

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE



**DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA EN REMOCIÓN DE
CONTAMINANTES EN UN SISTEMA DE FLUJO VERTICAL.**

POR:

SILVIA HERNÁNDEZ TORRES

TESIS

Presentada como Requisito Parcial para Obtener el Título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Junio de 2017

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA EN REMOCIÓN DE
CONTAMINANTES EN UN SISTEMA DE FLUJO VERTICAL.

POR:

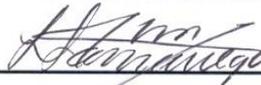
SILVIA HERNÁNDEZ TORRES

QUE SOMETE A LA CONSIDERACION DE H. JURADO
EXAMINADOR COMO REQUISITO PARA OBTENER EL TÍTULO
DE:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

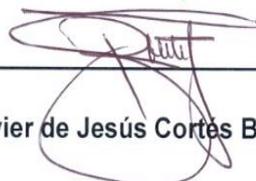
Aprobada por:

Presidente del Jurado



Dr. Luis Samaniego Moreno

Asesor Principal



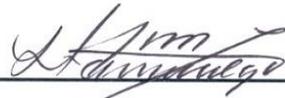
Dr. Javier de Jesús Cortés Bracho

Coasesor



Dr. Jorge Méndez González

Universidad Autónoma Agraria
"ANTONIO NARRO"
Coasesor



Dr. Luis Samaniego Moreno

Coordinador de la División de Ingeniería



Coordinación de
Ingeniería

Buenavista, Saltillo Coahuila, México, Junio de 2017

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por regalarme la vida, por todas las bendiciones, por iluminar mi camino en el transcurso de mi vida, por la fortaleza que me ha dado para seguir y soportar los momentos difíciles día a día y sobre todo por darme la oportunidad de haber culminado una meta más en mi vida.

A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, mi (Alma Terra Mater), por haberme abierto las puertas y cobijado durante estos cuatros años y medio, dándome la oportunidad de formarme profesionalmente.

Al **Dr. Luis Samaniego Moreno** por el apoyo que me brindó para la realización de esta tesis, por su amistad, y sobre todo por los conocimientos que de él aprendí y que ahora me llevo.

Al **Dr. Javier de Jesús Cortés Bracho** Por la orientación, apoyo y tiempo que me ha brindado para la elaboración de este proyecto, además de sus sugerencias y observaciones que han sido muy constructivas para mi formación profesional.

Al **Dr. Jorge Méndez González** Por su interés mostrado y el apoyo que me brindó para poder llevar a cabo este trabajo, muchas gracias.

A **mis amigas**, Enedelia, Ana Lilia, Toñita, Jessica, Yesenia y Elda, gracias por su amistad, comprensión y apoyo, por sus sabios consejos que me brindaron sobre todo cuando necesitaba un brazo para sostenerme cuando ya no podía ponerme de pie, por estar siempre en los momentos buenos y malos a lo largo de toda la carrera.

Al señor **Nieves Almaguer Medellín, Víctor Solís Martínez y Efrén** (los viejitos de la Narro)

Por su apoyo, la amistad y confianza que me brindaron, por sus sabios consejos, cuando no sabía qué hacer.

DEDICATORIA

A mi madre

Quien a base de trabajo, ejemplo, apoyo, confianza y amor, me ha permitido lograr hoy una profesión.

Hermelinda Torres Díaz

A mi madre que estuvo siempre a mi lado brindándome su amor y apoyo ilimitado e incondicional. Velando por mi bienestar y educación siendo mi apoyo en todo momento, depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento en mi inteligencia y capacidad Dándome a cada instante una palabra de aliento para llegar a culminar mi profesión, formándome día a día una persona de bien. Es por ella que soy lo que soy ahora.

A mis hermanos

Marcelino Virgilio Hernández Torres

Nazario Hernández Torres

Guadalupe Hernández Torres

Caridad Hernández Torres

Gracias por el apoyo y ejemplo que en cada segundo de mi vida me han brindado; por sus cuidados, amor y comprensión; por sus sabios consejos que me orientaron por el camino recto de la vida; pero gracias principalmente por tener en ustedes a mis mejores amigos.

Marcelino y Nazario que siempre me han apoyado moralmente y me alentaron a seguir adelante, anhelando que siempre me preparara para enfrentarme a la vida.

A Guadalupe y Caridad principalmente, que por su trabajo, esfuerzo y apoyo he logrado concluir mi profesión, por haber estado conmigo siempre compartiendo alegrías y tristezas, por el ejemplo con el que me han guiado y el sacrificio que han realizado, me han alentado para lograr culminar esta etapa y poder enfrentar nuevos retos.

INDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	III
DEDICATORIA	IV
ÍNDICE DE CUADROS	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
RESUMEN	1
I. INTRODUCCIÓN	2
1.1 Objetivo	3
1.2 Hipótesis	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 El agua	4
2.2 Aguas residuales	5
2.3 Uso del agua en México	5
2.4 Aguas residuales en México	6
2.5 Necesidad del tratamiento de las aguas residuales	6
2.6 Métodos de tratamiento	6
2.6.1 Tratamiento primario	8
2.6.2 Tratamiento secundario	9
2.6.3 Tratamiento terciario	12
2.7 Tratamiento natural	13
2.7.1 Lagunas	13
2.7.2 Humedales	13
2.8 Evaluación del sistema en la remoción de contaminante	15
2.8.1 Potencial de Hidrogeno (pH)	15
2.8.2 Conductividad eléctrica (CE)	15
2.8.3 Sólidos disueltos totales (DTS)	16

2.8.4 Sólidos suspendidos totales (SST).....	16
2.8.5 Turbiedad	16
2.8.6 Demanda Química de Oxígeno (DQO)	17
2.8.7 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	17
2.8.8 Temperatura	17
2.8.9 Coliformes Totales (CT)	18
2.8.10 Coliformes Fecales (CF).....	18
III. MATERIALES Y MÉTODOS	19
3.1 Localización del sitio experimental	19
3.2 Sistema de flujo vertical	19
IV. RESULTADOS	29
4.1 Potencial de hidrógeno (pH).....	29
4.2 Temperatura.....	30
4.3 Conductividad Eléctrica (CE)	31
4.4 Sólidos Disueltos Totales	31
4.6 Sólidos Suspendidos Totales y la Turbiedad	32
4.7 Coliformes Fecales	33
4.8 Coliformes Totales	34
4.9 Demanda Bioquímica de Oxígeno y Demanda Química de Oxígeno	35
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	37
VI. LITERATURA CITADA	38

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación del agua en uso consultivo y no consultivo.....	4
Cuadro 2. Cantidades de sustancias para la determinación de Sólidos Suspendidos Totales (SST).	24
Cuadro 3. Cantidades utilizadas para la determinación de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).	25
Cuadro 4. Resultado de los parámetros analizados.....	29

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Etapas del tratamiento de aguas residuales. (Tomado de: Pérez y Camacho, 2011).	7
Figura 2. Tratamiento primario. (Tomado de Pérez y Camacho, 2011).	9
Figura 3. Tratamiento secundario (Tomado de: Pérez Y Camacho, 2011).	12
Figura 4. Conexión entre los dos toneles.	21
Figura 5. Jarrito respiratorio.....	21
Figura 6. Sistema de flujo vertical.....	22
Figura 7. Determinación de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).	25
Figura 8. Determinación de Demanda Bioquímica de Oxígeno.	26
Figura 9. Cajas de MFC con filtro.	28
Figura 10. Cajas Petri con m-endo.....	28
Figura 11. Comportamiento del potencial de hidrógeno (pH).	30
Figura 12. Comportamiento de la Temperatura.	30
Figura 13. Comportamiento de la Conductividad Eléctrica (CE).	31
Figura 14. Comportamiento de los Sólidos Disueltos Totales (SDT).....	32
Figura 15. Relación entre la Conductividad Eléctrica y los Sólidos Disueltos Totales.	32
Figura 16. Relación de Sólidos Suspendedos Totales y la Turbiedad.	33
Figura 17. Comportamiento de los Coliformes Fecales (CF).....	34
Figura 18. Comportamiento de los Coliformes Totales (CT).....	35
Figura 19. Relación entre la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO).	36

RESUMEN

Los humedales artificiales de flujo vertical son utilizados para depuración de aguas residuales con flujos discontinuos o intermitentes, y su aplicación puede ser desde pequeñas comunidades, fábricas y/o centros educativos como es el caso de escuelas. En este caso se instaló un sistema de flujo vertical en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicada en la ciudad de Saltillo Coahuila, para la depuración de aguas residuales proveniente de un tanque imhoff, para dar un pulimento al agua residual y posteriormente dar un reúso agrícola. La generación de aguas residuales es principalmente doméstica, además de las actividades de docencia e investigación inherentes a la universidad. Es por esto que surgió la idea de instalar un sistema de flujo vertical, con el objetivo de determinar la eficiencia de remoción del sistema, analizando los parámetros de calidad de agua, tanto de entrada como de salida de cada uno de los toneles. Algunos parámetros fueron tomados en campo, tales como pH, conductividad eléctrica (CE), total de sólidos disueltos (TSD), temperatura (t), turbidez (turb), y otros en laboratorio, como: demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), coliformes fecales y totales (CF y CT) y sólidos suspendidos (TSS). Comparando los resultados con la NOM-003-ECOL-1997, no cumplen con el límite máximo permisible en los parámetros de coliformes fecales, demanda bioquímica de oxígeno y sólidos suspendidos totales, por lo que el agua no es aceptable para el servicio al público con contacto indirecto u ocasional. De acuerdo a los datos obtenidos el sistema de flujo vertical realiza su función en la eliminación de contaminantes, ya que presenta remociones del orden de 77 por ciento en coliformes fecales, así como un 66 por ciento en sólidos suspendidos totales. Se puede decir que el sistema necesita la ampliación con más unidades de filtración (toneles) para incrementar la eficiencia de tratamiento y que el agua sea apta para riego. De acuerdo al comportamiento de la remoción obtenida se puede sugerir que con el incremento de uno o dos toneles será suficiente.

Palabras clave: Aguas Residuales, Clasificación, Parámetros, Tratamiento, Muestreo.

I. INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los recursos naturales que forma parte del desarrollo de cualquier país; es el compuesto químico más abundante del planeta y resulta indispensable para el desarrollo de la vida. Su disponibilidad es paulatinamente menor debido a su contaminación por diversos medios, incluyendo a los mantos acuíferos, lo cual representa un desequilibrio ambiental, económico y social.

Se considera que el agua está contaminada cuando se ven alteradas sus características químicas, físicas, biológicas o su composición, por lo que pierde su potabilidad para consumo diario o para su utilización en actividades domésticas, industriales o agrícolas. Las aguas residuales se definen como aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general, de cualquier otro uso, así como la mezcla de ella (Romero *et al.*, 2009).

