



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA

LICENCIATURA DE BIOLOGÍA



**“ESTUDIO BACTERIOLÓGICO Y FISICOQUÍMICO DEL SISTEMA
DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UNA INDUSTRIA
TEXTIL”**

T E S I S

**PARA OBTENER TÍTULO DE
BIÓLOGO**

PRESENTA:

ALEJANDRO LUNA AGUILAR



Directora: QFB Esperanza del S. Robles Valderrama

Laboratorio: Calidad del Agua, Proyecto de Conservación y Mejoramiento Ambiental (CyMA), UIICSE

Los Reyes Iztacala, Tlalnepantla Edo Mex. 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

“Lo que sabemos es una gota de agua

Lo que ignoramos es el océano”.

Isaac Newton

INDICE

AGRADECIMIENTOS.....	4
DEDICATORIAS	5
1. INTRODUCCIÓN.....	6
2. ANTECEDENTES.....	9
3. MARCOTEÓRICO	10
3.1. Aguas Residuales	10
3.2. Tratamiento de las aguas residuales.....	12
3.2.1. Tratamiento de aguas residuales con lodos activados.....	13
3.3. Tratamiento de Aguas residuales industriales	14
3.4. Norma NOM ECOL-1997.....	15
3.5. Parámetros de control y operación en el tratamiento de aguas residuales... 16	
3.5.1. pH	16
3.5.2. Sólidos Suspendidos Totales(SST).....	16
3.5.3. Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV).....	16
3.5.4. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅).....	17
3.5.5. Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	17
3.5.6. Fósforo Total (FT)	17
3.5.7. Nitrógeno total(NT).....	18
3.5.8. Nitratos(N ₂)	18
3.5.9. Nitritos(N ₃)	18
3.5.10. Temperatura	19
3.5.11. Coliformes totales.....	19
3.5.12. Coliformes fecales	20
3.5.13. Tiempo de retención hidráulica.....	20
3.5.14. Relación Alimento/Microorganismos (F/M).....	20
3.5.15. Índice Volumétrico de lodos.....	21
3.5.16. Tiempo de Retención Celular (Θ _c).....	21
3.5.17. Volumen de Purga.....	21
3.5.18. Oxígeno Disuelto	22
3.5.19. Relación Carbono-Nitrógeno-Fósforo.....	22
3.5.20. Conductividad Eléctrica.....	22
4. JUSTIFICACIÓN	23
5. OBJETIVOS.....	24
6. MATERIALES Y MÉTODOS.....	25
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
7.1. Parámetros Fisicoquímicos... ..	30
7.2. Parámetros Bacteriológicos.....	37
7.3. Porcentajes de Remoción.....	40
7.3.1. Porcentaje de remoción de la Demanda Bioquímica de oxígeno DBO ₅	46
7.3.2. Porcentaje de remoción de Sólidos Suspendidos(SST).....	46
7.3.3. Porcentaje de remoción de Nitrógeno total (NT).....	47
7.3.4. Porcentaje de remoción de Fósforo Total (FT)	47

7.3.5. Porcentajes de remoción de la Demanda Química de Oxígeno(DQO)	48
7.3.6. Porcentajes de remoción de Coliformes totales y fecales	49
7.4. Parámetros de operación	50
7.4.1. Coeficiente de correlación entre los parámetros bacteriológicos y físicoquímicos con los parámetros de operación.....	53
7.5. Comparación de los resultados obtenidos en el efluente final con la NOM 003.....	55
8. CONCLUSIONES	57
REFERENCIAS	59

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi directora de la tesis la profesora “QFB Esperanza Robles Valderrama” por transmitirme sus enseñanzas y conocimientos y por darme la oportunidad de pertenecer a su equipo de trabajo.

También Agradezco a los miembros de mi comité evaluador en especial al Dr. Alfonso Lugo y a la M. en C. Dolores Hurtado Bocanegra por sus enseñanza y consejos que me brindaron, más en particular a la Profa. Dolores porque ella fue de mucha ayuda a encontrarle sentido a la carrera, con su forma de ser, pensar, sus pláticas que teníamos en pocas palabras en ella encontré ese amor y esa inspiración para seguir adelante con la carrera.

A la Dra. Rosario Sánchez por brindarme su ayuda, su amistad y por preocuparse por mi desempeño por sus palabras de motivación y de aprecio hacia mi persona y por sus grandiosas clases que tome con ella.

A Mayra y Humberto por sus buenos deseos y aprendizaje que obtuve en el poco tiempo de conocerlos, por esas experiencias que viví con ellos y esas charlas que me dejaron mucho aprendizaje.

A mis amigos en especial a Abraham, Marco, Juan y Omar (bubu) por creer en mí y por sus buenos deseos y sus palabras de aliento. Ellos estuvieron conmigo la mayor parte de la carrera, en los buenos momentos en los malos y en los peores; gracias por brindarme su amistad y su apoyo, ya que además de mis amigos son como mis “HERMANOS”.

Agradezco a mi familia por brindarme su apoyo y a su paciencia, porque si me tarde mucho pero nunca perdieron la confianza en mí, y en los peores momentos siempre estuvieron conmigo.

DEDICATORIAS

A mi abuelito Miguel Estanislao (q.e.p.d), porque gracias a sus cuidados y porque estuvo conmigo y compartió la mayoría de mi infancia y parte de mi juventud soy lo que soy ahora y sé que donde quiera que esté él se encuentra orgulloso de mi gracias por todo abuelito.

A mi padre Eleazar y mis Hermanos Eleazar, Uriel por estar siempre conmigo que bien o mal creyeron en mi, por enseñarme que siempre hay que ser perseverantes y dedicado en lo que uno haga y por compartir cada momento bueno o malo junto conmigo y aunque siempre los hago repelar saben que jamás estaremos separados “siempre unidos”. En particular gracias a ti papa por mostrarme el camino idóneo y porque por ti y tus enseñanzas soy lo que soy ahora.

A mi madre Rosa y mi otro Hermano Eduardo, a pesar de no estar juntos me brindaron su apoyo de una u otra forma y cuando los necesite hay estuvieron gracias a ti madre porque si no fuera por ti y mi papa yo no estuviera redactando esta tesis “GRACIAS A LOS 2” porque supe aprender lo bueno de ambos.

A mi tío Juan y mis primos Sergio, Juan y Violeta gracias por su apoyo, sus enseñanzas, en particular mi tío que me apoyo en todo momento con libros o lo que se necesitara; gracias por todo.

A ti Abraham, Marco, Juan (Juanito) y Omar (bubu) Uds. que estuvieron prácticamente toda la carrera conmigo y que compartimos un sinfín de cosas juntos, y que estuvieron siempre a mi lado en este largo trayecto, gracias por sus muestras de apoyo y por creer en mí, sin dejar de lado que los considero como unos hermanos gracias por todo.

*A ti Seltzint por estar prácticamente toda la carrera conmigo, no solo fuiste mi novia, fuiste mi amiga, mi compañera de equipo de trabajo, de salón, fuiste mi musa inspiradora, la persona quien más creyó en mí, cuando ni mi familia en algunos momentos creía, tu jamás me dejaste solo siempre estuviste conmigo en las buenas en las malas, siempre me brindaste en el tiempo que estuvimos juntos tu amor incondicional, me apoyaste en todo momento y puedo decir que gracias a ti estoy donde estoy y que fuiste y serás mi gran amor
TE QUIERO MUCHISISIMO.*

A la Profesora Dolores porque ella fue quien me hizo encontrarle sentido a mi carrera, con sus enseñanzas sus pláticas motivacionales que tuve con ella y su forma de pensar tan excepcional que tiene, que motiva a cualquiera y que te hace creer que puede llegar a ser alguien en la vida a base de esfuerzo, dedicación y disciplina gracias por todo profesora espero jamás cambie y me siento orgulloso que sea parte de mi comité evaluador.

RESUMEN

Los grandes volúmenes que se generan de aguas residuales, sumado a la escasez del agua, representan un problema al momento de su descarga en los cuerpos de agua, ya que pueden producir malos olores y problemas de salud para las personas y seres vivos. Dentro de las aguas residuales están las de origen doméstico y las industriales, en este caso específicamente la industria textil. Este tipo de aguas generan un problema mayor que la doméstica, por los diversos químicos y colorantes que utilizan en sus procesos y son difíciles de remover. Por esta problemática en México se construyeron plantas de tratamiento de aguas residuales, y dentro de los diversos procesos de tratamiento se encuentran los lodos activados; en este proceso se implementa el uso de microorganismos para la degradación de la materia orgánica. En este trabajo el objetivo fue evaluar la eficiencia de remoción de materia orgánica, nutrientes y bacterias en una planta de tratamiento de aguas residuales de una industria textil. Se realizaron 11 muestreos en el influente, decantador, filtro y salida. En el decantador tuvo valores de remoción de materia orgánica (DBO5) por encima del 95%, mientras que la remoción de sólidos presentaron valores hasta un 84%, total incrementándose en la salida hasta en un 93%, en lo que respecta al nitrógeno total, éstos presentaron valores de remoción de hasta un 100% en el decantador, mientras que el fósforo no presentó en la mayoría de los casos remoción solo en algunos muestreos (1,3,4 y 11vo muestreo) esto quizás debido a la solubilización del fósforo en el decantador, Los coliformes presentaron remociones del 55% tanto fecales como totales. También estos parámetros fueron comparados con los límites permisibles por la NOM-003 para agua residual tratada, y los coliformes fecales presentaron en los muestreos valores entre 230,000 y 700000 UFM/100 ml, a excepción de uno en el que no hubo crecimiento (3er muestreo), quedando estos resultados por arriba de los límites máximos permisibles (1000 y 240 según el tipo de contacto). La DBO y los sólidos tuvieron valores por debajo de los límites de la norma (20 y 30) con valores entre < 2 hasta 16.7 y de 8.25

hasta 19 respectivamente. Por otro lado se evaluaron los parámetros de operación de la planta de tratamiento, obteniendo valores de tiempo de OD de lodos de hasta 2.2 mg/L que son aceptables, mientras que el porcentaje de relación Carbono-Nitrógeno-Fósforo (100-5-1) obtuvo valores por encima del intervalo en la caso del nitrógeno (22 mg/L), mientras que el fosforo en su mayoría se mantuvo por debajo de la relación (1mg/L), en lo que respecta a la conductividad presento valores de hasta 1235 $\mu\text{s}/\text{cm}$, el índice volumétrico de los lodos se midió hasta el 4to muestreo obteniendo valores de hasta 203.5 que se encuentran un poco por encima del intervalo (80-150), el tiempo de retención celular presento valores por encima del intervalo (hasta 40 días) que fueron de hasta 3134.26 días, por último la relación alimento microorganismo (F/M) estuvo por debajo del rango (0.5d⁻¹) presentando valores de hasta 0.025 d⁻¹. En general se pudo observar que los valores de los parámetros de operación contra los que se compararon estos resultados de este trabajo fueron diferentes ya que aquellos se refieren a valores para plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas y aquí se calcularon para una industria textil y se pudo observar que en general los valores obtenidos no afectaron la buena remoción presentada para la materia orgánica, indicando con ello que la planta de tratamiento de la industria textil opera adecuadamente para los parámetros estudiados. La presencia de coliformes en la salida es debido a que no se aplica la cloración, sin embargo esto es debido a que el agua tratada se reusa en los mismos procesos de operación sin causar problema alguno ya que no es usada para contacto humano ni riego.

Palabras clave: Lodos activados, aguas residuales, nutrientes, materia orgánica, parámetros de operación, bacterias

1. INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los elementos más comunes en la Tierra; en estado líquido se halla en ríos, lagos y presas, en depósitos subterráneos (llamados acuíferos) y ocupa los mares y océanos circundantes; en estado gaseoso se presenta como vapor de agua en la atmósfera y en estado sólido cubre las regiones polares y las montañas más altas en forma de hielo o nieve (CONAGUA, 2008).

Actualmente el hombre enfrenta una crisis severa a nivel mundial en lo que respecta al agua, la cual está lejos de ser resuelta, el problema fundamental es que la cantidad disponible se encuentra fija, mientras que la población aumenta cada año.

La cantidad de agua que hay en nuestro planeta es de 1,386 millones de km³ de la cual 97.5% es agua salada contenida en los mares y océanos y sólo el 2.5% es dulce y en su mayoría, se encuentra en glaciares y capas de hielo, otra porción se encuentra en depósitos subterráneos de difícil acceso y solo 0.3% del agua dulce se encuentra disponible (ríos y lagos), por lo tanto, únicamente hay 10.53 millones de km³ disponibles para su aprovechamiento. Además, la distribución en todo el mundo no es igual, en el continente americano hay 47%, seguido por Asia con 32%, África con 9%, en Europa hay el 7% y Oceanía con 6% (UNESCO, 2012; CONAGUA, 2008).

México es un país de grandes contrastes respecto al agua. La distribución del recurso es muy variable regionalmente, y se encuentra íntimamente ligada a la satisfacción de las necesidades sociales más básicas, puesto que la disponibilidad de agua en cantidad y calidad es una condición necesaria para hacer viable el desarrollo social, económico y ambiental de nuestro país. En el tema del agua son especialmente visibles las implicaciones que tienen su preservación y cuidado actual respecto de su disponibilidad para las generaciones futuras (CONAGUA, 2008).

El crecimiento económico no ha tomado en cuenta plenamente las señales de insuficiencia de agua. La concentración de la población y la actividad económica

han creado zonas de mucha escasez, no sólo en las regiones de baja precipitación pluvial sino también en áreas donde eso no se percibía como un problema al comenzar el crecimiento urbano o el establecimiento de la agricultura de riego (Santamaría, 2003).

Uno de los principales problemas que representa el agua en México, es la diferencia significativa en cuanto a la disponibilidad del agua. El 80% del agua se encuentra en la República Mexicana a menos de 500 msnm, mientras que solo el 5% se encuentra arriba de la cota de los 2000 msnm, por lo que se dificulta el suministro hasta las ciudades de mayor tamaño muchas por arriba de los 500msn (González 2009 Sainz, 2009).

Los problemas de escasez de agua en México se han agravado en las últimas décadas, lo que genera mayor tensión en la competencia por el recurso. El diseño de mecanismos de prevención y, en su caso, de mediación y resolución de conflictos, requieren de conocer a fondo la manera en la que surgen y se desarrollan (Santamaría, 2003).

Sainz y Becerra en el 2003 mencionan que el crecimiento poblacional y económico ha ejercido mayor presión sobre las reservas de agua en nuestro país, al punto que el volumen demandado es mayor que el suministrado en ciertas regiones del país, provocando problemas de distribución.

Por otro lado el crecimiento de la actividad industrial, así como la elevada demanda por parte de la población, ha generado serias alteraciones ecológicas, ya que la descarga de aguas residuales de diferentes orígenes (Industrial, doméstico, agrícola, ganadero, etc.) a los cuerpos de aguas naturales, se lleva a cabo sin ningún tipo de tratamiento, lo cual ha traído como consecuencia la contaminación de prácticamente todas las cuencas hidrológicas (Salazar ,2009). Entre los contaminantes más comunes tenemos la materia orgánica, nutrientes como nitrógeno y fosforo, además de microorganismos como las bacterias patógenas entre otros.

Por otro lado, el agua en la industria se utiliza de diferentes maneras: para limpiar, calentar y enfriar; para generar vapor; para transportar sustancias o partículas disueltas; como materia prima; como disolvente; y como parte constitutiva del propio producto; La industria ocupa gran cantidad de químicos, metales, detergentes entre otros tipos de sustancias tóxicas y esto ha sido un gran problema a lo largo de los años (Consejo Consultivo del Agua, 2010).

El agua saliente de sus sistemas es vertida a los cuerpos de aguas naturales, sin ningún tipo de tratamiento, lo cual ha traído como consecuencia la contaminación de prácticamente todas las cuencas hidrológicas que sirven de abastecimientos a los centros urbanos. Ya que estos contaminantes pueden llegar a eutrofizar los cuerpos de agua lo que implica el crecimiento de microorganismos y organismos bentónicos que pueden disponer de todo el oxígeno del cuerpo de agua y producir una anoxia lo que genera malos olores y la muerte de peces (Muñoz, 2008).

