permisible para descargas a cuerpos de agua dulce es 10 mg/L rango superior a lo

propuesto por el EPA, con respecto al TULSMA los valores obtenidos (río, agua ablandada, condensados) están dentro del límite de la legislación.

Estos condensados tienen gran cantidad de energía y pueden ser utilizados una vez se eliminan los gases disueltos, siempre que sea posible son almacenados en un tanque llamado tanque de condensados y retornados a las calderas.

#### 4.2.2 Caracterización de agua en la industria extractora de aceite de palma y efluente de la planta de tratamiento de agua residual

En estos resultados, se presenta las características del agua cruda, ablandada, sin ablandar y Laguna No. 9. Los valores se compararon con el Texto Unificado Legislación Secundaria y Medio Ambiente para descargas a cuerpos de agua dulce donde se determina si los valores de agua son los necesarios para llegar a la calidad deseada para la recirculación.

**Tabla 12.** Características de parámetros físico-químicos del agua de producción, agua ablandada, agua de proceso sin ablandar y agua de laguna no.9

Parámetros de muestreo	Unidades	Agua de río	Agua ablandada de caldero	Agua de proceso sin ablandar	Laguna No.9	TULSMA
pH		7.4	7.3	6.6	8.4	5-9
Temperatura	(°C)	28	28	28	31.2	< 35
Conductividad	µS/cm	48	57	59	2464	-
Turbidez	NTU	5.74	1.6	3.73	15.5	-
O <sub>2</sub> disuelto	mg/L	4.6	4.9	4.8	1.2	-



**Tabla 13.** Características de parámetros físico-químicos del agua de producción, ablandada, agua de proceso sin ablandar y agua de laguna No.9

Parámetros	Unidades	Agua de río	Agua ablandada de caldero	Agua de proceso sin ablandar	Laguna No.9	TULSMA
DQO	mg/L	5	-	35	509	250
ST	mg/L	63	55	62	837	1600
SV	mg/L	73	73	55	103	-
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	13	10	13	5	
N- NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	3	2	3	1	10*
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/L	0.27	0.08	0.50	67	-
N- NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/L	0.21	0.06	0.39	52	15.0**
Cl	mg/L	2	7	8	392	1000
alcalinidad	mg/L	80	20	20	760	-

\*Nitritos/Nitratos expresado como N\*\* Límite máximo permisible de TKN expresado como N

El pH es un parámetro fundamental en el crecimiento y selección de los microorganismos en el proceso de degradación, el pH presente en la Laguna No. 9 es de 8.4 es decir que permite la existencia de microorganismos; de acuerdo a la legislación el rango permisible se encuentra entre 5 y 9, tabla No. 12 del TULSMA (Ministerio del Ambiente) por lo cual vemos que el agua de la laguna cumple la norma de descarga a cuerpos de agua dulce con respecto al pH.

El pH de las calderas es el adecuado (7.3-6.6) y se mantiene en un rango aceptable para la vida acuática. Es importante el control del pH para evitar problemas de corrosión (ácido) y

depósitos (básicos) (CONUEE, 2009). En estudios realizado por (Cruz, 1996), el pH de los esteros está entre 7.8 a 7.5 comparado al pH de 7.3 del agua cruda obtenida de los esteros vemos que este es ligeramente menor.

La temperatura promedio es de 28°C, menos en la Laguna No. 9 que con 31.2°C es ligeramente más alta. Según la Tabla 12 Anexo 1 del Libro VI del TULSMA, el límite de descarga debe ser menor a 35°C, y se puede observar que PDAQ se encuentra dentro del rango.

La conductividad del agua cruda de estero es de 48  $\mu\text{S}/\text{cm}$  sin embargo el de la Laguna No.9 es de 2464  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La conductividad de la Laguna No. 9 es alta, lo que indica una elevada concentración de iones y sólidos disueltos a causa de los procesos que ocurren en la planta extractora. Cabe mencionar que no existe regulación de este parámetro en la legislación ambiental ecuatoriana, sin embargo, el valor es menor al requerido por la ASME de 3500  $\text{mS}/\text{cm}$  (Tabla 11). Por otro lado, la conductividad del agua potable es menor 2500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En estudios realizados por la Secretaría Nacional del Agua indican que la conductividad de esteros y ríos oscilan entre 37. 5 a 60. 3  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Agua, 2010); el agua del estero tiene una calidad similar a los estudios realizados por la Secretaría Nacional del Agua.

La turbidez es menor a 5 NTU en el estero y en el agua ablandada, a diferencia de la turbidez del agua de la Laguna No.9 de la PTAR que tiene un valor de 15.5 NTU; este valor se debe a la materia insoluble en suspensión o dispersión coloidal (EPA, Wastewater Technology Fact Sheet Anaerobic Lagoons , 2002), que no se retiró durante los anteriores procesos de tratamiento; en la legislación no se encuentra valores máximos de descargas.

El oxígeno disuelto de la Laguna No .9 tiene una valor de 1.2  $\text{mg}/\text{L}$ , debido a la carga orgánica y presencia de nutrientes disueltos en el agua, lo cual provoca el crecimiento de algas. Para la

vida acuática (peces y otros microorganismos) el agua debe tener entre una valor superior 4 mg/L de oxígeno disuelto, si se encuentra a un rango de 0 a 4 mg/L se presenta una condición de hipoxia (falta de oxígeno) donde desaparecen los organismos y especies sensibles (Guillermo, 2007). El agua del río y el agua ablandada antes del proceso tiene oxígeno disuelto de 4 mg/L.

Con respecto a la Demanda Química de Oxígeno (DQO) los valores del agua de río, ablandada y sin ablandar están bajos en comparación a la de la Laguna No.9. El agua del río, la ablandada y la sin ablandar (cruda) son de buena calidad pues tienen bajo contenido de materia orgánica (menor a 30 mg/L); mientras que la Laguna No. 9 presenta una concentración de 509 mg/L sobrepasando el límite de la legislación ambiental de 250 mg/L.

El valor de los Sólidos Totales y Volátiles de la laguna No. 9 es considerablemente alto el de la Laguna No. 9 con Sólidos Totales de 837 mg/L, esta generación de sólidos se da por los sedimentos y lodos producidos por la actividad biológica.

El nitrógeno es un elemento que se encuentra en abundancia en la naturaleza, estos elementos son esenciales para el crecimiento de microorganismos, plantas y animales conocidos como nutrientes o bioestimulantes (Sánchez, Herzig, Peters, Márquez, & Zambrano ); el nitrógeno en la Laguna No. 9 se encuentra como nitrógeno amoniacal ( $\text{N-NH}_4^+$ ) y nitrato ( $\text{N-NO}_3^-$ ) con los valores de 52 mg/L y 1.1 mg/L respectivamente. El pre-tratamiento aeróbico del efluente de la extractora de aceite de palma (POME) reduce grandes cantidades de  $\text{N-NO}_3^-$  y  $\text{N-NH}_4^+$ , en algunas situaciones el POME se ha descargado directamente a tierra agrícola, usualmente a plantaciones de aceite de palma. La aplicación del efluente mejora el suelo y contenido de agua, pero no está comprobado aún si la aplicación del POME altera la fertilidad del suelo.(Agamuthu, Tan, & Shaiful, 1986).

El amonio presente en el agua se transforma rápidamente en nitrito y posteriormente a nitrato por los microorganismos, esta reacción de nitrificación está limitada por la baja concentración de oxígeno presente en la Laguna No. 9. El valor de nitrato en el efluente de la Laguna No. 9 es de 1.08 mg/L muy inferior a lo considerado peligroso para la vida acuática, si el agua residual alcanza concentraciones superiores a de 90 mg/L de nitratos (Sánchez, Herzig, Peters, Márquez, & Zambrano ). Por otro lado, se puede apreciar que el amonio con valores de  $52 \pm 0.37$  mg/L N-  $\text{NH}_4^+$  y  $1 \pm 1.04$  mg/L N- $\text{NO}_3^-$  no cumple con los límites máximos permisibles de 15.0 mg/L TKN para descarga a cuerpos de agua dulce. El resto de mediciones (agua ablandada, agua sin ablandar y el agua cruda) presenta con valores menores a 3 mg/L N- $\text{NO}_3^-$  y menores a 1mg/L en N- $\text{NH}_4^+$  no representan peligro respecto a lo estipulado por la OMS, donde la concentración máxima permisible para agua potable de  $\text{NO}_3^-$  es de 44 mg/L. La concentración de cloruro en el agua antes de ablandar, agua cruda, agua sin ablandar y agua de la Laguna No.9 es de 1.9, 6.6, 7.6, 128 mg/L respectivamente, valor que cumple con la legislación ambiental.

Según la caracterización realizada, se aprecia que los valores donde existe mayor problema son las concentraciones de DQO y concentración de amonio que sobrepasan la norma (TULSMA).

**Tabla 14.** Caracterización de metales y aceites y grasas de las laguna no. 9 y no. 10

	Unidades	Laguna No. 9	Laguna No. 10	TULSMA
Aceites y grasas	mg/L	< 20	< 20	0.3
Cobre	mg/L	< 0.1	< 0.1	1
Manganeso	mg/L	< 0.05	< 0.05	2
Zinc	mg/L	0.07	< 0.05	5

La Tabla 14 indica la concentración de los metales Cobre, Manganeso y Zinc además de aceites y grasas de las últimas lagunas provenientes de la PTAR de extractora. Los valores presentes en la tabla no sobrepasan los límites estipulados por la legislación.

En la Laguna No. 9, los aceites y grasas se encuentran por debajo de los 20 mg/L; el término aceites y grasas es comúnmente usado para grasas, aceites, ceras y otros componentes similares encontrados en el agua residual (Tchobanoglous, Burton, & Stensel, 2003). Si la concentración de grasas no es removida del agua residual antes de ser descargada, puede generar problemas a la vida biológica y crear películas sobre la superficie del agua (Strenstrom, Silverman, & Bursztynsky, 1997). Además, la presencia de aceites y grasas puede ocasionar daños en la planta de tratamiento de aguas residuales, provocando una reducción en la tasa de transferencia de oxígeno, dificultad en la sedimentación, la flotación de lodos, taponamientos y aparición de malos olores (Cammarota & Freire, 2006).

Cantidades trazas de metales pesados como cadmio, cromo, cobre, hierro, plata, manganeso, mercurio, níquel y zinc son constituyentes de importancia en el agua, estos metales son

necesarios para el crecimiento microbiano además de ser limitantes para el crecimiento de algas. Sin embargo, los mismos elementos metálicos en concentraciones elevadas son considerados contaminantes y pueden ser tóxicos (Tchobanoglous, Burton, & Stensel, 2003).

Los metales analizados fueron cobre (Cu), zinc (Zn) y manganeso (Mn), la importancia de estos metales pesados radica también en su propiedad de acumulación en el agua y suelos a largo plazo y una complicada remoción de los mismos (Siebe, 1997). Es importante conocer la cantidad de cobre presente en el agua, ya que permite identificar si son adecuados en aplicaciones agrícolas (Méndez, Rodríguez, & Palacios, 2000), los valores de cobre adecuados en el suelo generalmente son de 2 y 250 mg/L (ATSDR, 2004) en cuanto a la legislación nacional vigente, la concentración de cobre para descargas a cuerpos de agua dulce no debe ser mayor a 1 mg/L, condición que no se sobrepasa valores de 0.24 mg/L.