En México se generan alrededor de 348.1 metros cúbicos por segundo de aguas residuales, de los cuales reciben tratamiento 339.2 metros cúbicos, es decir el 97.5 por ciento; y se potabilizan 97.9 metros cúbicos por segundo (CNA, 2016).

Los procesos utilizados principalmente son físicos, químicos y biológicos (Romero *et al.*, 2009). Dentro de estos últimos, los humedales.

Los humedales de flujo vertical son sistemas en los que el agua residual fluye a través del sustrato, en general gravilla, entrando en contacto con los microorganismos que colonizan la superficie tanto de las raíces de las plantas como del propio sustrato. En estos sistemas ocurre un número importante de procesos físicos, químicos y biológicos interrelacionados. Varios investigadores han informado sobre la aplicación de humedales como una opción eficaz de bajo costo para el tratamiento secundario y terciario de aguas residuales, y los consideran una opción adecuada para la depuración de aguas residuales de pequeños núcleos en áreas rurales.

Otra virtud, quizá muy importante en el caso de saneamiento autónomo de viviendas, hoteles, etcétera, es el valor estético de algunas macrofitas como el lirio amarillo. (Rodríguez *et al.*, 2012).

Los humedales de flujo vertical son cada vez más populares que los humedales artificiales (HHAA) de flujo horizontal, especialmente cuando el espacio es limitado ya que tienen una mayor eficiencia en el tratamiento. En humedales de flujo vertical (HFV) el agua es bombeada hacia la superficie del lecho, para percolar verticalmente hacia abajo a través de la capa de filtro (Von, 2009).

Los humedales de flujo vertical pueden ser una solución óptima para la depuración de aguas residuales con flujos discontinuos o intermitentes, como es el caso de escuelas (Rodríguez, 2012).

Es por esto que ha surgido la idea de instalar un sistema de flujo vertical en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro para la depuración de aguas residuales provenientes de los internados, el comedor de los estudiantes, por lo que hay una generación de aguas residuales principalmente domésticas, además de las actividades de docencia e investigación inherentes a la universidad.

1.1 Objetivo

Determinar la eficiencia de un sistema de flujo vertical en el tratamiento de agua residual.

1.2 Hipótesis

La eficiencia de tratamiento de un sistema de flujo vertical sea mayor del 80%.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 El agua

El agua es un elemento que se puede encontrar en la naturaleza en estado sólido, líquido y gaseoso, es inodora, incolora e insabora (es decir, no tiene olor, color o sabor); su fórmula química es H₂O, lo cual significa que está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno.

El agua forma parte importante de todos los organismos vivos, por ejemplo, el ser humano está constituido por 60% del vital líquido, un árbol por 50% (INEGI, 2017).

De acuerdo al documento de las Estadísticas del Agua en México (CNA, 2014) el agua es empleada de diversas formas en todas las actividades humanas, ya sea para subsistir o producir e intercambiar bienes y servicios. En el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) tiene clasificados los usos del agua en doce rubros, en la que se distingue también si el uso es consuntivo o no (Cuadro 1).

Cuadro 1. Clasificación del agua en uso consuntivo y no consuntivo.

Uso agrupado	Consuntivo/no consuntivo	Rubros de clasificación de REPDA
Agrícola	Consuntivo	Agrícola, acuicultura, pecuario, usos múltiples, otros usos.
Abastecimiento público	Consuntivo	Doméstico, público urbano
Industria autoabastecida	Consuntivo	Agroindustrial, servicios, industrial, comercio.
Energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad	Consuntivo	Industrial
Hidroeléctrico	No consuntivo	Hidroeléctricas

Tomado de: CNA, 2014.

El 62.8% del agua utilizada para uso consuntivo proviene de fuentes superficiales (ríos, arroyos y lagos), mientras que el 37.2% restante corresponde a fuentes subterráneas (acuíferos).

2.2 Aguas residuales

Son aquellas aguas cuyas características originales han sido modificadas por actividades humanas y que por su calidad requieren un tratamiento previo, antes de ser rehusadas, vertidas a un cuerpo natural de agua o descargadas al sistema de alcantarillado (OEFA, 2014).

2.3 Uso del agua en México

Espigares y Pérez (2003) describen que las aguas residuales tienen diversos orígenes:

- Aguas residuales domésticas o aguas negras: proceden de las heces y orina humanas, del aseo personal y de la cocina y de la limpieza de la casa. Suelen contener gran cantidad de materia orgánica y microorganismos, así como restos de jabones, detergentes y grasas.
- Aguas blancas: pueden ser de procedencia atmosférica (lluvia, nieve o hielo) o del riego y limpieza de calles, parques y lugares públicos. En aquellos lugares en que las precipitaciones atmosféricas son muy abundantes, éstas pueden de evacuarse por separado para que no saturen los sistemas de depuración.
- Aguas residuales industriales: proceden de los procesamientos realizados en fábricas y establecimientos industriales y contienen aceites, detergentes, antibióticos, ácidos y grasas y otros productos y subproductos de origen mineral, químico, vegetal o animal. Su composición es muy variable, dependiendo de las diferentes actividades industriales.
- Aguas residuales agrícolas: procedentes de las labores agrícolas en las zonas rurales. Estas aguas suelen participar, en cuanto a su origen, de las aguas urbanas que se utilizan, en numerosos lugares, para riego agrícola con o sin un tratamiento previo.

En el año 2010, las 2,186 plantas en operación en el país trataron 93.6 metros cúbicos por segundo, es decir el 44.76% de los 209.1 metros cúbicos por segundo recolectados en los sistemas de alcantarillado (CNA, 2012).

2.4 Aguas residuales en México

El 59% del consumo total del agua en los países desarrollados se destina a uso industrial, el 30% a gasto doméstico, de acuerdo a lo que menciona Rodríguez (2006). En el 2025, el consumo de agua destinada para el uso industrial alcanzará los 1.170 km³ / año, cifra que en 1995 se situaba en 752 km³ / año. El sector productor no solo es el que más gasta, también es el que más contamina. Más del 80% de los desechos peligrosos del mundo se producen en los países industrializados, mientras que en las naciones en vías de desarrollo un 70% de los residuos que se generan en las fábricas se vierten al agua sin ningún tipo de tratamiento previo, contaminando así los recursos hídricos disponibles.

Estos datos son los que aportan una idea de la importancia que tiene el tratamiento y la reutilización de aguas residuales en el sector industrial en el mundo, y más aún en países que saldan su balance de recursos hídricos con números rojos.

2.5 Necesidad del tratamiento de las aguas residuales

Es evidente que la contaminación de agua, está disminuyendo su calidad en muchas partes del mundo. Con este progresivo deterioro, el uso de técnicas y modelos para predecir la conducta de los organismos indicadores de la calidad del agua, ha llegado a ser cada vez más importante.

Es por esto que las aguas residuales, antes de ser vertidas en las masas receptoras, deben recibir un tratamiento adecuado según su composición, capaz de modificar sus condiciones físicas, químicas y microbiológicas, hasta evitar que se provoquen los problemas enunciados de polución y de contaminación de las aguas receptoras (Espigares y Pérez, 2003).

2.6 Métodos de tratamiento

Pérez y Camacho (2011) describen que el tratamiento de aguas residuales consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como

fin eliminar los contaminantes físicos, químicos y biológicos presentes en el agua efluente del uso humano. El objetivo del tratamiento es producir agua limpia (o efluente tratado) o reutilizable en el ambiente y un residuo sólido o fango (también llamado biosólido o lodo) convenientes para su disposición o reúso. Es muy común llamarlo depuración de aguas residuales para distinguirlo del tratamiento de aguas potables.

Las aguas residuales son generadas por residencias, instituciones y locales comerciales e industriales. Éstas pueden ser tratadas dentro del sitio en el cual son generadas (por ejemplo: tanques sépticos u otros medios de depuración) o bien pueden ser recogidas y llevadas mediante una red de tuberías - y eventualmente bombas - a una planta de tratamiento municipal. Los esfuerzos para recolectar y tratar las aguas residuales domésticas de la descarga están típicamente sujetos a regulaciones y estándares locales, estatales y federales (regulaciones y controles). A menudo ciertos contaminantes de origen industrial presentes en las aguas residuales requieren procesos de tratamiento especializado. En la Figura 1 se muestra el proceso de tratamiento de las aguas servidas.

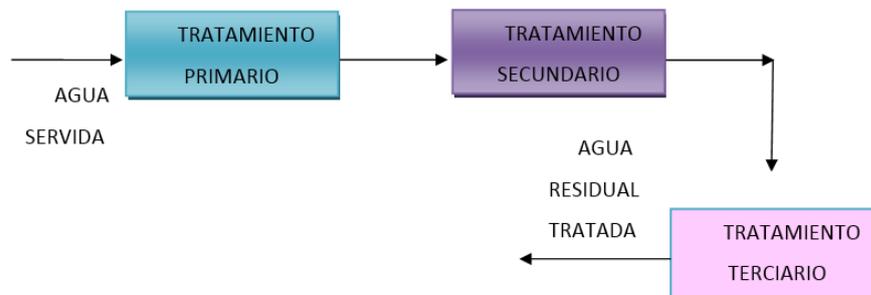


Figura 1. Etapas del tratamiento de aguas residuales. (Tomado de: Pérez y Camacho, 2011).

Estos procesos de tratamiento son típicamente referidos a un:

- Tratamiento primario (asentamiento de sólidos)
- Tratamiento secundario (tratamiento biológico de la materia orgánica disuelta presente en el agua residual, transformándola en sólidos suspendidos que se eliminan fácilmente)

- Tratamiento terciario (pasos adicionales como lagunas, micro filtración o desinfección)

2.6.1 Tratamiento primario

Los sistemas primarios son los más sencillos en la limpieza del agua y tienen la función de preparar el agua, limpiándola de todas aquellas partículas cuyas dimensiones puedan obstruir o dificultar los procesos consecuentes (Rodie y Hardenberg, 1987).

2.6.1.1 Remoción de sólidos.- En el tratamiento mecánico, el afluente es filtrado en cámaras de rejas para eliminar todos los objetos grandes que son depositados en el sistema de alcantarillado, tales como trapos, barras, condones, compresas, tapones, latas, frutas, papel higiénico, entre otros. Éste es el usado más comúnmente mediante una pantalla rastrillada automatizada mecánicamente. Este tipo de basura se elimina porque esto puede dañar equipos sensibles en la planta de tratamiento de aguas residuales, además los tratamientos biológicos no están diseñados para tratar sólidos (Apolinar, 2011).