Algunos países se han dado a la tarea de investigar y llevar a cabo distintos tipos de tratamiento de agua para reducir los efectos dañinos que la contaminación ha ocasionado a este recurso, dependiendo no solo del tipo de contaminantes presentes, sino considerando el uso que se le dará nuevamente una vez que el agua haya cumplido con el tratamiento adecuado (Muñoz, 2008).

En México se implementó la creación de plantas de tratamiento de aguas residuales para dar un reúso a estas aguas de desecho. Dentro de esto, el 17% de las aguas residuales producidas en México son tratadas, de las cuales solamente el 9.25% alcanzó las condiciones esperadas, utilizándose para ello procesos sofisticados con equipo de alto costo, lo cual representa una gran limitante en su aplicación por el aspecto económico y por las bajas eficiencias logradas (Salazar, 2009).

Existen diversos métodos de tratamiento como son los procesos biológicos y entre éstos se encuentran los lodos activados (Muñoz, 2008).

Este proceso funciona principalmente mediante una mezcla compleja de microorganismos que crecen en reactores aireados oxidando la materia orgánica

biodegradable, que es transformada en biomasa microbiana y CO₂, a la vez que degrada nutrientes como fósforo y nitrógeno de sus formas orgánicas hasta oxidarlos a nitratos y ortofosfatos (Grady *et al.*, 1999 citado por Erijman *et al.*, 2011).

Aunque estos sistemas de tratamiento han sido estudiados en general, cada planta tiene características particulares biológicas y fisicoquímicas que dependen del volumen, tipo de agua y grado de contaminación del agua a tratar, por lo que la caracterización de estos procesos es importante para el desarrollo de una estrategia que permita optimizar el proceso biológico en cuanto a costos y a eficiencia de remoción (Caldera *et al.*, 2010).

2. ANTECEDENTES

Erijman *et al.* en el 2011 realizaron una reseña de los avances recientes en la ecología microbiana, la ecofisiología, la genómica y la ingeniería de procesos para observar como la integración de nuevos conocimientos permite superar las limitaciones del análisis microbiológico clásico para entender, predecir y optimizar el funcionamiento de los procesos de tratamiento de efluentes. De acuerdo con los mismos autores, el método por lodos activados es el más usado ya que remueve microorganismos, materia orgánica y algunos nutrientes como nitrógeno y fósforo o los vuelve menos dañinos para la salud.

Lahera en 2010 realizó un estudio sobre la sustentabilidad de las plantas de tratamiento de aguas residuales, plantea la situación de las plantas de tratamiento existentes en México y su pobre infraestructura, también menciona que hace falta tener mayor tecnología en la creación de dichas plantas para que pueda existir una sustentabilidad en el tratamiento de aguas residuales y puedan ser vertidas a los cuerpos de agua con la mínima contaminación.

Cortina, en 2008 realizó un estudio en México sobre las alternativas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil, donde realizaron pruebas de laboratorio

para evaluar la calidad en el tratamiento de las aguas residuales de dicha industria y así conocer si cumplen con las normas establecidas por la ley.

Méndez *et al.*, en 2004, utilizaron el tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados a escala de laboratorio; utilizando un módulo compuesto por 6 minirreactores, los cuales son una adaptación de los referidos en la bibliografía.

En general, en la literatura hay diversos autores que describen los diferentes tipos de tratamiento biológicos de las aguas residuales, mencionando los tipos de aguas residuales y contaminantes existentes en estas aguas, así como los organismos que intervienen en los sistemas del tratamiento biológico entre otros temas (Ferrer *et al.*, 2013; Osnaya, 2012; Moscoso, 2011; Muñoz, 2008; Russell, 2006 y Rojas, 2002).

3. MARCO TEORICO

3.1 Aguas Residuales

Las aguas residuales se definen como aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, comerciales, de servicios, agrícola e industriales entre otros (Rodríguez-Monroy y Duran 2006, citado por Romero *et al.*, 2009 y Osnaya, 2012). Los contaminantes en las aguas residuales son habitualmente una mezcla compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos (Muñoz, 2008). Rojas en el 2002 nos menciona que las aguas residuales contienen aproximadamente un 99.9% de agua y el resto por materia sólida. Los residuos sólidos están conformados por materia mineral y materia orgánica. La materia mineral proviene de subproductos desechados durante la vida cotidiana y de la calidad de las aguas de abastecimiento. La materia orgánica proviene exclusivamente de la actividad humana y está compuestos por materia carbonacea, proteínas y grasas. Muñoz en el 2008 menciona que dentro de las distintas clasificaciones que pueden establecerse de las aguas residuales, la más usada por su procedencia así se tiene: drenaje, escorrentía, doméstica (fecales y limpieza), industriales (comerciales e industriales) y agrarias (agrícolas y ganaderas).

Las aguas residuales industriales son aquellas que proceden de cualquier actividad o negocio en cuyo proceso de producción, transformación o manipulación se utilice el agua. Son enormemente variables en cuanto a caudal y composición, difiriendo las características de los vertidos, no sólo de una industria a otra, sino también dentro de un mismo tipo de industria. Éstas son más contaminadas que las aguas residuales urbanas, además, con una contaminación mucho más difícil de eliminar (Muñoz, 2008).

Martínez en el 2014 hace mención a que los contaminantes industriales presentan una composición muy variable dependiendo del uso industrial al que hayan sido destinadas las aguas, así se tiene que la industria textil se caracteriza por generar aguas residuales abundantes en materia orgánica y nutrientes.

Los vertidos de las fábricas textiles dependen del tipo de proceso a los que se sometan los distintos materiales empleados en la empresa textil. Podemos dividir las materias primas en tres grandes grupos: lanas, algodón y fibras químicas.

Mientras que Blanco en el 2009 hace mención, que la industria textil ha presentado notables problemas medioambientales vinculados principalmente al uso y gestión del agua. El impacto ambiental de sus efluentes líquidos es muy diverso por la gran variedad de materias primas, reactivos y métodos de producción existentes en ellos.

Además la industria textil consume diariamente grandes cantidades de agua en la mayoría de sus procesos. Dichos efluentes se caracterizan generalmente por su elevada Demanda Química de Oxígeno (DQO), elevada temperatura, alto contenido en color, pH inestable, sólidos en suspensión y compuestos orgánicos clorados.

3.2 Tratamiento de las aguas residuales.

El tratamiento de aguas residuales es el conjunto de operaciones unitarias de tipo físico, químico o biológico cuya finalidad es la eliminación o reducción de la contaminación así como la eliminación de las características no deseables de las aguas, bien sean naturales, de abastecimiento, de proceso o residuales llamadas, en el caso de las urbanas, aguas negras (Muñoz, 2008).

Mientras que Salazar en 2009 hace mención, que los procesos de tratamiento utilizan una fase primaria para realizar la separación física de sólidos mediante taques de sedimentación, seguida de una etapa secundaria, donde se lleva a cabo la degradación bacteriana de la materia orgánica (digestores anaerobios, lodos activados etcétera). También menciona que el empleo de sistemas biológicos de tratamiento de efluentes es la alternativa más viable para países en desarrollo. Posteriormente una fase secundaria que en la mayoría de los casos son de carácter biológicas, se utilizan ciertos microorganismos capaces de degradar la materia orgánica e inorgánica; después una fase terciaria que por lo general se implementan tecnologías más avanzadas (filtros de membrana, filtros de cuarzo y el más sofisticado y hasta ahora el de mayor vanguardia la osmosis inversa) para remover partículas de mucho menor tamaño como metales pesados entre otros.

El propósito del tratamiento dependerá del uso que se le quiera dar al agua tratada, por ejemplo:

En las aguas de uso agrícola su objetivo principal es la reducción de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo.

En el caso de la industria, es la reducción de compuestos orgánicos e inorgánicos, en algunos casos es necesario llevar a cabo un pre-tratamiento, debido a la toxicidad de algunos compuestos que pueden llegar a ser nocivos para los microorganismos (Metcalf y Eddy, 1998, citado por Martínez, 2014).

En las aguas residuales domésticas su objetivo es la reducción de la materia orgánica y nutrientes (nitrógeno y fósforo) (Pérez, 2002 citado por Martínez 2014).

En México el 17% de las aguas residuales producidas son tratadas, de las cuales solamente el 9.25% alcanzó las eficiencias esperadas (Salazar, 2009).

Según la información publicada en el 2008, en México existen 1833 plantas de tratamiento de aguas residuales en operación formal, repartidas en los diferentes estados que conforman la república. La capacidad instalada de estas plantas es de 113 m³ /s, sin embargo, el caudal procesado es de 83.6 m³/s, equivalente al 40.2% del total de las aguas residuales colectadas en los sistemas formales de alcantarillado, estimado 208 m³/s. El rango del caudal tratado va desde 61.3 L/s en Campeche, hasta 11, 646 L/s en Nuevo León. Solo dos estados tratan el 100% de las aguas que recogen en alcantarillas: Aguascalientes y Nuevo León (CONAGUA, 2009, citado por Quivera, 2010).

Dentro de los tratamientos biológicos uno de los más utilizados son los lodos activados.

3.2.1 Tratamiento de aguas residuales con lodos activados

Este tratamiento se desarrolló por primera vez en Inglaterra en el año 1914 y actualmente es el método estándar de tratamiento de aguas residuales en los países desarrollados (Méndez *et al.*, 2004).

Es un sistema de mezcla completa. Su nombre proviene de la producción de una masa activada de microorganismos capaz de estabilizar un residuo en medio aerobio. Estos lodos, se desarrollan inicialmente por una aireación prolongada bajo condiciones que favorecen el crecimiento de organismos que tienen la habilidad de oxidar materia orgánica. Siendo el oxígeno uno de los principales factores limitantes que permiten el óptimo crecimiento microbiano en un sistema de tratamiento de aguas. Este método está provisto de un sistema de recirculación y eliminación de lodos.

El ambiente aerobio en el reactor se consigue mediante el uso de aireadores mecánicos, que también sirven para mantener el líquido en estado de mezcla completa. La aireación favorece también a la liberación del nitrógeno y óxidos de

nitrógeno y así promuevan la regeneración completa de las bacterias degradadoras de fósforo (Pérez, 2002 citado por Martínez, 2014).

Al cabo de un periodo determinado de tiempo, la mezcla de las nuevas células con las antiguas se conduce hasta un tanque de sedimentación para ser separados por sedimentación del agua residual tratada. Una parte de las células sedimentadas se recirculan para mantener en el reactor la concentración de células deseadas, mientras que la otra parte se purga del sistema. La fracción purgada corresponde al crecimiento celular (Méndez *et al.* 2004).

Las partículas de lodo activado, llamadas flóculos, están compuestas por millones de bacterias en crecimiento activo aglutinadas por una sustancia gelatinosa. El floculo absorbe la materia orgánica y la convierte en CO₂. Además presenta una reducción de la DBO₅ que fluctúa entre el 60 y el 85% (Muñoz, 2008). Mientras que Palma y Manga en el 2005 hacen mención que el sistema de lodos activados presenta una buena eficiencia en cuanto a la remoción de DBO₅ y DQO, presentando porcentajes de remoción que van del 80 al 90%.

3.3 Tratamiento de aguas residuales industriales

El proceso de depuración de aguas industriales mediante lodos activados generalmente conlleva un proceso dividido en tres etapas: tratamiento primario donde se le da un tiempo de reposo al flujo del agua para sedimentar el material coagulado; después un tratamiento secundario (biológico) en donde el influente está en contacto con los lodos durante determinado periodo de tiempo recibiendo oxígeno mediante un sistema de difusores de burbuja fina, posteriormente el flujo se dirige a estanques circulares (decantador), el agua reposa en ellos por otro periodo de tiempo permitiendo así la floculación y sedimentación de la masa de lodos activados, los cuales se depositan en el fondo (agua dura) y regresan al proceso para servir de inóculo y finalmente el influente pasa a un tratamiento terciario permaneciendo en un estanque de cloración por un tiempo estimado de

30 minutos, para finalmente ser vertida al cuerpo de agua, siendo este proceso fundamental para la eliminación de bacterias y así evitar contaminar los cuerpos de aguas y provocar enfermedades (Pacheco *et al.*, 2006 citado por Martínez, 2014).

3.4 Norma NOM 003 ECOL-1997

Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas tratadas que se reúsen en servicio al público, con el objeto de proteger el medio ambiente y la salud de la población, y es de observancia obligatoria para las entidades públicas responsables de su tratamiento y reúso.

En caso de que el servicio al público se realice por terceros, éstos serán responsables del cumplimiento de la presente Norma, desde la producción del agua tratada hasta su reúso o entrega, incluyendo la conducción o transporte de la misma (SEMARNAP, 2003).

3.5 Parámetros de control y operación en el tratamiento de aguas residuales

(Marín *et al.*, 2013)

3.5.1 pH

Es una forma de expresar la concentración de iones Hidrógeno $[H^+]$ o más exactamente de su actividad. Se usa universalmente para expresar la intensidad de las condiciones ácidas o alcalinas de una solución. En concentraciones excesivas de H^+ afectan el agua en algunos de sus usos y por esta razón es una medida de polución en potencia.

El pH es el que controla el grado de disociación de muchas sustancias. No debe confundirse con la acidez o la alcalinidad.

En este caso, la presencia de carbonatos, fosfatos y de iones similares dan al agua un poder bufferizante y entonces la adición al agua de un ácido o de una base en tales condiciones no causa mayor efecto en el pH.

Por lo tanto el pH es importante en el proceso de potabilización del agua sobre todo en:

- La Coagulación. Hay un valor de pH para el cual el proceso es más eficiente.
- La Desinfección. La reacción del hipoclorito adiciona iones H⁺, disminuyendo el pH

La suavización o ablandamiento se controla con pH, es vital en los procesos aerobios y anaerobios, se debe controlar en las marchas analíticas.

3.5.2 Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Son sólidos constituidos por partículas y materia orgánica en suspensión y/o coloidal, que son retenidos en el elemento filtrante. Los sólidos suspendidos totales o el residuo no filtrante de una muestra de agua natural residual industrial o doméstica, se definen como la porción de sólidos retenidos por un filtro de fibra de vidrio que posteriormente se sea a 103-105 C° hasta un peso constante. El incremento de peso en el filtro representa el total de sólidos suspendidos.

3.5.3 Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)

Es la cantidad de materia orgánica e inorgánica capaz de volatilizarse por efecto de la calcinación a 550C° ± 50C° en un tiempo de 15 a 20 min. La concentración de sólidos volátiles se suele considerar como una medida aproximada del contenido de materia orgánica, en ciertos casos de microorganismos tales como bacterias y protozoos entre otros.

3.5.4 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)

Es el parámetro que mide el contenido de materia orgánica biodegradable que posee un cuerpo de agua, y la cantidad de oxígeno necesario para su descomposición. La medición expresa, la cantidad de materia orgánica que puede ser consumida u oxidada, por una población bacteriana en una muestra de agua durante un cierto tiempo.

Cuando se descargan aguas con DBO₅ altas a un cuerpo de agua, las bacterias y otros microorganismos, disponen de una rica fuente de alimentos, lo que permite que se reproduzcan con rapidez. Las cantidades, cada vez mayores de bacterias, consumen el oxígeno del agua para degradar la materia orgánica. Si la DBO₅ del efluente es demasiado elevada, o el cuerpo receptor no es capaz de diluirla hasta alcanzar un nivel seguro, la cantidad de oxígeno disuelto disminuye, de tal forma que los peces y otros organismos acuáticos mueran asfixiados.

3.5.5 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno, es una estimación de la materia susceptible a oxidación, por un oxidante químico fuerte. Esto significa que requiere condiciones menos controladas que la DBO₅. El límite que se permite para descargas a sistemas de alcantarillado, no debe exceder de 75mg/L (Marín *et al.*, 2013).