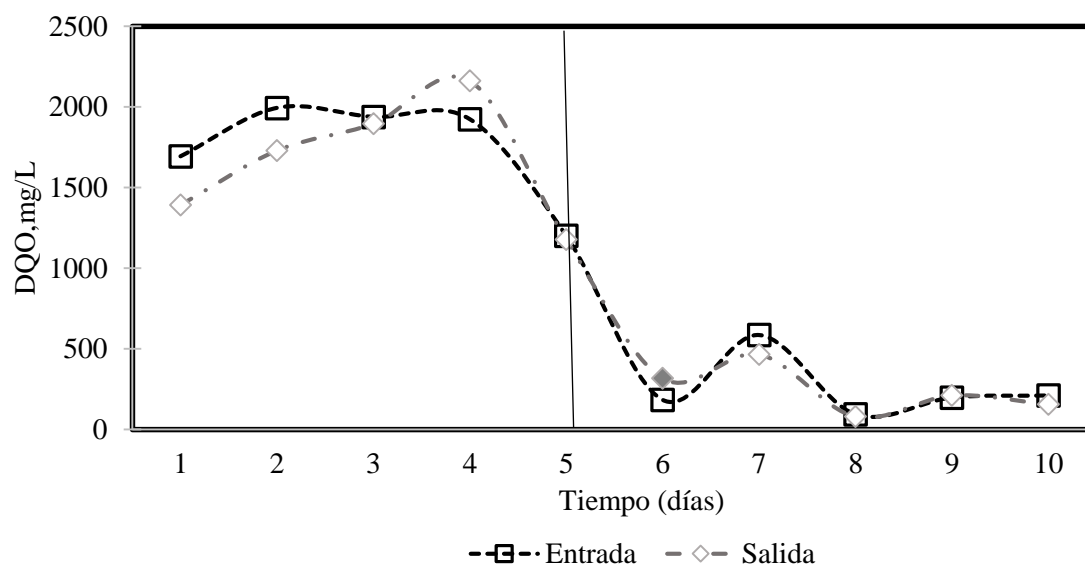
Los compuestos de manganeso existen de forma natural en el ambiente como sólidos en el suelo y pequeñas partículas de agua, mientras que en el aire están presentes en las partículas de polvo (Lenntech, 2014). El manganeso representa un peligro tanto para humanos, animales y plantas, por lo que es importante evitar aumentar la concentración presente del mismo; el manganeso es un micronutriente necesario para el crecimiento microbiano (Tchobanoglous, Burton, & Stensel, 2003). La cantidad que alcanza en la lagunas No. 9 y No. 10 tiene un valor de 0.07 mg/L y 0.05 mg/L respectivamente, su presencia en el agua no atribuye ningún riesgo porque el valor obtenido no representa un peligro (Lenntech, 2014); comparando estos valores con la legislación nacional evidenciamos que la descarga es inferior al límite establecido de 5mg/L.

### 4.3 Bioreactor

Debido a la carga contaminante y a las concentraciones elevadas de amonio encontradas en la caracterización de la Laguna No. 9, para realizar una recirculación es necesario aplicar un tratamiento adicional que se da mediante la filtración de arena con flujo lento y un tanque con aireación extendida. Es así que se planteó realizar un estudio de filtración de arena para eliminar los valores obtenidos que a continuación se indican.

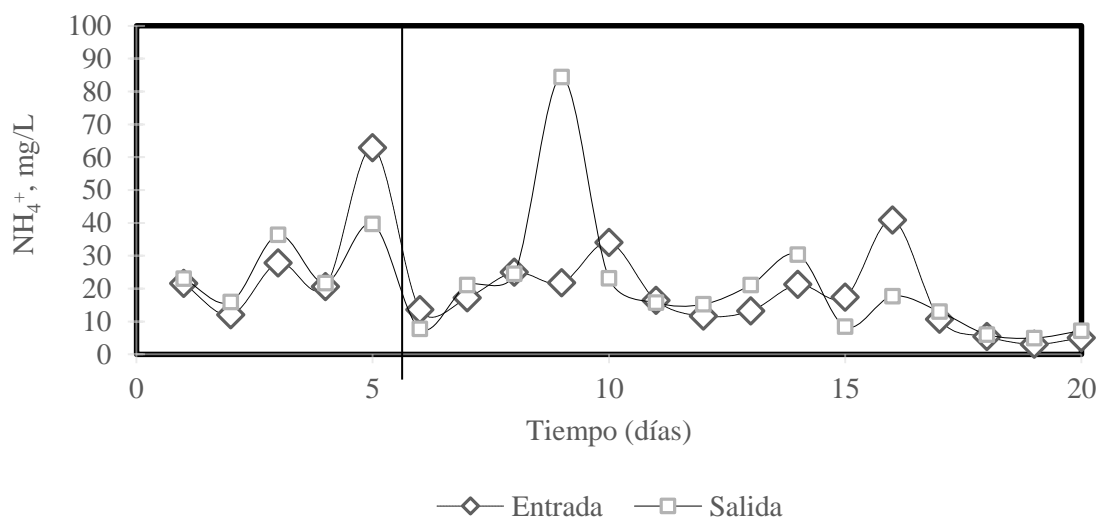
#### 4.3.1 Caracterización de entrada y salida del reactor sin aireación y con aireación.

A continuación se presentan los primeros análisis realizados en el bioreactor (filtro de arena y tanque sin airear) sin aplicación de oxígeno extra (bombas de aireación). La alimentación se realiza diariamente con medio basal mineral y agua, para mantener el volumen constante del tanque.



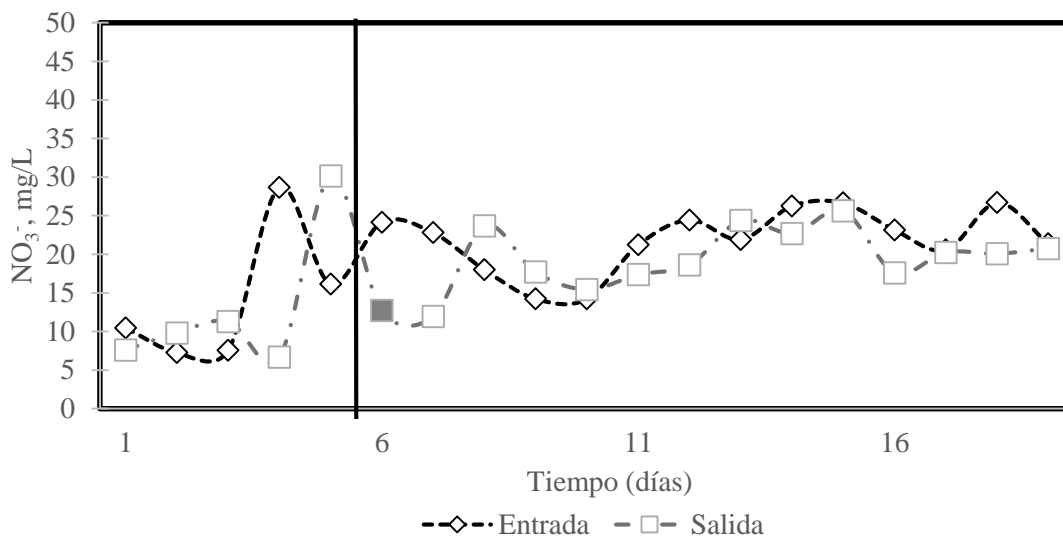
**Figura 9.** Concentración de DQO en función del tiempo, en un período previo a la aireación y después de la aireación realizado en el tanque de alimentación (□) indica la entrada (afluente) al filtro de arena y (◇) representa la salida (efluente) del filtro de arena

Como se puede ver en la Figura 9 las concentraciones altas de DQO se deben a la colocación del medio basal mineral y al inóculo microbiano. En los primeros días de funcionamiento, el reactor no genera cambios en sus concentraciones debido a que se está aclimatando y no existe oxígeno adicional en el tanque de agua. Se aplica oxígeno con bombas aireación en el tanque de alimentación, que se da a partir del quinto día (flecha azul). En la gráfica se puede ver claramente que desde la colocación del oxígeno, la concentración de DQO baja de manera considerable.

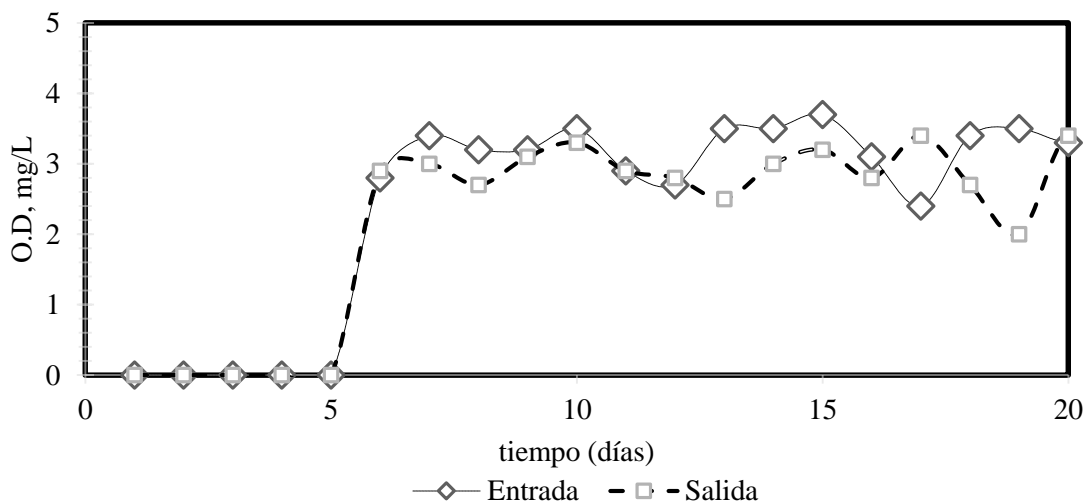


**Figura 10.** Concentración de amonio en función del tiempo, en un período previo a la aireación y después de la aireación realizado en el tanque de alimentación ( $\diamond$ ) indica la entrada (afluente) al filtro de arena y ( $\square$ ) representa la salida (efluente) del filtro

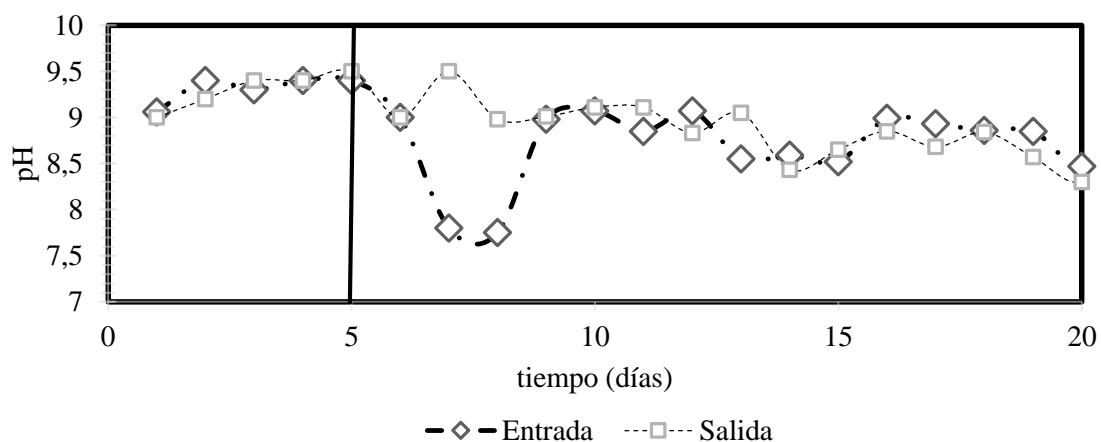




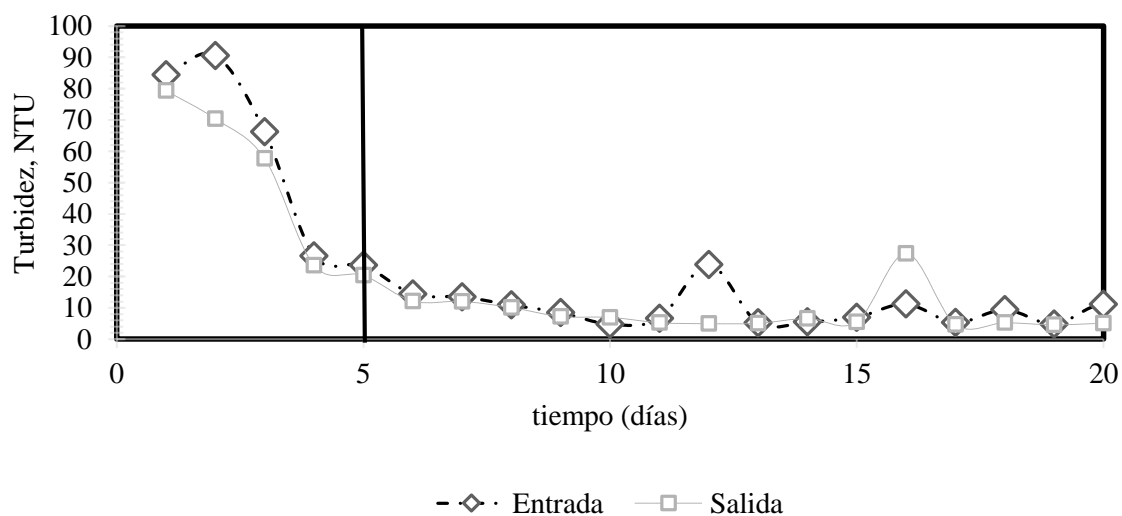
**Figura 11.** Concentración de nitrato en función del tiempo, en un período previo a la aireación y después de la aireación realizado en el tanque de alimentación ( $\diamond$ ) indica la entrada (afluente) al filtro de arena, ( $\square$ ) representa la salida (efluente) del filtro



**Figura 12.** Concentración de OD en función del tiempo, en un período previo a la aireación y después de la aireación realizado en el tanque de alimentación ( $\diamond$ ) indica la entrada (afluente) al filtro de arena, ( $\square$ ) representa la salida (efluente) del filtro



**Figura 13.** Concentración de pH en función del tiempo, en un período previo a la aireación y después de la aireación realizado en el tanque de alimentación (◊) indica la entrada (afluente) al filtro de arena a 8:00 am; (◻) representa la salida (efluente) del filtro



**Figura 14.** Concentración de turbidez en función del tiempo, en un período previo a la aireación y después de la aireación realizado en el tanque de alimentación (◊) indica la entrada (afluente) al filtro de arena a 8:00 am; (◻) representa la salida (efluente) del filtro

Como se indica en las gráficas a partir del quinto día empieza a variar las concentraciones. La turbidez fue el único parámetro que disminuyó en ausencia del oxígeno.

