



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL
MEDIANTE CULTIVO DE MICROALGAS PARA OBTENER UN
EFLUENTE QUE CUMPLA CON LA NOM-003-SEMARNAT-1997

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

BIÓLOGO

P R E S E N T A:

REYES LANDEROS JOSHUA

TUTOR:

M. EN C. ISaura YÁÑEZ NOGUEZ

CIUDAD DE MÉXICO A

2022





Universidad Nacional
Autónoma de México



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.



JURADO ASIGNADO:

Presidente:	Dra. María Teresa Orta Ledesma
Secretario:	Dra. Ana Cecilia Espinosa García
Vocal:	M. en C. Isaura Yáñez Noguez
1 ^{er} . Suplente:	Dr. Rodolfo Omar Arellano Aguilar
2 ^{do} . Suplente:	M. en C. Verónica Aguilar Zamora



Lugar donde se realizó la tesis:

LABORATORIO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

M. EN. C. ISaura YÁÑEZ NOGUEZ

ISAURA YÁÑEZ NOGUEZ



El trabajo experimental fue realizado en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM que cuenta con certificado de conformidad otorgado por el organismo acreditado Certificación Mexicana, S.C., por haber implementado y mantener un Sistema de Gestión de la Calidad de conformidad con los requisitos de la norma internacional ISO 9001:2015

No. de Certificado CMX C SGC 155 2017, válido en el período del

12 de noviembre de 2020 al 11 de noviembre de 2023



TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	12
2. MARCO TEÓRICO.....	13
2.1. CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES	13
2.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES	14
2.2.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL AGUA RESIDUAL	14
2.2.1.1. SÓLIDOS TOTALES	14
2.2.1.2. SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)	15
2.2.1.3. SÓLIDOS FILTRADOS (SFT)	15
2.2.1.4. SÓLIDOS SEDIMENTABLES (SSS)	15
2.2.1.5. SÓLIDOS COLOIDALES (SFC)	15
2.2.1.6. SÓLIDOS DISUELTOS (SFD)	15
2.2.1.7. OLOR	15
2.2.1.8. COLOR	16
2.2.1.9. TEMPERATURA	16
2.2.2. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL AGUA RESIDUAL	17
2.2.2.1. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)	17
2.2.2.2. PH	18
2.2.2.3. ALCALINIDAD	18
2.2.2.4. NUTRIENTES	19
2.2.2.5. NITRÓGENO	19
2.2.2.6. FÓSFORO	19
2.2.2.7. AZUFRE	20
2.2.3. CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS DEL AGUA.....	20
2.2.3.1. DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO (DBO).....	20
2.2.3.2. AGENTES PATÓGENOS	22
2.2.3.3. ORGANISMOS INDICADORES	22
2.3. PROCESOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	24
2.3.1. PROCESOS FÍSICOS.....	25
2.3.2. PROCESOS QUÍMICOS UNITARIOS	26
2.3.3. PROCESOS BIOLÓGICOS UNITARIOS	27
2.3.4. PROCESOS BIOLÓGICOS AEROBIOS CON CULTIVO EN SUSPENSIÓN- LODOS ACTIVADOS.....	27
2.3.4.1. PROCESOS BIOLÓGICOS AEROBIOS CON CULTIVO FIJO	27
2.3.4.2. FILTROS PERCOLADORES.....	28



2.3.4.3.	CONTADORES BIOLÓGICOS ROTATORIOS (CBR-BIODISCOS)	28
2.3.4.4.	PROCESADORES DE BIOMASA FIJA SOBRE LECHO MÓVIL	28
2.3.4.5.	PROCESOS BIOLÓGICOS ANAEROBIOS	28
2.4.	NIVELES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	29
2.4.1.	PRETRATAMIENTO.....	29
2.4.2.	TRATAMIENTO PRIMARIO	29
2.4.3.	TRATAMIENTO SECUNDARIO	30
2.4.4.	TRATAMIENTO Terciario	30
2.4.5.	TRATAMIENTO AVANZADO	31
2.5.	RIESGOS AL PÚBLICO POR EL CONTACTO DE AGUA RESIDUAL NO TRATADA	32
2.6.	INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AGUA DE ACUERDO CON LA NOM-003-SEMARNAT-1997	34
2.6.1.	SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST).....	34
2.6.2.	DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO (DBO)	34
2.6.3.	GRASAS Y ACEITES	36
2.6.4.	HUEVOS DE HELMINTO	36
2.6.5.	COLIFORMES FECALES.....	38
2.7.	ANTECEDENTES EN EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL CON MICROALGAS	40
2.7.1.	PROPIEDADES DE LAS MICROALGAS EN UN SISTEMA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO	41
2.7.2.	TIPOS DE TRATAMIENTO ESPECÍFICOS CON MICROALGAS.....	42
2.7.3.	REACTORES RACEWAY	42
2.8.	NORMATIVIDAD MEXICANA EN MATERIA DE TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL	43
2.8.1.	NOM-003-SEMARNAT-1997	44
3.	JUSTIFICACIÓN	46
4.	OBJETIVOS	49
4.1.	GENERAL	49
4.2.	PARTICULARES	49
5.	HIPÓTESIS	50
6.	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO UTILIZADO EN LA PLANTA “ATZINTLI”	51
6.1.	CARACTERÍSTICAS DEL AGUA SUJETA A TRATAMIENTO.....	56
7.	DISEÑO DE EXPERIMENTOS	58
7.1.	TIPO Y TOMA DE MUESTRAS	58
7.1.1.	MUESTRA DE GRASAS Y ACEITES	58
7.1.2.	MUESTRA DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)	59
7.1.3.	MUESTRA DE HUEVOS DE HELMINTO	59



7.1.4.	MUESTRA PARA DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO (DBO)	59
7.1.5.	MUESTRA PARA COLIFORMES FECALES	59
7.1.6.	PERIODICIDAD DE LA TOMA DE MUESTRAS Y NÚMERO DE REPETICIONES POR MUESTRA	59
8.	MATERIALES Y METODOLOGÍA.....	61
8.1.	MEDICIÓN DE GRASAS Y ACEITES	61
8.2.	MEDICIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)	63
8.3.	MEDICIÓN DEL NÚMERO DE HUEVOS DE HELMINTO.....	64
8.4.	MEDICIÓN DE DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO (DBO).....	65
8.5.	MEDICIÓN DE COLIFORMES FECALES.....	66
9.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	69
9.1.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE GRASAS Y ACEITES	71
9.2.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST).....	77
9.3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE HUEVOS DE HELMINTO	83
9.4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO (DBO).....	88
9.5.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE COLIFORMES FECALES.....	95
9.6.	PORCENTAJE DE AUMENTO/DISMINUCIÓN EN LOS PARÁMETROS.....	102
9.7.	ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE PARÁMETROS	103
10.	CONCLUSIONES	105
11.	RECOMENDACIONES	106
12.	REFERENCIAS.....	107
13.	ANEXOS.....	114
13.1.	HISTOGRAMAS	114
ANEXO		119
NOM-003-SEMARNAT-1997		119



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1. COMPONENTES DEL MODELO DIDÁCTICO ESCALA PILOT ATZINTLI.....	53
ILUSTRACIÓN 2. SISTEMA DE MEZCLA DEL REACTOR	53
ILUSTRACIÓN 3. LOCALIZACIÓN DE LA PTAR, REACTOR Y SEDIMENTADOR.....	54
ILUSTRACIÓN 4. INSTALACIONES DE LA PLANTA PILOTO "ATZINTLI"	55
ILUSTRACIÓN 5. SEDIMENTADOR.....	56
ILUSTRACIÓN 6. PROCEDIMIENTO DE DILUCIÓN PARA EL ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO	67
ILUSTRACIÓN 7. MATRAZ DE BOLA DESPUÉS DE CUANTIFICACIÓN DE GRASAS	72
ILUSTRACIÓN 8. MONTAJE DE EQUIPO DE EXTRACCIÓN SOXHLET	73
ILUSTRACIÓN 9. FILTROS EN HORNO DE SECADO.....	78
ILUSTRACIÓN 10. BOTELLAS DE DBO	89
ILUSTRACIÓN 11. PROCESO DE FILTRACIÓN DE COLIFORMES.....	96
ILUSTRACIÓN 12. CUANTIFICACIÓN FINAL DE COLIFORMES	96
ILUSTRACIÓN 13. CUANTIFICACIÓN INICIAL DE COLIFORMES.....	97