3.5.6 Fósforo Total (FT)

El fósforo generalmente se encuentra en aguas naturales, residuales y residuales tratadas, como fosfatos. Éstos se clasifican como ortofosfatos, fosfatos condensados y compuestos organofosfatados. Estas formas de fosfatos provienen de una gran cantidad de fuentes, tales como productos de limpieza, fertilizantes, procesos biológicos, etc.

Los fosfatos son sustancias solubles en agua, que los productores primarios necesitan para su desarrollo; pero si se encuentran en cantidades excesivas, inducen el crecimiento desmedido de algas y otros organismos, provocando la eutrofización del agua. Cuando estas algas y otros vegetales mueren, al ser descompuestos por los microorganismos, se agota el oxígeno del agua, y se hace imposible la vida de otros seres vivos y su resultado es un agua mal oliente e inutilizable.

3.5.7 Nitrógeno total

El nitrógeno total es la suma del nitrógeno amoniacal y orgánico presente en la muestra, al igual que el fósforo, su exceso en el agua puede llegar a causar eutrofización.

Las moléculas del nitrógeno se encuentran principalmente en el aire, en el suelo y el agua. Es emitido extensamente por las industrias incrementando los suministros de nitratos y nitritos en el suelo y el agua, como consecuencia de reacciones que tienen lugar en el Ciclo del Nitrógeno, por lo que las concentraciones de nitrógeno en el agua aumentan. Si esas concentraciones exceden los 70 mg/L, puede cambiar la composición de especies debido a la susceptibilidad de ciertos organismos.

3.5.8 Nitratos

Se encuentra solo en pequeñas cantidades en aguas residuales domésticas, pero en plantas de tratamiento biológico puede encontrarse en concentraciones de hasta 30 mg/L. El nitrato es un nutriente esencial para muchos autótrofos fotosintéticos.

3.5.9 Nitritos

Considerado como una etapa intermedia en el ciclo del nitrógeno, pueden estar presentes en el agua como resultado de la descomposición biológica de materiales proteicos. En el agua la presencia de nitritos indican contaminación.

También se pueden producir nitritos en plantas de tratamiento o en los sistemas de distribución de agua, como resultado de la acción de las bacterias sobre el nitrógeno amoniacal.

El nitrito puede entrar en un sistema de abastecimiento, como inhibidor de corrosión en agua de proceso industrial. El nitrito es un agente etiológico potencial de metahemoglobinemia en los seres humanos. El ácido nitroso, que se forma de nitritos en disolución ácida, puede reaccionar como aminas secundarias (RR'-NH) para formar nitrosaminas, muchas de las cuales son conocidas por ser potentes agentes cancerígenos.

3.5.10 Temperatura

Una corriente puede cambiar su temperatura por efectos climáticos naturales o por la introducción de desechos industriales.

Es importante porque actúa sobre procesos como la actividad biológica, la absorción de oxígeno, la precipitación de compuestos, la formación de depósitos, y por los cambios de viscosidad en los procesos de tratamiento, como desinfección por cloro, filtración, floculación, sedimentación y ablandamiento.

3.5.11 Coliformes totales

Los Coliformes totales, comprenden todos los bacilos Gram-negativos aerobios o anaerobios facultativos, no esporulados, que fermentan la lactosa con producción de gas en un lapso máximo de 48hrs, a $35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

Este grupo está conformado por 4 géneros principalmente *Enterobacter*, *Escherichia*, *Citrobacter* y *Klebsiella*, y se utiliza como indicador de contaminación fecal en el agua.

3.5.12 Coliformes fecales

Los Coliformes fecales se denominan termotolerantes, por su capacidad de soportar temperaturas más elevadas. Esta es la característica que la distingue de los Coliformes totales. Los Coliformes fecales son un subgrupo de los Coliformes totales, capaz de fermentar la lactosa a 44.5°C aproximadamente, el 95% del grupo de los Coliformes presentes en la heces, están formados por *Escherichia coli* y ciertas especies de *Klebsiella*. Como los Coliformes fecales se encuentran casi exclusivamente en las heces de los animales de sangre caliente, se considera que reflejan la presencia de contaminación fecal.

3.5.13 Tiempo de retención hidráulica

Se define como el tiempo en horas que transcurre entre la entrada del agua y su salida a través de un tanque.

Se consideran de:

- Alta Tasa: 1 a 7 horas
- Convencional: 8 a 12 horas
- Aireación extendida: 12 a 36 horas

3.5.14 Relación Alimento/Microorganismos (F/M)

Expresa la relación que existe entre la cantidad de alimento que llega al tanque de aireación por día (mg/L de DBO o DQO) y la cantidad de microorganismos que existen en el tanque (SSVLM mg/L), expresada en d⁻¹.

Se consideran:

- Alta Tasa: 0.9 a 1.6 d⁻¹
- Convencional: 0.5 a 0.8 d⁻¹.
- Aireación extendida: 0.05 a 0.4 d⁻¹.

3.5.15 Índice Volumétrico de lodos

El índice volumétrico de lodos es el volumen en mililitros ocupados por un gramo de lodo después de 30 minutos de sedimentación.

Se considera que:

- Menores a 70 g/ml los lodos son muy finos y la sedimentabilidad es muy rápida
- 70 a 150 g/ml es lo convencional y la sedimentación rápida
- Mayor de 150 g/ml son lodos esponjados y la sedimentabilidad muy lenta.

3.5.16 Tiempo de Retención Celular (Θ_c)

Se define como el tiempo promedio en días que un microorganismo permanece en el proceso de tratamiento.

Se consideran:

- Alta Tasa: 4 a 6 días.
- Convencional: 8 a 12 días.
- Aireación extendida: 9 a 15 días.
- Valores mayores a 15 días deberá realizar purga y menores tiene perdida de lodos o muy baja producción de lodos.

3.5.17 Volumen de Purga

Este control es importante debido a que siempre se generan nuevas células o microorganismos que van a ser utilizados para realizar las mismas funciones que sus antecesoras. Por lo tanto deben eliminarse los SSVLM.

3.5.18 Oxígeno Disuelto

El OD se utiliza para el control de la contaminación en aguas naturales, las cuales deben tener condiciones favorables para el crecimiento y reproducción de la población de peces y organismos acuáticos, suministrando niveles de oxígeno suficientes y permanentes.

- Se mide para asegurar las condiciones aerobias de un tratamiento.
- Los cambios biológicos producidos en un residuo líquido se conocen por la concentración de oxígeno disuelto.
- sirve como base para calcular la DBO.
- Es un factor de corrosión del hierro y el acero y se controla o elimina en sistemas de distribución de agua y vapor.

La medición del OD se mantiene entre 2 a 4 mg/L en la superficie y no menor a 0.5 mg/L en el fondo.

3.5.19 Relación Carbono-Nitrógeno-Fósforo

Debe existir un balance entre los nutrientes y la carga orgánica y deberá ser de 100-5-1%. El nitrógeno interviene en el proceso de Nitrificación y desnitrificación y el fósforo incorpora dentro del protoplasma de las bacterias cuando se multiplica u oxida materia y remueve del 50 al 90%.

3.5.20 Conductividad Eléctrica

La conductividad específica de un agua es la medida de la habilidad para transportar una corriente eléctrica, varía con el tipo y cantidad de iones que contenga expresado en $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Cualquier cambio en la cantidad de sustancias disueltas, en la movilidad de los iones disueltos y en su valencia, implica un cambio en la conductividad, y por ello

el valor de la conductividad es muy usado en el análisis de aguas para obtener un estimativo rápido del contenido de sólidos disueltos.

Por lo tanto cualquier valor de conductividad mayor a 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, provocara color grisáceo, olor fétido, exceso de espuma, abultamiento, bajas velocidades de asentamiento y rompimiento de los flóculos.

4. JUSTIFICACIÓN

El agua es la más abundante e importante sustancia a lo largo de nuestros tiempos, debido a los múltiples usos que se le da a la misma (doméstico, público, industrial, agrónomo entre otros) se requieren grandes cantidades de este recurso.

Esto nos ha llevado en la actualidad a tener una problemática de escasez mundial debido al mal uso que se le da; podemos destacar su desperdicio, contaminación (descargas de aguas negras, basura, químicos entre otras) de las cuencas hidrológicas y la mayoría de los cuerpos de agua sin dejar de lado también su disponibilidad ya que no en todos los países se cuenta con la disposición de tan vital líquido.

Debido a esta problemática, en diversos países como México, se han dado a la tarea de buscar soluciones para combatir estas problemáticas, una de ellas es el tratamiento de las aguas residuales cuyo objetivo es remover los contaminantes de dichas aguas y así poder dar un reúso al agua residual ayudando de esta forma a combatir el problema de la escasez del agua potable.

En lo que respecta a la industria, existe una problemática porque en su mayoría las industrias descargan sus aguas de desecho de forma directa y sin ningún tipo de tratamiento, esto representa un grave problema por los diversos químicos y sustancias corrosivas que se utilizan, en particular en la industria textil, además que en dicha industria se usan diversos colorantes para los procesos de teñido de las telas que se producen.

Por lo que es importante concientizar al sector industrial de lo importante que es el tratamiento de las aguas de su procesos industriales, para remover los

contaminantes previo a la descarga a ríos, lagos o causes hídricos, además de que estas acciones les permitan cumplir con las normas de descarga de aguas residuales (NOM-ECOL-1997) ; Cabe destacar que el problema de las descargas directas de las textileras hoy en día es un problema en varias regiones del país tal es el caso del Rio Tula por citar un ejemplo, por ello es de gran importancia evaluar y conocer los sistemas de tratamiento que se deben aplicar a los efluentes de este tipo de industrias.

Por otro lado en México existen pocos estudios relacionados con el tratamiento de aguas residuales de origen industrial y más particularmente de la industria textil.

Cabe destacar que entre los sistemas de tratamiento biológico más usados en la actualidad están los lodos activados con los cuales, de acuerdo a la literatura se obtienen buenas remociones de materia orgánica para los desechos domésticos, sin embargo en los desechos industriales y como consecuencia de la gran variedad de sustancias químicas que se utilizan, éste tratamiento debe ser estudiado en forma particular dependiendo del tipo de características físicas y químicas que constituyan el agua residual de cada giro industrial.

De ahí la importancia de seguir estudiando este sistema en las diferentes descargas industriales. Y realizar más estudios en aguas de esta índole, para así impedir que se sigan contaminado aún más nuestros cuerpos de agua y concientizar al sector industrial del daño que se le está haciendo a nuestros cuerpos de agua.

5. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia del funcionamiento tanto bacteriológico como fisicoquímico de un sistema de tratamiento de aguas residuales de una industria textil

OBJETIVOS PARTICULARES

Analizar los parámetros fisicoquímicos: DBO₅, DQO, nitrógeno total, sólidos suspendidos, sólidos suspendidos volátiles, nitratos, nitritos, fósforo total, pH.

Analizar los parámetros bacteriológicos: Coliformes totales y Coliformes fecales

Determinar la remoción de materia orgánica, nutrientes y bacterias

Evaluar los parámetros de operación: volumen del tanque, gasto de entrada, tiempo de retención, oxígeno disuelto, conductividad, relación alimento y microorganismos (A/M), índice volumétrico de lodos, volumen de purga, relación carbono-nitrógeno-fósforo.

Comparar los resultados del efluente con los estipulados por la Norma Oficial Mexicana NOM-03-ECOL-1997 para agua residual tratada

6. MATERIALES Y MÉTODOS

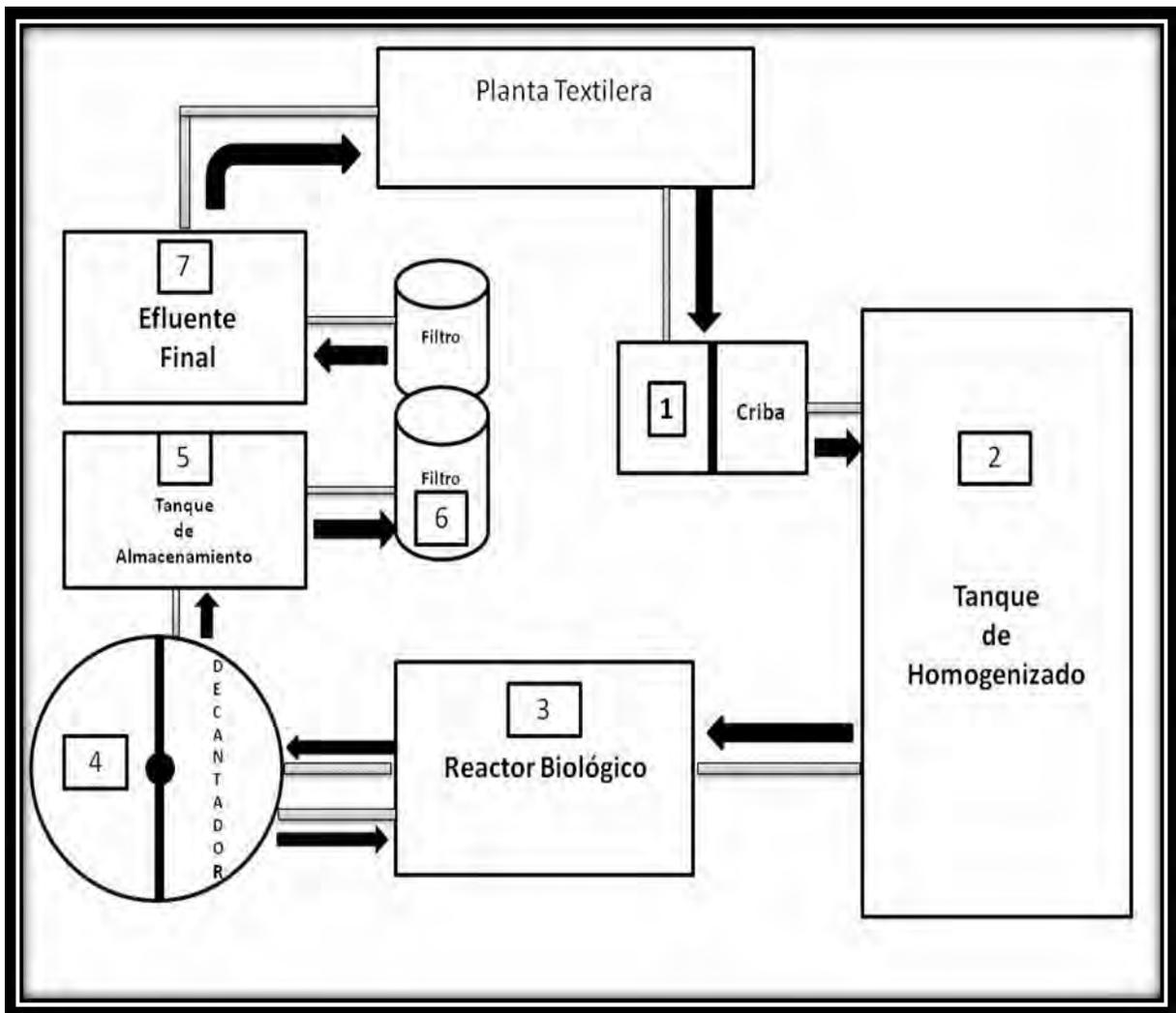
Descripción de la zona de estudio

Es una planta de tratamiento de aguas residuales de una industria textil localizada en el Estado de México.

La planta de tratamiento (ver esquema), consta de un tratamiento preliminar (**figura 1**) para la eliminación de fibras que podrían dañar las bombas, además de un sistema de tratamiento primario o también llamado tanque de homogenización (**figura 2**) que permite amortiguar los horarios “picos”, posteriormente esta agua pasa a un sistema biológico secundario (**figura 3**) donde se realiza la degradación biológica, terminado este proceso el agua pasa a un decantador (**figura 4**) que permite la separación del agua depurada (agua blanda) y los lodos biológicos (agua dura) y ésta última es regresada al proceso biológico; finalmente el agua es tratada por un proceso de filtración (**figura 5**) para la eliminación de sólidos suspendidos y mejoramiento de la calidad de agua. Para este estudio se tomaron muestras en el influente al sistema secundario o efluente del tanque de

homogenización, en el efluente del decantador y después del sistema de filtros de cuarzo.