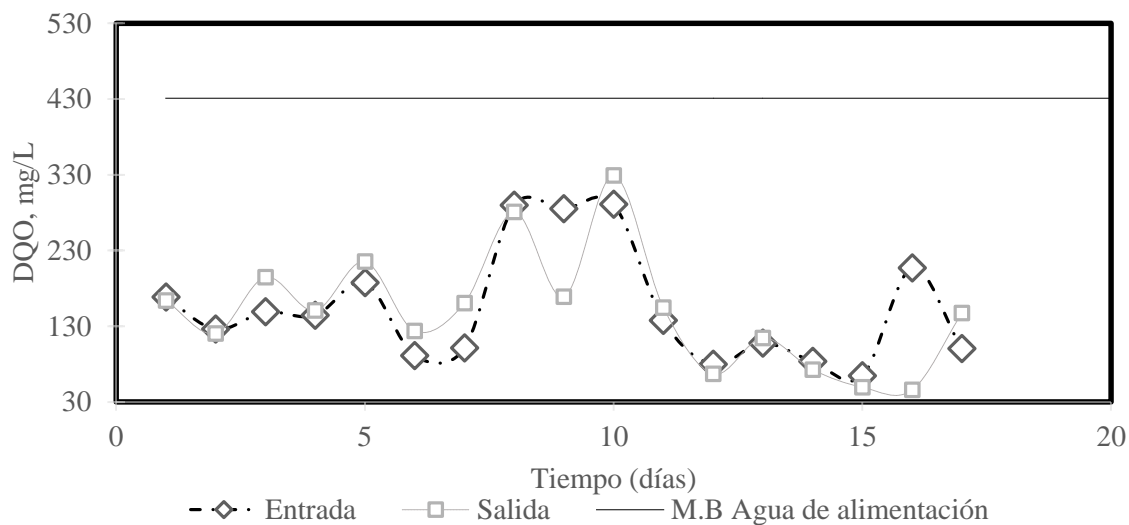
Se reduce la concentración de amonio y el nitrato incrementa la concentración debido a la nitrificación en presencia de oxígeno. Es así que en ausencia de oxígeno no se ejecutó la actividad de nitrificación y reducción de materia orgánica, a partir del quinto día fue indispensable oxígeno extra para mantener al reactor en un rango de 2 a 5 mg/L. En otros estudios han identificado que el oxígeno disuelto menor a 0.5 mg/L provoca la acumulación de amonio y a partir de 1.4 mg/L comienza la nitrificación (Peng & Zhu, 2006). El nivel de oxígeno promedio recomendable es de 2 mg/L (Sans & Ribas, 1989) en temperaturas de 10 a 25 °C a diferencia del oxígeno teórico (Ecuación 4), por otro lado concentración altas de OD mejora la actividad metabólica de la Bacterias Oxidadoras de Amonio (BOA) (Jianlong & Ning, 2004) valor que está dentro de nuestro estudio.

Los primeros monitoreos se efectuaron con la finalidad de estabilizar el bioreactor y las bacterias tengan la capacidad de efectuar nitrificación. El porcentaje de remoción del contaminante es inversamente proporcional al flujo a través del filtro lento debido a que la reducción del contaminante toma tiempo, si el flujo es muy rápido la eficiencia de remoción se reduce. (Zaidun & Assist, 2011).

#### 4.3.2 Caracterización de los efluentes y afluentes provenientes del reactor con medio basal (del día 1 al día 20) con aireación

Los siguientes gráficos corresponden a los resultados obtenidos de la medición diaria de DQO,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ , oxígeno disuelto, pH, conductividad, cloruro, sulfatos y turbidez por 20 días, de

lo que fue el segundo monitoreo evaluado en el reactor, únicamente con medio basal como fuente de alimentación.



**Figura 15.** Concentración de la DQO en función del tiempo, en un período después de la aireación realizado en el tanque de alimentación ( $\diamond$ ) indica la entrada (afluente) al filtro de arena, ( $\square$ ) representa la salida (efluente) del filtro y ( $\Delta$ ) es la salida (efluente, s4). La línea es la concentración (d<sub>qo</sub>) de medio basal antes del tratamiento

En cuanto al DQO, en los siguientes 20 días de monitoreo (Figura 15) con medio basal se puede observar que existe disminución de la concentración con respecto al tiempo. Los valores medidos son menores a la concentración inicial de medio basal. La aplicación de agua residual sintética simple (medio basal) se efectuó para aclimatar y saber el comportamiento que adquiere el reactor y así determinar el funcionamiento del mismo.

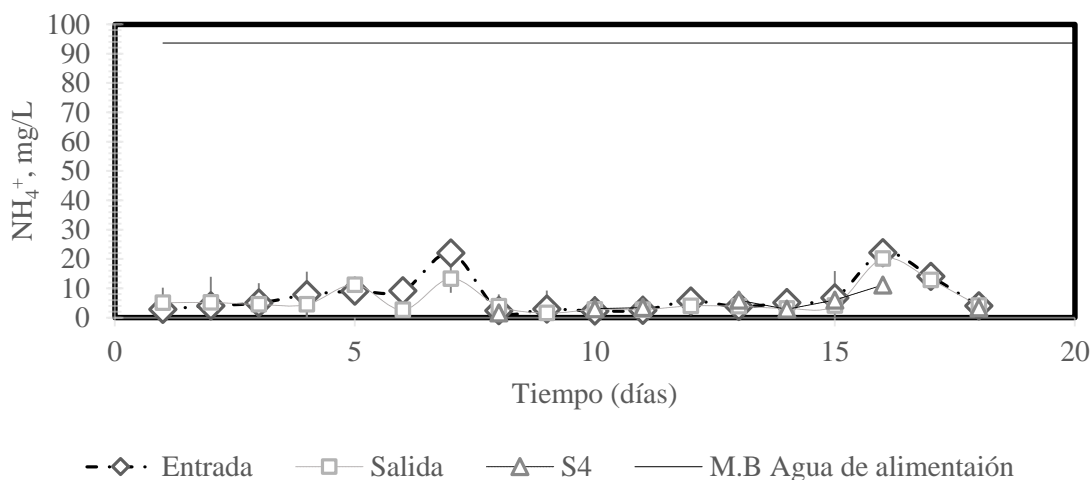
La concentración inicial de medio basal es de 431 mg DQO/L, durante los días de monitoreo se disminuye la concentración de DQO manteniendo un rango de 147 a 47 mg DQO/L. El DQO de la gráfica está dado por la presencia de glucosa en la receta, la reacción es espontánea

y fácil de degradar dando un porcentaje de remoción de 84%. Estudios realizados por Healy, Rodgers, & Mulqueen (2007) mencionan que si el afluente tiene un promedio de concentración de 2382 mg/L DQO (la fuente de DQO es dado por glucosa) generará que el filtro falle en 253 días dependiendo del tiempo de residencia y la tasa de carga hidráulica.

La concentración de demanda química de oxígeno (DQO) es variable durante la operación del sistema; a pesar que la tendencia se disminuye, existe una serie de subidas y bajadas en los valores debido al acoplamiento en el lecho de las bacterias. Por otro lado, se observa que los resultados son similares entre el afluente y efluente, se puede determinar que el bioreactor disminuye la concentración de carga orgánica de manera paulatina con una relación de recirculación en el filtro de 6:1<sup>6</sup>. En el estudio de Healy et. al, se menciona que la de remoción del DQO va ser afectada por la relación de recirculación 3:1 (EPA, Storm Water Technology Fact Sheet. Sand Filter , 1999), los días de tratamiento (42 días), el tiempo de residencia en el filtro (6.7 días) y OD (8 mg/L ) obteniendo un ese caso un porcentaje de remoción mayor al 90% (Healy, Rodgers, & Mulqueen, 2007), este resultado es cercano al obtenido en el presente estudio.

---

<sup>6</sup> 6:1 significa que se recircula el agua en filtro seis veces en un día, con tiempo hidráulico en el filtro de arena de 4 horas



**Figura 16.** Variación de la concentración de amonio con respecto al tiempo. ( $\diamond$ ) indica la entrada (afluente) al filtro de arena, ( $\square$ ) representa la salida (efluente) del filtro de arena y ( $\Delta$ ) es la salida (efluente, s4) del filtro de arena después de cuatro horas de la primera alimentación del reactor. (-) es la concentración (amonio) de medio basal

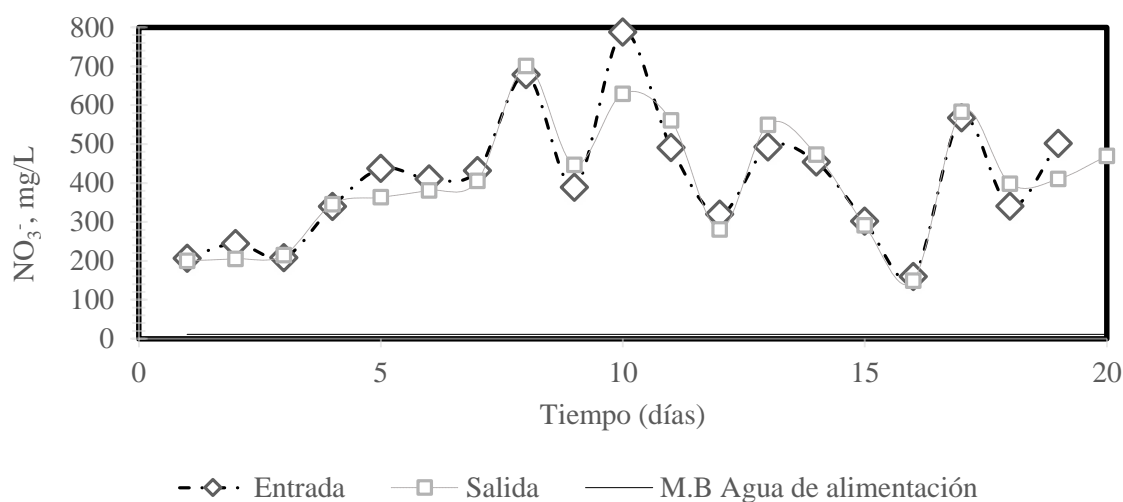
Durante los primeros 20 días de monitoreo con medio basal se puede identificar que los reactores disminuyen la composición de amonio  $\text{NH}_4^+$  a valores menores que  $4 \text{ mg L}^{-1}$  (Figura 16) obteniendo el valor más bajo en el sexto día de hasta  $1.6 \text{ mg L}^{-1}$ . El comportamiento del amonio tiene una tendencia constante, es decir sus rangos de concentración en el efluente, afluente y efluente se encuentran por debajo de  $5 \text{ mg/L}$ , a pesar que la concentración de amonio del medio basal es de  $94 \text{ mg/L}$ ; se demuestra que en la primera fase de monitoreo, el reactor funciona con un porcentaje de remoción mayor a 90%.

La eficiencia se debe a que la carga orgánica es baja ( $67 \text{ mg/L DQO}_{\text{total}}$ ) como se vio anteriormente, generando menos competencia entre las bacterias (autótrofas y heterótrofas). La remoción del DQO es importante pues refleja la diversidad microbiológica en el sistema, es

decir determina la competencia en el crecimiento de microorganismos autótrofos y heterótrofos (Nakhla & Farooq, 2003). Estudios anteriores realizados por EPA (*Process Design Manual for Nitrogen Control*) y Stenquis, et al. Indican que para obtener 75% y 89% de remoción de amonio es necesario tener carga orgánica baja y una temperatura mayor a 20°C. La reducción de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) que ocurre en el reactor es un proceso en donde el nitrógeno orgánico y amoniacal se oxida transformándose en nitrito y posteriormente en nitrato (Ecuación 2), llamado proceso de nitrificación y que se da por bacterias especializadas.