2.6.1.2 Remoción de arena.- Esta etapa (también conocida como escaneo o maceración) típicamente incluye un canal de arena donde la velocidad de las aguas residuales es cuidadosamente controlada para permitir que la arena y las piedras de ésta tomen partículas, pero todavía se mantiene la mayoría del material orgánico con el flujo. Este equipo es llamado colector de arena. La arena y las piedras necesitan ser quitadas a tiempo en el proceso para prevenir daño en las bombas y otros equipos en las etapas restantes del tratamiento. Algunas veces hay baños de arena (clasificador de la arena) seguido por un transportador que transporta la arena a un contenedor para la deposición. El contenido del colector de arena podría ser alimentado en el incinerador en un procesamiento de planta de fangos, pero en muchos casos la arena es enviada a un terraplén (Mesias, 2010).

2.6.1.3 Sedimentación.- La sedimentación se utiliza en los tratamientos de aguas residuales para separar sólidos en suspensión de las mismas.

La eliminación de las materias por sedimentación se basa en la diferencia de peso específico entre las partículas sólidas y el líquido donde se encuentran, que acaba en el depósito de las materias en suspensión.

En algunos casos, la sedimentación es el único tratamiento al que se somete el agua residual. La sedimentación puede producirse en una o varias etapas o en varios de los puntos del proceso de tratamiento (Sette, 2003). En la Figura 2 se muestra la sedimentación.

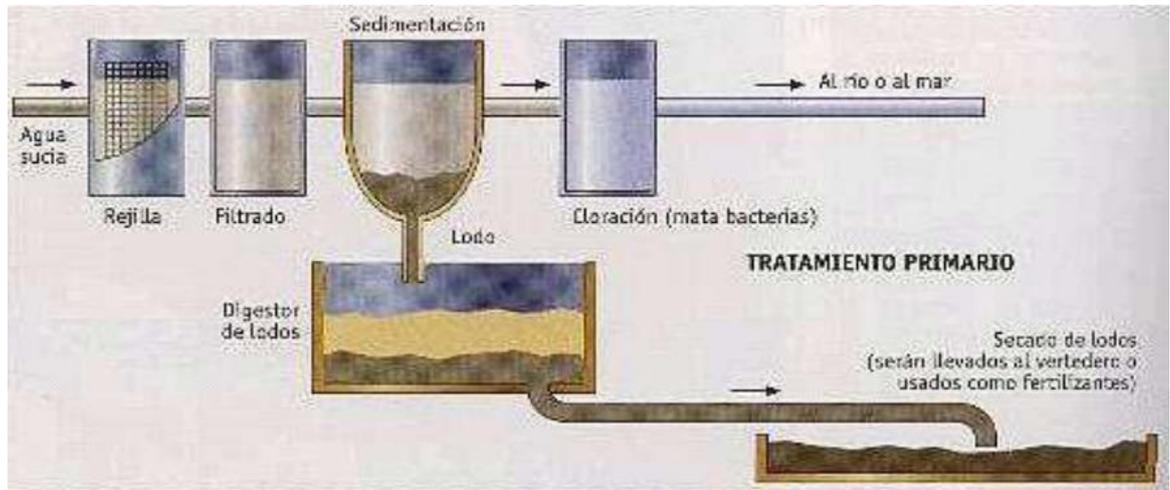


Figura 2. Tratamiento primario. (Tomado de Pérez y Camacho, 2011).

2.6.2 Tratamiento secundario

El tratamiento secundario también llamado tratamiento biológico se emplea para eliminar la contaminación orgánica disuelta.

El tratamiento biológico se realiza mediante microorganismos, que en condiciones aerobias atacan la materia orgánica presente en las aguas residuales transformándola en gases y materia celular, que posteriormente se separan por decantación (Pérez, 2012).

2.6.2.1 Filtros de desbaste.- Consiste habitualmente en la retención de los sólidos gruesos del agua residual mediante una reja, manual o autolimpiable, o un tamiz, habitualmente de menor paso o luz de malla. Esta operación no solo reduce la carga contaminante del agua a la entrada, sino que permite preservar los equipos como conducciones, bombas y válvulas, frente a los depósitos y obstrucciones provocados por los sólidos, que habitualmente pueden ser muy fibrosos: tejidos, papeles, entre otros (Urrutia, 2017).

2.6.2.2 Fangos activos o lodos activados.- El principio básico del proceso consiste en que las aguas residuales se pongan en contacto con la población microbiana mixta (aerobia y anaerobia), en forma de suspensión floculenta en un sistema airado y agitado. La materia en suspensión y la coloidal, se eliminan rápidamente de las aguas residuales por adsorción y aglomeración en los flóculos microbianos (Mayo, 2010).

2.6.2.3 Camas filtrantes (camas de oxidación).- Se utiliza la capa filtrante de goteo utilizando plantas más viejas y plantas receptoras de cargas más variables, las camas filtrantes son utilizadas donde el licor de las aguas residuales es rociado en la superficie de una profunda cama compuesta de coque (carbón, piedra caliza o fabricada especialmente de medios plásticos). Tales medios deben tener altas superficies para soportar las biopelículas que se forman. El licor es distribuido mediante unos brazos perforados rotativos que irradian de un pivote central. El licor distribuido gotea en la cama y es recogido en drenes en la base. Estos drenes también proporcionan un recurso de aire que se infiltra hacia arriba de la cama, manteniendo un medio aerobio. Las películas biológicas de bacteria, protozoarios y hongos se forman en la superficie media y se comen o reducen los contenidos orgánicos. Esta biopelícula es alimentada a menudo por insectos y gusanos los cuales atraen pájaros (Pérez y Camacho, 2011).

2.6.2.4 Placas rotativas y espirales.- En algunas plantas pequeñas son usadas placas o espirales de revolvimiento lento que son parcialmente sumergidas en un licor. Se crea un flóculo biótico que proporciona el substrato requerido (Muentes, 2015).

2.6.2.5 Biodiscos.- Este sistema de tratamiento biológico secundario es usado para la remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y para el pulido de efluentes nitrificados. Remueve la materia orgánica soluble y coloidal presente en el agua residual, bajo condiciones aerobia (Deloya, 2001).

2.6.2.5 Filtros aireados biológicos.- Filtros aireados (o anóxicos) biológicos (BAF) combinan la filtración con reducción biológica de carbono, nitrificación o desnitrificación. BAF incluye usualmente un reactor lleno de medios de un filtro. Los medios están en la suspensión o apoyados por una capa en el pie del filtro. El propósito doble de este medio es soportar altamente la biomasa activa que se une a él y a los sólidos suspendidos del filtro. La reducción del carbón y la conversión del amoníaco ocurre en medio aerobio y alguna vez alcanzado en un sólo reactor mientras la conversión del nitrato ocurre en una manera anóxica. BAF es también operado en flujo alto o flujo bajo dependiendo del diseño especificado por el fabricante (Fuentes, 2008).

2.6.2.6 Reactores biológicos de la membrana.- MBR es un sistema con una barrera de membrana semipermeable o en conjunto con un proceso de fangos. Esta tecnología garantiza la remoción de todos los contaminantes suspendidos y algunos disueltos. La limitación de los sistemas MBR es directamente proporcional a la eficaz reducción de nutrientes del proceso de fangos activos. El coste de construcción y operación de MBR es usualmente más alto que el de un tratamiento de aguas residuales convencional de esta clase de filtros (Martínez, 2012).

2.6.2.7 Sedimentación secundaria.- El paso final de la etapa secundaria del tratamiento es retirar los flóculos biológicos del material de filtro y producir agua tratada con bajos niveles de materia orgánica y materia suspendida (García *et al.*, 2012). En la Figura 3 se muestra el tratamiento secundario.

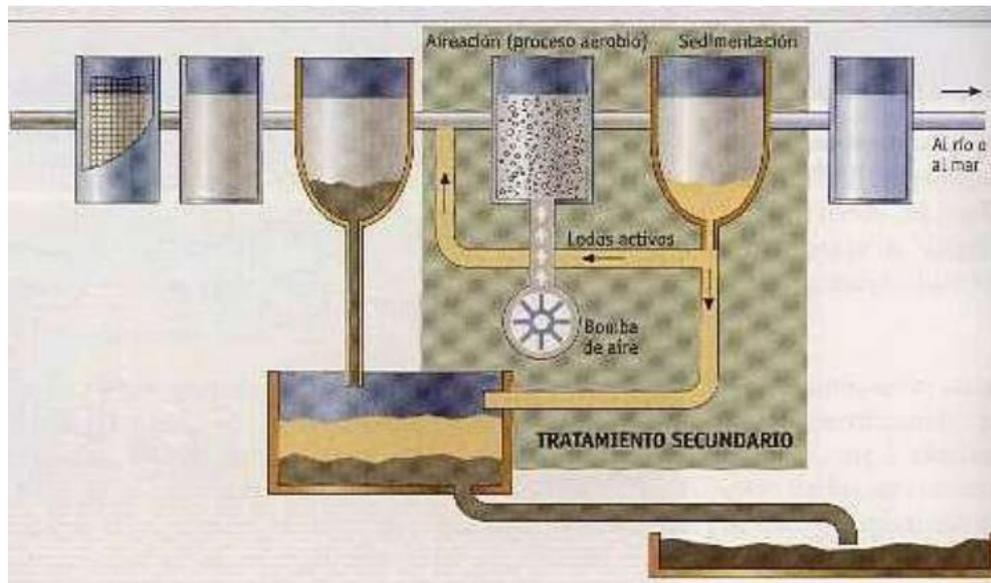


Figura 3. Tratamiento secundario (Tomado de: Pérez Y Camacho, 2011).

2.6.3 Tratamiento terciario

El tratamiento terciario se emplea para separar la materia residual de los efluentes de procesos de tratamiento biológico, a fin de prevenir la contaminación de los cuerpos de agua receptores, o bien, obtener la calidad adecuada para el reusó, factor de importancia en la planeación de recursos hidráulicos donde el abastecimiento de agua potable es limitado, como ocurre en las grandes metrópolis de nuestro país.

Los sistemas terciarios frecuentemente implican elevados costos de inversión. No obstante, se han reportado algunas experiencias con resultados satisfactorios en la aplicación de materiales naturales locales de bajo costo para la remoción de contaminantes residuales (Vaca *et al.*, 2001).

2.7 Tratamiento natural

2.7.1 Lagunas

Menciona Moreno (2002) que el lagunaje se puede aplicar a núcleos de población superiores a los 200 habitantes, siempre que se disponga de una superficie de terreno de al menos 6,5 m²/hab.