A esta agua no se le aplica el tratamiento de cloración porque puede afectar al sistema de la textilera



Esquema de la planta de tratamiento de la industria textil



Figura 1 Tratamiento preliminar



Figura 2 Tanque de homogenización



Figura 3 Reactor biológico

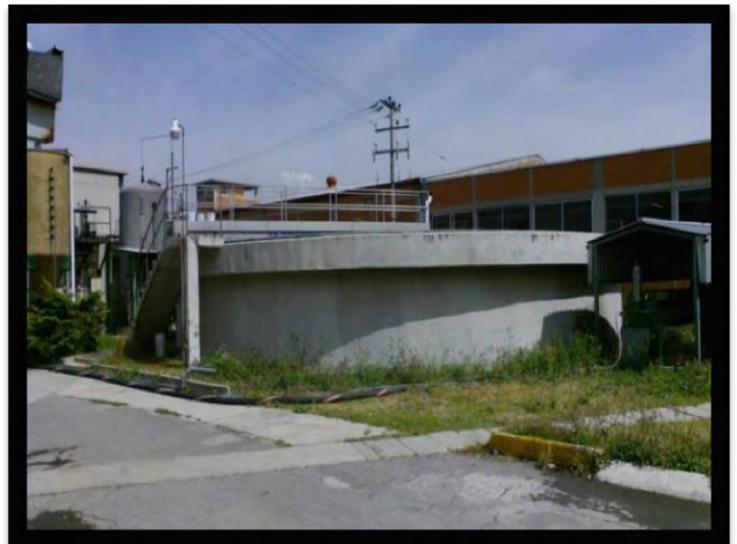


Figura 4 Decantador



Figura 5 Filtración

Muestreo

Se realizaron 11 muestreos entre febrero del 2013 y enero del 2014 en una planta de tratamiento de aguas residuales que se encuentra dentro de la industria textil que utiliza los lodos activados como sistema de tratamiento. Se seleccionaron como estaciones de muestreo el influente del sistema de tratamiento el decantador (salida de los lodos activados), salida de un filtro de cuarzo y la salida o cisterna donde se deposita el agua tratada.

In situ se determinaron en cada estación de muestreo; la temperatura y el oxígeno disuelto con un Oxímetro YSI. Mod 51, y pH con un potenciómetro HANNA Instruments HI 8314). Se tomó una muestra en envase estéril para la determinación de los indicadores bacteriológicos de contaminación, transportando el frasco en hielo y dos muestras en garrafones de un litro para las determinaciones fisicoquímicas, de los cuales uno se acidificó y se mantuvo en hielo y el otro solo se mantuvo en hielo. En el sistema de lodos activados se tomó una muestra de lodos en una botella de 500 ml.

En el laboratorio se determinaron los parámetros bacteriológicos Coliformes totales y coliformes fecales por la técnica del NMP (Número Más Probable) (APHA-AWWA-WEF, 1998).

Los parámetros fisicoquímicos se determinaron de acuerdo a las técnicas estandarizadas que se indican en la tabla 1 (APHA-AWWA-WEF, 1998).

Tabla 1. Técnicas analíticas de los parámetros fisicoquímicos
(APHA-AWWA-WEF, 1998)

Parámetro	Técnica
Sólidos suspendidos totales y volátiles	Gravimétrica
Sólidos Sedimentables	Sedimentación en Probeta de 1L
Conductividad	Conductimétrica medidor

	HANNA modelo HI 8733
Nitratos	Reducción con cadmio
Nitritos	Diazotización
DQO	Reflujo
DBO ₅	Dilución
Fósforo total	Cloruro estanoso
Nitrógeno total	Kjeldahl

Los parámetros de operación se calcularon con las siguientes fórmulas:

Tiempo de retención hidráulica:

$$TRH = V_r / Q_o$$

V_r = Volumen del Tanque (L, m³)

Q_o = Gasto de entrada de agua (L/seg, m³/d).

Relación alimento y microorganismos (F/M):

$$F/M = DQO * Q_o / SSVLM * V_r$$

DQO = Materia orgánica que ingresa al reactor (mg/L)

Q_o = Es el caudal de agua que ingresa al reactor (m³/día)

SSVLM = Es la cantidad de lodos activados que existe en el reactor (mg/L)

V_r = Volumen del Tanque (m³)

Tiempo de retención celular

$$\theta_c = SSVLM * V_r / Q_p * SSV_r + (Q_e * SSV_e)$$

SSVLM = Es la cantidad de lodos activados que existe en el reactor (mg/L)

Vr= Volumen del tanque de aereación (L)

Qp= Gasto de purga de lodos (L/d)

SSVr= Sólidos Suspendidos volátiles de la recirculación (mg/L)

SSVe= Sólidos Suspendidos Volátiles en el efluente (mg/L)

Qe= Gasto del efluente (L/d)

Índice volumétrico de lodos:

$$IVL = \frac{VSLM \cdot 30 \text{ min} \cdot 1000}{SSVLM \text{ (mg/L)}}$$

VSLM.= Volumen de sedimentación del licor mixto a los 30 min (ml/L)

SSVLM= Es la cantidad de lodos activados que existe en el reactor (mg/L)

Volumen de purga:

$$Vp= Vr \cdot (X2-X1)/X2$$

Vp= Volumen de purga (L/d)

Vr= Volumen del tanque de aereación (L)

X2= Concentración de SSVLM (mg/L)

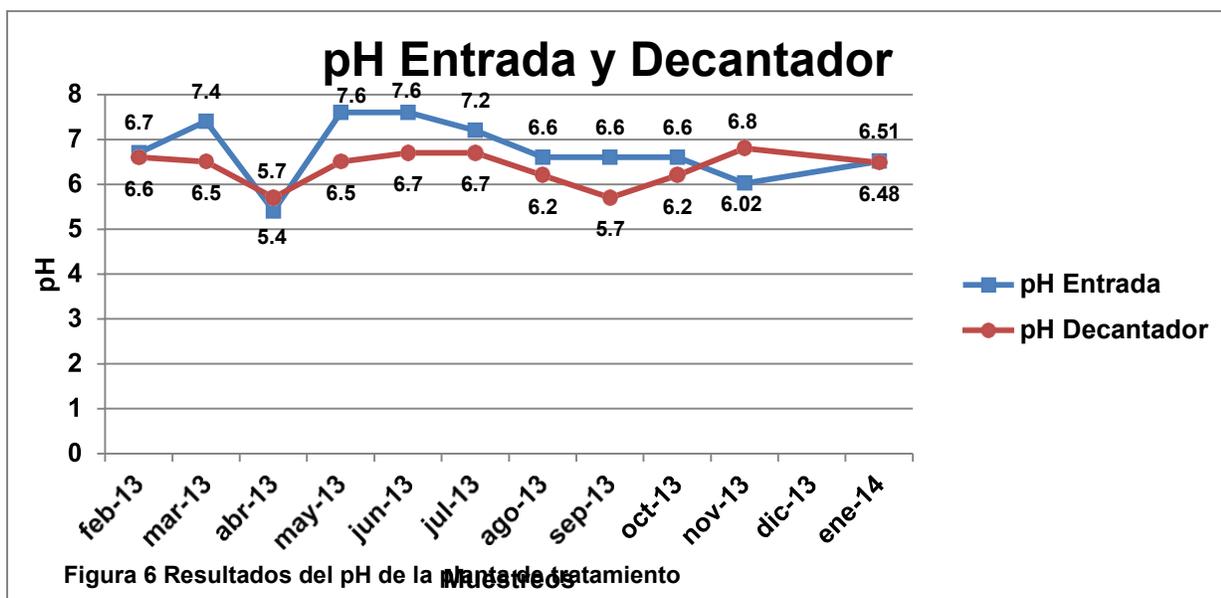
X1= Concentración de SSVLM establecido como condición de operación (A/M)

Relación carbono-nitrógeno-fosforo. Se determinará con los resultados de los nutrientes y la carga orgánica.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Parámetros Fisicoquímicos

En las figuras 6 a la 12, se muestran la comparación de los resultados entre los valores del influente con los del decantador (salida de los lodos activados), durante los muestreos realizados. En dichas figuras se puede mostrar la eficiencia del sistema de tratamiento en la industria textil respecto a los parámetros analizados.



En lo que respecta al pH del influente (entrada), mostró valores entre 5.4 y 7.4; mientras que en el decantador se obtuvieron valores entre 5.7 y 6.7, por lo que no existe una variación significativa entre los resultados, mostrando con ellos una mínima acidez y neutralidad, esto porque la industria textil utiliza una gran cantidad de productos químicos como blanqueadores, suavizantes, colorantes y limpiadores cuyos ingredientes activos son sales de bases y ácidos como el hidróxido de sodio, hidróxido de potasio, ácido sulfúrico, ácido oxálico entre otros, la mezcla de ácidos y bases en la utilización conjunta de estos productos, por el uso de estos químicos es que producen un agua residual con valores cercanos a

la neutralidad también (Muñoz, 2008). Por otro lado, los valores de pH se reducen tornando el agua más acida en el decantador, probablemente por el uso de ciertos ácidos (ácido clorhídrico, sulfúrico entre otros) usados en la industria textil, para el lavado, teñido y obtención de las telas (Martínez, 2014).

Comparando los valores de pH obtenidos con los de Tinoco (2011) y Blanco (2009) que van de 4.6 a 5 y de 7.19 a 7.53, se puede decir que el sistema presenta valores adecuados para el funcionamiento del sistema, teniendo alguna similitud con los valores de Blanco.

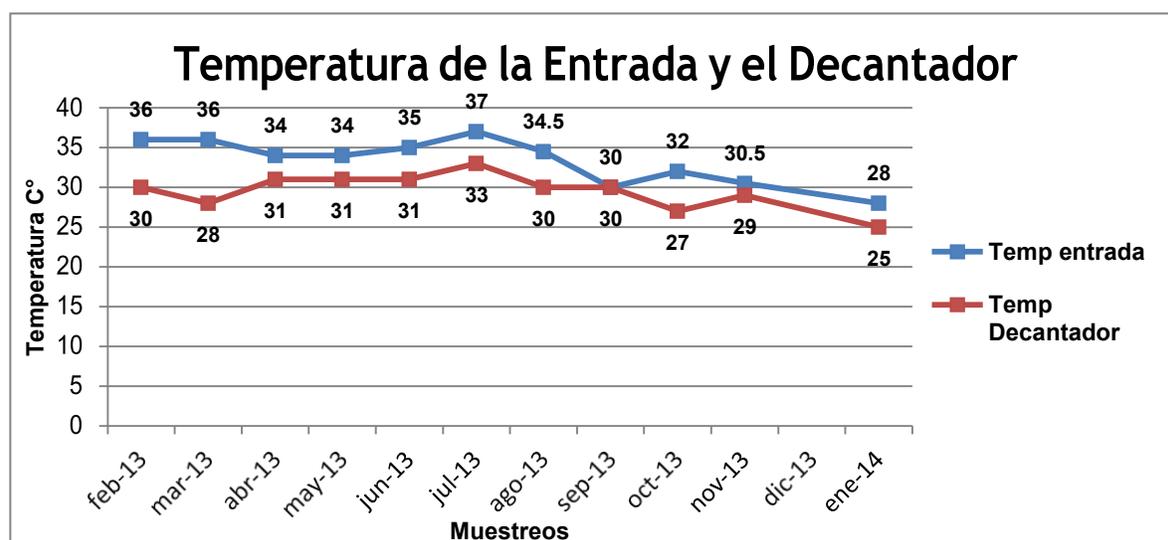
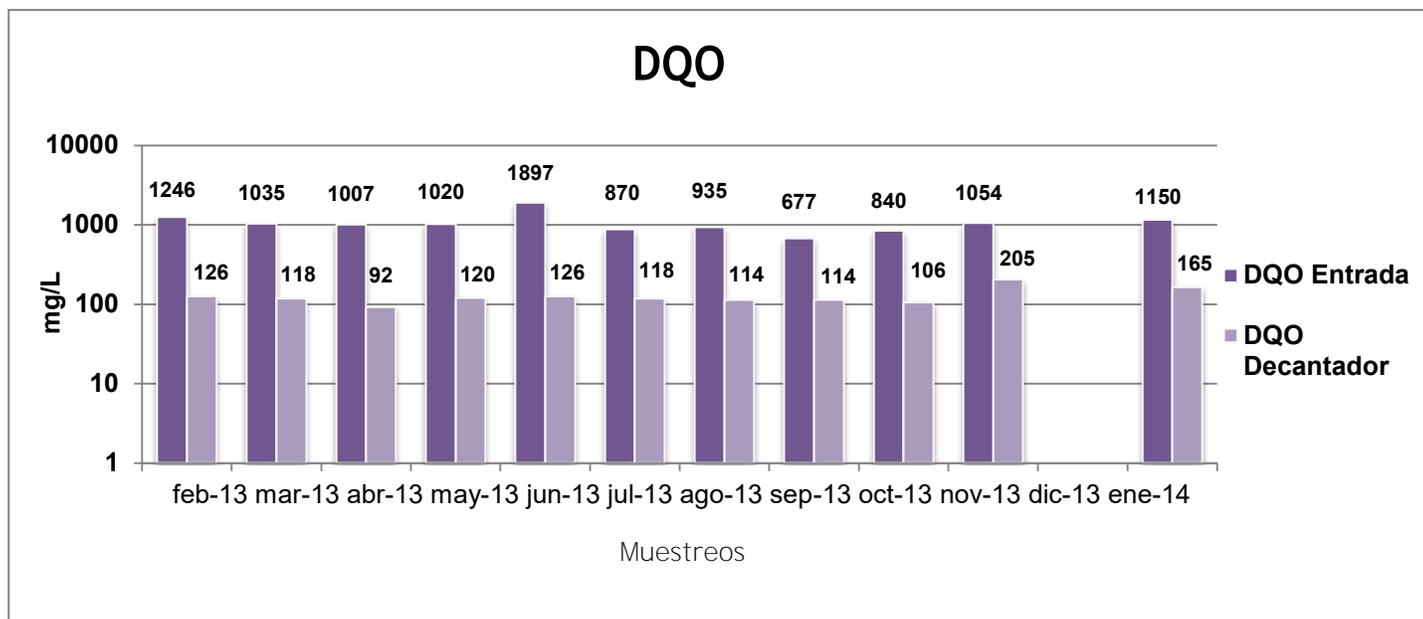


Figura 7 Resultados de la Temperatura de la planta de tratamiento

La temperatura en la entrada presenta valores altos que oscilan entre los 22 y 37°C, mientras que en el decantador se observó una mínima disminución de la temperatura presentando valores que van 25 a 31°C, con estos valores obtenidos tanto en la entrada como en el decantador no presentan problema alguno en el proceso de tratamiento del agua pero presentan estas temperaturas, puesto que el agua es usada para procesos de teñido y lavado de las telas y de ahí los valores pueden existir altas temperaturas. Por lo que este parámetro es muy importante pues determina la calidad del agua y su capacidad de estabilizar la materia orgánica. Los altos niveles de temperatura, pueden afectar tanto los niveles de oxígeno disuelto como la tasa de crecimiento bacteriana heterótrofa (Díaz, 2003); lo que favorece a la degradación de la materia orgánica putrescible elevando la

calidad del agua residual para posteriormente someterse a un último tratamiento por filtros con resinas de intercambio iónico (Martínez, 2014).



* Diciembre no hubo muestreo por período vacacional

Figura 8 Resultados de la Demanda Química de Oxígeno de la planta de tratamiento

La DQO Presento valores de hasta 1897 mg/L, esto, como se ha venido mencionando, debido al uso de variedad de productos químicos en la industria como son los limpiadores con base de amonio, productos en aerosol, blanqueadores, colorantes, adhesivos, y emulsionantes. También cuando desmontan colores lo hacen con hidróxido de amonio (Martínez, 2014).