El tiempo de monitoreo también se debe a que las bacterias se reproducen lentamente y además son aún, más sensibles a los cambios generados. Investigaciones anteriores de Pell y Nyberg (1989) mencionan que se necesita alrededor de 75-95 días para que las bacterias (nitrificadoras) se estabilicen por completo y cumplan su funcionamiento, cabe recalcar que el tiempo de estabilización depende del agua residual y la temperatura. En el estudio de Bahgat, M, et al. (1999) les tomó de 38-52 días para que las bacterias nitrificadoras se estabilicen en el sistema.

La recirculación del sistema, de igual manera, afecta a la nitrificación. En un estudio realizado por Parker, et. al (1986) la eficiencia aumenta de 61 a 87% con tasa de recirculación de 2:7 a 3:8 (Parker, Richards, & Parker, 1986), resultado parecido al estudio. De igual manera, cabe recalcar que en el tanque, el agua se encuentra aireada constantemente debido a que el oxígeno es necesario para el proceso.

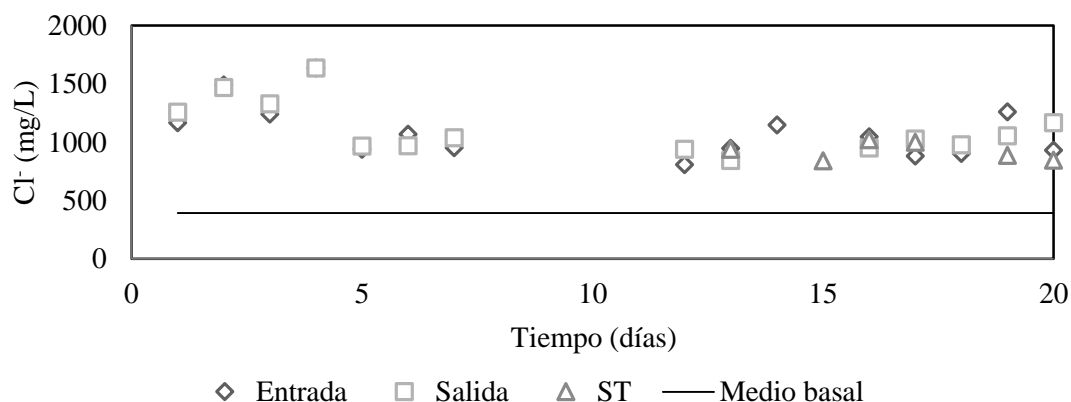


**Figura 17.** Variación de la concentración de nitrato con respecto al tiempo de monitoreo. ( $\diamond$ ) indica la entrada (afluente) al filtro de arena, ( $\square$ ) representa la salida (efluente) del filtro de arena y ( $\Delta$ ) es la salida (efluente, s4) del filtro de arena después de cuatro horas de la primera alimentación del reactor. (-) es la concentración (nitrato) de medio basal

La concentración de nitrato como se ve en la Figura 17 es alta durante los 20 días de monitoreo en comparación con la concentración de agua sintética ( $11 \text{ mg/L NO}_3^-$ ). La concentración de nitrato en el último día de monitoreo es  $414 \text{ mg NO}_3^-/\text{L}$ , como indica la Figura 17, las concentraciones varían y sus rangos está entre 200 y 583 mg/L. Así mismo como ocurrió con el DQO, no existe variación en el efluente, afluente y efluente, la tendencia en los 20 días, no disminuye ni aumenta, sino más bien, permanece estable. El aumento de nitrato en comparación con el medio basal, es producto de la nitratación ocurrida en el sistema; debido a que la desnitrificación se genera en ausencia de oxígeno y al no existir una fase de anoxia en el reactor, el contenido de nitrato se acumula. Estudios anteriores han identificado que en un filtro de arena no existe remoción para el nitrato 0% (EPA, Storm Water Technology Fact Sheet. Sand Filter, 1999). En este estudio no hay desnitrificación



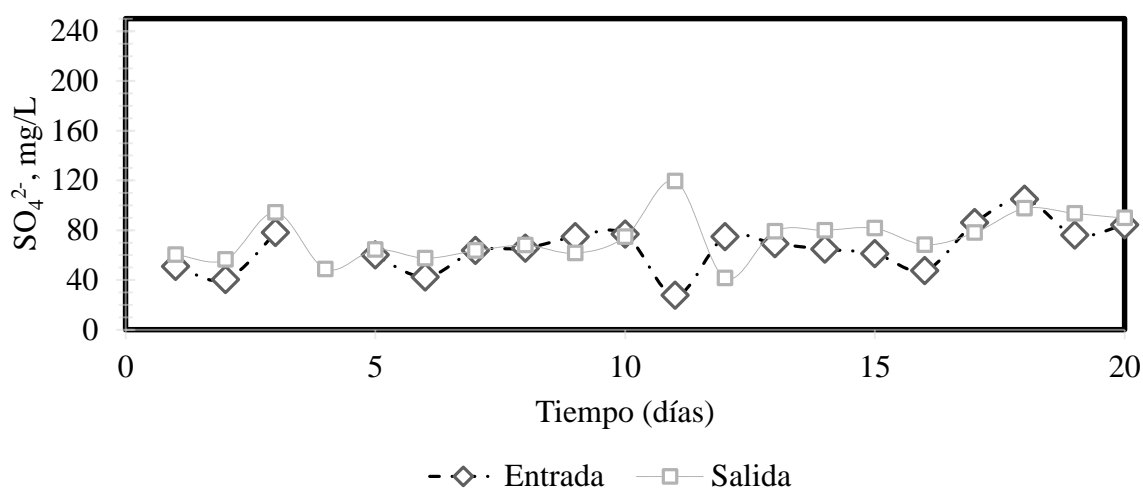
porque el sistema se diseñó con un sistema de aireación continua, es así que no permite la participación de las bacterias organoheterotróficas anóxicas que realizan la desnitrificación.



**Figura 18.** Variación de la concentración de cloruro con respecto al tiempo de monitoreo. (◇) indica la entrada (afluente) al filtro de arena, (□) representa la salida (efluente) del filtro de arena y (Δ) es la salida (efluente, s4) del filtro de arena después de cuatro horas de la primera alimentación del reactor. (-) es la concentración (cloruro) de medio basal

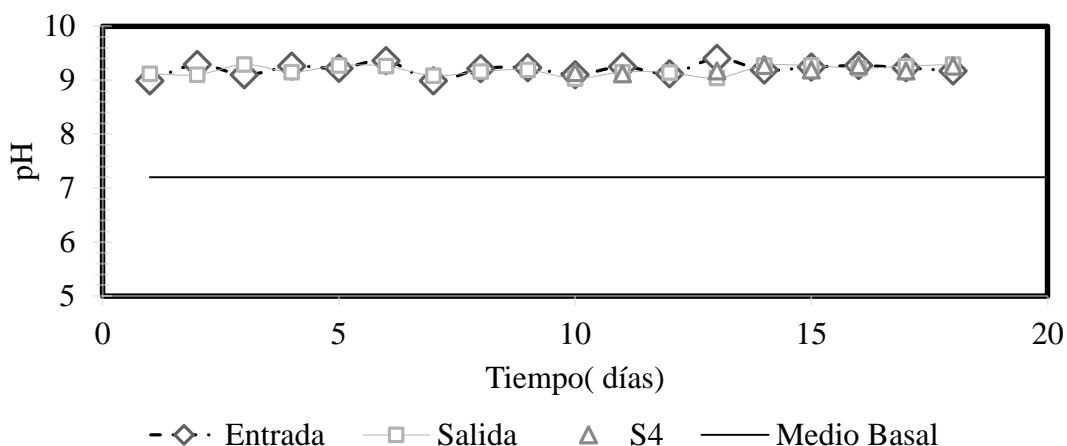
La gráfica presenta los valores de cloruro que van disminuyendo durante los días que se monitorea. Las concentraciones altas de cloruro en los primeros días se presenta debido a que se coloca 30% de HCl en el reactor para disminuir el pH y mantenerlo a 7.1 o 7.3, sin embargo, se dejó de suplementar el ácido debido al posible efecto que puede generar a las bacterias nitrificadoras. Para los siguientes días de monitoreo se dejó de medir este parámetro ya que el filtro y el tanque, no tratan el cloruro y no hay ningún cambio en su concentración. La disminución de cloruro dada en la gráfica se ha dado por la remoción de agua (efluente) diaria mientras se alimentaba al reactor; el cambio de agua cada dos horas estabiliza el contenido de cloruro y evita a su vez que se incremente. El valor final obtenido es de 846

mg/L, concentración que cumple con valor máximo permisible la legislación ambiental, es así, que no representa un problema.



**Figura 19.** Variación de la concentración de sulfatos con respecto al tiempo. (◇) indica la entrada (afluente) al filtro de arena y (□) representa la salida (efluente) del filtro de arena.

Los sulfatos presentan un comportamiento similar en la entrada y la salida del reactor, sin embargo, en los últimos días de monitoreo existe una tendencia a que aumenten. Las concentraciones generalmente varían con valores máximos de 105 mg/L y mínimos de 28 mg/L y durante el monitoreo hay incremento y disminución de la concentración; es un rango que se mantiene estable. La tendencia no varía durante los días de monitoreo, sin embargo, en los últimos días se ha incrementado ligeramente la concentración de sulfatos. No se observan cambios, debido a que el sistema es aeróbico y no genera alteración en la concentración de sulfatos. El valor final que se obtuvo fue de 65 mg/L, en los siguientes monitoreos ya no se determina la concentración, ya que el compuesto se reduce biológicamente en condiciones anaerobias (King & Yu, n.d.; Metcalf & Eddy, 2003).

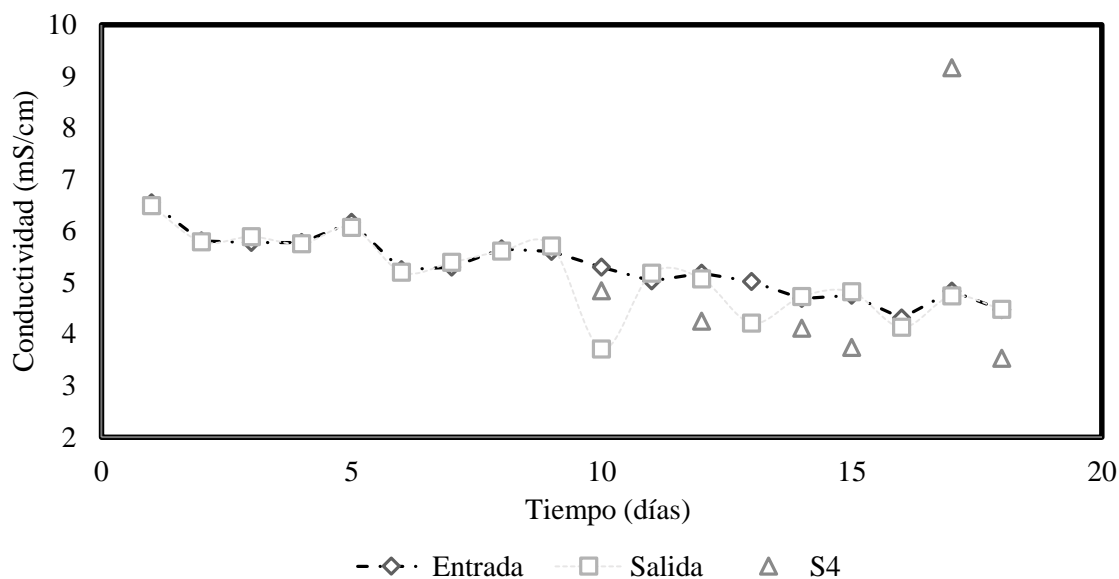


**Figura 20.** Variación de la concentración de pH con respecto al tiempo. (◇) indica la entrada (afluente) al filtro de arena, (□) representa la salida (efluente) del filtro y (Δ) es la salida (efluente, s4) del filtro de arena después de cuatro horas. (-) es el ph de medio basal

El pH durante los primeros 20 días de monitoreo se mantiene constante; el pH como se observa en la gráfica, indica un rango entre 8-9. El rango de concentración para la vida biológica está entre 6 a 9 (Metcalf & Eddy, 2003); en varias investigaciones (Interactions of temperature, pH, and biomass on the nitrification process) se ha observado que generalmente el pH óptimo para la nitrificación está entre 8 y 9. En la mayoría de las tendencias sí el pH decrece, la tasa de nitrificación decrece (Nazih, 1986).