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. ORGANISMOS INDICADORES DE CONTAMINACIÓN HUMANA.....	23
TABLA 2. PROCESOS FÍSICOS APLICADOS AL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	25
TABLA 3. PROCESOS QUÍMICOS APLICADOS AL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	26
TABLA 4. NIVELES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	31
TABLA 5. AGENTES INFECCIOSOS POTENCIALES EN LAS AGUAS RESIDUALES	33
TABLA 6. CLASIFICACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DE ACUERDO LA DBO	35
TABLA 7. CARACTERÍSTICAS DE PLATYHELMINTOS Y NEMATHELMINTOS EN ETAPA ADULTA	37
TABLA 8. CARACTERÍSTICAS DE ALGUNOS DE LOS HUEVOS DE PLATYHELMINTOS Y NEMATHELMINTOS	38
TABLA 9. PRINCIPALES TIPOS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL CON MICROALGAS.....	42
TABLA 10. NORMAS OFICIALES MEXICANAS EN MATERIA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	44
TABLA 11. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES EN LOS PARÁMETROS APLICABLES A LA NOM-003-SEMARNAT-1997.....	45
TABLA 12. PLAN DE TRABAJO PARA LA TOMA DE MUESTRAS.....	60
TABLA 13. RESULTADOS GENERALES OBTENIDOS DURANTE LA EXPERIMENTACIÓN	70
TABLA 14. RESULTADOS INICIALES Y FINALES DE GRASAS Y ACEITES	71
TABLA 15. RESULTADOS INICIALES Y FINALES DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES.....	78
TABLA 16. RESULTADOS INICIALES Y FINALES DE NÚMERO DE HUEVOS DE HELMINTO	83
TABLA 17. RESULTADOS INICIALES Y FINALES DE DBO	88
TABLA 18. RESULTADOS INICIALES Y FINALES DE COLIFORMES FECALES	95



TABLA 19. PORCENTAJE DE AUMENTO O DISMINUCIÓN EN LOS PARÁMETROS 102

ÍNDICE DE GRÁFICAS

GRÁFICA 1. COMPORTAMIENTO DEL PARÁMETRO DE GRASAS Y ACEITES ANTES Y DESPUÉS DEL TRATAMIENTO MEDIANTE EL CULTIVO DE MICROALGAS 74

GRÁFICA 2. COMPORTAMIENTO DEL PARÁMETRO SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES ANTES Y DESPUÉS DEL TRATAMIENTO MEDIANTE EL CULTIVO DE MICROALGAS 79

GRÁFICA 3. COMPORTAMIENTO DEL PARÁMETRO HUEVOS DE HELMINTO ANTES Y DESPUÉS DEL TRATAMIENTO MEDIANTE EL CULTIVO DE MICROALGAS 84

GRÁFICA 4. COMPORTAMIENTO DEL PARÁMETRO DBO ANTES Y DESPUÉS DEL TRATAMIENTO MEDIANTE EL CULTIVO DE MICROALGAS 90

GRÁFICA 5. COMPORTAMIENTO DEL PARÁMETRO COLIFORMES FECALES ANTES Y DESPUÉS DEL TRATAMIENTO MEDIANTE EL CULTIVO DE MICROALGAS 98

GRÁFICA 6. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN ENTRE DATOS PAREADOS INICIALES 103

GRÁFICA 7. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN ENTRE DATOS PAREADOS FINALES 104

ÍNDICE DE HISTOGRAMAS

HISTOGRAMA 1. FRECUENCIA DE RESULTADOS DE GRASAS Y ACEITES ANTES Y DESPUÉS DEL TRATAMIENTO MEDIANTE CULTIVO DE MICROALGAS 114

HISTOGRAMA 2. FRECUENCIA DE RESULTADOS DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES ANTES Y DESPUÉS DEL TRATAMIENTO MEDIANTE CULTIVO DE MICROALGAS 115

HISTOGRAMA 3. FRECUENCIA DE RESULTADOS DE HUEVOS DE HELMINTO ANTES Y DESPUÉS DEL TRATAMIENTO MEDIANTE CULTIVO DE MICROALGAS 116

HISTOGRAMA 4. FRECUENCIA DE RESULTADOS DE DBO ANTES Y DESPUÉS DEL TRATAMIENTO MEDIANTE CULTIVO DE MICROALGAS . 117

HISTOGRAMA 5. FRECUENCIA DE RESULTADOS DE COLIFORMES FECALES ANTES Y DESPUÉS DEL TRATAMIENTO MEDIANTE CULTIVO DE MICROALGAS 118



RESUMEN

En este trabajo se comprobó la eficacia de un tratamiento biológico nivel terciario de aguas residuales basado en el cultivo de microalgas. Lo anterior encaminado a cumplir con los parámetros determinados por la NOM-003-SEMARNAT-1997 cuyo propósito es establecer los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Los parámetros evaluados fueron: Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Huevos de Helminto (HH), grasas y aceites y coliformes fecales. Los datos obtenidos muestran que el efluente obtenido se encontró dentro de los límites máximos permisibles en 4 de los 5 parámetros para su reúso en servicios al público con contacto indirecto u ocasional, los Sólidos Suspendidos Totales (que corresponden a la biomasa algal y son separados posteriormente) aumentaron favorablemente a 840 mg/L. Los resultados manifiestan un panorama prometedor en el ámbito del tratamiento de aguas residuales con costos relativamente bajos. La ventaja adicional del gran potencial que se vislumbra mediante éste tipo de tratamiento, es obtener un beneficio económico mediante las distintas aplicaciones que se le pueden dar al uso de la biomasa generada durante el tratamiento.



ABSTRACT

In this work, the efficacy of a tertiary biological wastewater treatment based on microalgae cultivation was tested. This was aimed at complying with the parameters determined by NOM-003-SEMARNAT-1997, whose purpose is to establish the maximum permissible limits of pollutants for treated wastewater reused in public services. The parameters evaluated were: Biological Oxygen Demand (BOD), Total Suspended Solids (TSS), Helminth Eggs (HE), fats and oils, and fecal coliforms. The data obtained show that the effluent obtained was within the maximum permissible limits in 4 of the 5 parameters for reuse in services to the public with indirect or occasional contact; the Total Suspended Solids (TSS) (linked to the algal biomass and are subsequently separated) favorably increased to 840 mg/L. The results show a promising outlook in the field of wastewater treatment at relatively low costs. The additional advantage of the great potential of this type of treatment is to obtain an economic benefit through the different applications that can be given to the use of the biomass generated during the treatment.



1. INTRODUCCIÓN

La producción de agua residual en el mundo aumenta considerablemente cada día a medida que aumenta la demanda total de agua (ONU, 2017). En México, por ejemplo, el 77% de la población está asentada en donde se encuentra sólo el 33% del agua renovable (Arreguín *et al.*, 2020) y los usos agrupados agrícola y el abastecimiento público cubren alrededor del 90.9% de la demanda de agua (CONAGUA, 2015). A esto se suma la contaminación del agua como otro factor limitante de la disponibilidad, puesto que el 70% de los cuerpos de agua tienen algún grado de contaminación en México (Arreguín *et al.*, 2020). En todos los países, salvo en los más desarrollados, la gran mayoría de las aguas residuales se vierte directamente en el medio ambiente sin tratamiento adecuado, con consecuencias perjudiciales para la salud humana, la productividad económica, la calidad de los recursos ambientales de agua dulce y los ecosistemas (ONU, 2017). Es por ello por lo que muchas de las investigaciones a nivel mundial y específicamente en México, están orientadas a buscar alternativas para solventar esta problemática, con apego a la normatividad vigente.