De acuerdo con los valores obtenidos por Blanco (2009) hasta de 2750 mg/L, se puede observar que la planta no utiliza tantos químicos o se preocupa por no hacerlo.

En los valores del decantador (salida del proceso biológico), se observó una significativa disminución de la DQO obteniendo valores hasta de 205 mg/L, lo que indica una buena remoción en lo que respecta a este parámetro, comparándolo con los valores establecidos por las normas mexicanas (100 mg/L contacto directo y 120 contacto indirecto) en lo que respecta a este parámetro solo podría ser utilizada de forma indirecta (CONAGUA, 2008).

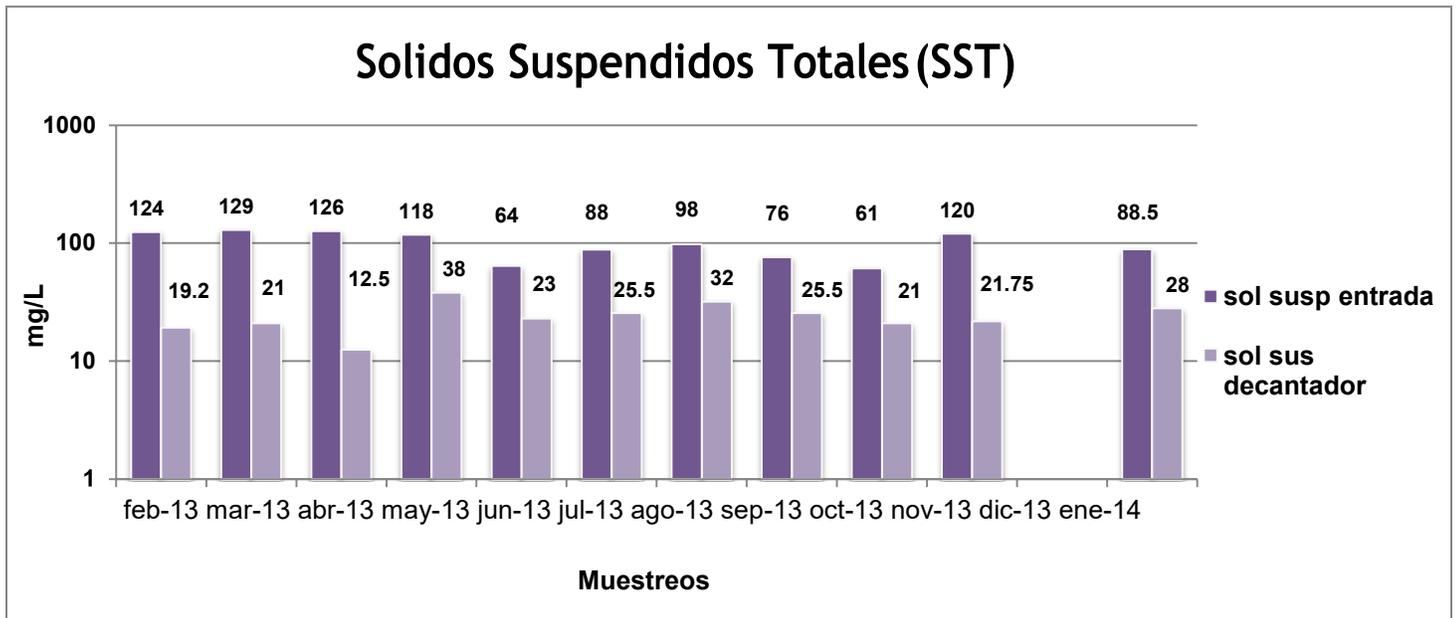
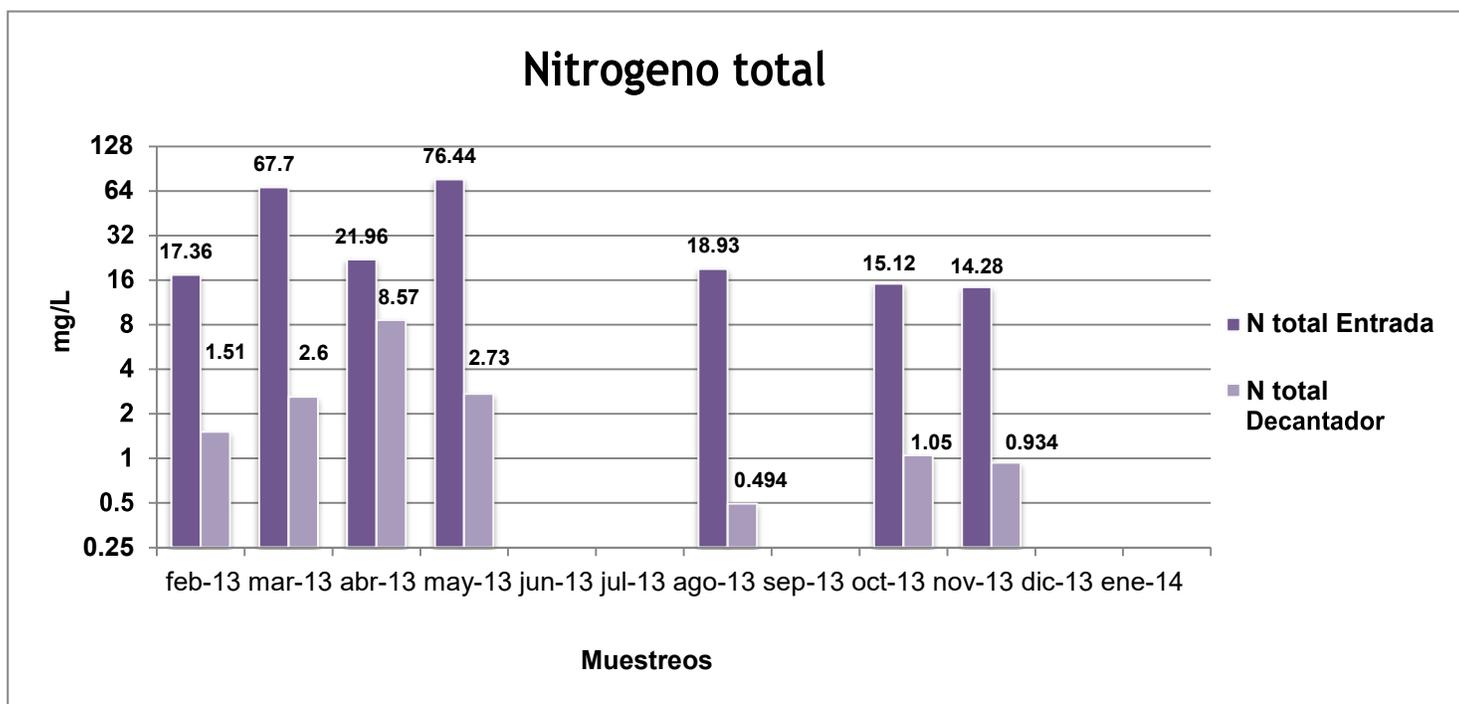


Figura 9 Resultados Sólidos Suspendidos Totales (SST) de la planta de tratamiento
 *Diciembre no hubo muestreo por periodo vacacional

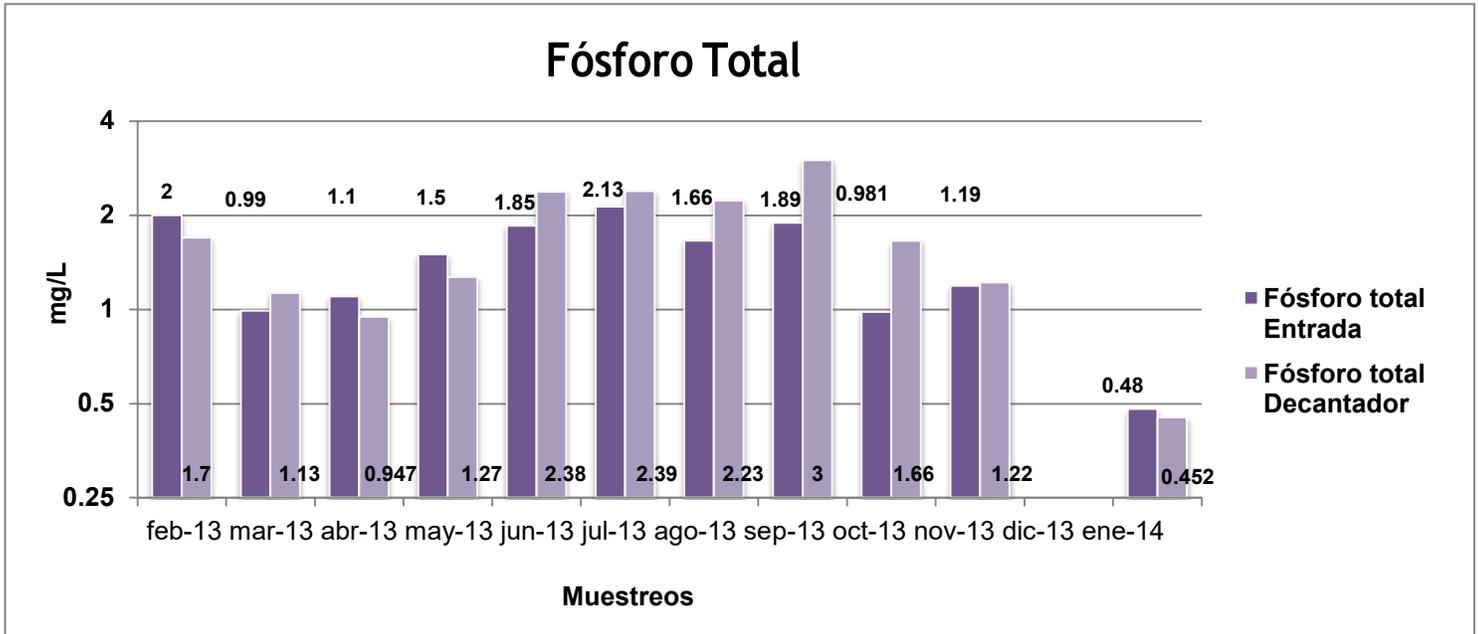
Los sólidos suspendidos son relativamente altos en la entrada, con valores de hasta 129 mg/L, esto debido al uso de colorantes, partículas de fibras que pasaron del tratamiento preliminar. Comparándolos con los resultados obtenidos por Martínez en el 2014 quien obtuvo valores de hasta 135 mg/L se puede inferir que la planta siguen las mismas condiciones en el agua en cuanto este parámetro. Mientras que en los obtenidos en el decantador muestran una mayor disminución obteniendo valores de hasta 28 mg/L, lo que muestra que también en este parámetro hay una remoción significativa, lo que puede deberse a una sedimentación durante el tiempo de permanencia del agua residual en los lodos y posteriormente al paso de la filtración obteniendo una remoción de este parámetro parecida a la que obtuvo Martínez donde alcanzó valores de hasta 70 mg/L.



*Diciembre no hubo muestreo por período
 Figura 10 Resultados de Nitrógeno Total de la planta de tratamiento

En cuanto al NT se obtuvieron valores altos de hasta 76.44 lo que indica aparte del uso de químicos, una posible mezcla del agua de origen industrial con la de los baños, oficinas u otros lugares de tipo doméstico. Estos valores fueron menores comparándolos con los que obtuvo Martínez (2014) de hasta 110 mg/L.

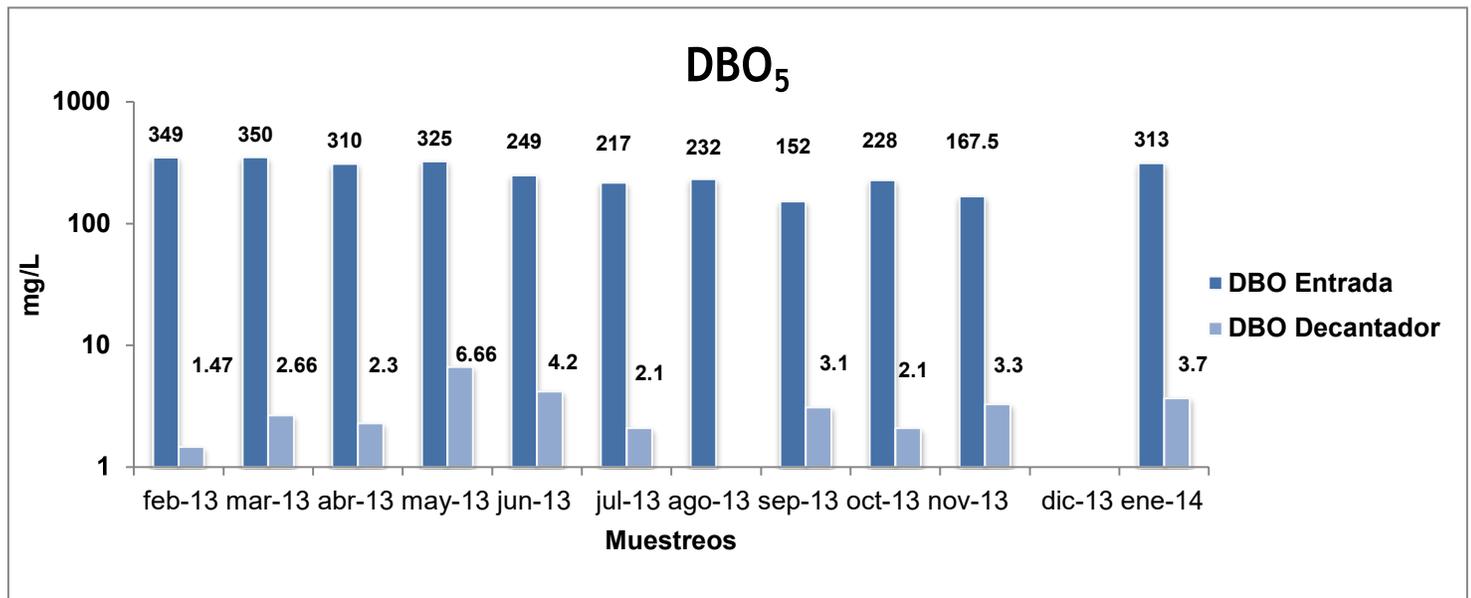
En el decantador se obtuvo una muy buena remoción mejor a la obtenida por Martínez (2014), quien obtuvo valores de hasta 19 mg/L, lo que indica además la presencia en el reactor biológico de bacterias nitrificantes que degradan el nitrógeno orgánico y amoniacal.



*Diciembre no hubo muestreo por período vacacional
 Figura 11 Resultados de Fosfato total de la planta de tratamiento

En cuanto al FT en la entrada se obtuvo valores relativamente bajos de hasta 2.13 mg/L, comparándolos con los de Martínez (2014), que obtuvo en la entrada valores hasta de 1.67; de igual manera que con el NT su presencia se puede deber a todas las sustancias químicas que se utilizan en los procesos.

En el decantador se obtuvieron valores de hasta 2.39 lo que indica que en la mayoría de los muestreos no existió una remoción al contrario de Martínez que obtuvo valores de hasta 1.44 mg/L. En general los lodos activados no son eficientes para la remoción de fosfatos por lo que si se requiere removerlos habrá que recurrir a un tratamiento adicional.