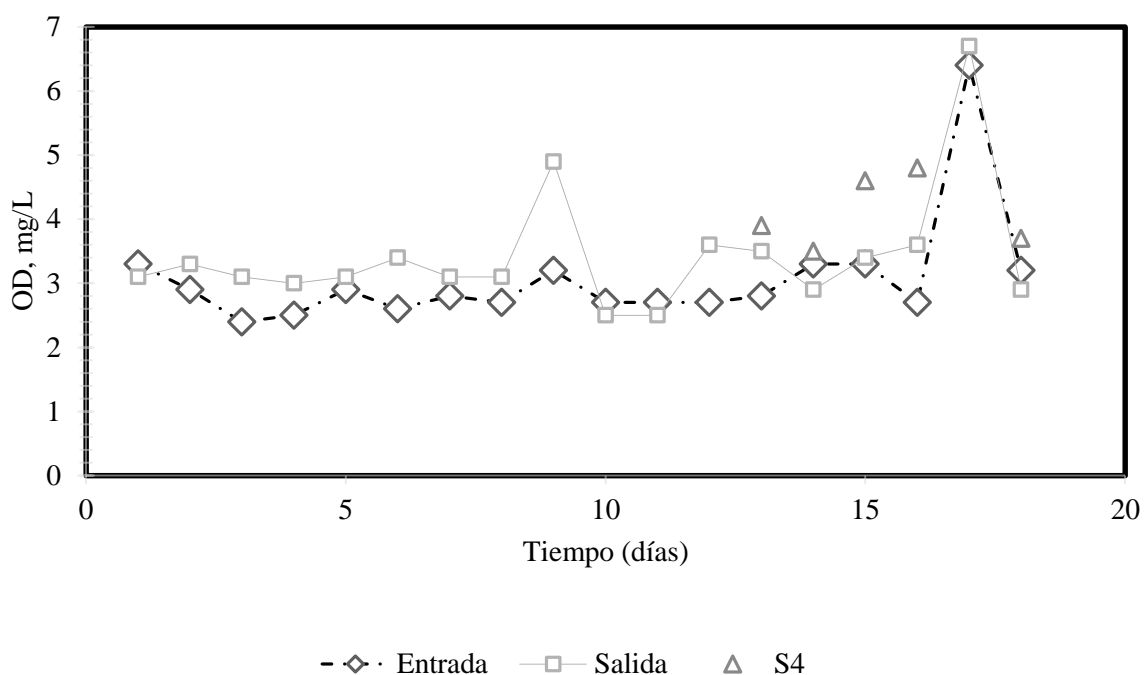
El pH adecuado para las nitrosomas es de 8.5 a 8.8 y para las bacterias nitrobacter es de 8.3 a 9.3; para la oxidación de nitrito a nitrato, el pH debe estar entre 7.7 y 8.8 (Nazih, 1986). Si existe un cambio abrupto en el pH de 7.2 a 6.4 no se genera efectos adversos, pero si, el pH varía de 7.2 a 5.8 la eficiencia de nitrificación cambia radicalmente (Nazih, 1986). Cuando la nitrificación se completa (nitrificación y nitratación), el pH incrementará (se hace básico) debido a la remoción de  $\text{CO}_2$  ( $\text{CO}_2$  stripping) (Peng & Zhu, 2006). Es así que se pueden observar pH altos en la Figura 20.

Con pH 9 y aireación no se remueve por stripping, porque las condiciones generales para remover amonio por stripping son pH de 11 y temperatura de 48 °C, por lo que, la eficiencia de remoción es limitado por la temperatura. Además de que el sistema por stripping es costoso (CORP).



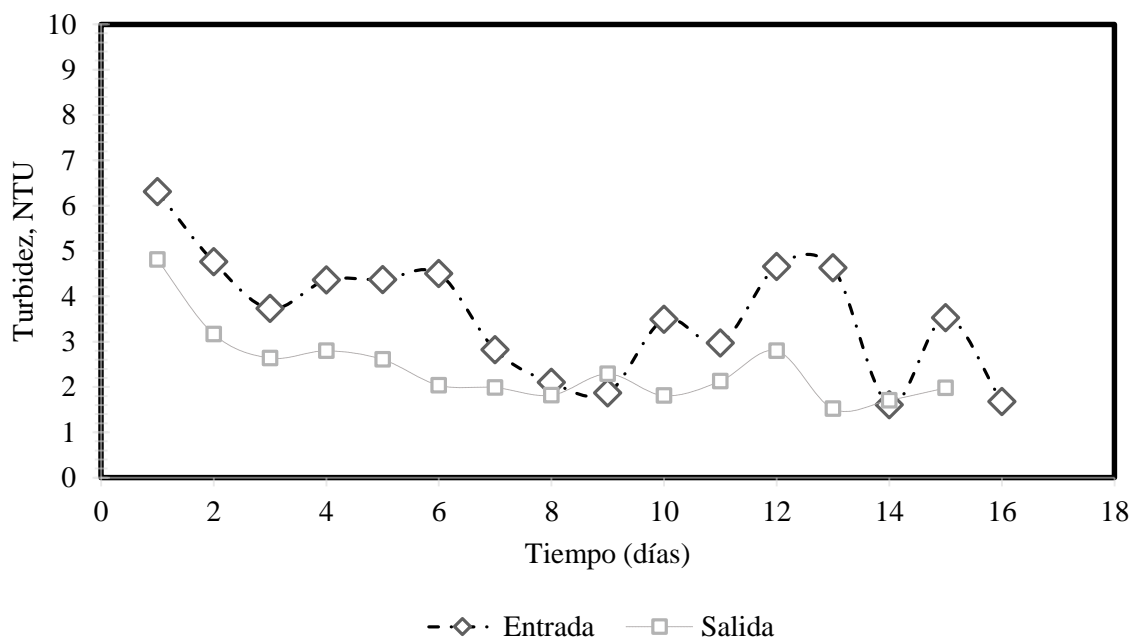
**Figura 21.** Variación de la conductividad con respecto al tiempo. (◇) indica la entrada (afluente) al filtro de arena, (□) representa la salida (efluente) del filtro de arena y (Δ) es la salida (efluente, s4) del filtro de arena después de cuatro horas

En la Figura 21 se puede observar que la conductividad de los 20 días de monitoreo se mantiene constante, a pesar que en los últimos días tiende a disminuir el valor manteniéndose en 3 mS/cm. La entrada y la salida se mantienen en un mismo valor y no existe mayor cambio; el valor es alto debido a que el medio basal está compuesto principalmente de sales y la conductividad disminuye a medida que la concentración de los iones disminuyen (Metcalf & Eddy, 2003).



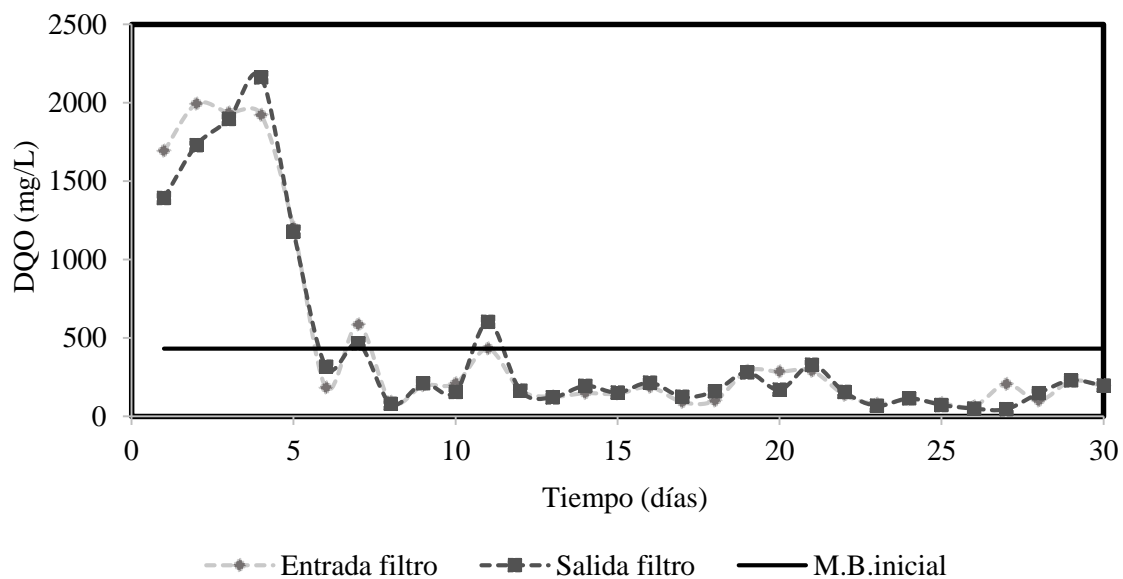
**Figura 22.** Variación del OD con respecto al tiempo de monitoreo. (◇) indica la entrada (afluente) al filtro de arena, (□) representa la salida (efluente) del filtro de arena y (Δ) es la salida (efluente, s4) del filtro de arena después de cuatro horas

En cuanto al oxígeno disuelto que se observa en la Figura 22 que este presenta valores constantes que se mantienen entre 3 y 4 mg/L durante los primeros 20 días. El OD afecta a la nitrificación según el rango de concentraciones, estudios han reportado que es necesario entre 0.5 a 1 mg/L para que la nitrificación comience a generarse (Stenstrom & Poduscka, 2003). Sin embargo, la tasa de crecimiento bacteriano para la nitrificación reacciona con un OD entre el rango de 0.5 mg/L a 4.0 mg/L. Una concentración de 4.0 mg/L es necesaria para lograr una máxima nitrificación.

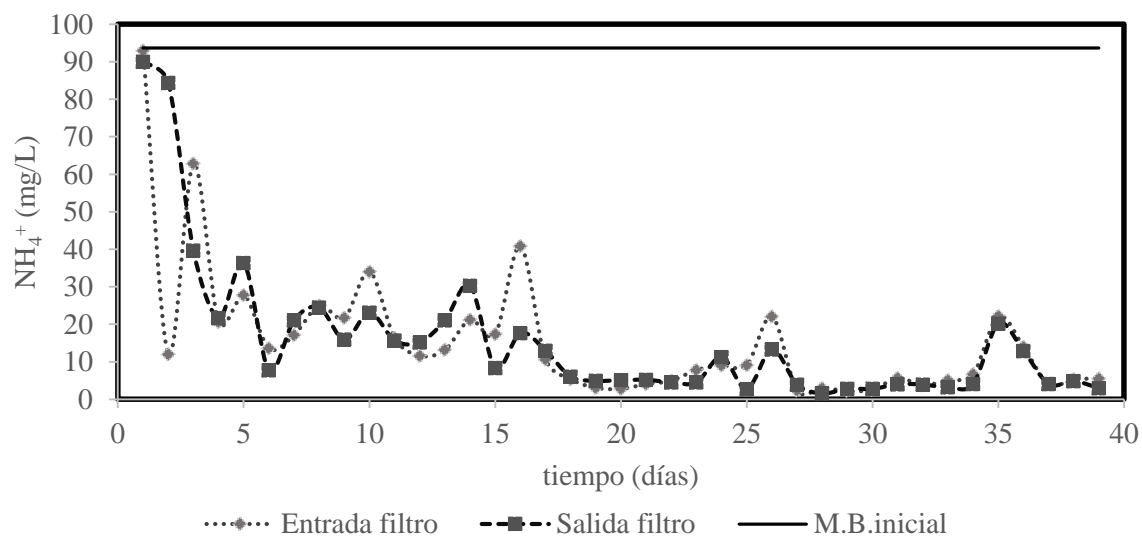


**Figura 23.** Variación de la turbidez con respecto al tiempo de monitoreo. (◇) indica la entrada (afluente) al filtro de arena y (□) representa la salida (efluente) del filtro de arena.