La depuración por lagunaje de aguas residuales consiste en el almacenamiento de éstas durante un tiempo variable en función de la carga aplicada y de las condiciones climáticas, de forma que la materia orgánica resulte degradada mediante la actividad de los microorganismos presentes en el medio acuático. El proceso de depuración tiene lugar gracias a reacciones biológicas, químicas y físicas, que ocurren en las lagunas y que tienden a estabilizar el agua residual. Los fenómenos que se producen tienen relación con la sedimentación, oxidación, fotosíntesis, digestión, aireación y evaporación. En función de los tipos de microorganismos, que dependen, a su vez, de la presencia de oxígeno disuelto, las lagunas, también conocidas como estanques de estabilización, se clasifican en anaerobias, facultativas y aerobias o de maduración.

2.7.2 Humedales

La norma oficial mexicana NOM-001-ECOL-1996, menciona que los humedales naturales son las zonas de transición entre los sistemas acuáticos y terrestres que constituyen áreas de inundación temporal o permanente, sujetas o no a influencia de mareas, como pantanos, ciénegas y marismas, cuyos límites los constituyen el tipo de vegetación hidrófila de presencia permanente o estacional; las áreas donde el suelo es predominantemente húmedos originadas por la descarga natural de acuíferos.

2.7.2.1 Humedal de flujo superficial.- En los humedales de flujo superficial (HS) el agua fluye sobre la superficie del sustrato desde la entrada hasta la salida del flujo de agua, y la vegetación se desarrolla en condiciones de inundación total o parcial. Es el tipo de humedal de tratamiento que más se asemeja a un humedal natural, con profundidades de agua inferiores a los 60 cm (generalmente en el rango de los 30 a 50 cm). Estas profundidades someras permiten el desarrollo de una densa población de vegetación acuática (macrofitos) en la mayor parte de la superficie del humedal, lo que supone una diferencia fundamental con respecto al tratamiento por lagunaje. La mayoría de los HS que existen en la actualidad han sido construidos para la depuración de efluentes de depuradoras que por lo tanto ya han recibido tratamiento previo, generalmente secundario (Sánchez, 2013).

2.7.2.2 Humedales de flujo subsuperficial.- Un humedal de tratamiento de flujo subsuperficial (HSS) es aquel en el que el flujo de agua se produce a través de un medio porosa, constituido por el propio sustrato o por grava, diseñados de tal modo que el nivel de agua permanezca en todo momento por debajo de la superficie del sustrato. Por lo general, se construyen mediante el sellado o impermeabilización de una cubeta y su relleno con un sustrato poroso de gravas, arena y/o algún otro material en el que pueda desarrollarse el tipo de vegetación seleccionado, que suele ser de macrofitas emergentes. La profundidad del sustrato poroso suele estar entre los 30 y 90 cm (Sánchez, 2013).

2.7.2.3 Humedales de flujo subsuperficial horizontal.- Son aplicados como una alternativa al tratamiento aguas residuales. Estos consisten en un material aislante colocado bajo un lecho filtrante de material poroso y una cubierta vegetal de plantas macrófitas que, mediante la incorporación de oxígeno a través de sus raíces, depura el agua mediante procesos físicos, químicos y biológicos (Pérez *et al.*, 2013).

2.7.2.4 Humedales de flujo subsuperficial vertical.- También conocidos como filtros intermitentes, este tipo de humedales reciben las aguas residuales de arriba hacia abajo, a través de un sistema de tuberías de aplicación de agua. Las aguas filtran verticalmente a través de un sustrato inerte (arena, gravas) recogidas en una red de drenaje situada en el fondo del humedal (Delgadillo, 2010). La aplicación intermitente del agua residual y el drenaje vertical en el lecho permiten que las reacciones aeróbicas se produzcan con rapidez, permitiendo una mayor oxigenación del líquido (Domínguez *et al.*, 2014).

2.8 Evaluación del sistema en la remoción de contaminante

2.8.1 Potencial de Hidrogeno (pH)

La medición del pH del agua es muy importante para muchos tipos de muestra. Los valores altos y bajos de pH son tóxicos para organismos acuáticos, ya sea directamente o indirectamente. Es el parámetro más importante utilizado en la evaluación de las propiedades corrosivas de un medio ambiente acuático. Asimismo, es importante para el funcionamiento efectivo de los procesos de tratamiento de aguas y su control (por ejemplo, floculación y desinfección de cloro), el control de plumbosolencia de aguas potables y tratamiento biológico de aguas residuales y los vertidos de aguas residuales (NMX-AA-008-SCFI-2011).

2.8.2 Conductividad eléctrica (CE)

La conductividad electrolítica es una expresión numérica de la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica. Esta capacidad depende de la presencia de iones, de su concentración total, de su movilidad, valencia y concentraciones relativas, así como de la temperatura.

La determinación de conductividad es de gran importancia pues da una idea del grado de mineralización del agua natural, potable, residual, residual tratada, de proceso o bien del agua para ser usada en el laboratorio en análisis de rutina o para trabajos de investigación.

El valor de conductividad es un parámetro regulado por límites máximos permisibles en descargas de aguas residuales al alcantarillado o a cuerpos receptores, también es un parámetro de calidad del agua para usos y actividades agrícolas, para contacto primario y para el consumo humano (NMX-AA-093-SCFI-2000).

2.8.3 Sólidos disueltos totales (DTS)

Son sustancias orgánicas e inorgánicas solubles en agua y que no son retenidas en el material filtrante. Las aguas naturales o residuales con altos contenidos de sólidos suspendidos o sales disueltas no pueden ser utilizadas en forma directa por las industrias o por las plantas potabilizadoras. De ello se deriva el interés por determinar en forma cuantitativa estos parámetros (NMX-AA-034-SCFI-2001).

2.8.4 Sólidos suspendidos totales (SST)

Es el material constituido por los sólidos sedimentables, los sólidos suspendidos y coloidales que son retenidos por un filtro de fibra de vidrio con poro de 1,5 μm secado y llevado a masa constante a una temperatura de $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (NMX-AA-034-SCFI-2015).

2.8.5 Turbiedad

ES la presencia de partículas suspendidas y disueltas. Materia en suspensión como arcilla, cieno o materia orgánica e inorgánica finamente dividida, así como compuestos solubles coloridos, plancton y diversos microorganismos. La transparencia del agua es muy importante cuando está destinada al consumo del ser humano, a la elaboración de productos destinados al mismo y a otros procesos de manufactura que requieren el empleo de agua con características específicas, razón por la cual, la determinación de la turbiedad es muy útil como indicador de la calidad del agua, y juega un papel muy importante en el desempeño de las plantas de tratamiento de agua, formando como parte del

control de los procesos para conocer cómo y cuándo el agua debe ser tratada (NMX-AA-038-SCFI-2001).

2.8.6 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) es la concentración de la masa de oxígeno equivalente a la cantidad de dicromato consumida por la materia disuelta y suspendida cuando una muestra de agua se trata con este oxidante bajo condiciones definidas (NMX-AA-030/1-SCFI-2012).

2.8.7 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅): Es una estimación de la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana heterogénea para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua en un periodo de 5 días. El método se basa en medir el oxígeno consumido por una población microbiana en condiciones en las que se ha inhibido los procesos fotosintéticos de producción de oxígeno en condiciones que favorecen el desarrollo de los microorganismos (NMX-AA-028-SCFI-2001).

2.8.8 Temperatura

El valor de temperatura es un criterio de calidad del agua para la protección de la vida acuática y para las fuentes de abastecimiento de agua potable, es también un parámetro establecido como límite máximo permitido en las descargas de aguas residuales y una especificación de importancia en los cálculos de balance de energía y de calor de los procesos industriales.

Las temperaturas elevadas en el agua pueden ser indicadores de actividad biológica, química y física, lo anterior tiene influencia en los tratamientos y abastecimientos para el agua, así como en la evaluación limnológica de un cuerpo de agua, por lo que es necesario medir la temperatura como un indicador de la presencia de compuestos y contaminantes, a través del método de prueba que se establece en la presente norma mexicana (NMX-AA-007-SCFI-2013).

2.8.9 Coliformes Totales (CT)

Los Coliformes son una familia de bacterias que se encuentran comúnmente en las plantas, el suelo y los animales, incluyendo los humanos. La presencia de bacterias coliformes es un indicio de que el agua puede estar contaminada con aguas negras u otro tipo de desechos en descomposición. Generalmente, las bacterias coliformes se encuentran en mayor abundancia en la capa superficial del agua o en los sedimentos del fondo (Rivas y Magadan. 2012).

2.8.10 Coliformes Fecales (CF)

La presencia y extensión de contaminación fecal es un factor importante en la determinación de la calidad de un cuerpo de agua. Las heces contienen una variedad de microorganismos y formas de resistencia de los mismos, involucrando organismos patógenos, los cuales son un riesgo para la salud pública al estar en contacto con el ser humano. El examen de muestras de agua para determinar la presencia de microorganismos del grupo coliforme que habitan normalmente en el intestino humano y de otros animales de sangre caliente, da una indicación. Dada la limitada capacidad de algunos miembros del grupo de organismos coliformes para sobrevivir en agua; sus números también pueden emplearse para estimar el grado de contaminación fecal (NMX-AA-42-1987).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización del sitio experimental

El presente trabajo se llevó a cabo en la planta de tratamiento de aguas residuales que se encuentra en el campus de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en la Ciudad de Saltillo, Coahuila. Ubicada a los 25° 21' 24.34" Latitud Norte y 101° 2' 3" Longitud Oeste. Colinda al norte con el jardín botánico, al sur con el jardín hidráulico, al este con el Departamento de Fitomejoramiento y al oeste con el Departamento de Horticultura. La planta de tratamiento se compone de un tanque igualador de gasto seguido de un pantano de flujo subsuperficial y posteriormente una laguna de oxidación terminando con una laguna de almacenamiento.

Como parte del sistema de tratamiento del agua residual, se encuentra un tanque Imhoff, donde se da pretratamiento a las aguas obtenidas de los departamentos académicos de Parasitología y Botánica principalmente, ya que las aguas residuales generadas por internado, comedor y otros departamentos académicos, es recolectada en un sistema de alcantarillado alterno que descarga directamente a una fosa igualadora de gasto, omitiendo el pretratamiento por el tanque Imhoff; por lo que hay una generación de aguas residuales, principalmente domésticas, además de las actividades de docencia e investigación inherentes a la Universidad. De este tanque Imhoff se extrae agua para el funcionamiento del sistema de flujo vertical.

3.2 Sistema de flujo vertical

El sistema consiste en un sistema de flujo vertical o llamado también humedales; está formado por dos toneles de 200 litros, rellenos de grava con diámetro de 2 centímetros y una porosidad del 54%, conectados por una tubería de PVC de una pulgada, extrayendo el agua del tanque Imhoff por una manguera

de polietileno de una pulgada con una longitud de 90 m, que conecta a los humedales.