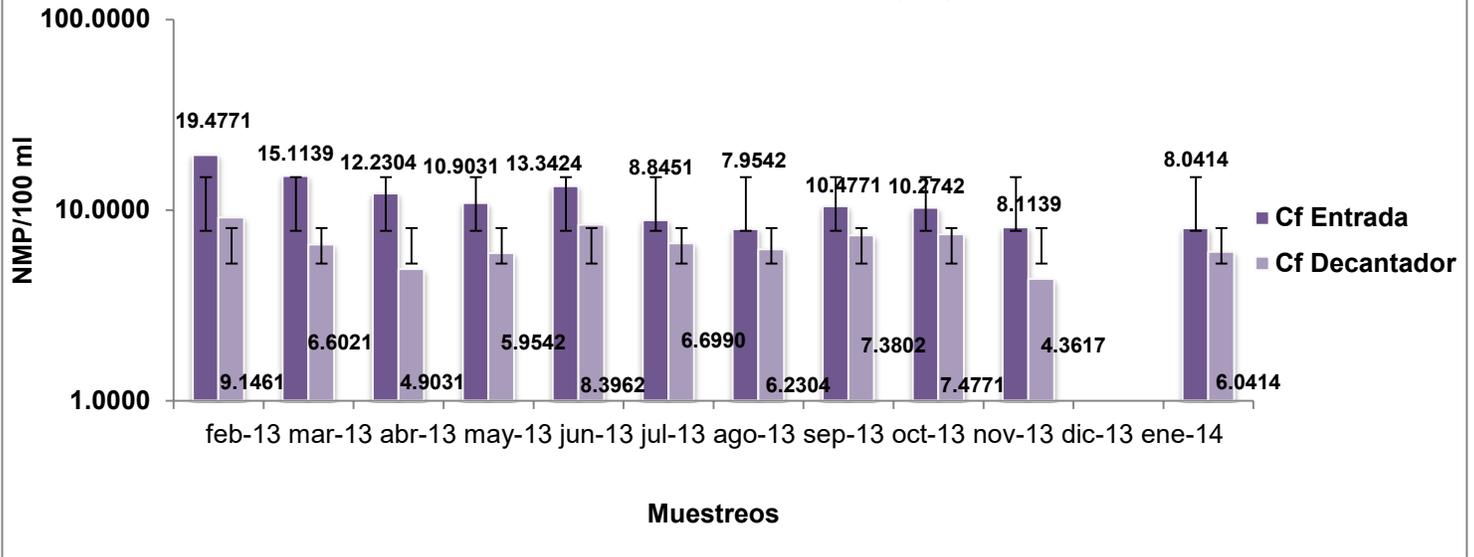
*Diciembre no hubo muestreo por período vacacional
 Figura 12 Resultados de DBO₅ de la planta de tratamiento

Los valores de DBO₅ en la entrada (máximos de 350 mg/L), se asemejan con los de Martínez (2014) quien obtuvo valores de hasta 391 mg/L. Mientras que los resultados obtenidos en el decantador muestran valores que llegan hasta 6.6 mg/L, lo que muestran una eficiente remoción en cuanto a materia orgánica, lo que indica una muy buena acción microbiana además de agentes químicos que degradan la materia orgánica (Muñoz, 2008).

7.2 Parámetros bacteriológicos

En las figuras 13 y 14 se muestran los resultados de los coliformes fecales (CF) y coliformes totales (CT) obtenidos tanto en el influente como en el decantador (salida de los lodos activados), y en ellas se puede observar la eficiencia en cuanto a la remoción bacteriológica.

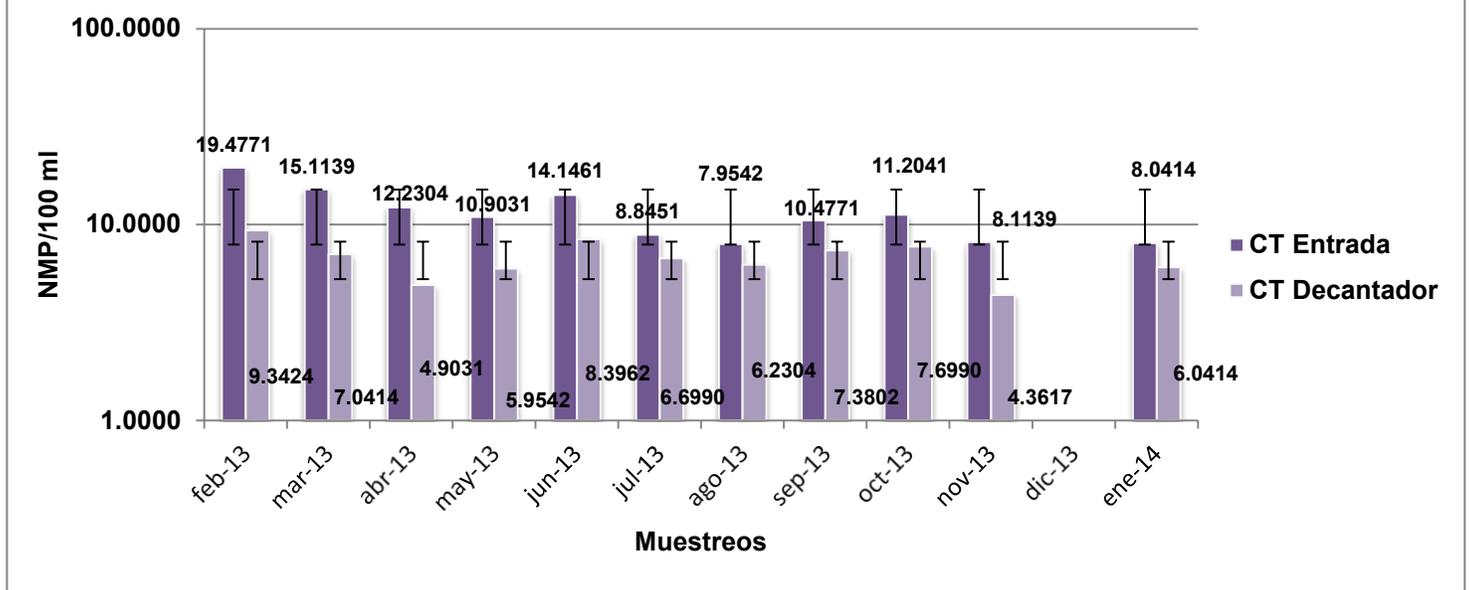
Coliformes Fecales (Cf)



*Diciembre no hubo muestreo por periodo vacacional

Figura 13 Resultados Coliformes fecales (Cf) de la planta de tratamiento

Coliformes Totales (CT)



* Diciembre no hubo muestreo por periodo vacacional

Figura 14 Resultados de Coliformes Totales (CT) de la planta de tratamiento

En el caso de los Coliformes fecales y totales los elevados valores obtenidos en la entrada (expresados en NMP/100 ml), por lo general se encuentran presentes en las aguas residuales de sanitarios y letrinas, mientras que los coliformes totales como un grupo cosmopolita esta presentes en todo tipo de agua residual (Martínez et al., 2008 citado por Martínez, 2014). Pero aunque este influente a tratar se dice que proviene únicamente de los procesos industriales llevados a cabo en la misma industria textil, la incidencia de coliformes tan altas solo puede indicar la presencia de desechos domésticos, lo cual se hizo saber a los encargados mostrando un desconocimiento real de la instalación pues al parecer que si había antes una conexión que comunicaba las aguas sanitarias con las residuales de la planta. Otro aspecto en menor grado pero que también pudo contribuir a la alta incidencia bacteriana puede ser la contaminación de las materias primas utilizadas, las cuales están conformadas por tejidos orgánicos de origen animal, así como de factores sanitarios en el transporte de las mismas (Martínez 2014).

Comparando los resultados de la entrada del influente de estos parámetros con los obtenidos en el decantador, se observó una remoción un poco menor de la mitad tanto de coliformes fecales y totales, la cual en comparación con ciertos parámetros fisicoquímicos, no resulta tan buena, esto debido a que ciertas bacterias pasan a través del reactor biológico mediante los flóculos que se generan en el reactor.

7.3 Porcentajes de Remoción

En las tablas 2 a la 11 se muestran los porcentajes de remoción de los parámetros más relevantes, comparando los resultados de la entrada (influyente) con los del decantador, el filtro y la salida, para mostrar que tan eficiente es el sistema para la remoción de nutrientes materia orgánica y bacterias (coliformes)

Tabla 2 Porcentajes de remoción del 1^{er} muestreo de la planta de tratamiento comparando (E-D, E-F, E-S)

Muestreo 1 19/Febrero/2013							
Parámetro	Entrada	Decantador		Filtro de Arena		Salida	
	Resultado obtenido	Resultado obtenido	% Remoción (E-D)	Resultado obtenido	% Remoción (E-F)	Resultado obtenido	% Remoción (E-S)
Coliformes Totales (log.)	19.4771	9.3424	52.03%	9.3802	51.84%	6.3802	67.24%
Coliformes Fecales (log.)	19.4771	9.1461	53.04%	9.3802	51.84%	5.9542	69.43%
DBO ₅ en mg/L	349	1.47	99.58%	0	100%	0	100%
Sólidos Suspendidos en mg/L	124	19.2	84.52%	17.8	85.64%	9	92.74%
Nitrógeno Total mg/L de N	17.36	1.51	91.30%	0.616	96.45%	0.391	97.75%
Fosforo Total como mg/L de P-PO ₄	2	1.7	15%	1.99	0.5%	1.97	1.5%
DQO en mg/L	1246	126	89.89%	86	93.1%	80	93.56%

Tabla 3 Porcentajes de remoción del 2^o muestreo de la planta de tratamiento comparando (E-D, E-F, E-S)

Muestreo 2 12/Marzo/2013							
Parámetro	Entrada	Decantador		Filtro de Arena		Salida	
	Resultado obtenido	Resultado obtenido	% Remoción (E-D)	Resultado obtenido	% Remoción (E-F)	Resultado obtenido	% Remoción (E-S)
Coliformes Totales (log.)	15.1139	7.0414	53.41%	12.2040	19.25%	7.0414	53.41%
Coliformes Fecales (log)	15.1139	6.6021	56.32%	11.5441	23.62%	6.8451	54.71%
DBO ₅ en mg/L	350	2.66	99.24%	4.11	98.82%	0	100%
Sólidos Suspendidos en mg/L	129	21	83.72%	34	73.64%	16.5	87.21%
Nitrógeno Total mg/L de N	67.7	2.6	96.16%	0.729	98.92%	0.391	99.42%
Fosforo Total como mg/L de P-PO ₄	0.99	1.13	-	1.11	-	1.17	-
DQO en mg/L	1035	118	88.60%	75	92.75%	73	92.95%

Tabla 4 Porcentajes de remoción del 3^{er} muestreo de la planta de tratamiento comparando (E-D, E-F, E-S)

Muestreo 3 23/Abril /2013							
Parámetro	Entrada	Decantador		Filtro de Arena		Salida	
	Resultado obtenido	Resultado obtenido	% Remoción (E-D)	Resultado obtenido	% Remoción (E- F)	Resultado obtenido	% Remoción (E –S)
Coliformes Totales (log.)	12.2304	4.9031	59.91%	2.8751	76.49%	0	100%
Coliformes Fecales (log)	12.2304	4.9031	59.51%	2.4771	79.75%	0	100%
DBO ₅ en mg/L	310	2.3	99.26%	6.83	97.80%	16.15	94.79%
Sólidos Suspendidos en mg/L	126	12.5	90.08%	9.5	92.46%	8.25	93.45%
Nitrógeno Total mg/L de N	21.96	8.57	78.04%	0.794	96.38%	0.37	98.32%
Fosforo Total como mg/L de P-PO ₄	1.1	0.947	13.91%	0.862	21.64%	0.858	22%
DQO en mg/L	1007	92	90.86%	70	93.05%	70	93.05%

Tabla 5 Porcentajes de remoción del 4^o muestreo de la planta de tratamiento comparando (E-D, E-F, E-S)

Muestreo 4 21/Mayo /2013							
Parámetro	Entrada	Decantador		Filtro de Arena		Salida	
	Resultado obtenido	Resultado obtenido	% Remoción (E-D)	Resultado obtenido	% Remoción (E- F)	Resultado obtenido	% Remoción (E –S)
Coliformes Totales (log.)	10.9031	5.9542	45.39%	5.3802	50.65%	5.6021	48.62%
Coliformes Fecales (log)	10.9031	5.9542	45.39%	5.3802	50.65%	5.4771	49.77%
DBO ₅ en mg/L	325	6.66	97.97%	12.7	96.1%	16.7	94.87%
Sólidos Suspendidos en mg/L	118	38	67.80%	33	72.03%	19	83.90%
Nitrógeno Total mg/L de N	76.44	2.73	96.43%	0.819	98.93%	0.683	99.11%
Fosforo Total como mg/L de P-PO ₄	1.5	1.27	15.33%	-	-	1.41	6%
DQO en mg/L	1020	120	88.24%	95	90.69%	90	91.18%

Tabla 6 Porcentajes de remoción del 5º muestreo de la planta de tratamiento comparando (E-D, E-F, E-S)

Muestreo 5 18/Junio /2013							
Parámetro	Entrada	Decantador		Filtro de Arena		Salida	
	Resultado obtenido	Resultado obtenido	% Remoción (E-D)	Resultado obtenido	% Remoción (E-F)	Resultado obtenido	% Remoción (E-S)
Coliformes Totales (log.)	14.1461	8.3962	40.65%	8.1461	42.41%	6.3802	54.90%
Coliformes Fecales (log)	13.3424	8.3962	40.65%	8.1461	42.41%	6.3802	54.90%
DBO ₅ en mg/L	249	4.2	98.31%	3.3	98.67%	5.38	97.84%
Sólidos Suspendidos en mg/L	64	23	64.06%	14.5	77.34%	11.25	82.42%
Nitrógeno Total mg/L de N	37.8	0	100%	0	100%	0	100%
Fosforo Total como mg/L de P-PO ₄	1.85	2.38	*	2.18	*	1.64	11.35%
DQO en mg/L	1897	126	93.36%	103	94.57%	61	96.78%

Tabla 7 Porcentajes de remoción del 6º muestreo de la planta de tratamiento comparando (E-D, E-F, E-S)

Muestreo 6 30/Julio /2013							
Parámetro	Entrada	Decantador		Filtro de Arena		Salida	
	Resultado obtenido	Resultado obtenido	% Remoción (E-D)	Resultado obtenido	% Remoción (E-F)	Resultado obtenido	% Remoción (E-S)
Coliformes Totales (log.)	8.8451	6.6990	24.26%	6.6990	24.26%	5.3617	39.38%
Coliformes Fecales (log)	8.5451	6.6990	24.26%	6.6990	24.26%	5.3617	39.38%
DBO ₅ en mg/L	217	2.1	99.03%	3.5	98.39%	2.2	98.99%
Sólidos Suspendidos en mg/L	88	25.5	71.02%	26.5	69.89%	13	85.23%
Nitrógeno Total mg/L de N	19.6	0	100%	0	100%	0	100%
Fosforo Total como mg/L de P-PO ₄	2.13	2.39	*	2.67	*	2.34	*
DQO en mg/L	870	118	86.44%	97	88.85%	70	91.95%

Tabla 8 Porcentajes de remoción del 7º muestreo de la planta de tratamiento comparando (E-D, E-F, E-S)

Muestreo 7 27/Agosto/2013							
Parámetro	Entrada	Decantador		Filtro de Arena		Salida	
	Resultado obtenido	Resultado obtenido	% Remoción (E-D)	Resultado obtenido	% Remoción (E-F)	Resultado obtenido	% Remoción (E-S)
Coliformes Totales (log.)	7.9542	6.2304	21.67%	5.1461	35.30%	6.4771	18.57%
Coliformes Fecales (log)	7.9542	6.2304	21.67%	5.1461	35.30%	6.4771	18.57%
DBO ₅ en mg/L	232	0	100%	2	99.14%	0	100%
Sólidos Suspendidos en mg/L	98	32	67.35%	16	83.67%	10	89.79%
Nitrógeno Total mg/L de N	18.93	0.494	97.39%	0.384	97.97%	0.384	97.97%
Fosforo Total como mg/L de P-PO ₄	1.66	2.23	*	2.1	*	2.3	*
DQO en mg/L	935	114	87.81%	79	91.55%	71	92.41%

Tabla 9 Porcentajes de remoción del 8º muestreo de la planta de tratamiento comparando (E-D, E-F, E-S)