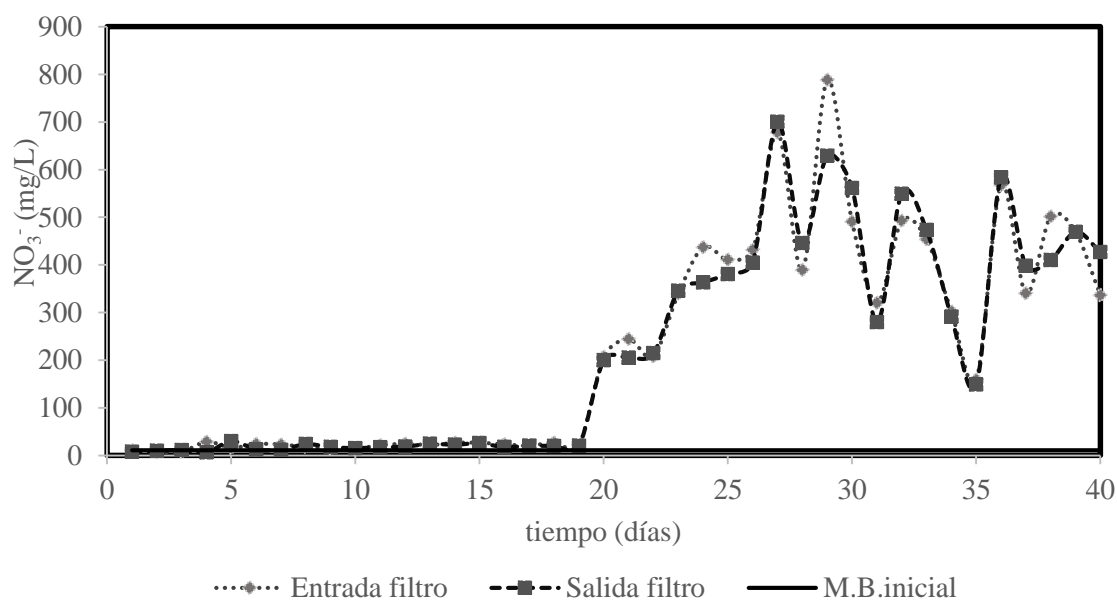
La turbidez del reactor es el parámetro con mayor cambio con respecto a la entrada y salida según la gráfica. Además se observa una disminución cada día, generando un valor final de 1.71 NTU comparado al valor inicial de 5 NTU; en la entrada se presenta un valor mayor que en la salida (efluente). Por lo general, el filtro remueve un promedio de 80-95% de turbidez (Collin, 2009). La agencia de protección ambiental de los Estados Unidos (EPA) ha establecido unos estándares de turbidez  $< 1$  Unidad de Turbidez Nefelométrica (NTU) en el 95% del tiempo, para filtros de arena.



**Figura 24.** Concentración de dco en comparación con medio basal antes del tratamiento por los primeros 30 días de funcionamiento del reactor



**Figura 25.** Concentración de amonio en comparación con medio basal antes del tratamiento por los primeros 40 días de funcionamiento del reactor



**Figura 26.** Concentración de nitrato en comparación con medio basal antes del tratamiento por los primeros 40 días de funcionamiento del reactor

#### 4.3.3 Caracterización de los efluentes y afluentes provenientes del reactor con medio basal – Laguna No. 9 y solo Laguna No. 9 (del día 21 al día 60)

En los siguientes 21 días de monitoreo los experimentos a escala laboratorio se realizaron con una mezcla de agua de medio basal y Laguna No.9, después del día 41 se trabajó solo con agua de la Laguna No.9. Los valores de caracterización se determinaron experimentalmente. Se efectuó la mezcla para que el reactor se establezca poco a poco a la nueva alimentación. A continuación se encuentran las tablas de la caracterización realizadas para la mezcla con medio basal- Laguna No. 9 y solo para la Laguna No. 9.



**Tabla 15.** Resultado del monitoreo de 20 días con agua de laguna/medio basal a partir del día 21 continuando el monitoreo anterior

Parámetros	Unidad	Antes de tratamiento de agua	Después de tratamiento de agua (50% medio basal/ 50% agua Laguna No. 9)										Porcentaje de remoción (%)			
			29 de oct.					7 de nov.								
			Entrada		Salida			S4		Entrada		Salida			S4	
pH		7.29	9.12	9.08	9.05	8.95	8.91	8.98	-							
OD	mg/L	4.18	3.51	3.09	3.70	2.89	3.88	3.62	-							
Turbidez	NTU	4.42	1.94	1.58	1.58	1.71	1.31	1.33	70							
Conductividad	mS/cm	3.64	4.37	4.38	4.31	2.20	2.37	4.16	-							
DQO	mg/L	384	0.01	146	0.02	97	0.00	56	0.00	202	151	0.01	186	61		
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/L	80	0.00	5	3.40	5	2.72	7	2.48		-			91		
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	16	0.72	361	0.29	355	0.93	387	0.15	253	1.5	300	0.1	301		

**Tabla 16.** Resultado del monitoreo de 20 días con agua de laguna No. 9 a partir del día 41 continuando el monitoreo anterior

Parámetros	Unidades	Antes de tratamiento de agua	Después de tratamiento de agua (Laguna No. 9)											Porcentaje de remoción (%)	
			17 DE NOV.						27 DE NOV.						
			Entrada	Salida	S4	Entrada	Salida	S4							
pH		8.40	9.07	9.00	9.09	8.95	8.86	8.79							-
OD	mg/L		4.37	4.40	3.69	4.90	5.58	4.94							-
Turbidez	NTU	15.50	2.82	1.10	1.15	5.00	2.06	2.19							87
Conductividad	mS/cm	2.46	3.36	3.74	3.68	3.02	2.85	3.02							-
DQO	mg/L	509	234	0.01	208	0.02	328	0.02	263	0.01	196	0.01	280		61
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/L	67			0.11						0.11				100
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	4.83	0.01	253	0.12	280	0.32	272	0.15	259	0.49	263	0.47	267	-

**Tabla 17.** Resumen del porcentaje de remoción obtenido en el filtro.

Parámetros	Porcentaje de remoción (%)		
	MBM	Laguna No. 9/ MBM	Laguna No. 9
DQO	84	61	61
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	96	91	100
Turbidez	-	70	87

Con respecto al DQO del monitorio de 50% medio basal y 50 de agua Laguna No. 9 y el del agua de la laguna No. 9 disminuye la concentración comparado con el valor antes del tratamiento. Como se puede observar en la Tabla 17, la concentración inicial de DQO es de 384 mg/L, después de 10 días de tratamiento (29 de octubre) se ve que el DQO bajo en un rango de 147 mg/L -57 mg/L, a los 20 días (7 noviembre), el DQO<sub>total</sub> cambio, obteniendo concentraciones entre 202 mg/L – 152 mg/L. Estos últimos valores se incrementaron a comparación de los datos del 29 de octubre, generando una remoción del 61% tomando en cuenta el valor de la salida del 7 noviembre.

Para el tratamiento solo con agua de la laguna No. 9, se puede observar que el porcentaje de remoción de DQO también es de 61%, tomando el valor de salida (efluente) del reactor y el valor previo al tratamiento (509 mg/L), para el cálculo de remoción. Esto se debe a que la concentración de carga orgánica es más alta y más compleja de remover a comparación de la glucosa (medio basal). En un estudio realizado por Zaidun & Assist (2011) dice que para una concentración mayor a 110 mg/L de DQO con filtros de diámetro de partícula 0.75mm, la eficiencia de remoción baja al 60%, porcentaje similar al obtenido en esta investigación, es

decir, a menor concentración de DQO mayor es la eficiencia de remoción. La eficiencia de remoción de DQO aumenta cuando hay mayor tiempo de contacto con el lecho (Zaidun & Assist, 2011). Estudios realizados con filtros de arena lentos también mencionan que el porcentaje de remoción de DQO generalmente tiene un rango de 50-67% (Nakhla & Farooq, 2003). Los cambios de concentración y contenido de carga orgánica durante el monitoreo se puede ver reflejado en la adsorción. Es posible que la adsorción podría ser el motivo fundamental de la remoción de materia orgánica que es utilizada por las bacterias heterótrofas pero también es limitada (Feng et al., 2012), por lo mismo se puede observar en esta investigación que la remoción de materia orgánica es más baja que la nitrificación. .

Antes de utilizar el tratamiento de filtro arena y tanque aireado es importante considerar que la materia orgánica es consumida en anteriores fases como en las lagunas anaerobias y facultativas, de esta manera disminuye la competencia entre bacterias nitrificantes y heterótrofas (Carrera, n.d.), es así que, que existe menor porcentaje de remoción de materia orgánica debido a que las bacterias en el reactor se encargan de oxidar compuestos inorgánicos.

Con respecto al amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) se observa en la (Tabla 15 y Tabla 16) una concentración antes del tratamiento de 80 mg/L y a los 10 días de monitoreo se obtuvo valores entre 7.3 a 4.6 mg/L en la salida, no se pudo determinar el valor de monitoreo en los siguientes 10 días, con estos valores se determinó un porcentaje de remoción del contaminante en un 91%. La eficacia se da mediante el filtro lento de arena que se atribuye por la capa bacteriana nitrificadora (*Schmutzdecke*) desarrollado entre los granos de arena (Rao, Malini, Lydia, & Lee, 2013).

A partir del día 41 con alimentación de agua de la Laguna No. 9 únicamente, se pudo observar después de los 10 días de monitoreo que la concentración de amonio también se reduce en comparación a la concentración inicial de 65 mg/L a 0.11 mg/L. Es importante recalcar que la eficiencia de remoción depende de la concentración de oxígeno presente y de la carga orgánica porque, la literatura recomienda una carga orgánica baja para incrementar la eficiencia de remoción de amonio. (Zaidun & Assist, 2011) A pesar de que la carga orgánica del agua es realmente alta (384 mg/L en medio/laguna 9 y 509 mg/L DQO<sub>total</sub> en la Laguna No 9), la eficiencia de remoción de amonio es mayor al 90 % y 100 % respectivamente.

La eficiencia obtenida se basa en la constante recirculación (6:1), se puede recircular el tiempo necesario hasta conseguir las condiciones que se requiere (Zaidun & Assist, 2011), lo que permite que se vaya limpiando cada vez más el agua y las bacterias sigan cumpliendo con la oxidación del amonio.

Estudios realizados por la EPA identifican que la eficiencia de remoción TKN es de 46% en filtros lentos de arena (EPA, Storm Water Technology Fact Sheet. Sand Filter , 1999). En otros estudios realizados por Bahgat et al., (1999) en la cual tratan agua residual en un filtro de arena ( $d_p = 1.2$  mm) tuvieron una remoción de amonio del 60% aproximadamente. La eficiencia depende del tiempo de actividad de las bacterias nitrificadoras y de las condiciones de aireación (Bahgat et al., 1999); en el mismo estudio se identificó que existen más bacterias oxidadoras de amonio, que se encuentran en la superficie del lecho. En otros estudios se obtuvo un porcentaje de remoción en la nitrificación del 42.4 -78.4 % (Nakhla & Farooq, 2003).

La eficiencia del filtro de arena de esta investigación es mayor al de las investigaciones anteriormente citadas ya el agua tratada para la nitrificación proceda de tratamientos biológicos previos, que de agua cruda sin tratar.

La concentración obtenida en el estudio para nitrato según los valores se mantiene entre 300 mg/L y 267 mg/L de  $\text{NO}_3^-$  respectivamente. Como ya se mencionó anteriormente el valor alto representa la acumulación de  $\text{NO}_3^-$  a causa de la reacción de nitrificación, para reducir la concentración del mismo, se requiere realizar un tratamiento adjunto anóxico para que se de la desnitrificación. Existen otros estudios realizado por Aslan (2007) quien encontró una remoción del 95% de nitrato en un filtro lento de arena para el tratamiento de agua potable; la remoción se dio principalmente en el tope del lecho a un caudal de 0.05 m/h (Aslan & Cakici, 2007)

### Balance de amonio y nitrato

**Tabla 18.** Balance de amonio y nitrato en el sistema de tratamiento con agua de la laguna No.9

Entra al reactor					
66.8	mg/L	$\text{NH}_4^+$	51.84	mg/L	N
4.83	mg/L	$\text{NO}_3^-$	1.09	mg/L	N
		TOTAL	52.93	mg/L	N
Sale del reactor					
0.11	mg/L	$\text{NH}_4^+$	0.09	mg/L	N
253	mg/L	$\text{NO}_3^-$	57.05	mg/L	N
		TOTAL	57.13	mg/L	N

La tabla 18 indica el balance de nitrógeno realizado en el sistema de tratamiento de filtración y aireación. Se puede observar que los valores que entran de nitrógeno y los que salen son diferentes, hay mayor nitrógeno que sale. Es importante recalcar que la determinación del

nitrate (0.11 mg/L) se midió con diferente método analítico. Además el sistema de tratamiento es dinámico es así la diferencia del valor.

El pH contiene valores de 9 a 8.9, en el monitoreo de medio basal/Laguna No. 9; para el monitoreo final (únicamente laguna 9) el valor está entre 8.79 y 8.95, estos valores aún están dentro del rango aceptable para las bacterias nitrobacter, que son las encargadas de degradar el nitrito y convertirlo en nitrato, sin embargo, es recomendable ajustar el pH para que el agua residual en la planta de tratamiento no genere problema de sedimentación como indica en la Tabla 3 (Ridzuan, et al., 2013) (Lens , Hulshoff, Wilder, & Asano, 2002).