Diseño

Entrada: Conectar un tubo de 50 cm de PVC de una pulgada en el primer tonel, en el extremo inferior a una altura de 10 cm de la base, en el otro extremo del tubo colocar una válvula globo de PVC para el manejo del paso del agua, conectando la tubería que conduce el agua.

Para conectar el primer y el segundo tonel, se coloca una tubería de PVC de una pulgada en el extremo superior, dejando 10 cm antes del borde de los toneles. Entre los dos toneles se conecta una Tee con reducción para instalar una válvula globo de PVC de 0.5", como se muestra en la Figura 4.



Figura 4. Conexión entre los dos toneles.

Colocar el extremo de una tubería de PVC de 30 cm de largo de una pulgada de diámetro en el segundo tonel, en la parte inferior a una altura de 10 cm de la base. En el otro extremo colocar un jarrito respiratorio como se muestra en la Figura 5. Para evitar el paso directo del flujo.



Figura 5. Jarrito respiratorio.

Para asegurar la entrada y salida no puntual del agua en los toneles y tratar de evitar las zonas muertas y/o de estancamiento de flujo, en cada uno de los toneles se instalaron dos crucetas hechas con tuberías perforada de PVC de una pulgada de diámetro, las dimensiones de las crucetas tiene que ser de las dimensiones del tonel, en cada salida de la cruceta se le coloca un tapón. Una cruceta se coloca en la parte inferior, y una en la parte superior de los toneles, estas son conectada en las entradas y salida de cada tonel.

Luego cada tonel se rellena de grava de 2 cm de diámetro hasta llegar a la superficie. El sistema se observa en la Figura 6.



Figura 6. Sistema de flujo vertical.

Puntos de muestreo

Entrada tonel, tonel 1-2, salida

Eficiencia

Para evaluar la eficiencia del sistema en remoción de contaminantes, hay que obtener muestras para su análisis en campo y en laboratorio, los parámetros que se toman en campo son la temperatura, pH, conductividad eléctrica y sólidos disueltos, que son tomados con un medidor multiparametros (HI 98130); la turbidez con un Turbidímetro (HI 93703). Para cada uno de estos, se toma una pequeña muestra en un vaso de precipitado en la entrada del tonel, tonel 1-2 y salida. Esos parámetros por lo general se realizan todos los días al igual que se le toma el gasto en la salida para evaluar si el sistema se encuentra estable o no y que no haya ninguna alteración en los resultados.

Se toman 2 litros de muestra en un recipiente, ya sea de polietileno o de vidrio, marcando en cada uno el punto de muestreo que es la entrada de los toneles, tonel 1-2, y salida de los toneles, para el análisis en laboratorio de los siguientes parámetros que a continuación se explica.

Sólidos suspendidos totales

Materiales

- Papel para Filtros
- Filtro
- Manguera
- Vacío
- Platos de aluminio
- Matraz kitasato o de filtración de 500 ml
- Agua destilada

Procedimiento

Eliminar la pelusa del filtro

- Se conecta un extremo de la manguera al vacío y el otro extremo al matraz kitasato o de filtración de 500 ml.
- Luego se le coloca el portafiltro en la boca del matraz.
- Después en el portafiltro se le coloca filtro de fibra de vidrio con una pinza y se moja con agua destilada.
- Se abre la succión, y ya que haya pasado toda el agua destilada se retira con una pinza, se coloca en un plato de aluminio. (Repetir con cada una, cuantas necesarias sean).
- Ya terminadas todas se colocan a la estufa por una hora a 105°C.
- Después de la hora se saca y se deja enfriar, luego se pesa cada uno de los papeles filtros tomando nota del peso.

Procedimiento con la muestra

Se repite los mismos procedimientos que cuando se le quita la pelusa al papel filtro, pero ahora en lugar de que se le moje con agua destilada se le añadirán 20 mL de la muestra correspondiente para cada filtro, agregándole aproximadamente 10 mL de agua destilada, se repetirán tres veces cada una como se observa en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Cantidades de sustancias para la determinación de Sólidos Suspendidos Totales (SST).

N° de plato	Tipo de muestra	Cantidad de muestra
1 ^a	Entrada de los toneles	20 mL
1B		20 mL
1C		20 mL
2 ^a	Toneles 1-2	20 mL
2B		20 mL
2C		20 mL
3 ^a	Salida toneles	20 mL
3B		20 mL
3C		20 mL

Después de haber repetido el procedimiento anterior se coloca en la estufa por 24 hrs, a 105 °C pasado el periodo se pesaron y se tomaron anotaciones para obtener los resultados correspondientes con la siguiente formula.

$$\text{Sólidos Suspendidos Totales} \frac{mg}{Lt} = \frac{(\text{Peso 2} - \text{Peso 1}) * 1000 * 1000}{\text{Muestra}}$$

Donde:

Peso 1= Peso del filtro seco sin residuo (g).

Peso 2= Peso del filtro con residuo seco (g).

Muestra= Volumen de la muestra (mL).

Demanda Bioquímica Oxígeno (DBO)

La DBO fue determinada por el método respirométrico y las cantidades de solución buffer, semilla y muestra son indicadas en el manual de operación del aparato DOD Track II de Hach.

Los frascos de vidrio se enumeraron y se le agrego a cada uno las soluciones correspondientes como lo indica el cuadro 3.

Cuadro 3. Cantidades utilizadas para la determinación de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).

# de bote	Cantidad de muestra (mL)	+	mL de semilla	+	mL de agua destilada
1	45 mL entrada	+	35 mL	+	10 mL
2	45 mL tonel 1-2	+	35 mL	+	10 mL
3	45 mL salida	+	35 mL	+	10 mL
4	35 mL de semilla	+		+	55 mL

Después de agregar cada muestra se introduce un agitador magnético a cada frasco y se vierte dentro, un sobre de solución buffer y nutrientes (Sulfato de magnesio, fosfato de potasio monobásico, fosfato de potasio dibásico y agua desmineralizada), luego se coloca una canastilla de goma con una perla de hidróxido de potasio, y enseguida se coloca en el BOD track II (aparato de DBO por método respirométrico). Posteriormente se mete a una incubadora a 20 °C, se programa para que los resultados sean leídos después de 5 días de incubación. Como se muestra en la Figura 7.



Figura 7. Determinación de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).

Demanda Química de Oxígeno

Reactivos

- Dicromato de potasio 0.25N.

- Sulfato de amonio ferroso (SAF) 0.25N.
- Indicador de ortofenantrolina.
- Ácido Sulfúrico-Sulfato de plata.

Procedimiento

- En un matraz Erlenmeyer de 250 mL se agregó 20 mL de muestra con una pipeta volumétrica, añadiendo una pizca de sulfato mercúrico y con movimientos circulares se le adicionó 20 mL de dicromato de potasio 0.25N.
- De forma lenta y mezclándolo se agregó 30 mL de solución de ácido sulfúrico-sulfato de plata, luego se llevó al aparato de reflujo, y a partir de que empezó la ebullición se dejó por dos horas.
- Terminando el periodo de reflujo, se añadió 100 mL de agua destilada y 5 gotas de ortofenantrolina titulándolo con SAF (Sulfato de amonio ferroso 0.25N), el vire es de azul verdoso a marrón rojizo como se ilustra en la Figura 8.



Figura 8. Determinación de Demanda Bioquímica de Oxígeno.

- Al mismo tiempo se corre un blanco con los mismos reactivos y un volumen de agua igual al de la muestra.

Cálculos

$$DQO \frac{mg}{lto} = \frac{(V1 - V2) * N * 8 * 1000}{V3}$$

Donde

V_1 = volumen del SAF requerido en la titulación del blanco (mL).

V_2 = Volumen del SAF requerido en la titulación de la muestra (mL).

V_3 = Volumen de la muestra (mL).

N = Normalidad de la SAF.

8 = Equivalente químico del oxígeno.

Coliformes fecales

Se prepara medio de cultivo, MFC, suficiente para trabajar 3 puntos de muestreo, 4 diluciones y 2 repeticiones por lo que en total son 24 cajas.

- Los materiales se esterilizaron.
- Se realizó una dilución decimal sucesiva con 8 tubos de ensaye (10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7} , 10^{-8}), para trabajar con 4 diluciones impares (10^{-1} , 10^{-3} , 10^{-5} , 10^{-7}).
- A cada tubo se le agregó 2.7 mL de agua destilada.
- Al primer tubo de ensaye se le agregó 0.3 mL de la muestra, se mezcló con movimientos circulares.
- Cambiando puntilla del primer tubo de ensaye se tomó 0.3 mL de la muestra, y se le agregó al segundo tubo de ensaye, mezclándolo con movimientos circulares.
- De igual manera se hizo lo mismo para el tercer tubo y los otros 5 tubos de ensaye cambiando puntilla para cada uno.
- El primer tubo fue la dilución 10^{-1} y así sucesivamente.
- De los tubos de dilución se tomó 0.1 mL y se filtró en membrana de 0.45 mm de diámetro y 47 μm de tamaño de poros, en embudo de filtración.
- Se utilizó un embudo por cada muestra y se filtró de lo más diluido a lo menos diluido.
- Solo se filtraron las diluciones 10^{-1} , 10^{-3} , 10^{-5} , 10^{-7} .
- Cada filtro se colocó en una caja de MFC, como se observa en la Figura 9.
- Al terminar se incubaron por 24 horas a 44 °C.



Figura 9. Cajas de MFC con filtro.

Coliformes totales

De igual manera que en los coliformes fecales se realizó el mismo procedimiento se preparó medio de cultivo, m-endo 8 cajas Petri por cada muestra, ya que son 3 puntos de muestreo, 4 diluciones a trabajar y 2 repeticiones por lo que en total son 24 cajas. Se realizó los mismos procedimientos solamente que en lugar de colocar las membranas en cajas de MFC ahora se colocaron en las cajas de m-endo y se incubaron a 37 °C, por 24 h. como se muestra en la Figura 10.



Figura 10. Cajas Petri con m-endo.

IV. RESULTADOS

Los resultados obtenidos durante el experimento se observa en el Cuadro 4. En cada uno se muestra la cantidad de remoción y la relación entre ellos como entrada-tonel 1-2; tonel 1-2-salida; entrada-salida.

Cuadro 4. Resultado de los parámetros analizados.