Muestreo 8 24/Septiembre/2013							
Parámetro	Entrada	Decantador		Filtro de Arena		Salida	
	Resultado obtenido	Resultado obtenido	% Remoción (E-D)	Resultado obtenido	% Remoción (E-F)	Resultado obtenido	% Remoción (E-S)
Coliformes Totales (log.)	10.4771	7.3802	29.56%	8.2041	21.70%	7.2041	31.24%
Coliformes Fecales (log)	10.4771	7.3802	29.56%	7.9542	27.08%	6.9542	33.62%
DBO ₅ en mg/L	152	3.1	97.96%	2.54	98.33%	0	100%
Sólidos Suspendidos en mg/L	76	25.5	66.45%	19	75%	16	78.95%
Nitrógeno Total mg/L de N	17.36	0	100%	0	100%	0	100%
Fosforo Total como mg/L de P-PO ₄	1.89	3	*	2.83	*	2.77	*
DQO en mg/L	677	114	83.16%	91	86.56%	53	92.17%

Tabla 10 Porcentajes de remoción del 9º muestreo de la planta de tratamiento comparando (E-D, E-F, E-S)

Muestreo 9 22/Octubre/2013							
Parámetro	Entrada	Decantador		Filtro de Arena		Salida	
	Resultado obtenido	Resultado obtenido	% Remoción (E-D)	Resultado obtenido	% Remoción (E-F)	Resultado obtenido	% Remoción (E-S)
Coliformes Totales (log.)	11.2041	7.6990	31.28%	6.2304	44.39%	5.9031	47.31%
Coliformes Fecales (log)	10.2742	7.4771	27.22%	6.2304	39.36%	5.9031	42.54%
DBO₅ en mg/L	228	2.1	99.08%	5.9	97.41%	0	100%
Sólidos Suspendidos en mg/L	61	21	65.57%	10.5	82.79%	6.5	89.34%
Nitrógeno Total mg/L de N	15.12	1.05	93.05%	0.784	94.81%	0.392	97.40%
Fosforo Total como mg/L de P-PO₄	0.981	1.66	*	1.41	*	1.64	*
DQO en mg/L	840	106	87.38%	82	90.24%	78	90.71%

Tabla 11 Porcentajes de remoción del 10º muestreo de la planta de tratamiento comparando (E-D, E-F, E-S)

Muestreo 10 19/Noviembre/2013							
Parámetro	Entrada	Decantador		Filtro de Arena		Salida	
	Resultado obtenido	Resultado obtenido	% Remoción (E-D)	Resultado obtenido	% Remoción (E-F)	Resultado obtenido	% Remoción (E-S)
Coliformes Totales (log.)	8.1139	4.3617	46.24%	5.1139	36.97%	5.6990	29.76%
Coliformes Fecales (log)	8.1139	4.3617	46.24%	4.9031	39.57%	5.6990	29.76%
DBO₅ en mg/L	167.5	3.3	98.03%	2.3	98.63%	2.75	98.36%
Sólidos Suspendidos en mg/L	120	21.75	81.87%	24.5	79.58%	19	84.17%
Nitrógeno Total mg/L de N	14.28	0.934	93.46%	0.672	95.29%	0.588	95.88%
Fosforo Total como mg/L de P-PO₄	1.19	1.22	*	1.2	*	0.887	25.46%
DQO en mg/L	1054	205	80.55%	22	97.91%	12	98.86%

Tabla 12 Porcentajes de remoción del 11° muestreo de la planta de tratamiento comparando (E-D, E-F, E-S)

Muestreo 11 28/Enero/2014							
Parámetro	Entrada	Decantador		Filtro de Arena		Salida	
	Resultado obtenido	Resultado obtenido	% Remoción (E-D)	Resultado obtenido	% Remoción (E-F)	Resultado obtenido	% Remoción (E-S)
Coliformes Totales (log.)	8.0414	6.0414	24.87%	5.3802	33.09%	5.2040	35.28%
Coliformes Fecales (log)	8.0414	6.0414	24.87%	5.3802	33.09%	5.2040	35.28%
DBO ₅ en mg/L	313	3.7	98.82%	2	99.36%	3	99.04%
Sólidos Suspendidos en mg/L	88.5	28	68.36%	16.25	81.64%	21.5	75.70%
Nitrógeno Total mg/L de N	15.82	0	100%	0	100%	0	100%
Fosforo Total como mg/L de P-PO ₄	0.48	0.452	5.83%	0.133	72.29%	0.176	63.33%
DQO en mg/L	1150	165.5	85.61%	43.1	96.25%	46	96%

7.3.1 Porcentaje de remoción de la DBO₅

La DBO₅ presento valores muy altos de remoción en todos los muestreos en el decantador, siendo en el filtro y en la salida del influente la mínima remoción pues ya se había hecho casi toda en el decantador con porcentajes de más de 90% y en el 7° muestreo (Agosto) alcanzando 100%; mientras que el 4° muestreo (Mayo) fue el que tuvo la menor remoción con un 94.87%. Esto muestra que este sistema es muy dúctil y eficiente para la remoción de la materia orgánica; ya que estos valores se colocan por encima del estándar de remoción por lodos activados, el cual es de un 85% a un 90% (Poch, 1999 citado por Martínez, 2014). Esto debido a las buenas condiciones propiciadas de oxigenación en el reactor biológico y a los flóculos en un óptimo estado metabólico de los fangos activados (Castillo *et al.*, 2012).

7.3.2 Porcentaje de remoción de Sólidos Suspendidos

Los sólidos suspendidos presentaron porcentajes de remoción de la entrada al decantador que van desde 64.07% hasta 90.08%, mientras de la entrada al filtro se obtuvieron porcentajes entre los 69.89% y los 92.46% y de la entrada a la salida del efluente se muestran porcentajes que van desde los 75.70% hasta los 93.45%, esto nos indica que hay una buena remoción en el decantador y que esta se ve incrementada un poco después del filtro y de la salida. El 8º muestreo (Septiembre) es el que menor remoción presentó mientras que el 3º muestreo (Abril) tuvo la mayor remoción. Comparados con los obtenidos por Martínez en el 2014 cuyas remociones van de los 0% hasta un 86.9% de la entrada al decantador y un 33.4% hasta 96.7% de la entrada hasta la salida, muestran que en ese estudio las remociones fueron un poco menores al actual. En general se puede decir que existe buena remoción en cuanto a este parámetro, lo que indica probablemente un buen funcionamiento de la planta puesto que los sólidos suspendidos en aguas residuales domésticas e industriales presentan una naturaleza mayormente de tipo orgánica, sirviendo como sustrato y fuente nutritiva para muchos microorganismos, su eliminación se convierte en un factor importante para la óptima remoción de bacterias y nutrientes (Molina y Tigreros, 2005).

7.3.3 Porcentaje de remoción de Nitrógeno total (NT)

Los porcentajes de remoción de NT obtenidos de la entrada al decantador van de 78.04% hasta el 100%, mientras que de la entrada al filtro se observan porcentajes de los 94.81% hasta 100% y de la entrada a la salida del efluente se muestran porcentajes desde 95.88% hasta 100%. Aquí también sucede que el decantador hace la mayor remoción y el filtro y la salida ayudan a incrementar un poco dicha remoción. En este estudio el 7º muestreo fue el que menor remoción presentó, mientras que los muestreos 5º (Junio), 6º (Julio), 8º (Septiembre) y 11º (Enero del 2014) fueron en los que se presentó mayor remoción. En comparación con las remociones obtenidas en la bibliografía que oscilaron entre un 9.5% y un 90.7% de la entrada al decantador mientras que de la entrada a la salida

obtuvieron valores que van de un 33.3% a un 99%, siendo en general un poco más altas las remociones en el estudio actual.

Ya que en aguas residuales sin tratar, están presentes el nitrógeno orgánico y el nitrógeno amoniacal cuantificado como nitrógeno total; su remoción indica una buena nitrificación en la etapa aeróbica del proceso de depuración, es decir, el nitrógeno orgánico es convertido en nitrógeno amoniacal por la acción microbiana y este último, en presencia de oxígeno, es degradado por las bacterias nitrificantes *Nitrosomas* spp. Y *Nitrobacter* spp. En nitritos y posteriormente en nitratos durante el proceso de depuración (Pérez, 2002).

7.3.4 Porcentaje de remoción de Fosforo total (FT)

Los porcentajes de remoción de FT obtenidos, presentaron muchas anomalías pues en la mayoría de los muestreos no hubo remoción, solo en el 1° (Febrero), 3° (Abril) y 11° (Enero del 2014) muestreos presentaron remoción pero demasiado baja entre los 0.5 hasta el 66.33% siendo el 11° muestreo el de mayor remoción mientras que el 3° el de menor remoción. En otros muestreos como el 4° (Mayo), 5° (Junio) y el 10° (Noviembre) solo se presentó remoción de la entrada a la salida, de igual manera paso en el estudio de Martínez en el 2014 donde no obtuvo valores de remoción en la mayoría de sus muestreos observando de igual manera un aumento en los niveles de fosforo de la entrada al decantador en vez de disminuir al igual que en el presente estudio. Esto se debe posiblemente a la ausencia de una etapa anaeróbica en el tratamiento a la que es sometida el agua residual (González y Saldarriaga, 2008); otro factor importante es la competencia entre las bacterias acumuladoras de fósforo y las bacterias nitrificantes, es decir, el aumento de estas bacterias reduce la tasa reproductiva de las bacterias acumuladoras de fósforo principalmente del género *Acinetobacter*, este desbalance se ve reflejado en una buena remoción del nitrógeno pero una mala remoción del fósforo (Suárez y Jácome, 2007). Palma y Manga en el 2005, también se hace mención que otro factor importante para una óptima remoción de fósforo es que se obtiene en un intervalo de 7.4 a 6.6 de pH; los valores en la

entrada y el decantador se sitúan entre 7.1 y 6.1, ya que a valores más bajos de pH la remoción de fósforo decrece.

7.3.5 Porcentajes de remoción de la DQO

En lo que respecta a la DQO, ésta presentó porcentajes de la entrada al decantador desde 80.95% hasta 93.36%, mientras que de la entrada al filtro mostro porcentajes que van de 86.56% hasta 94.54 y por último de la entrada a la salida desde 90.71% hasta 98.86%, siendo el 9º muestreo (Octubre) en el que menos remoción se registró, mientras que el de mayor remoción fue el 10º muestreo (Octubre). Comparándolo con los resultados obtenidos por Martínez (2014) éste. Obtuvo remociones de la entrada al decantador que van de un 82.4% a un 92.4% mientras que de la entrada a la salida desde un 91.4% hasta 97.9% siendo los resultados similares a los actuales. En lo que respecta a este parámetro, se observa que existió una muy buena remoción, ya que estos valores de DQO están directamente relacionados con los de DBO₅, siendo mucho mayores los valores de DQO que los de la DBO₅, este comportamiento es habitual en aguas residuales industriales, en comparación con las aguas residuales domésticas, debido a las altas concentraciones de materia inorgánica y materia orgánica no biodegradable, vertidas en las aguas residuales originadas por el uso masivo de productos químicos en la industria textil (Ramahlo, 1996). Mientras que ambos parámetros dependen directamente de la eficiencia en la actividad microbiana de los lodos activados y de las buenas condiciones ambientales de pH, temperatura y oxígeno disuelto en el bio-reactor (Arango y Garcés, 2007).

7.3.6 Porcentajes de remoción de Coliformes totales y fecales

En lo que respecta a los porcentajes de remoción de coliformes totales y fecales estuvieron entre el 21.67% y 59.91% entre la entrada y el decantador, mientras que entre la entrada y el filtro se obtuvieron porcentajes de entre un 19.25% y un 76.75% y por último entre la entrada y la salida se obtuvieron valores entre 18.57% hasta un 100% de remoción; siendo el 3^{er} muestreo (Abril) en el que mayor de remoción presentó, mientras que el 7º muestreo (Agosto) fue en el que menor remoción se registró; mientras que las remociones obtenidas por Martínez

(2014) de la entrada al decantador obtuvo valores que van de 34.9% a un 58.7%, mientras que de la entrada a la salida obtuvo remociones que van de un 41.2% a un 84.3% esto para coliformes fecales, mientras que para Coliformes totales obtuvo valores de remoción entre un 26.8% y un 42.4% esto de la entrada al decantador, en tanto que de la entrada a la salida va desde un 41.2% hasta 84.3%, por lo que se observa que comparada con el anterior trabajo la planta presenta remociones poco aceptables ya que en la mayoría de los muestreos se encontraron dichas remociones por debajo de la mitad; pero estos valores se colocan por encima del estándar de remoción de bacterias con potencial patógeno por lodos activados, el cual oscila alrededor de un 50% (Poch, 1999 citado por Martínez, 2014), la disminución gradual de pH, el aumento en las concentraciones de oxígeno disuelto y lodos metabólicamente activos, son los factores principales para la eliminación de bacterias enteropatógenicas (Chuchon y Aybar, 2008 citado por Martínez 2014).

7.4 Parámetros de Operación

Con la información obtenida del sistema y con algunos de los parámetros fisicoquímicos determinados se calcularon los parámetros de operación y se compararon con los diferentes porcentajes de remoción de dichos parámetros (Tabla 13) (Tchobanoglous *et al.*, 2003). Ya que los parámetros de operación son de vital importancia para el buen funcionamiento de una planta de tratamiento en este caso de lodos activados, por lo que es importante su evaluación para verificar el estado en el que se encuentran los lodos (Torrescano, 2009).

Con el objeto de discutir los parámetros de operación calculados, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones mencionadas anteriormente en los materiales y métodos para cada uno de ellos, aunque hay que tomar en cuenta que esos criterios se aplican para agua residual doméstica y por lo mismo en la industrial los patrones pueden cambiar y ser muy diferentes.

Tabla 13. Parámetros de operación y su comparación con los porcentajes de remoción del decantador

Muestreo	Parámetro	% de Remoción E- D	OD Lodos	% de relación Carbono-Nitrógeno-Fósforo 100-5-1 Influyente	Conductividad eléctrica en $\mu\text{s}/\text{cm}$ Influyente	Índice volumétrico	Tiempo de retención celular	Relación alimento/microrganismo (F/M)
1	DBO	89.89%	0.6	100-5-0.6	1090	No hubo	3134.26 días	0,014 d-1
	DQO	89.89%						
	Sol.susp	84.52%						
	N tot	91.30%						
	P tot	85%						
	Col tot	52.03%						
	Col fec	53.04%						
2	DBO	99.24%	0.2	100-19-0.3	789	No hubo	No hubo	No hubo
	DQO	88.86%						
	Sol.susp	83.72%						
	N tot	96.16%						
	P tot	No hubo						
	Col tot	53.41%						
	Col fec	56.32%						
3	DBO	99.26%	0.6	100-7-0.3	694	No hubo	2121.62 días	0,023 d-1
	DQO	90.86%						
	Sol.susp	90.08%						
	N tot	78.04%						
	P tot	13.91%						
	Col tot	59.91%						
	Col fec	59.91%						
4	DBO	97.97%	0.8	100-22-0.4	867	78.22	431.8 días	0,025 d-1
	DQO	88.24%						
	Sol.susp	67.80%						
	N tot	96.43%						
	P tot	15.33%						
	Col tot	45.39%						
	Col fec	45.39%						
5	DBO	98.31%	0.8	100-15-0.8	1010	77.26	785.6 días	0.015 d-1
	DQO	93.36%						
	Sol.susp	64.06%						
	N tot	100%						
	P tot	No hubo						
	Col tot	40.65%						
	Col fec	40.65%						

6	DBO	99.03%	2.4	100-9-1	1120	91.48	570.1 días	0.016 d-1
	DQO	86.44%						
	Sol.susp	71.02%						
	N tot	100%						
	P tot	No hubo						
	Col tot	24.26%						
	Col fec	24.26%						
7	DBO	100%	1.6	100-8-0.7	1235	61.32	793.6 días	0.009 d-1
	DQO	87.81%						
	Sol.susp	67.35%						
	N tot	97.39%						
	P tot	No hubo						
	Col tot	21.67%						
	Col fec	21.67%						
8	DBO	97.96%	1	100-11-1	1040	146.37	873.8 días	0.007 d-1
	DQO	83.16%						
	Sol.susp	66.45%						
	N tot	100%						
	P tot	No hubo						
	Col tot	29.56%						
	Col fec	29.56%						
9	DBO	99.08%	2.2	100-7-0.4	946	115.06	925.4 días	0.011 d-1
	DQO	87.38%						
	Sol.susp	65.57%						
	N tot	93.05%						
	P tot	No hubo						
	Col tot	31.28%						
	Col fec	27.22%						
10	DBO	98.03%	1.4	100-8-0.7	1056	134	1025.3 días	0.008 d-1
	DQO	80.55%						
	Sol.susp	81.87%						
	N tot	93.46%						
	P tot	No hubo						
	Col tot	46.24%						
	Col fec	46.24%						
11	DBO	98.82%	1	100-5-0.1	1146	203.5	492.2 días	0.024 d-1
	DQO	85.61%						
	Sol.susp	68.36%						
	N tot	100%						
	P tot	5.38%						
	Col tot	24.87%						
	Col fec	24.87%						

En la tabla 13 se puede apreciar que la relación carbono-nitrógeno-fósforo, en general no se ajusta a los estándares propuestos para agua residual doméstica (100-5-1), donde se muestra que en el caso del nitrógeno solo se cumplió con esta relación en el 1^{er} y 11^o muestreo, mientras que con el fósforo solo se cumplió con este valor en los muestreos 6^o y 8^o y el valor más bajo fue de 0.1 en el 11^o muestreo. Los altos porcentajes del nitrógeno obtenidos en la relación, podría deberse a que los bajos niveles de fósforo aumentan excesivamente los otros dos nutrientes y existen pocas bacterias que degradan el nitrógeno para producir el protoplasma y formar otras bacterias, sin embargo, si existe suficiente fósforo, las bacterias lo usan para generar enzimas que degradan otros compuestos inorgánicos presentes en el agua residual (Torrescano, 2009).