Derivado de dichas investigaciones a nivel mundial, se han vuelto las miradas a reconocer el agua residual no como un desecho sino como un recurso aprovechable. Las agendas globales han plasmado esta posición en la edición 2017 del Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo. Este informe se titula "Aguas residuales: el recurso no explotado", que demuestra que mejorar la gestión de las aguas residuales genera beneficios sociales, ambientales y económicos que son esenciales para el desarrollo sostenible.

Para lograr el propósito del aprovechamiento de las aguas residuales, las microalgas se han convertido en una de las mejores alternativas, ya que además de ser consideradas como una alternativa de tratamiento terciario, proveen de biomasa con alto valor agregado que incluso puede ser comercializable. El cultivo de microalgas en agua residual funciona como un tratamiento biológico, estos organismos absorben compuestos inorgánicos (macro y micronutrientes) y reducen la carga inorgánica y orgánica presente (Abdel-Raouf *et al.*, 2012) (Markou & Georgakakis, 2011).



2. MARCO TEÓRICO

2.1. CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES

De acuerdo con CONAGUA (2015) las aguas residuales son aquellas 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 ellas.

De acuerdo con el Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA, 2008) la clasificación de las aguas residuales se puede hacer en 3 grandes grupos:

- Aguas residuales urbanas: Presentan aguas residuales domésticas y/o la mezcla de estas con aguas residuales industriales y/o escorrentía pluvial.
- Aguas residuales domésticas: Son aquellas procedentes de zonas de viviendas y servicios primarios al público (no industriales) con desechos generados principalmente por el metabolismo humano y actividades del hogar. Los principales componentes de este tipo de agua residuales son los siguientes:
 - Materia orgánica, sólidos de distinta procedencia, grasas y sales (para el caso de los contaminantes provenientes de la cocina).
 - Detergentes y nutrientes (por las emisiones generadas en el área de lavado).
 - Materia orgánica (sólidos disueltos y suspendidos), nutrientes, organismos patógenos, sales jabones, geles y champú. (por las instalaciones de sanitarios y baño).
- Aguas residuales industriales: Las aguas residuales contenidas en esta categoría son todas aquellas que en sus orígenes tuvieron un fin en alguna actividad comercial o industrial (que no fue de origen doméstico o de servicios primarios ni de escorrentía



pluvial). La composición de estas aguas puede llegar a ser muy variada debido a las distintas exigencias que presente la industria.

La clasificación de las aguas residuales puede variar de acuerdo con el autor y a la practicidad del estudio de estas. Tal es el caso de la propuesta hecha por CONAGUA (2015) donde la clasificación de las aguas residuales se divide en municipales e industriales, siendo las primeras aquellas que se disponen en los sistemas de alcantarillado (tanto urbanos como rurales) mientras que las segundas corresponden a aquellas que se descargan en cuerpos receptores de propiedad nacional.

2.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES

Para un buen manejo, uso y reúso de los recursos hídricos del país es necesario conocer las propiedades con las que cuentan las aguas. De este modo, las podemos clasificar por sus características físicas, químicas y biológicas. A continuación, se muestran algunas de las características más importantes de las aguas residuales de acuerdo con Pacheco (2011).

2.2.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL AGUA RESIDUAL

Entre las características físicas más destacables se encuentra el contenido total de sólidos, la distribución de partículas por su tamaño, olor, color y temperatura. La cantidad de los sólidos suele ser el parámetro más importante debido a que se puede conocer la naturaleza general del agua residual y se puede dar una aproximación al tratamiento inicial (Ortiz, 2014).

2.2.1.1. SÓLIDOS TOTALES

Son partículas que se encuentran disueltas o suspendidas en el agua constituidas por materia orgánica e inorgánica. Se le puede considerar como sólido total a toda la materia que se encuentra después de una evaporación del agua.



2.2.1.2. SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)

Los sólidos contenidos en esta categoría se encuentran definidos por todos aquellos que son retenidos por un elemento filtrante (generalmente un filtro con tamaño de poro menor o igual a una micra). Pueden ser vistos a simple vista después de haber sido expuestos a la temperatura previamente descrita y sometidos a filtración utilizando un tamaño de poro en el intervalo mencionado anteriormente.

2.2.1.3. SÓLIDOS FILTRADOS (SFT)

Aquellos sólidos que pueden atravesar un filtro con un diámetro de poro no mayor a un micrómetro.

2.2.1.4. SÓLIDOS SEDIMENTABLES (SSS)

Aquellos sólidos que logran sedimentarse en un periodo de 60 minutos en un cono de Imhoff.

2.2.1.5. SÓLIDOS COLOIDALES (SFC)

Las partículas que se encuentran contenidas en esta categoría tienen un diámetro que oscila entre 0.001 micrómetro y 1 micrómetro y no pueden ser eliminadas por sedimentación (permanecen en suspensión).

2.2.1.6. SÓLIDOS DISUELTOS (SFD)

Son todas las moléculas orgánicas que se encuentran permanentemente disueltas en la solución verdadera del agua.

2.2.1.7. OLOR

Esta característica del agua se encuentra dada principalmente por los gases liberados durante la descomposición de la materia orgánica. El agua residual fresca presenta un olor a keroseno



mientras que los sulfuros de hidrógenos hacen que el olor del agua séptica sea más desagradable (Davis *et al.*, 2008). El olor dado a las aguas residuales proviene principalmente por el sulfuro de hidrógeno y otros compuestos malolientes, desechos industriales descargados en el sistema de alcantarillado, manejo de medios sépticos, escoria de tanques primarios, sobrecarga orgánica en procesos de tratamiento, biosólidos en tanques de espesamiento, operaciones de incineración a gas de desperdicios, biosólidos en procesos de incineración y biosólidos en operaciones de compostajes (Metcalf & Eddy 1995).

2.2.1.8. COLOR

Se puede utilizar como una medida cualitativa de la edad del agua residual (Ortiz, 2014). Así, el agua residual que es relativamente reciente presenta un color café grisáceo (el cual equivale a un aproximado de 6 horas desde su descarga), mediante el transporte y el paso del tiempo, el agua residual que viaja a través del sistema de drenaje comienza a tornarse de un color grisáceo oscuro hasta llegar a un color negro (lo anterior debido a estar sujeta a condiciones anaerobias, generalmente durante este proceso hay una formación abundante de sulfuro ferroso), al llegar a este color final se le llama “agua residual séptica” (Crites & Tchobanoglous, 2000).

2.2.1.9. TEMPERATURA

Este parámetro es de suma importancia y se encuentra estrechamente relacionado con los procesos biológicos (aerobios y/o anaerobios) así como en la velocidad de reacción de las reacciones químicas. Generalmente, la temperatura de las aguas residuales es mayor a la temperatura del agua de suministro debido a que en el proceso de su formación las aguas domésticas e industriales añaden agua caliente. Hay actividad bacteriana en un rango de 2°C hasta 50°C. En este intervalo se pueden encontrar bacterias quimioheterotróficas (utilizando materia orgánica como sustrato) en el límite inferior de temperatura, posteriormente las bacterias productoras de metano (en un intervalo que va de los 5°C hasta los 15°C) hasta llegar al límite superior donde los procesos de nitrificación se detienen. Por lo general, la



temperatura óptima para que se lleven a cabo estos procesos de actividad bacteriana se encuentra en un rango de 25°C a 35°C (Crites & Tchobanoglous, 2000).

2.2.2. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL AGUA RESIDUAL

Estas características pueden ser agrupadas en 3 subgrupos: compuestos inorgánicos, compuestos gaseosos y compuestos orgánicos. Dentro de las características químicas inorgánicas más importantes podemos resaltar a los nutrientes (a su vez los de mayor importancia son el nitrógeno, fósforo, nitratos, nitritos y el amoníaco libre) y los gases. Del mismo modo, la concentración de sustancias inorgánicas presentes en el agua se encuentra estrechamente relacionada con el tipo de formación geológica con las que ha estado en contacto desde su obtención hasta su disposición final previa al tratamiento (Crites & Tchobanoglous, 2000).