Parámetros	Entrada	Tonel 1-2	Salida	Entrada - Tonel 1-2	Tonel 1-2 -Salida	Entrada-Salida
Potencial de hidrógeno (pH)	8.10	8.09	7.98			
Temperatura °C	19.05	20.72	21.73			
Conductividad Eléctrica (CE) (mS/cm)	1.97	2.03	2.00			
Sólidos Disueltos Totales (TDS)(ppt)	0.975	1.005	0.993			
Turbiedad (UNT)	88.81	57.26	39.26	36	31	56
Sólidos Suspendido Totales (mg/L)	98.3333	48.3333	33.3333	51	31	66
Coliformes Fecales (ufc/mL)	1.95X10 ⁷	8.5X10 ⁶	4.5X10 ⁶	56	47	77
Coliformes Totales (ufc/mL)	2.1X10 ⁷	1.3X10 ⁷	5.5X10 ⁶	38	58	74
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L)	120	92	116	23	-26	3
Demanda Química de Oxígeno (mg/L)	200	370	60	-85	84	70

4.1 Potencial de hidrógeno (pH)

El pH de una sustancia es la medición de acidez o alcalinidad, en las muestras, los tres puntos exponen un valor ligeramente alcalino, teniendo el mayor en la entrada del sistema disminuyendo hacia la salida (Figura 11). Esto pudiera deberse al cambio de temperatura o actividades microbiológicas. Cuando la temperatura del agua aumenta el pH disminuye, debido a que las moléculas de agua tienden a descomponerse en sus constituyentes, el hidrógeno y el oxígeno.

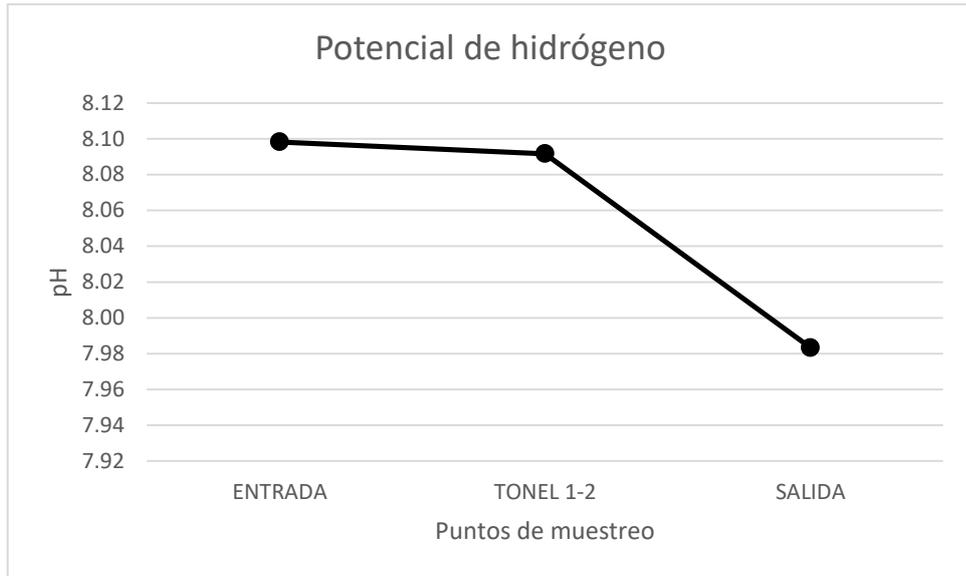


Figura 11. Comportamiento del potencial de hidrógeno (pH).

4.2 Temperatura

Es necesario medir la temperatura como un indicador de la presencia de compuestos y contaminantes en el agua. Las temperaturas elevadas en el agua son indicadores de actividad biológica, química y física (NMX-AA-007-SCFI-2000). En la Figura 12 se puede observar el comportamiento de la temperatura de los tres puntos de muestreo la cual se comporta de forma ascendente, el cambio de temperatura de la entrada a la salida fue de tres grados Celsius máximo, según Cupil (2015), los incrementos mayores de 5° C produce pérdidas de oxígeno.

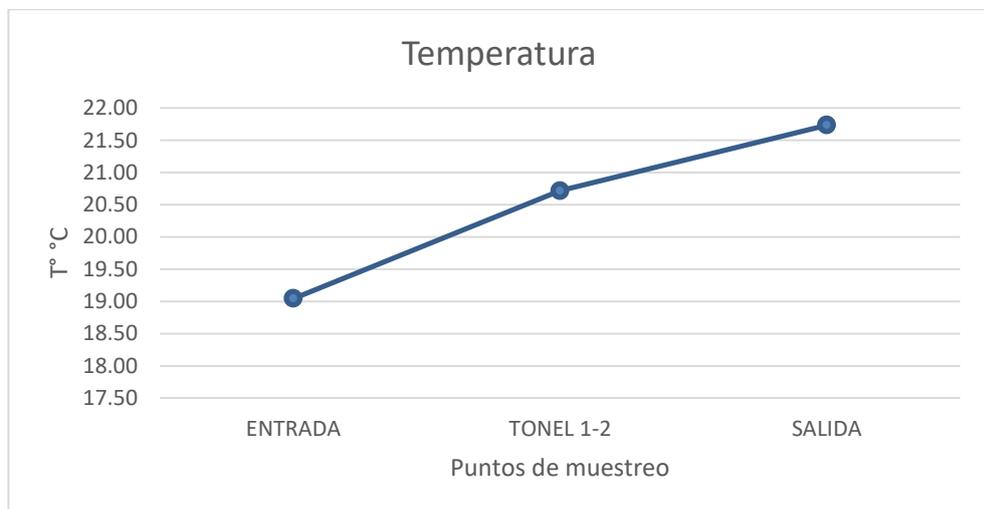


Figura 12. Comportamiento de la Temperatura.

4.3 Conductividad Eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica (CE), es la propiedad de un material que le permite conducir el flujo de la electricidad y de esta se puede determinar las cantidades de sales disueltas en el agua. Cuando la temperatura del agua aumenta, la conductividad eléctrica también.

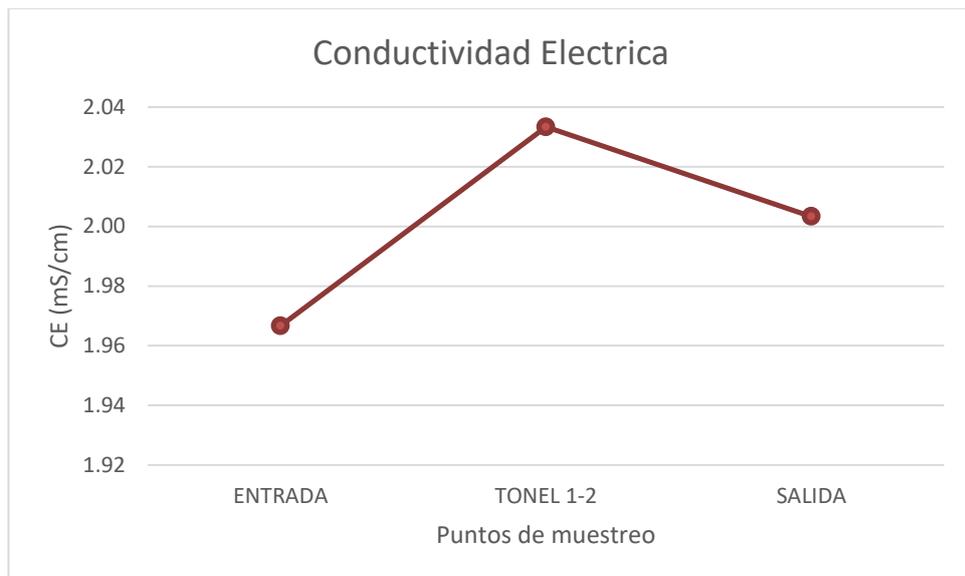


Figura 13. Comportamiento de la Conductividad Eléctrica (CE).

4.4 Sólidos Disueltos Totales

El total de sólidos disueltos (TDS) mantiene el mismo comportamiento que la conductividad eléctrica (CE) como se puede observar en la Figura 14, esto se debe a que el TSD es calculado con la lectura de CE y por consiguiente los dos parámetros son afectados por la temperatura ya que la temperatura va en aumento (Figura 12), y al suceder esto, causa una evaporación en el punto tonel 1-2. Los sólidos disueltos aparecen solo cuando el agua es evaporada, es decir, con el movimiento los sólidos se concentran más en la superficie de los toneles, cuando esto sucede por la densidad de solidos incrementa la temperatura.

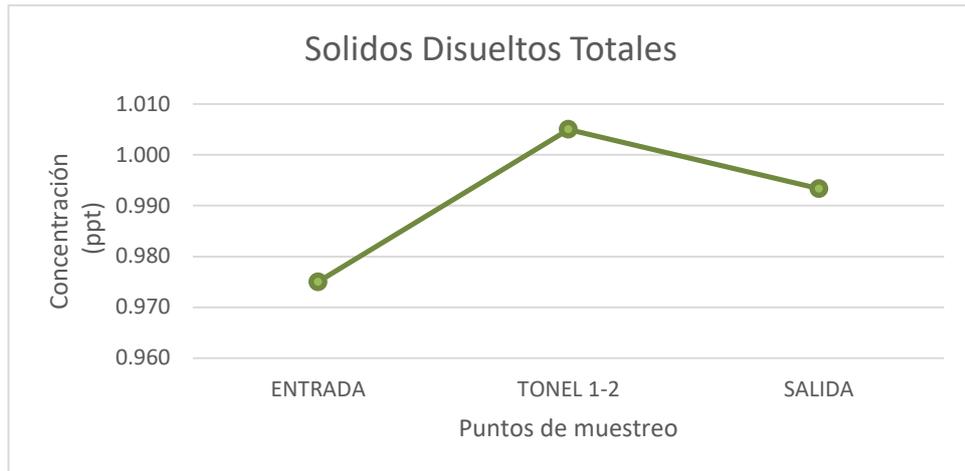


Figura 14. Comportamiento de los Sólidos Disueltos Totales (SDT).

4.5 Conductividad Eléctrica y Sólidos Disueltos Totales

Existe una relación del 99.51% entre la conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales, evaluados en los tres puntos de muestreo, como se puede apreciar en la Figura 15. Menciona Cupil (2015) que mientras mayor sea el valor de la conductividad eléctrica mayor será la cantidad de solidos disueltos en el agua.