La conductividad que se presenta en los últimos 40 días de monitoreo está entre 4 a 2.2 mS/cm, valores, para la composición de medio/Laguna No. 9 el mayor valor se encuentra en 4.4 y el menor valor en 2.2, los valores entre el afluente y efluentes no varían significativamente. En la conductividad está entre 3.02 (afluente) y 2.85 (efluente), y estos valores representan las sales disueltas e iones presentes en el reactor como el  $\text{NO}_3^-$ .

El OD es reconocido como uno de los factores más importantes para el funcionamiento correcto del filtro y la nitrificación, pues existe una relación lineal entre la remoción de amonio y el afluente de oxígeno disuelto; un OD menor a 0.5 mg/L inhibe la tasa de nitrificación (Tchobamoglous, Burton, F, & Stensel D, 2003) por ello es importante continuar con el monitoreo. El OD de estos último monitoreos está en un rango de 5.58 a 2.89 mg/L. El OD necesario para las bacterias heterótrofas podría ser significativo ya que el  $\text{DQO}_{\text{total}}$  que se pudo remover fue de solo 61%. El oxígeno disuelto fue consumido por las bacterias que transforman el amonio nitrato, si las bacterias heterotróficas consumieran mucho oxígeno disuelto, la remoción de amonio sería menor (Feng et al., 2012).

La turbidez es un factor importante en la operación del filtro. Como se ve en los resultados el porcentaje de remoción está entre el 70% (medio basal/Laguna No. 9) y el 87% (Laguna No. 9), con una turbidez inicial de 4.4 NTU y de 15.5 NTU respectivamente; siendo el único parámetro que varía significativamente tanto en la entrada al filtro como en las salidas (efluentes) tal como lo indican las tablas. Si la turbidez es mayor a 50 NTU, el agua residual debería tener un tratamiento de sedimentación previo a pasar al filtro de arena. Altos niveles de turbidez en el agua residual puede bloquear el funcionamiento del biofiltro de arena y recortar la vida del mismo de meses a días (Zaidun & Assist, 2011). La turbidez identifica la calidad de las descargas del agua con respecto a los coloides y material residual suspendido (Metcalf & Eddy, 2003). Zaidun, et. al, indica que para arenas con diámetro de partícula de 0.75 mm y agua con turbidez de 10-20 NTU la eficiencia de remoción puede llegar a ser mayor al 90% (valor que se parece al de la investigación), para aquellas que se encuentran con turbidez mayor a 50 NTU la eficiencia de remoción se reduce en un 80%.

## **5. Conclusiones y Recomendaciones**

- Según los datos arrojados por el balance hídrico, las zonas donde más se ocupa agua son, el esterilizador (387 m<sup>3</sup>/d), el prensado (33 m<sup>3</sup>/d), el hidrociclón (25 m<sup>3</sup>/d) y el digestor (21m<sup>3</sup>/d), siendo estos los principales procesos para una futura recirculación de agua y así bajar los niveles de consumo de agua dulce.
- Se ha realizado una investigación en el laboratorio de filtro de arena y tanque aireado para disminuir la carga orgánica y concentraciones de amonio de una planta de tratamiento de aguas residuales de una industria extractora de palma, para que sea posible la recirculación de agua al proceso.



- La recirculación del agua residual tratada en el filtro demostró que el agua puede ser reutilizada en un 70% debido a la remoción de contaminantes obtenida, esta agua podría utilizarse en el lavado de máquinas y en varios procesos a excepción de las calderas.
- La carga contaminante que muestra este efluente (Laguna No. 9) puede variar dependiendo del proceso y del funcionamiento del PTAR, los valores obtenidos en este estudio muestran concentraciones de DQO de 509 mg/L por los procesos anteriores de las lagunas de tratamiento.
- Aunque la concentración de DQO presente en el efluente de la PTAR es elevada, no es el único problema; otra de las preocupaciones es la elevada concentración de amonio, que en este estudio fueron de 67 mg/L, y que alteran la reproducción de peces y son tóxicos para los animales.
- Las calderas vaporizan el agua mediante energía térmica, este vapor generado se utiliza para la esterilización, digestión y medio de fuerza motriz. Por ello es indispensable que la operación deba ser fiable y segura. Como se indicó en los resultados, se puede ver que los condensados de proceso y purga continua de calderas presenta problemas en la dureza total (7.02 mg/L y 31.7 mg/L) y en el hierro (0.48 mg/L y 0.26 mg/L) respectivamente. Estos valores, por otro lado no son tan diferentes al del río en hierro (1.05 mg/L) y dureza total (23.8 mg/L), por lo que el agua generada en estos condensados puede tranquilamente recircular para el proceso de ablandamiento del agua, para así no utilizar el agua del río.
- La elaboración del filtro propuesto para la recirculación de agua en el proceso, mostró resultados importantes en cuanto a la remoción de DQO y amonio. En el experimento

en el laboratorio se encontró una remoción del DQO de 61% y casi 100% para amonio; esto confirma que el sistema funciona adecuadamente

- La concentración de nitrato es elevada pero, el actual estudio no contempla la eliminación de este componente. La legislación nacional estipula un límite permisible para nitratos es de 15 mg/L TKN y 10 mg/L nitratos y nitritos, por esta razón se recomienda un posterior tratamiento anóxico en el reactor y así continúe el tratamiento con el proceso adicional de desnitrificación.
- Para la realización del filtro de arena en la planta, se recomienda controlar el sistema de evaporación, de carga orgánica y de turbidez para que no lo saturen y la vida útil del mismo sea más extensa.
- El porcentaje de remoción de DQO, amonio y turbidez se da a medida que el agua percola a través del filtro de arena y se almacena en el tanque de aireación. La materia orgánica e inorgánica y turbidez (sólidos suspendidos y coloides) son removidos por procesos mecánicos (adsorción, difusión, *screening* y sedimentación) y por procesos biológicos (muerte natural, descomposición metabólica y depredación). La eficiencia del reactor también depende del tamaño de la partícula de la arena, la profundidad del filtro y la tasa de flujo que pasa a través del filtro.
- El agua tratada en el filtro, se la puede reutilizar para procesos de producción que no necesiten agua de alta calidad.
- Se recomienda tener un control en el pH del agua para mantenerlo en un rango aceptable para las bacterias. En el proceso de nitrificación se recomienda un pH de 7-9.
- La investigación necesita ser ampliada y profundizada pues se demostró que bajaron los niveles de carga orgánica y de amonio, lo cual es un comienzo, pero también

subieron los niveles de nitrato. Se requiere hacer una investigación que explore alternativas de remoción de nitratos.

## 6. Anexos

### 6.1 Protocolo detallado

#### Medición de cloruro

A 10 ml de muestra de agua se agregó 0.2 ml de ISA de cloruro. Una vez mezclado se determinó el potencial en mV utilizando el electrodo. La curva efectuada se graficó en función logarítmica en base 10 y se obtuvo un RSQ de 0.99 según la ley de Beer. La determinación de valores de la muestra se realizó por triplicado.

#### Medición de sulfatos

El sulfato presente en la muestra precipita como sulfato de bario ( $\text{BaSO}_4$ ). Una vez que precipita se filtra la muestra utilizando filtros de microfibra de vidrio con un diámetro de 45.5 mm y tamaño de poro 1.2  $\mu\text{m}$ . Previamente se pesa el filtro en una pesa muestras y se anota el valor. Una vez filtrado se coloca en el horno GC- Series Lab Ovens a  $105^\circ\text{C}$  por 8 horas. La concentración de sulfato se determina por diferencia de pesos del filtro limpio y el filtro con la muestra

#### Medición de Nitrato

A 10 ml de estándar se agregó 0.2 ml de solución de ajuste de fuerza iónica (ISA nitrato). Posteriormente se determinó el potencial en mV. La curva se graficó en función logarítmica. El mismo procedimiento se realizó para las muestras de agua efectuándolo por triplicado. Se efectuó desviación estándar y un promedio. El potencial determinado en el multiparámetro se convierte en concentración en base a la curva de calibración ya mencionado.

#### Medición de Amonio

Se aplicó 0.2 ml de solución de ajuste de fuerza iónica (ISA amonio) que se añaden a 10 ml de muestra o estándar. Se mide el potencial (mV) con los dos electrodos. Los valores obtenidos se grafican en una curva de calibración en función logarítmica con base 10, de acuerdo a la ley de Beer se obtiene un RSQ de 0.99. La concentración de amonio se calcula de acuerdo a la curva de calibración. Los análisis se efectúan por triplicado

## 6.2 Desarrollo ecuaciones

Flujo a través de un lecho empacado

**Tabla 19.** Notación para el flujo a través de un lecho empacado

Símbolos	Significado
A	Área de la sección a lo largo del lecho
$a_v$	Área superficial de la partícula dividido por el volumen
$D_p$	Diámetro de la partícula , $6/a_v$
L	Longitud del lecho
Q	Tasa de flujo volumétrico (caudal)
$u_o$	Velocidad de flujo (Q/A)
$\epsilon$	Fracción vacía (porosidad)

$$t = \frac{V_{H2O}}{Q_{H2O}}$$

t es el tiempo hidráulico de retención es:

$$V_{H2O} = A * d * \epsilon$$

$$u_o = Q/A$$

Donde  $A_s$  es el área superficial,  $d$  la profundidad y  $\varepsilon$  la porosidad del medio, está dado por la ley de Darcy.

### 6.3 Características físico químicos de proceso de producción

**Tabla 20.** Características físico- químicas de condensados de esterilización y mezcla de condensados de calderas y esterilizados

Parámetros	unidades	Condensados esterilización	Condensados calderas y esterilización
pH		5.4	4.2
conductividad	uS/cm	5670	3640
DQO	mg/L	29600	9989
ST	mg/L	36813	10334
SV	mg/L	28837	7589
NO3	mg/L	248	127
NH4	mg/L	469	356
Cl	mg/L	2011	439

## 6.4 Fotos



Anexo 1. Planta extractora de aceite PDA



Anexo 2. Tanque de agua de almacenamiento para alimentar a los calderos







Anexo 3. Laguna No.9 de la PTAR en la extractora



Anexo 4. Bioreactor a escala laboratorio (filtro de arena, tanque de alimentación y bombas aireadoras)



Anexo 5. Cambio de color del agua tratada durante los 20 días de monitoreo en el filtro de arena y tanque. A la izquierda se encuentra el agua cruda sin tratar y a la derecha el agua tratada

## 7. Bibliografía

- Agua, S. N. (2010). *Muestreo de la calidad del agua en la cuenca de río cayapas, provincia de esmeraldas, en los cantones el y alfarero y san lorenzo* . Senagua .
- ANCUPA. (2010). *Caracterización de Cultivo de la Palma Aceitera en el Ecuador* . Quito: Asociación Nacional de Cultivadores de Palma Africana. ANCUPA, 2010a.
- ANCUPA. (2014). *Palma Ecuador país palmicultor*. Quito: ANCUPA.
- APHA. (2012). *Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater*. Virginia: WEF.
- APHA. (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (22 ed.). Washington, DC: American Public Health Association.
- ASME. (s.f.). *Guidelines for Water Quality in Modern Industrial Water Tube Boilers for Reliable Continuous Operation*. Obtenido de ALTRET: <http://www.altret.com/upload/article/boiler-water-treatment-guideline-20120705124824.pdf>
- ATSDR. (2004). Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU., Servicio de Salud Pública. *Resumen de Salud Pública*, ATSDR.
- B. van Lier, J., Mahmoud, N., & Zeeman, G. (2008). *Anaerobic Wastewater Treatment*. London: IWA Publishing.
- Bermudez, R. . (2000). Evaluación de la disminución de la carga contaminante de la vinaza de desilariá por tratamiento anaerobio. *Rev. Int Contam. Ambient.*, 16(3), 103-107.

- Cammarota, M., & Freire, D. (2006). A review of hydrolytic enzymes in the treatment of wastewater with high oil and grease content. *Bioresource Technology*, 2195-2210.
- Chamorro, G. (2014). *Evaluación de una PTAR de una empresa de fabricación de queso y montaje de biorreactores para el estudio de la depuración de su efluente*. Quito: Universidad San Francisco de Quito.
- Chen, S., Ling, J., & Blancheton, J. (2006). *Nitrification kinetics of biofilm as affected by water quality factors*. France: Elsevier.
- Collin, C. (2009). *Biosand filtration of high turbidity water: modified filter design and safe filtrate storage*. Massachusetts: Massachusetts institute of technology.
- Constituyente, A. (s.f.). *Constitución del Ecuador*.
- CORP, B. E. (s.f.). *Ammonium Stripping*.
- Crites, R., Middlebrooks, J., & Reed, S. (2006). *Natural Wastewater Treatment Systems*. Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Cruz, M. (1996). *Estudio del meiobentos en el golfo de Guayaquil, (rio guayas, canal casjala y estero Salado), Ecuador*.
- EPA. (1999). *Storm Water Technology Fact Sheet. Sand Filter*. Washington, D.C: EPA.
- EPA. (2002). *Wastewater Technology Fact Sheet Anaerobic Lagoons*. Washington, D.C : Municipal Technology Branch .
- EPA, U. (1977). *National Interim Primary Drinking Water Regulations, Federal Register*. Washington, DC: U. S Environmental Protection Agency .