Dentro de los gases que se encuentran en mayor frecuencia están el nitrógeno (N_2), el oxígeno (O_2), el dióxido de carbono (CO_2), el sulfuro de hidrógeno (H_2S), el amoníaco (NH_3), y el metano (CH_4) (Ortiz, 2014). Gran parte de los sólidos en suspensión, así como de los sólidos filtrables son de naturaleza orgánica. Estos se encuentran formados por compuestos que presentan carbono, hidrógeno y oxígeno (en algunos casos puede presentarse nitrógeno, azufre, fósforo o hierro en menores cantidades). Las proteínas, hidratos de carbono, grasas y aceites son los principales grupos de sustancias orgánicas presentes (Metcalf & Eddy, 1995).

2.2.2.1. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

Se puede definir como la cantidad equivalente de oxígeno (mg/L) necesaria para oxidar los componentes orgánicos del agua mediante el uso de agentes químicos oxidantes (CENTA, 2008). Hay varias razones por las cuales los valores de la DQO se encuentran por encima de los valores de la DBO, entre los principales se encuentran los siguientes:



- Hay algunas sustancias que son difíciles de oxidar por procesos biológicos mientras que por procesos químicos estas se oxidan más fácilmente.
- Pueden existir sustancias orgánicas tóxicas para los organismos utilizados en la prueba de DBO.
- La presencia de sustancias inorgánicas como sulfuros, sulfitos, yoduros, entre otros pueden resultar en valores más elevados en la DQO.

La relación entre la DBO_5/DQO puede indicar la biodegradabilidad de las aguas residuales urbanas. Siendo así que valores menores a 0.04 indican que la capacidad de biodegradabilidad del agua es alta, valores entre 0.04 y 0.2 indican una capacidad mediana y valores mayores a 0.2 indican aguas poco biodegradables.

2.2.2.2. PH

Este parámetro indica la concentración presente de iones de hidrógeno (H^+) que indica la acidez del agua. La importancia de este parámetro recae en el hecho de que está estrechamente relacionado con ciertos procesos biológicos que sólo se pueden llevar a cabo en un intervalo de acidez. La escala de pH oscila entre valores que van desde 0 hasta 14 siendo 7 el valor neutro. Para la existencia de vida se consideran valores entre 5-9 como adecuados, cualquier valor de este parámetro que se encuentre fuera de este intervalo resultará en la imposibilidad de llevar a cabo tratamientos biológicos (Ortiz, 2014).

2.2.2.3. ALCALINIDAD

La presencia de hidróxido, carbonatos y bicarbonatos (de calcio magnesio, sodio, potasio o amoníaco) de acuerdo con Pacheco (2011). Este parámetro indica la capacidad del agua de neutralizar ácidos, el agua residual normalmente es alcalina y esta propiedad ayuda a regular los cambios en el pH. Del mismo modo, este parámetro resulta ser de los más importantes cuando se desea emplear un tratamiento químico, cuando se desean eliminar nutrientes por medio de métodos biológicos y al eliminar amoníaco mediante arrastre por aire.



2.2.2.4. NUTRIENTES

Al emplearse un sistema de tratamiento biológico de agua residual es importante considerar los nutrientes que puedan estar presentes en el caudal. Las microalgas pueden asimilar una cantidad considerable de nutrientes debido al hecho de que grandes cantidades de nitrógeno y fósforo son requeridas para la formación de proteínas (equivalente al 50% en promedio del peso seco de las microalgas) ácidos nucleicos y síntesis de fosfolípidos. La absorción de estos nutrientes puede ser regulada y optimizada cambiando el pH a uno asociado a una mayor tasa fotosintética (Muñoz & Guieysse, 2006).

2.2.2.5. NITRÓGENO

Este es uno de los elementos que resulta vital para el crecimiento de organismos como protistas y plantas, por esto recibe el nombre de “bioestimulador”. Al utilizar un tratamiento biológico este elemento resulta necesario para la formación de proteínas. El total de este elemento se encuentra dado por la suma de nitrógeno orgánico (como parte de proteínas), amoníaco, nitritos y nitratos (Metcalf & Eddy, 1995). Existe una relación entre el pH del agua y la forma del nitrógeno predominante. Así, en aguas con un valor de pH superior a 3 predomina nitrógeno amoniacal mientras que en valores inferiores a 9.3 predomina el amonio. Una concentración alta de nitrógeno amoniacal puede resultar tóxica para varios organismos acuáticos mientras que el consumo de nitrato puede causar metahemoglobinemia en niños (Ortiz, 2011). Debido a que los nitratos son una fuente de oxígeno en ambientes anóxicos o con una concentración muy baja de oxígeno, el exceso de nitrógeno puede ser removido de un sistema utilizando bacterias aerobias o facultativas convirtiendo a los nitratos en gas nitrógeno que se introduce a la atmósfera (Russell, 2007).

2.2.2.6. FÓSFORO

Es un elemento que permite el crecimiento y la proliferación de microalgas y llega a ser un elemento limitante en su crecimiento, puede generar un cambio en el olor y la coloración del



agua y, justamente, el hecho de que permita el desarrollo de microalgas puede llegar a ser un problema cuando estas mueren y generan una contaminación de carácter orgánico (Ortiz, 2014). Parte de la presencia de este elemento en las aguas residuales viene de detergentes sintéticos los cuales presentan polifosfatos en su composición, sin embargo, el mayor aporte ocurre debido a las actividades de cría y engorde de ganado, así como el uso excesivo de fertilizantes y pesticidas en actividades agrícolas (Menéndez Gutiérrez & Pérez Olmo, 2007).

2.2.2.7. AZUFRE

El azufre es un elemento que se encuentra tanto en cuerpos de agua natural y cuerpos de agua residual, es necesario para los organismos debido a que este elemento es indispensable para la síntesis y degradación de proteínas, del mismo modo, existen bacterias que reducen los sulfatos a sulfuros en condiciones anaeróbicas (Metcalf & Eddy, 1995).

2.2.3. CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS DEL AGUA

Conocer las características biológicas del agua brinda un panorama general del estado de estas. Existen organismos indicadores que sólo pueden sobrevivir en un intervalo pequeño bajo condiciones específicas. De acuerdo con lo anterior se puede conocer el estado del sistema acuático e implementar un tratamiento tomando en cuenta más características específicas. Hablando sobre los microorganismos que se encuentran dentro de un cuerpo de agua, estos juegan un papel importante en la cadena alimenticia y sólo existen pocas especies que representan un riesgo para la salud humana u ocasionan daños al medio. La presencia o ausencia de organismos patógenos es de suma importancia para determinar la calidad en la que se encuentra el cuerpo de agua y es información que permite evaluar, monitorear y seleccionar procesos de tratamiento de aguas residuales (OMS, 2006).

2.2.3.1. DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO (DBO)

Se define como la cantidad necesaria de oxígeno (mg/L) para poder oxidar los componentes de las aguas residuales de manera biológica en el transcurso de 5 días, el oxígeno consumido



siempre es proporcional a la cantidad de materia orgánica presente en el agua (Pacheco, 2011). Depende directamente de la temperatura, el oxígeno presente y la velocidad a la que este se consume; durante este proceso se pueden diferenciar 3 actividades principales: oxidación, síntesis y respiración endógena (Crites & Tchobanoglous, 2000). Así, cuando los niveles de DBO son altos, los niveles de oxígeno presente serán bajos debido al consumo de este por medio de las bacterias. De acuerdo con Metcalf & Eddy (1995), los resultados de la DBO pueden ser empleados para determinar la cantidad aproximada de oxígeno requerida para estabilizar biológicamente la materia orgánica presente, establecer las dimensiones de las instalaciones de la planta de tratamiento y medir la eficiencia de algunos procesos de tratamiento. Aunque la información de esta prueba permite hacer inferencias sobre distintas características (como las mencionadas anteriormente), es preciso hacer notar que presenta algunas deficiencias que se enlistan a continuación:

- No existe validez estequiométrica asignable con esta prueba.
- El periodo de 5 días es un tiempo de muestra arbitrario que tiene que ver con el origen de la prueba (hecha en Inglaterra donde el tiempo máximo de transporte de los ríos es de 4.8 días). En teoría, el proceso podría seguir de manera indefinida.
- La nitrificación influye en el proceso de la prueba.
- Los resultados no siempre se pueden reproducir de manera viable. Analíticamente hablando, este parámetro es pobre ya que agrupa información en conjunto y no brinda datos de cada una de las variables que lo constituyen.