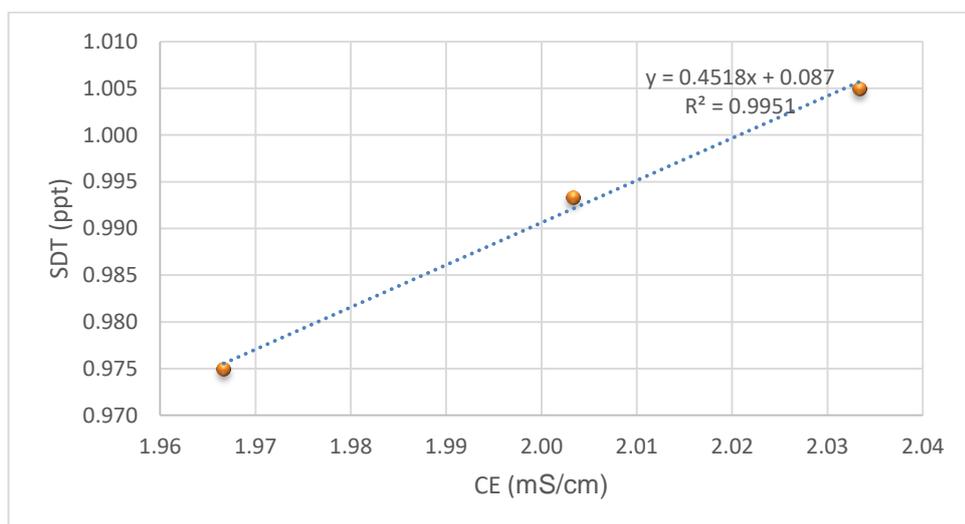


Figura 15. Relación entre la Conductividad Eléctrica y los Sólidos Disueltos Totales.

4.6 Sólidos Suspendidos Totales y la Turbiedad

Los sólidos suspendidos totales consisten de partículas de material orgánico e inorgánico y son los que causan la turbidez, es por eso que en los resultados se

muestra una relación del 98%, entre ellos, evaluados en los tres puntos de muestreo. Las remociones encontradas en los SST es de 51% entre la entrada y el tonel 1-2 y del tonel 1-2 a la salida un 31%, de manera global se obtuvo un 66 %; mientras que en la turbiedad se presenta 36% de remoción entre la entrada y el tonel 1-2 y del tonel 1-2 a la salida un 31%, en todo el proceso se presenta un 56%, como se observa en la Figura 16.

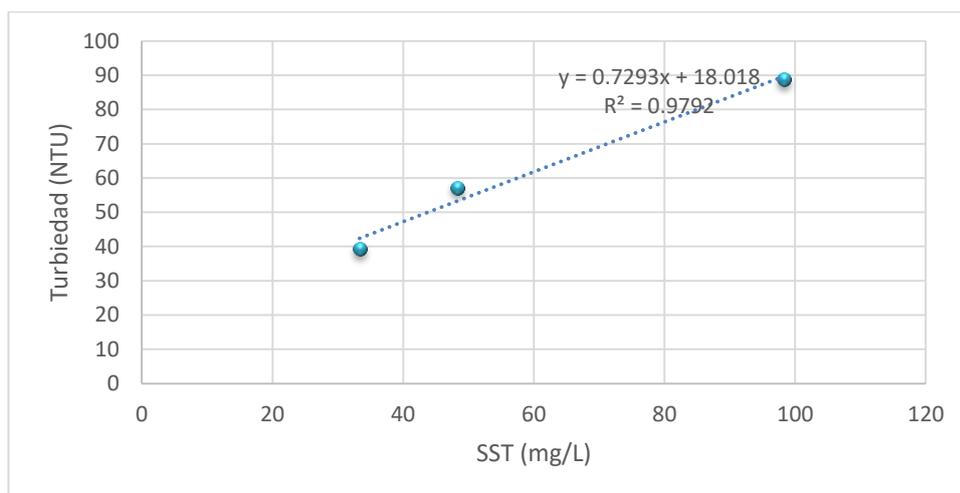


Figura 16. Relación de Sólidos Suspendedos Totales y la Turbiedad.

4.7 Coliformes Fecales

Tanto los coliformes fecales como los totales son bacterias, a diferencia de los coliformes totales, los coliformes fecales son generados por los humanos y los animales, son bacterias que resisten una temperatura de 44.5 °C, al igual que los coliformes totales, los coliformes fecales les afecta la temperatura y las cantidades de oxígeno disuelto, además la adhesión al material filtrante. En la entrada del tonel 1 al tonel 1-2 se observa un 56% de remoción y del tonel 1-2 a la salida se obtuvo un 47% (Figura 17). De acuerdo a lo mencionado anteriormente el nivel de bacterias disminuye, en general se obtuvo 77% de remoción, este resultado no es suficiente para cumplir con el requerimiento normativo, ya que la norma NOM-003-ECOL-1997, establece 1000 NMP/100 mL (10 coliformes fecales por mL) y el resultado fue de 4.5×10^6 ufc/mL (NMP significa “Número más Probable”, es un método estadístico que nos indica el valor más próximo al número real de gérmenes presentes en una muestra, es un método muy sensible, pudiendo a veces detectar hasta un microorganismo presente en la muestra).

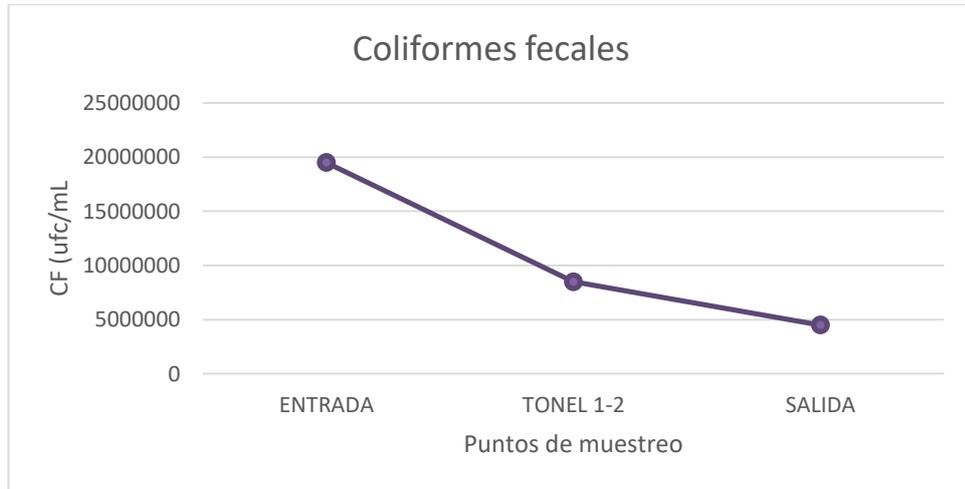


Figura 17. Comportamiento de los Coliformes Fecales (CF).

4.8 Coliformes Totales

Los coliformes son bacterias que pueden sobrevivir a una temperatura de 35 °C, se puede observar en los resultados que en la entrada del tonel y tonel 1-2 un 38% de remoción, mientras que en el tonel 1-2 a la salida un 58%, y de la entrada a la salida del sistema 74%, por lo que hubo una gran cantidad de eliminación de bacteria (Figura 18).

El comportamiento de los resultados se debe a que las bacterias les afectan la temperatura y las cantidades de oxígeno, adhesión al material filtrante, cuando hay una mayor temperatura las cantidades de oxígeno disuelto disminuyen y las bacterias no pueden sobrevivir.

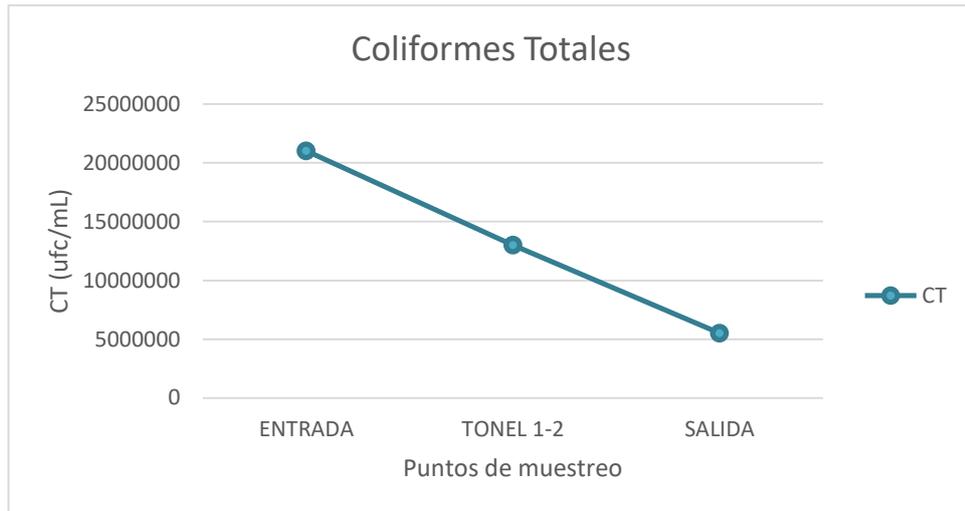


Figura 18. Comportamiento de los Coliformes Totales (CT).

4.9 Demanda Bioquímica de Oxígeno y Demanda Química de Oxígeno

La DQO de un agua residual suele ser mayor que su correspondiente DBO, debido al mayor número de compuestos cuya oxidación tiene lugar por vía química, frente a los que se oxidan por la biológica. Como se puede observar en la Figura 19, se tiene un comportamiento ascendente y descendente de la DQO, ya que en la entrada del tonel al tonel 1-2 no se obtuvo remoción, del tonel 1-2 a la salida fue de un 84% y en todo el sistema fue de un 70%.

En la DBO se obtuvo un 3% de remoción en todo el sistema sin embargo este resultado no es suficiente para cumplir con el requerimiento normativo ya que la norma NOM-003-ECOL-1997, establece 30 mg/l y el resultado fue de 116 mg/l. más del triple del que la norma establece.

En la DQO se obtuvo un 70% de remoción, también no cumple con el requerimiento normativo de la norma NOM-003-ECOL-1997, ya que establece 30 mg/l y se obtuvo 60 mg/l.

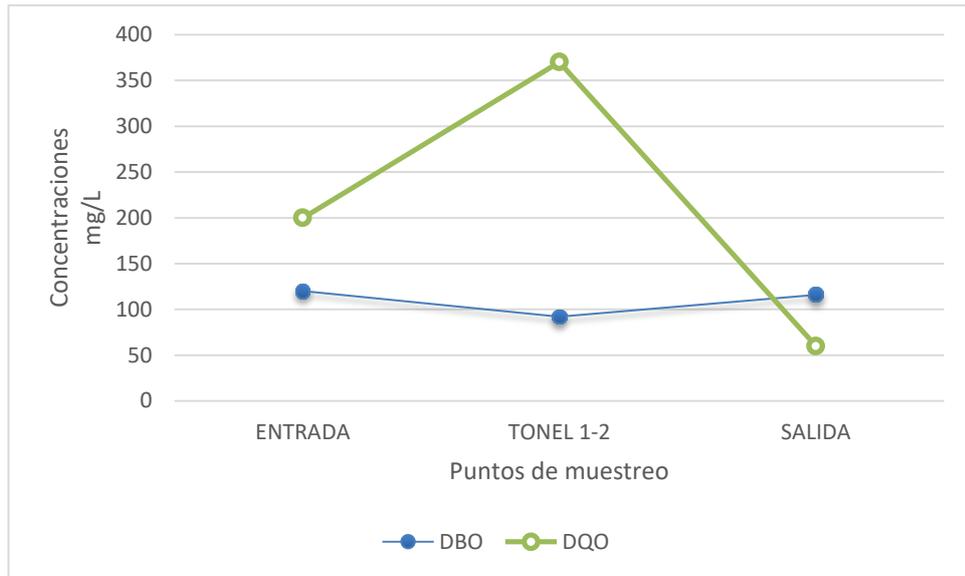


Figura 19. Relación entre la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO).