La conductividad obtenida en la entrada osciló desde 694 hasta 1240 $\mu\text{s}/\text{cm}$, por lo que se considera dentro de los valores óptimos para evitar que se produzca el color gris, olor fétido, exceso de espuma, abultamiento, bajas velocidades de asentamiento y rompimiento de los flóculos en el tanque de los lodos.

El Índice volumétrico de los lodos presentó valores entre 78.22 y 203.05 mg/L, este parámetro se empezó a medir a partir del 4^o muestreo, Según Torrescano, maneja un rango de entre 80-150 aunque en ciertos casos valores más altos se tiene un lodo convencional y por lo tanto un buen efluente, comparándolos con los resultados obtenidos en el muestreo se observó que la mayoría de estos valores entran dentro del rango encontrando que es un buen lodo y obtiene el efluente esencial para el uso en la industria textil.

El tiempo de retención celular o también conocido como edad de los lodos, mostró valores desde 431.8 hasta los 3134.26 días estos valores van en conjunto con los resultados de alimento/microorganismos y si los primeros aumentan y los otros disminuyen estos puede ser por concentraciones bajas de OD que hay en el tanque de aeración- Si comparamos con los criterios de agua residual doméstica, los valores tan elevados indicarían la necesidad de purgar los lodos, situación que podría coincidir con el hecho que durante el estudio no se realizaron purgas, sin

olvidar que en el agua industrial estos criterios variarán dependiendo del giro industrial (Torrescano 2009).

Por último se calculó la relación alimento/microorganismos obteniendo datos que van de los 0.007 hasta los punto 0.025 que comparándolos con los criterios para agua residual doméstica los valores quedaron por debajo de la categoría de aireación extendida mencionada por Torrescano.

7.4.1 Coeficiente de correlación entre los parámetros bacteriológicos y fisicoquímicos con los parámetros de operación

Con el objeto de saber si habría alguna relación significativa entre los parámetros de operación calculados en esta planta de tratamiento con las remociones alcanzadas de los parámetros bacteriológicos y fisicoquímicos se calculó el coeficiente de correlación de Pearson.

En la tabla 14 se muestran los resultados de los coeficientes de correlación entre los parámetros bacteriológicos (coliformes totales y fecales) y fisicoquímicos (DQO, DBO₅, nitrógeno total, sólidos suspendidos) con los parámetros de operación (Tiempo de retención celular (TRC), conductividad, Índice volumétrico de lodos y Relación alimento/microorganismo F/M). Las correlaciones significativas se consideraron con un nivel de $P \leq 0.05$

Tabla 14. Correlación de los Parámetros de operación con los Parámetros Fisicoquímicos y Bacteriológicos (los valores resaltados son los que resultaron significativos)

Param opera/Param fico y bact	NT	SST	DBO ₅	DQO	CF	CT
NT/SST/DBO ₅ /DQO /CF/CT	1	1	1	1	1	1
Cond	0.72503226	-0.40143094	-0.10539837	-0.33159056	-0.68518126	-0.72675404
TRC	0.67501571	0.78135498	-0.76591691	0.36637489	0.68648342	0.68114433
F/M	-0.25004483	0.14953621	0.05967055	0.42638353	0.30933683	0.29903317
Ivol	0.11784839	0.20816517	-0.26253843	-0.55483156	-0.15640739	-0.15756904

El nitrógeno total presento una correlación significativa directamente proporcional con el tiempo de retención celular ($r = 0.67$) y la conductividad ($r = 0,72$), Lo cual podría deberse a que en el nitrógeno total está el nitrógeno orgánico y amoniacal, lo que implica mayor contenido de materia orgánica y si esta aumenta por lo tanto existirá un tiempo de retención celular mayor para degradarla.

Por otro lado los coliformes totales y fecales presentaron una correlación inversamente proporcional con la conductividad ($r = -0.72$ y $r = -0.68$) respectivamente), lo cual puede deberse a que al aumentar la conductividad se incrementa también la salinidad afectando y disminuyendo el crecimiento de los coliformes. En cambio los coliformes presentaron una correlación directamente proporcional con el tiempo de retención celular, ($r = 0.68$ ambos) lo cual puede deberse a que entre mayor sea el número de coliformes se incrementará también el contenido microbiano que se necesita en el cálculo del tiempo de retención celular, incrementándose éste.

Mientras que la DBO_5 y los sólidos suspendidos, solo presentaron correlación directamente proporcional con el tiempo de retención celular ($r = -0.76$ y 0.78 respectivamente)

En base a lo anterior se puede decir que el parámetro de operación que presentó correlación significativa con los parámetros bacteriológicos y fisicoquímicos determinados en este estudio, fue el tiempo de retención celular el cual es importante pues representa la “edad de los lodos” los cuales si resultan muy viejos requerirán una purga para mantener una buena remoción de los contaminantes en el sistema biológico.

6.5 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL EFLUENTE FINAL CON LA NOM 003

Tabla 15. Comparación de los resultados obtenidos del Efluente (salida), con los límites permitidos por la NOM-003.

Parámetros	Resultados Obtenidos						Límites NOM-003	Límite NOM-003
	Muestras							
	1° 19/02/13	2° 12/03/13	3° 23/04/13	4° 21/05/13	5° 18/06/13	6° 30/07/13	Contacto indirecto	Contacto directo
Coliformes Fecales NMP/100 mL.	900000	7000000	0	300000	2400000	230000	1000	240
DBO ₅ mg/L	0	0	16.15	16.7	5.38	2.2	30	20
SST mg/L	9	16.5	8.25	19	11.25	13	30	20

Tabla 15. (Continuación). Comparación de los resultados obtenidos de los muestreos del Efluente (salida), con los límites permitidos por la NOM-003.

Parámetros	Resultados obtenidos					Límite NOM-003	Límite NOM-003
	Muestras						
	7° 27/08/13	8° 24/09/13	9° 22/10/13	10° 19/11/13	11° 28/11/14	Contacto indirecto	Contacto directo
Coliformes Fecales NMP/100 mL.	3000000	9000000	800000	500000	160000	1000	240
DBO ₅ mg/L	0	0	0	2.75	3	30	20
SST mg/L	10	16	6.5	19	21.5	30	20

En la tabla 15 se presenta la comparación de los resultados obtenidos de coliformes fecales, DBO₅, y los SST en el efluente (salida) con los límites establecidos en la NOM- 003-ECOL-1997. Se encontró que los coliformes fecales presentaron valores por arriba de los límites máximos permisibles (1000 y 240 según el tipo de contacto), presentando valores entre 230,000 y 700000 NMP/100 ml, a excepción de uno en el que no hubo crecimiento (3^{er} muestreo). La DBO y los sólidos suspendidos totales tuvieron valores por debajo de los límites de la norma (20 y 30) con valores desde 0 hasta 16.7 y de 6.15 hasta 21.5 respectivamente; siendo este último valor el único muestreo en el que no cumplió con las normas establecidas para contacto directo, rebasando ligeramente el valor máximo permisible de la norma (SEMARNAP, 2003).

La presencia tan elevada de coliformes totales y fecales en el efluente es debido a que no se pasa por el proceso de cloración o desinfección. Sin embargo esto no resulta problemático para este caso, ya que el agua tratada es recirculada en el proceso de la misma industria textil lo cual no repercute un riesgo para la salud para los trabajadores de la industria. Si se cambiara a otro uso esa agua tratada si sería necesario darle el paso de la desinfección.

8. CONCLUSIONES

La planta presento una muy buena remoción en cuanto a materia orgánica (DBO_5 y DQO) y sólidos suspendidos presentando remociones mayores de 90 y 85 % respectivamente.

Los nutrientes y los coliformes totales y fecales presentaron remociones bajas ya que en la mayoría de los casos los valores fueron ligeramente mayores a 50% y en lo que respecta a los nutrientes en el caso del fosforo no existieron remociones en la mayoría de los muestreos, sino al contrario, en varios muestreos presento aumento en el decantador en comparación con los presentados en la entrada.

Las altas concentraciones de coliformes totales y fecales en el influente puede estar relacionado con la mezcla del agua residual de origen industrial con la de origen domestica (baños, oficinas, regaderas) o por la algunas materias primas contaminadas dentro del proceso de la textilera.

La presencia de coliformes en la salida es debido a que no se aplica la cloración ya que el agua tratada se reusa en los mismos procesos de operación sin causar problema alguno pues no es usada para contacto humano ni riego. Por otro lado clorar el agua puede afectar a sus procesos decolorando las telas.

Los parámetros de operación calculados para la planta de tratamiento de aguas residuales de esta industria textil difieren a los usados más convencionalmente en las plantas de tratamiento de agua residual doméstica.

La planta de tratamiento de la industria textil opera adecuadamente para los parámetros estudiados ya que se alcanzaron muy buenos porcentajes de remoción de materia orgánica.

9. REFERENCIAS

- APHA-AWWA-WEF. 1998. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* 20ª ed. USA.
- Arango, R. A. y Garcés, G. L. F., 2007. Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. Corporación Universitaria Lasallista. México. 8 pps.
- Caldera, Yaxcelys, Gutiérrez, Edixon, Luengo, Mirvia. 2010. Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales de industria avícola. *Rev. cient. (Maracaibo)*. 20, (4): 409-416.
- Castillo B., E., R., Bolio R., A., Méndez N., R., I., Osorio R., J., H., Pat C., R., Remoción de materia orgánica en aguas residuales de rastro por el proceso de Contacto Biológico Rotacional, 2012. Revista-Ingeniería. Académica de la Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán, 16, (2): 83-91
- CONAGUA 2008. www.conagua.org.mx
- Consejo Consultivo del Agua 2010. www.aguas.org.mx
- Cortina C. 2008. Alternativa de Tratamiento de Aguas Residuales de la Industria Textil. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil. Instituto Politécnico Nacional. México, D.F. 194 pp.
- Díaz, F. J., P., 2003. Investigación sobre el efecto de la temperatura en los procesos biológicos por fangos activos. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, España, 552pags.
- Erijman L, Figuerola E., Guerrero Leandro, Ayarza J. 2011. Impacto en los recientes análisis de comunidades microbianas sobre el control del proceso de tratamiento de efluentes. *Revista Argentina de Microbiología*. Buenos Aires, Argentina 43: 127-145
- Ferrer J, Seco. 2008. Tratamientos biológicos de aguas residuales. Primera edición, Editorial Alfaomega. Valencia, España 188 pp.

- González, M. y Saldarriaga, J., C., 2008. Remoción biológica de materia orgánica, nitrógeno y fósforo en un sistema tipo anaerobio-anóxico-aerobio. *Revista de la Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín Colombia.* (10): 45-53.
- Jiménez C. B.E., 2001. *La Contaminación Ambiental en México.* Ed Limusa. Méx. 925 p.
- Lahera V. 2010. Infraestructura Sustentable: Las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. *Rev. Quivera Toluca, Edo Mex.* 12, (2): 58-69.
- Martínez H. S., Coronel O, 2008. Control de la calidad del agua tratada en una depuradora a través de los Bioindicadores bacterianos *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa*. Tesis de Licenciatura en Biología Universidad Autónoma de Hidalgo 87pags.
- Mendez, L, Miyashiro, V, Rojas, R. 2004. Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados a escala de laboratorio. *Rev. Inst. Investig. Fac. Minas Metal Cienc. Geogr.* 7 (14): 74-83.
- Molina, A., M. y Tigreros G., J., L., 2005. Evaluación preliminar de la remoción de sólidos suspendidos en el sistema de tratamiento de aguas residuales del municipio de Arauca, trabajo de investigación. Universidad Nacional de Colombia sede Arauca Ingeniería Ambiental Arauca, 102pps.
- En línea http://www.lima-water.de/documents/jmoscoso_informe.pdf
- Muñoz A. 2008. Caracterización y Tratamiento de Aguas Residuales. Monografía para título de Ingeniero Industrial, Universidad Autónoma de Hidalgo, México 305 pps.
- Nodal E, 2001. Procesos biológicos aplicados al tratamiento del agua residual. *Ingeniería hidráulica y ambiental.* 22 (4): 52 – 56.
- Osnaya Maricarmen. 2012 “Propuesta para el diseño de un Humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales en la Universidad de la Sierra de Juárez” tesis de licenciatura en Ciencias Ambientales, Universidad de la Sierra de Juárez, Oaxaca, México 189 pps.

- Pérez M. L., 2002. Remoción de fosforo y nitrógeno en aguas residuales utilizando un reactor discontinuo secuencial (SBR). XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Cancún, México, 27 al 31 de octubre, 2002.
- Ramahlo R. S., 1996. Tratamiento de aguas residuales. 1ªEd. Reverté, España 50-64 pp.
- Rojas R. 2002 “Conferencia Sistemas de tratamiento de Aguas Residuales” Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- Russell D. 2006 Tratamiento de Aguas Residuales un enfoque práctico editorial Reverte. Barcelona, España 260 pps.
- Salazar M. 2009. Sistemas Integrales de tratamiento de aguas residuales, mediante el uso combinado de digestión anaerobia y microalgas. *Revista Contactos* 73: 16-22.
- Santamaría J, Becerra M. 2003. Los Conflictos del Agua en México. *Gaceta Ecológica Abril-Junio*. Instituto Nacional de Ecología. México, D.F 67: 61- 68.
- SEMARNAP (Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. (2003). Norma Oficial Mexicana NOM-03-ECOL-1997 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 23 de abril de 2003.
- Tchobanoglous G., Burton F.L., Stensel H.D. 2003. *Wastewater engineering: Treatment and reuse. Metcalf and Eddy*. McGraw–Hill Professional, Nueva York. 1848 pps.
- Suárez, J. y Jácome, A., 2007. Eliminación de fósforo en los procesos de depuración de aguas residuales, Departamento de ingeniería del agua, Asignatura: Sistemas de saneamiento, Universidad de la Coruña, España. 19pps.
- UNESCO 2012 www.unesco.org