Aun con estas limitaciones, la prueba es aceptable como parámetro de regulación debido al hecho de que indica el potencial de consumo de oxígeno que las aguas puedan requerir y el grado de tratamiento al que ha sido sometido un cuerpo de agua (Crites & Tchobanoglous, 2000).



2.2.3.2. AGENTES PATÓGENOS

Existen diversos organismos capaces de ocasionar infecciones o ser portadores de enfermedades para los seres humanos. Los principales tipos de organismos que se encuentran contenidos en esta categoría son bacterias, virus, huevos de helminto (que después serán helmintos parásitos) y protistas (Ortiz, 2014). Algunos organismos que son de interés en cuanto al impacto al ser humano e indicadores del nivel de contaminación que se presenta en un cuerpo de agua residual son las coliformes fecales y los helmintos (específicamente los huevos que son la fase infectiva para el ser humano).

2.2.3.3. ORGANISMOS INDICADORES

De acuerdo con Apella & Araujo (2019), estos organismos permiten identificar, estimar y monitorear tanto la presencia de patógenos como condiciones específicas del cuerpo de agua residual.

Un ejemplo de estos organismos son los coliformes fecales. Un grupo de bacterias que se encuentran en el intestino de animales de sangre caliente (incluyendo al humano) (Cázares, 2014). Los organismos indicadores deben de cumplir con las siguientes características:

- Su presencia debe de ser positiva cuando hay contaminación fecal.
- Su presencia debe de ser mayor que el número de patógenos objetivos.
- Su potencial de supervivencia debe de ser mayor o igual al patógeno objetivo. bajo las condiciones ambientales basales y durante el proceso de tratamiento.
- El aislamiento y la cuantificación de estos organismos debe de ser más rápido que el aislamiento y cuantificación del propio patógeno.

Algunos de los organismos indicadores de contaminación humana se muestran a continuación (Tabla 1).



Tabla 1. Organismos indicadores de contaminación humana

Organismo indicador	Características
Coliformes totales	Bacterias que pueden fermentar lactosa con generación de gases a 35°C. Este grupo incluye a cuatro géneros: <i>Escherichia</i> , <i>Klebisella</i> , <i>Citrobacter</i> y <i>Enterobacter</i>
Coliformes fecales	Es un subgrupo de las coliformes totales y dentro de sus características están la generación de gases y/o colonias a una temperatura elevada (44.5 °C durante 24 h)
<i>Klebisella</i>	Este género está contenido dentro de las coliformes fecales, este grupo se cultiva a 35 °C durante 24 h
<i>Escherichia coli</i>	Parte de la población bacteriana, es el género más representativo de las fuentes de contaminación fecal
Estreptococos fecales	Es un grupo artificial emparejado con los coliformes fecales con el objetivo de detectar las fuentes de contaminación fecal reciente.
Enterococos	Dos familias son las más representativas dentro del grupo de estreptococos más específicos de la contaminación humana (<i>S. faecalis</i> y <i>S. faecium</i>). Estas familias se pueden aislar y cuantificar mediante la eliminación de las demás por métodos analíticos
<i>Clostridium perfringens</i>	Bacteria anaerobia formadora de esporas, es un buen indicador cuando existe la sospecha de que se presente una contaminación pasada al momento de realizar la desinfección de un cuerpo de agua.
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> y <i>Aeromonas hydrophila</i>	Debido al hecho de que estos organismos se encuentran comúnmente en grandes cantidades en cuerpos de agua residual cuando hay ausencia de contaminantes fecales inmediatos, permiten conocer si hubo contaminación reciente.

Fuente: (Metcalf & Eddy, 1995).



2.3. PROCESOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Una vez que el ser humano ha utilizado agua y la ha dispuesto en el sistema de alcantarillado, surge la necesidad de llevar a cabo diversos tratamientos (físicos químicos y/o biológicos) para poder eliminar la presencia de los contaminantes que se encuentren y poderla reutilizar para algún otro fin (Pacheco, 2011). De acuerdo con CENTA (2008), dentro de los problemas que se pueden presentar en los cuerpos de agua receptores de estos contaminantes se encuentran la aparición de fangos y flotantes, agotamiento del oxígeno presente en las lagunas y aportes excesivos de nutrientes. Los fangos y flotantes (que vienen de la fracción no sedimentada de los sólidos presentes formando una capa) llegan a provocar el agotamiento del oxígeno disuelto, desprendimiento de malos olores y un impacto visual considerable.

En cuanto a las consecuencias generadas por el agotamiento del oxígeno presente en lagunas están los compuestos fácilmente oxidables, los cuales comienzan a ser degradados por vía aerobia por las bacterias presentes que pueden llegar a bajar los niveles de oxígeno hasta valores excesivos donde el desarrollo de la vida acuática se verá comprometido, del mismo modo, habrá liberación de gases causantes de malos olores (Noyola & Morgan, 2013).

Finalmente, el aporte excesivo de nutrientes (principalmente nitrógeno y fósforo) puede llegar a causar un crecimiento desmedido en las microalgas y plantas acuáticas impidiendo que estas aguas sean posteriormente empleadas en la industria o para fines domésticos. Del mismo modo, existen varios factores a considerar para que un tratamiento de agua residual funcione correctamente. Algunos de estos factores recaen en las condiciones ambientales, la temperatura es crucial cuando se emplea una línea de tratamiento biológico. La disponibilidad de espacio también se debe de considerar; por regla general, un sistema de tratamiento con bajos requerimientos (tanto de operación como de mantenimiento) requerirá una mayor área en comparación con uno que demande mayores recursos de operación y mantenimiento. Entre otros factores están el requerimiento de personal, disponibilidad de recursos, la participación y educación de los asentamientos urbanos circundantes, aplicabilidad de los procesos, consideración de la formación de residuos, aceptación por parte de la comunidad,



generación de subproductos con interés económico, vida útil del proyecto y la inversión total (Noyola & Morgan 2013).

2.3.1. PROCESOS FÍSICOS

De acuerdo con Metcalf & Eddy (1995), aquí se agrupan los procesos que operan, por medio de fuerzas mecánicas. En los sistemas de tratamiento de aguas residuales. Las operaciones físicas unitarias más comunes se muestran a continuación (Tabla 2)

Tabla 2. Procesos físicos aplicados al tratamiento de aguas residuales

Operación	Aplicación
Medición del caudal	Medida para llevar un seguimiento en el control de los procesos e informes de descargas
Desbaste	Elimina sólidos gruesos sedimentables por medio de su retención en la parte superficial
Dilaceración	Los sólidos gruesos son triturados hasta llevarlos a un tamaño uniforme
Homogeneización del caudal	Hay una estabilización en el flujo del caudal, así como de la DBO y los sólidos en suspensión
Mezclado	Se mezclan productos químicos y gases con el agua residual
Floculación	Este método incrementa el tamaño de las partículas presentes mediante la adición de más partículas para favorecer su sedimentación por gravedad
Sedimentación	Se eliminan los sólidos por acción de la gravedad
Flotación	Aquí se presenta la eliminación de sólidos finos que se encuentran en suspensión y cuya densidad es cercana a la del agua
Filtración	Se eliminan los sólidos suspendidos remanentes después del tratamiento químico y/o biológico
Microtamizado	Cumpliendo con la misma función de la filtración, este método permite la eliminación de microalgas de los efluentes
Transferencia de gases	Adición y eliminación de gases
Volatilización y arrastre de gases	Se emiten compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles presentes en las aguas residuales

Fuente: (Metcalf & Eddy, 1995).