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en los análisis y al compararlos con la NOM-003-ECOL-1997 se puede concluir que el agua no cumple con el límite máximo permisible de contaminantes con ninguno de los parámetros analizados, para el servicio al público con contacto indirecto u ocasional es decir el agua se puede utilizar para riego siempre y cuando la persona que se encargue del riego tenga los cuidados y equipo de protección para evitar el contacto directo.

De acuerdo a los resultados obtenidos también se puede concluir que el sistema si cumple su función, por el comportamiento de los resultados aunque el agua no sea de buena calidad y la eficiencia de tratamiento no haya sido mayor del 80% de remoción.

Por los resultados observados y la secuencia en la que los parámetros fueron disminuyendo es decir el agua se fue limpiando, se podría decir que probablemente necesita el implemento de uno o dos toneles más para lograr el objetivo esperado, pero para esto se tendría que aumentar el diámetro de las tuberías de conexión de un tonel a otro, y posiblemente se tendrían que colocarse en diferentes niveles, para tener una mayor presión y permitir el paso del agua.

Durante el trabajo de experimentación se analizó con un tercer tonel con las mismas condiciones, mismo diámetro de tubería y mismo nivel, no funcionó, se cree que fue por la temperatura, y se considera que por falta de presión, no le permitía el paso del agua al tercer tonel, se le implementó una Tee para la liberación de aire entre el segundo y el tercero, y le permitiera el paso del agua al tercero, pero no funcionó, es por esto que se recomienda lo anterior.

VI. LITERATURA CITADA

- Apolinar, V. M. 2011. Descripción de tratamiento de aguas residuales y fangos. Monografía de licenciatura, Universidad veracruzana, Coatzacoalcos, Veracruz. En línea en: <http://es.calameo.com/read/00426325065e8e1b2bf27>. Consultado el 24 de marzo del 2017.
- CNA. (Comisión Nacional del Agua). 2012. Atlas del agua en México. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. En línea en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/144625/_2012_AAM2012.pdf. Consultado el 20 de Mayo del 2016
- CNA. (Comisión Nacional del Agua). 2016. Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. México: Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. En línea en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/184667/DSAPAS_2016_web_Parte1.pdf. Consultado el 10 de Junio del 2016.
- CNA. (Comisión Nacional del Agua). 2014. Estadísticas del agua en México. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. En línea en: http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EA_M2014.pdf. Consultado el 10 de junio del 2016.
- Cupil, D. A. 2015. Calidad de agua mediante el análisis fisicoquímico, demanda bioquímica y química de oxígeno en los humedales de Tumulco, Veracruz, México. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias Biológicas Y agropecuarias, Tuxpan Veracruz.
- Delgadillo, O., Camacho A., Pérez, L. F. y Andrade M. 2010. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Cochabamba, Bolivia: Nelson Antequera Duran.

- Deloya, M. A. 2001. Una alternativa de tratamiento biológico para aguas residuales cuando no se dispone de grandes extensiones de terreno. *Tecnología en marcha*, 13(3), 57-59.
- Domínguez, R. E., Pérez, V.M. M., González, R. Y. M. y Jiménez, LI. T. 2014. Diseño de un humedal subsuperficial vertical para la depuración de las aguas residuales de la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas. Villa Clara, Cuba: Centro de estudio de química Aplicada.
- Espigares, G. M. y Pérez, L. J. A. 2003. Aguas residuales. Composición. En línea en:http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas_Residuales_composicion.pdf. Consultado el 8 de diciembre del 2016.
- Fuentes, S. H. F. 2008. Cuantificación de la presencia de glufosinato en los lodos activados, para el mejoramiento de la eficiencia de una planta de tratamiento de aguas residuales. Trabajo de graduación, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- García, R. N., Villanueva, D. P., Campos, M. E. y Velázquez, R. A. 2012. Análisis de la adsorción como método de pulimiento en el tratamiento de aguas residuales. *Quivera*, vol. 14 num1, pp. 109-129 Universidad de México. Toluca México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2017. Agua cuéntame territorio. En línea: <http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/agua/distribucion.aspx?tema=T>. Consultado en enero del 2017.
- Martínez, O. J. A. 2012. Tratamiento físico químico de una agua residual industrial con contaminantes mixtos. Memoria, Universidad Tecnológica de Querétaro, Santiago de Querétaro.
- Mayo, P. E. 2010. Proyecto ejecutivo de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales para la Localidad de Xochiapa, Ver. Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería civil, Región Xalapa, Xalapa Enrique Veracruz.

- Mesías, F. G. A. 2010. Desarrollo de una estrategia de crecimiento de wind wáter, una empresa fabricante de plantas de tratamiento. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias Físicas Y Matemáticas, Santiago, Chile.
- Moreno, M. L. 2002. La depuración de aguas residuales urbanas de pequeñas poblaciones mediante infiltración directa en el terreno. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Muentes, A. 2015. Planta de tratamiento de aguas residuales. En línea en: <http://aguasresidualescaucasiaudea.blogspot.mx/2015/>. Consultado el 21 de septiembre del 2016.
- NMX-AA-007-SCFI-2000. Análisis de agua- Determinación de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba (cancela a la NMX-AA-007-1980).
- NMX-AA-007-SCFI-2013. Análisis de agua – Medición de la Temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba (cancela la NMX-AA-007-SCFI-2000).
- NMX-AA-008-SCFI-2011. Análisis de agua – determinación del pH- método de prueba- (Cancela a la NMX-AA-008SCFI-2000).
- NMX-AA-028-SCFI-2001. Análisis de agua – determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO5) y residuales tratadas – método de prueba (cancela a la NMX-AA-028-1981).
- NMX-AA-030/1-SCFI-2012. Análisis de agua- Medición de la Demanda Química de Oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba- parte 1- método de refluo abierto- (Cancela a la NMX-AA-030-SCFI-2001).
- NMX-AA-034-SCFI-2001. Análisis de agua- determinación de Solidos y Sales Disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- método de prueba (Cancela a las NMX-AA-020-1980 Y NMX-AA-034-1981).

- NMX-AA-034-SCFI-2015. Análisis de agua – medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba (Cancela a la NMX-AA-034-SCFI-2001).
- NMX-AA-038-SCFI-2001. Análisis de agua de Determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales, y residuales tratadas – método de prueba (cancela a la NMX-AA-038-1981).
- NMX-AA-093-SCFI-2000. Análisis de agua- Determinación de la conductividad electrolítica- método de prueba- (cancela a la NMX-AA-093-1984).
- NMX-AA-42-1987. Calidad del aguas, determinación del número más probables (nmp) de coliformes totales, Coliformes fecales (Termo tolerantes) y Escherichia coli presuntiva.
- NOM-001-ECOL-1996. Norma oficial Mexicana. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
- NOM-003-ECOL-1997. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsan en servicios al público.
- OEFA (Organización de Evaluación y Fiscalización Ambiental). 2014. Fiscalización ambiental en aguas residuales. En línea en: https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827. Consultado en abril del 2017.
- Pérez, A. F. E. y Camacho, A. K. L. 2011. Tecnologías para el tratamiento de aguas servidas. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias Químicas, Posa Rica de Hgo, Veracruz.
- Pérez, P, C. 2012. Diseño y cálculo del tratamiento secundario mediante aireación prolongada de una EDARU. Tesis de licenciatura, Universidad Carlos III de Madrid, Escuela politécnica superior, Madrid.
- Pérez, S. R., Alfaro, C. C., Sasa, M. J. y Agüero, P. J. 2013. Evaluación del funcionamiento de un sistema alternativo de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Unicencia, 27(1), 332-340.

- Rivas, G. J. y Magadan, D. M. 2012. Planificación Turística y Desarrollo sostenible. Oviedo España: Séptem ediciones, S.L.
- Rodie B. E. y Hardenberg. 1987. Tratamiento de aguas residuales. México D.F: Ed. Continental S.A de C.V.
- Rodríguez, F. A. A., Letón, G. P., Rosal, G. R., Dorado, V., Villar, F., S. y Sanz García, J. M. 2006. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. Ed. CEIM (Dirección General de Universidades e Investigación).
- Rodríguez, G. M. R., Molina, B. J., Jácome, B. A. y Suarez, L. J. 2012. Humedal de flujo vertical para tratamientos terciario del efluente físico-químico de una estación depuradora de aguas residuales domésticas. Ingeniería Investigación y Tecnología, 14(2), 223-235.
- Romero. A. M., Colin, C. A., Sanchez, S. E. Y Ortiz. H. M. L. 2009. Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. Scielo, Revista internacional ambiental de contaminantes, 25(3).
- Sánchez, R. D. 2013. Diseño y modelización de humedales para el tratamiento de efluentes de depuradora. Memoria de doctorado, Universidad de Castilla-La Mancha, Ciudad Real.
- Sette, R. R. 2003. Tratamiento de aguas residuales. Barcelona: Ed. Reverte, S. A.
- SINA. (Sistema Nacional de Información del Agua). 2012. Atlas digital del agua México. En línea en: <http://www.conagua.gob.mx/atlas/usosdelagua31.html>. Consultado en febrero del 2017.
- Urrutia, V. J. 2017. Como operar una planta de tratamientos de aguas residuales. En línea en: http://mestreacasa.gva.es/c/document_library/get_file?folderId=500016358398&name=DLFE-1112906.pdf. Consultado 25 de abril del 2017.

- Vaca, M. M., Magdaleno, C. L., Sosa, C. M., Monroy, M. M. y Jiménez, C. B. 2001. Tratamiento Terciario de aguas residuales por filtración e intercambio iónico. México: Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco.
- Von, M. E. 2009. Humedales artificiales para el tratamiento de aguas grises y aguas residuales domesticas en países en desarrollo. En línea en: <http://www.rotaria.net/peru3/rotaria/files/Manual%20Humedal.pdf>. Consultado el 23 de septiembre del 2016.