- Erazo, R., & Rosero, P. (2014). *Estudio de detalle para la optimización del sistema de vapor* . Quito: Palmera de los Andes.
- FEDAPAL. (2005). *Fundacion de Fomento de Exportaciones de Aceite de Palma*. Obtenido de <http://www.fedapal.com>
- Fernandez, A., Letón, R., Rosal, R., Dorado, M., villar, S., & Sanz, J. (2006). Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. *informe de vigilancia tecnológica*.
- Graddy, L., Daigger, G., & Lim, H. (1999). *Biological Wastewater Treatment* . Switzerland: Marcek Dekker, Inc.
- Guillermo, G. (2007). *Oxigeno Disuelto* . RED MAPSA.
- Huisman, W., & Wood, L. (1974). *Slow sand Filter*. WHO.
- Igwe, J., & Onyegbado, C. (2007). *A review of Palm Oil Mill Effluent (POME) Water Treatment*. Abia: IDOSI.
- Keisuke, H., Chalermraj, W., & Shinichiro, O. (2003). Nitrification at low levels of dissolved oxygen with and without organic loading in a suspended-growth reactor. *Elsevier*, 24, 297-302.
- Lenntech. (10 de Agosto de 2014). *Water Treatment Solutions*. Obtenido de <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/mn.htm#Efectos%20ambientales%20del%20Manganeso>
- Lens , P., Hulshoff, L., Wilder, P., & Asano, T. (2002). *Water Recycling and Resource Recovery Industry*. Padstown: Publishing.

- Maderey, L., & Jiménez, A. (2005). *Principios de Hidrogeografía. estudio del ciclo Hidrológico* . México: Serie Textos Universitarios.
- Méndez, T., Rodríguez, L., & Palacios, S. (2000). *Impacto del Riego con Aguas Contaminadas, evaluado a través de la presencia de metales pesados en suelos*. DF, México.
- Miller, R. M. (2011). *How a lagoon works for livestock Wastewater Treatment*. UtahState University.
- Ministerio del Ambiente. (s.f.). *Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente*.
- Moletta, R. (2005). *Winery and distillery wastewater treatment by anaerobic digestion* . Narbonne: Water Science and Technology .
- Moller, S. (9 de mayo de 2013). *Palm oil: producción, consumo y distribución mundial del aceite de palma*. Obtenido de CABI: ca-bi.com
- Nacional, A. (2014). *Ley Orgánica de Recursos Hídricos usos y aprovechamiento del Agua* . Registro Oficial.
- Nazih, S. (1986). Interactions of temperature, pH, and biomass on the nitrification process. *Water Pollution Control Federation* , 52-59.
- NSW. (9 de Diciembre de 2014). *Water Quality*. Obtenido de Environment & Heritage: <http://www.environment.nsw.gov.au/water/waterqual.htm>
- Orellana, J. (2005). *Características del agua potable* . Ingeniería Sanitaria UTN.

- Otoniel Buenrostro, S. C. (2000). La digestión anaerobia como alternativa de tratamiento a los residuos sólidos orgánicos generados en los mercados municipales. *Rev. Int. Contam. Ambient.*, 16(1), 19-26.
- Pardillos, R. (2010). *Tratamientos del agua de una caldera de vapor*. Zaragoza: Escuela Universitaria Ingeniería Técnica Industrial .
- Pipeline. (1997). *Lagoon System Can Provide Low- Cost Wastewater Treatment* . Margantown: National Small flows clearinghouse.
- Ridzuan, M., Hassan, M., Shirai, Y., Samsu, A., Ali, A., & Idris, J. (2013). treatment of effluent from palm oil mill process to achieve river water quality for reuse as recycled water in a zero emission system. *Journal of Cleaner Production*, 1-4.
- Rueda, G., Gonzales, F., & Cardenas , L. (2009). *Informe de sostenibilidad Extractora Central S.A* . Bucaramanga- Santader: Textos Enlaza.
- Sánchez, O., Herzig, M., Peters, E., Márquez, R., & Zambrano , L. (s.f.). *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*. México D.F: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Sans, R., & Ribas, J. (1989). *Ingeniería ambiental: Contaminación y tratamientos*. Barcelona: Marcombo, S.A.
- Sardiñas, O., Chiroles, S., Fernández, M., Hernández, Y., & Pérez, A. (2006). *Evaluación físico-química y microbiológica del agua de la presa El Cacao (Cotorro, Cuba)*. La Habana: Instituto Nacional de Higiene.



- Setiadi, T. (s.f.). Palm oil and palm waste potential in indonesia. *Water and Wastewater treatment technologies* , 1-6.
- Siebe, C. (1997). Acumulación y Disponibilidad de Metales Pesados en Suelos Regados con Aguas Residuales en el Distrito de Riego 03, Tula, Hidalgo, México. *Rev. Int. Contam. Ambient.* , 15-21.
- Stenstrom, M., & Poduscka, R. (2003). the effect of dissolved oxygen concentration on nitrificatio. *Water Research*.
- Strenstrom, M., Silverman, G., & Bursztynsky, T. (1997). Oil and Grease in Urban Stromwaters. *Journal of Environmental Engineering*, 58-72.
- Tchobamoglous, G., Burton, F, & Stensel D. (2003). *Wastewater engineering Treatment and Reuse*. Hong Kong: McGraw-Hill.
- Tchobanoglous, G., Burton, F., & Stensel, D. (2003). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*. Hong Kong: McGraw Hill.
- Valarezo García, N. (2010). *Efecto de la concentración de biomasa, aceites, vegetales, aceites vegetales quemados, sales e hidrocarburos en los lodas activados*. Quito: USFQ.
- Visvanathan, C., & Asano, T. (s.f.). *The Potential for industrial wastewater reuse*. California: University of California at Davis,.
- Wang, L., Hung, Y.-T., Lo, H., & Yapijakis, C. (2006). *Waste Treatment in the Food Processing Industry*. Boca Ralton: Taylor & Francis Group.
- Wilkes, J. (2008). *Fluid Mechnics for Chemical Enginners*. Boston: Prentice Hall Professional Technical References.

Yanez, E. (s.f.). Tratamiento de agua en Calderas de Vapor. *Quimicamp del Ecuador Cía. Ltda*, 4-50.

Agamuthu, P., Tan, E. L., & Shaiful, a. a. a. (1986). Effect of aeration and soil inoculum on the composition of palm oil mill effluent (POME). *Agricultural Wastes*, 15(2), 121–132. [http://doi.org/10.1016/0141-4607\(86\)90043-0](http://doi.org/10.1016/0141-4607(86)90043-0)

Alfaro, M., & Ortiz, E. (2006). Consejo nacional de produccion. Proceso de produccion del aceite de palma 2006. *MAG*, 2006, 1–5.

Asano, T., & Levine, a. (1996). Wastewater reclamation, recycling and reuse: past, present, and future. *Water Science and Technology*, 33(10-11), 1–14. [http://doi.org/10.1016/0273-1223\(96\)00401-5](http://doi.org/10.1016/0273-1223(96)00401-5)

Aslan, S., & Cakici, H. (2007). Biological denitrification of drinking water in a slow sand filter. *Journal of Hazardous Materials*, 148(1-2), 253–8. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.02.012>

Bahgat, M., Dewedar, A., & Zayed, A. (1999). Sand-Filters used for wastewater treatment :, 33(8), 1949–1955.

Carrera, J. (n.d.). Eliminación biológica de nitrógeno en un efluente con alta carga. *Universidad Autonoma de Barcelona*.

CONUEE. (2009). Tratamiento de agua para su utilizacion en calderas, (0155).

- Feng, S., Xie, S., Zhang, X., Yang, Z., Ding, W., Liao, X., ... Chen, C. (2012). Ammonium removal pathways and microbial community in GAC-sand dual media filter in drinking water treatment. *Journal of Environmental Sciences*, 24(9), 1587–1593. [http://doi.org/10.1016/S1001-0742\(11\)60965-0](http://doi.org/10.1016/S1001-0742(11)60965-0)
- Garcés, I. C., & Sánchez, M. C. (1997). Productos derivados de la industria de la palma de aceite. *Usos* 1, (1), 33–48.
- Healy, M. G., Rodgers, M., & Mulqueen, J. (2007). Performance of a stratified sand filter in removal of chemical oxygen demand, total suspended solids and ammonia nitrogen from high-strength wastewaters. *Journal of Environmental Management*, 83(4), 409–15. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.03.005>
- Igwe, J. C., & Onyegbado, C. C. (2007). A Review of Palm Oil Mill Effluent ( Pome ) Water Treatment, *I*(2), 54–62.
- James, D. (1978). Water recycling in a poultry processing.
- Jianlong, W., & Ning, Y. (2004). Partial nitrification under limited dissolved oxygen conditions. *Process Biochemistry*, 39(10), 1223–1229. [http://doi.org/10.1016/S0032-9592\(03\)00249-8](http://doi.org/10.1016/S0032-9592(03)00249-8)
- King, L. S., & Yu, L. C. (n.d.). A Retrofitted Palm Oil Mill Effluent Treatment System for Tapping Biogas, 106–114.
- Loma, L. (n.d.). Calidad de agua para generadores de vapor tabla de contenidos, (5).

Manz, D. H., Ag, P., & Filter, O. (n.d.). Slow Sand Filtration - Demand operated and cleaned using backwash.

Metcalf & Eddy, I. (2003). *wastewater Engineering treatment and reuse*.

Montgomery, J. M. (1981). Water recycling in the fruit and vegetable processing industry.

*Vasa*. Retrieved from <http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf>

Nakhla, G., & Farooq, S. (2003). Simultaneous nitrification-denitrification in slow sand filters.

*Journal of Hazardous Materials*, 96(2-3), 291–303. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12493214>

Nazih, K. S. (1986). Interactions biomass on the nitrification of pH , process and. *Water*

*Pollution Control Federation*, 58(1), 52–59.

Othman, M. R., Hassan, M. A., Shirai, Y., Baharuddin, A. S., Ali, A. A. M., & Idris, J. (2014).

Treatment of effluents from palm oil mill process to achieve river water quality for reuse as recycled water in a zero emission system. *Journal of Cleaner Production*, 67, 58–61. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.004>

Parker, D. S., Richards, T., & Parker, S. (1986). Nitrification in trickling filters. *Water*

*Environment Federation*, 58(9), 896–902.

Pechsuth, M., Prasertsan, P., & Ukita, M. (2001). High-rate anaerobic treatment of palm oil

mill effluent. *Original Article*, 23, 779–787.

- Peng, Y., & Zhu, G. (2006). Biological nitrogen removal with nitrification and denitrification via nitrite pathway. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 73(1), 15–26.  
<http://doi.org/10.1007/s00253-006-0534-z>
- Potter, L. (2011). La industria del aceite de palma en Ecuador: Un buen negocio para los perquenos agricultores. *FLacso Ecuador*, 5–149.
- Rao, S. M., Malini, R., Lydia, a., & Lee, Y. (2013). Contaminants removal by bentonite amended slow sand filter. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 35(1), 23–29.  
<http://doi.org/10.3103/S1063455X13010049>
- Rupani, P., & Singh, R. (2010). Review of current palm oil mill effluent (POME) treatment methods: Vermicomposting as a sustainable practice. *World Applied Sciences ...*, 11, 70–81. Retrieved from <http://www.academia.edu/download/30492048/12.pdf>
- Shavandi, M. A., Haddadian, Z., Ismail, M. H. S., & Abdullah, N. (2012). Continuous metal and residual oil removal from palm oil mill effluent using natural zeolite-packed column. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 43(6), 934–941.  
<http://doi.org/10.1016/j.jtice.2012.07.001>
- Sontaya, K., Pitiyont, B., & Punsuvon, V. (2013). Decolorization and COD Removal of Palm Oil Mill Wastewater by Electrocoagulation, (9), 27–30.
- Zaidun, N., & Assist, L. (2011). The effect of sand filter characteristics on removal efficiency of organic matter from grey, 4(2), 143–155.