2.3.2. PROCESOS QUÍMICOS UNITARIOS

Básicamente, en este tipo de procesos unitarios se logra el mejoramiento de la calidad del agua mediante la adición de reactivos químicos y su consecuente reacción con aquellos presentes en el agua residual (Ortiz, 2014). Las operaciones químicas unitarias más frecuentes se encuentran a continuación (Tabla 3)

Tabla 3. Procesos químicos aplicados al tratamiento de aguas residuales

Operación	Aplicación
Precipitación química	Se elimina el fósforo y además se favorece la disminución de sólidos suspendidos
Adsorción	Se disminuye la materia orgánica que sigue presente al aplicar métodos convencionales. Éste método también se emplea para declorar el agua antes de su vertido final
Desinfección	Añadiendo diferentes reactivos, se inactivan selectivamente organismos patógenos
Desinfección con cloro	Es el tipo de desinfección más utilizado para la eliminación de organismos patógenos
Decloración	Es un proceso necesario después de haber aplicado cloro en la desinfección (realizado de distintas maneras)
Desinfección con dióxido de cloro	Este proceso es, particularmente, utilizado en la eliminación e inhibición de virus
Desinfección con cloruro de bromo	Es utilizado del mismo modo que el cloro y se cree que su efectividad recae en el hecho de que inhibe la actividad enzimática en bacterias
Desinfección con ozono	Comúnmente se utiliza para el control de olores y para la eliminación de materia orgánica soluble refractaria (sustituyendo al carbón activado)
Desinfección con luz ultravioleta	Produce directamente la inactivación de organismos patógenos o inhibe su reproducción. Se suelen utilizar lámparas de arco de mercurio.

Adaptado de (Metcalf & Eddy, 1995).



2.3.3. PROCESOS BIOLÓGICOS UNITARIOS

Generalmente, los tratamientos biológicos se basan en el uso de microorganismos que son capaces de asimilar las sustancias que se encuentran en suspensión dentro de un cuerpo de agua. Esta asimilación de compuestos hace que los mismos no estén disponibles para incorporarse al metabolismo de otros organismos patógenos y no patógenos presentes. Logrando las condiciones óptimas para que los organismos que van a ser utilizados puedan proliferar, se puede llegar a producir una biomasa que sea capaz de acelerar los procesos naturales de degradación.

2.3.4. PROCESOS BIOLÓGICOS AEROBIOS CON CULTIVO EN SUSPENSIÓN- LODOS ACTIVADOS

La materia orgánica que se encuentra presente en el cuerpo de agua es descompuesta por microbios aerobios por medio de su oxidación a productos finales como CO_2 y H_2O . Se airea el agua residual de 6 a 10 horas mientras los organismos se multiplican mientras asimilan parte de la materia orgánica. La biomasa se separa del agua residual aireada en el tanque de sedimentación secundario (y una parte es reciclada en el tanque de aireación) (Hernández, 2016). Los microbios ayudan a formar conglomerados que se sedimentan por gravedad en el tanque de sedimentación.

2.3.4.1. PROCESOS BIOLÓGICOS AEROBIOS CON CULTIVO FIJO

En este tipo de proceso, se pueden conseguir concentraciones aceptables de microorganismos sin que haya recirculación mediante el crecimiento de una biopelícula sobre un medio sólido (Ortiz, 2014).



2.3.4.2. FILTROS PERCOLADORES

Contienen un lecho empacado que descansa sobre un dren bajo el cual hay canales por los que pasa el agua para ser colectada, el agua residual es distribuida por medio de brazos giratorios hasta ser escurrida en la película biológica (EPA, 1999).

2.3.4.3. CONTADORES BIOLÓGICOS ROTATORIOS (CBR-BIODISCOS)

Están compuestos de varios discos soportados por un eje rotatorio parcialmente sumergidos dentro de un cuerpo de agua residual, la superficie de los discos se encuentra en constante rotación y en contacto intermitente con el aire y el agua residual creando una capa aeróbica de microorganismos que se engrosa continuamente y oxida a los contaminantes del agua residual (Torres-Lozada *et al.*, 2011).

2.3.4.4. PROCESADORES DE BIOMASA FIJA SOBRE LECHO MÓVIL

Se tiene una determinada concentración de biomasa sobre soportes de plástico que se encuentran en agitación constante y en movimiento dentro del reactor biológico, la biopelícula formada en estas paredes tiende a ser más efectiva que los flóculos biológicos, la biomasa es separada después en un decantador (Zalakain & Manterola, 2011).

2.3.4.5. PROCESOS BIOLÓGICOS ANAEROBIOS

Estos procesos son generalmente utilizados cuando la carga orgánica es muy grande y, aunque el tiempo de retención es muy alto y obliga a que el proceso sea relativamente lento, presentan la ventaja de que el costo se ve ampliamente reducido al compararlo con el oxígeno que se le debería de suministrar si se utilizara un tratamiento aerobio además de que se caracterizan por la producción de biogás (Vivanco *et al.* 2016).



2.4. NIVELES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Los tipos y niveles de tratamientos de agua residual aquí presentados surgen de la combinación seriada de los procesos unitarios descritos previamente. Históricamente se les conoce a las operaciones físicas unitarias como los niveles de pretratamiento o tratamiento primario mientras que a los procesos químicos unitarios se les conoce como niveles de tratamiento secundario (algunos autores consideran aquí también a los procesos biológicos unitarios) y a la combinación de todos los procesos (químicos, físicos y biológicos) se les conoce como tratamientos terciarios y/o avanzados (Metcalf & Eddy, 1995). De acuerdo con Hernández (2016), los métodos de tratamiento de agua residual se pueden clasificar de acuerdo con el tipo de medio que actúe sobre el agua (ya sea física, química o biológico) (Tabla 4).

2.4.1. PRETRATAMIENTO

Se aplica una serie de operaciones físicas y mecánicas que buscan eliminar del cuerpo de agua residual objetos sólidos de un tamaño considerable (CENTA, 2008). Dentro de las principales operaciones que se pueden destacar en esta etapa se encuentran el desbaste y la dilaceración para la eliminación de sólidos gruesos, la flotación para la eliminación de grasas y aceites y el desarenado para la eliminación de materia gruesa en suspensión (Metcalf & Eddy, 1995).

2.4.2. TRATAMIENTO PRIMARIO

De acuerdo con CENTA (2008), se define como el tratamiento que mediante procesos físicos tiene como objetivo la sedimentación de sólidos en suspensión, así como procesos en los que la DBO se vea reducida por lo menos 20% antes del vertido y los sólidos totales se vean eliminados en, al menos, 50%. Algunos de los procesos aplicados durante este nivel de tratamiento son la sedimentación, floculación y flotación donde son eliminados sólidos en suspensión, sólidos insolubles, arenas, materia orgánica, espuma y grasas. Actualmente hay una variable más tecnificada conocida como "Tratamiento Primario Avanzado" (TPA) donde se incluye un tratamiento físico-químico que logra precipitar una mayor cantidad de



contaminantes atrapándolos en flóculos que se pueden remover más fácilmente removiendo simultáneamente sólidos suspendidos totales, fósforo y causando un decremento en la DBO (REMTAVARES, 2006).

2.4.3. TRATAMIENTO SECUNDARIO

Principalmente, busca la eliminación de componentes orgánicos biodegradables, así como el decremento de los sólidos suspendidos remanentes (de menor tamaño) de niveles de tratamiento previo. Usualmente se incluye a la desinfección. Estos tratamientos suelen ir acompañados por el empleo de microorganismos que para lograr una reducción de materia orgánica soluble y coloidal (Metcalf & Eddy, 1995). Este tratamiento se puede llevar a cabo también mediante el empleo de operaciones fisicoquímicas, aunque los procesos biológicos presentan una gran ventaja económica debido a la inversión inicial requerida para su funcionamiento. La gran ventaja existente en los microorganismos empleados recae en el hecho de que las bacterias emplean como sustrato los nutrientes que se encuentran presentes en el agua residual y las incorporan a su metabolismo y/o estructura celular. Existe una gran variedad de compuestos orgánicos utilizados para generar un cultivo mezclado que es más eficiente contra distintos contaminantes y nutrientes presentes (Pacheco, 2011).

2.4.4. TRATAMIENTO TERCIARIO

De acuerdo con (Pacheco, 2011), el tratamiento pretende aumentar la calidad del agua tratada mediante el uso de nitrificación, desnitrificación y eliminación del fósforo con lo cual se logra la reducción de los nutrientes limitantes principales (nitrógeno y fósforo). En concreto, los tratamientos terciarios que involucran microalgas se consideran sistemas muy versátiles con una gran capacidad para ajustarse a distintos entornos y ser escalables a distintos niveles. Así, existen sistemas de tratamiento aplicables a distintas escalas, abiertos o cerrados, anaerobios o aerobios y de diferente complejidad (Hernández-Pérez & Labbé, 2014). De acuerdo a Maynard *et al.* (1999), la principal función de estos tratamientos es la reducción de patógenos que aún estén en el agua residual, remoción de nutrientes, contaminantes orgánicos y distintos



metales pesados al incorporarlos a su organismo, producir biomasa y productos de distinto interés económico como biogás y metabolitos algales. Tienen la capacidad de incorporar O_2 utilizando el CO_2 producido por la respiración microbiana (Muñoz & Guieysse, 2006).

2.4.5. TRATAMIENTO AVANZADO

Se considera que la meta final de estos tratamientos es la de recuperar el agua residual tratada y reutilizarla para un fin específico, con métodos bastante complejos comparados con los usados anteriormente. Se suelen aplicar tratamientos como adsorción con carbón activado, intercambio iónico, procesos de oxidación activados, y distintos tipos de membrana de acuerdo con el objetivo final Rodríguez (Fernández-Alba *et al.*, 2006).

Una descripción general se encuentra a continuación (Tabla 4).

Tabla 4. Niveles de tratamiento de aguas residuales

Nivel de tratamiento	Descripción
Preliminar	Hay una remoción de objetos grandes utilizando cribado con rejillas y tamices, desarenadores y separadores de grasas y aceites.
Primario	Se hace una remoción de los sólidos suspendidos principalmente por medio de sedimentación de la materia presente (orgánica e inorgánica)
Primario avanzado	Hay una remoción intensiva de los sólidos que aún pudiesen encontrarse suspendidos mediante la adición de coagulantes (proceso físico-químico)
Secundario	Se remueven compuestos orgánicos biodegradables y sólidos suspendidos utilizando, generalmente, procesos biológicos (se considera a la desinfección dentro del proceso secundario)
Terciario	Se emplea para eliminar sustancias que no han sido previamente removidas. Dentro de los tratamientos frecuentemente utilizados se encuentra la remoción de nutrientes como nitrógeno y fósforo mediante un tratamiento de ozono, oxido-reducción biológica y precipitación química.

Fuente: (Pacheco, 2011)



2.5. RIESGOS AL PÚBLICO POR EL CONTACTO DE AGUA RESIDUAL NO TRATADA

Enfocándonos en una perspectiva humana, hay muchas enfermedades que se pueden adquirir debido al contacto con agua residual (Tabla 5). De acuerdo con Hernández & Martínez (1996) de las principales enfermedades gastrointestinales podemos enlistar las siguientes.

- Cólera: Causada por la bacteria *Vibrio cholerae* causando una gran pérdida de líquidos debido a una toxina que se une a las células del intestino delgado.
- Fiebre tifoidea: Causada por la bacteria *Salmonella typhi*, estos microorganismos llegan a la sangre mediante el tubo digestivo ocasionando úlceras intestinales.
- Disentería: Provocada por *Shigella dysenteriae*, este microorganismo llega al intestino delgado y pueden causar úlceras y provocar la secreción de agua y electrolitos en el área yeyunal.
- Cisticercosis: Causada por el céstodo *Taenia solium*, este microorganismo tiene que ser ingerido en etapas larvianas. Una vez ingeridos las larvas se adhieren a los músculos formando quistes.

Además de estos efectos podemos tomar en cuenta los que se producen al verter agua residual sin un tratamiento previo en un cauce natural. Hay un depósito de residuos sólidos en el área, acumulación de sedimentos, contaminación por compuestos tóxicos, mayor eutrofización, consumo de oxígeno disuelto y malos olores Hernández & Martínez (1996). Y en general, podemos señalar diferentes agentes infecciosos potenciales presentes en el agua residual doméstica que pueden causar distintas enfermedades.

De acuerdo con Ortiz (2014) los tratamientos biológicos presentan un mayor rendimiento con una menor inversión tanto en la operación y en el mantenimiento. En relación con los



tratamientos químicos, el costo de inversión puede llegar a ser de 5 a 20 veces menores mientras que los costos de operación pueden llegar a ser de 3 a 10 veces menores.

Tabla 5. Agentes infecciosos potenciales en las aguas residuales

ORGANISMO	ENFERMEDAD
Bacterias	
<i>Campylobacter jejuni</i>	Gastroenteritis
<i>Escherichia coli</i>	Gastroenteritis
<i>Legionella pneumophila</i>	Legionelosis (malestar, fiebre dolor de cabeza y enfermedades respiratorias agudas)
<i>Leptospira</i> (150 sp)	Leptospirosis (ictericia, fiebre)
<i>Salmonella typhi</i>	Fiebre tifoidea (fiebre alta, diarrea y úlceras en el intestino delgado)
<i>Salmonella</i> (~2100 sp)	Salmonelosis
<i>Shigella</i> (4 sp)	Disentería bacilar
<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera (diarrea aguda, deshidratación)
<i>Yersinia enterocolitica</i>	Yersinosis
Protistas	
<i>Balantidium coli</i>	Balantidiasis (diarrea y disentería)
<i>Cryptosporidium parvum</i>	Criptosporidiasis
<i>Cyclospora</i>	Ciclosporiasis (diarrea severa, dolor de estómago, náuseas y vómitos prolongados)
<i>Entamoeba histolytica</i>	Amebiasis (Diarrea prolongada con sangrados, abscesos en el hígado y en el intestino delgado)
<i>Giardia lamblia</i>	Giardiasis (diarrea, náuseas e indigestión)
Helmintos	
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Ascariasis (infestación de parásitos intestinales)
<i>Enterobius vermicularis</i>	Enterobiasis
<i>Fasciola hepática</i>	Fascioliasis
<i>Hymenolepis nana</i>	Hymenolepiosis
<i>Taenia solium</i>	Teniasis
<i>Trichiuris trichiura</i>	Trichuriasis (presencia de parásitos intestinales alargados)
Virus	
Adenovirus (31 clases)	Enfermedades respiratorias
Enterovirus (72 clases)	Gastroenteritis, anomalías cardíacas y meningitis
VHA	Hepatitis infecciosa
Agente Norwalk	Gastroenteritis
Parvovirus (3 clases)	Gastroenteritis
Rotavirus	Gastroenteritis

Fuente: (Ortiz, 2014).



2.6. INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AGUA DE ACUERDO CON LA NOM-003-SEMARNAT-1997

2.6.1. SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)

Este parámetro busca evaluar la cantidad de materia sólida en suspensión o en disolución, su constitución es variable entre sólidos sedimentables, materia orgánica en suspensión y/o coloidal. Generalmente se pueden percibir a simple vista y su separación y cuantificación puede llegar a ser lograda por medio de medios físicos (generalmente haciéndolos filtrar a través de una membrana con un tamaño de poro de 1 micra) Metcalf & Eddy (1995).

2.6.2. DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO (DBO)

La cantidad necesaria de oxígeno (mg/L) necesaria para oxidar los componentes de las aguas residuales de manera bioquímica bajo condiciones específicas, el oxígeno consumido siempre es proporcional a la cantidad de materia orgánica presente en el agua Pacheco (2011). Depende directamente de la temperatura, el oxígeno presente y la velocidad a la que este se consume; durante este proceso se pueden diferenciar 3 actividades principales: oxidación, síntesis y respiración endógena (Crites & Tchobanoglous, 2000). Así, cuando los niveles de DBO son altos, los niveles de oxígeno presente serán bajos debido al consumo de este por medio de las bacterias y protozoos principalmente. A continuación se muestra la clasificación de la calidad del agua de acuerdo con la DBO (Tabla 6).



Tabla 6. Clasificación de la calidad del agua de acuerdo con la DBO

DBO	CRITERIO	DESCRIPCIÓN
Menor o igual a 3 mg/L	Excelente	No hay contaminación presente
Mayor a 3 mg/L y menor o igual a 6 mg/L	Buena Calidad	El contenido de materia orgánica degradable biológicamente es bajo
Mayor a 6 mg/L y menor o igual a 30 mg/L	Aceptable	Se presenta un indicio de contaminación. Estas aguas superficiales presentan capacidad de autodepuración o descarga de aguas residuales tratadas biológicamente
Mayor a 30 mg/L y menor o igual a 120 mg/L	Contaminada	Aguas superficiales contaminadas con presencia de descargas de aguas residuales principalmente de origen municipal
Mayor a 120 mg/L	Fuertemente contaminada	Estas aguas presentan un grado alto de contaminación y descarga de aguas residuales crudas de origen municipal y/o industrial

Fuente: (Sánchez *et al.*, 2015)



2.6.3. GRASAS Y ACEITES

Dentro de estos contaminantes se encuentran los compuestos constituidos por ácidos grasos de origen animal y vegetal, de hidrocarburos y, en general, son sustancias que presentan características hidrófobas y lipófilas. Debido a su constitución mencionada anteriormente, esto las hace insolubles en agua y en disolventes orgánicos. Los compuestos que se encuentran dentro de esta clasificación y que, a su vez, son de origen animal suelen componerse de ácidos grasos saturados y ser sólidos a una temperatura ambiente mientras que aquellos compuestos dentro de esta clasificación y de origen vegetal suelen ser líquidos a temperatura ambiente y presentar ácidos grasos insaturados, para la extracción de estos compuestos (tanto de origen vegetal como animal) se suele utilizar el hexano como disolvente para realizar su extracción Metcalf & Eddy (1995).

2.6.4. HUEVOS DE HELMINTO

Los parásitos se encuentran entre los indicadores microbiológicos de la calidad del agua. El grupo de los helmintos es un grupo artificial (no filogenéticamente relacionado necesariamente) el cual engloba a organismos eucariotas multicelulares de vida libre o parásitos con un sistema digestivo, reproductor, circulatorio, excretor y nervioso generalmente. Los organismos que son parásitos pueden llegar a infectar a especies tanto animales como vegetales y los ciclos de vida que presentan pueden llegar a ser sencillos como lo es el caso de *Enterobius vermicularis* en el que su etapa de vida libre es en estado de huevo, mientras que el adulto se encuentra en el intestino del hospedero; o pueden llegar a ser más complejos como lo es en el caso de *Strongyloides stercoralis*, donde se presentan varios estadios (huevos, larvas rabaditiformes, larvas filariformes y adultos machos o hembras) y migraciones dentro del huésped (Campos *et al.*, 2018). La importancia de este grupo radica en la capacidad de causar un riesgo elevado a la salud, lo anterior por su alta persistencia en el ambiente, el periodo de latencia extendido, su resistencia ante tratamientos convencionales y su estrategia reproductiva en la que la cantidad de huevos depositados por día puede llegar a ser considerablemente alta (Campos *et al.*, 2018).



El grupo se conforma, a su vez, de dos subgrupos: Los platyhelminintos y los nemátodos (gusanos planos y cilíndricos, respectivamente). De acuerdo con Bernabeu *et al.* (2002) los helmintos parásitos presentan diferencias a aquellos helmintos que son de vida libre:

- Obtienen sus nutrientes absorbiéndolos de su hospedero, ya sea de nutrientes que obtuvo previamente, fluidos o tejidos celulares aledaños.
- Su sistema nervioso se ve notablemente reducido.
- En aquellos parásitos que tienen una etapa infectiva en la que el hospedero los fagocita o se multiplican dentro del mismo, el sistema locomotor presente se ve ampliamente reducido.
- Hay una gran producción de huevos en los individuos adultos para lograr la infección de un nuevo huésped o mecanismos de resistencia (como la formación de quistes) para asegurar su descendencia. Algunas de las características de los grupos de helmintos se muestran a continuación (Tablas 7 y 8).

Tabla 7. Características de Platyhelminintos y Nematelmintos en etapa adulta

Phylum	Clase	Características principales	Ejemplos
Platyhelminintos	Tremátodos	No presentan segmentos	<i>Schistosoma intercalatum</i> y <i>Fasciola hepática</i>
	Céstodos	Tienen cuerpo segmentado y plano	<i>Taenia solium</i> y <i>Dyphylloporium latum</i>
Nematelmintos		Cuerpos cilíndricos sin segmentos con extremos puntiagudos	<i>Ascaris lumbricoides</i> y <i>Enterobius vermicularis</i>

Fuente: (Ingraham & Ingraham, 2015).



Tabla 8. Características de algunos de los huevos de Platyhelmintos y Nematelmintos

Phylum	Clase	Ejemplo	Características del huevo
Platyhelmintos	Tremátodos	<i>Fasciola hepatica</i>	Ovoides, amarillentos y operculados de 130-150 micras por 60-90 micras
	Céstodos	<i>Hymenolepis nana</i>	Esféricos (de 30 a 50 micras de diámetro) con un embrión hexacanto. Tienen doble envoltura donde hay filamentos extendidos desde abultamientos polares de la membrana interna
		<i>Taenia saginata</i>	Esféricos con vitelo a su alrededor (de 30 a 40 micras de diámetro) con una envoltura radiada con un embrión hexacanto
Nematelmintos		<i>Trichiuris trichiura</i>	Tienen forma de limón y no están del todo embrionados. Presentan doble membrana y abultamientos en cada polo (de 20 por 50 micras de diámetro)
		<i>Ascaris lumbricoides</i>	Son ovoides (de 40 a 80 micras por 35 a 50 micras de diámetro) con membranas gruesas y transparentes. No se encuentran completamente embrionados.

Fuente: Ingraham & Ingraham (2015).

2.6.5. COLIFORMES FECALES

Son un grupo de bacterias indicadoras del nivel de contaminación de un cuerpo de agua debido al hecho de que, comúnmente, se encuentran alojadas en el intestino de los seres humanos y de animales de sangre caliente, haciéndolos indicadores de contaminación fecal. Su tiempo de



permanencia en el agua es mayor al de las bacterias patógenas y se comportan de manera similar a las mismas (Bonilla, 2011).

Una de las características distintivas del grupo de las coliformes es la capacidad que tienen para fermentar la lactosa a 35°C (por lo general las totales), existen especies que se pueden encontrar con un estilo de vida libre como saprófitas independientes excepto el género *Echerichia* cuyo origen es exclusivamente intestinal, aquellas bacterias coliformes que sólo puedan existir de manera intestinal se les denomina como coliformes fecales y, del mismo modo, también son capaces de fermentar la lactosa a una temperatura de 44.5°C (Apella & Araujo, 2019).

El subgrupo de las coliformes fecales también se caracteriza por presentar miembros que son bacilos aerobios y anaerobios facultativos, gram negativos, con oxidasa negativa capaces de producir aldehídos a partir de la fermentación de la lactosa, ácido y gas en 24 horas a 45.5°C (Cázares, 2014).

Algunas de las ventajas que presentan como indicadores de la contaminación del agua son las siguientes:

- Si se encuentran presentes son indicadores exclusivos de contaminantes fecales, del mismo modo, si están ausentes, se asume que no existe contaminación fecal.
- El 95% da una respuesta positiva a la prueba de la temperatura.
- Su tiempo de supervivencia es mayor a las coliformes totales (por la termotolerancia que presenta el grupo). Así, también se puede saber si la contaminación es reciente si es que se encuentran en altas concentraciones.
- Su reproducción se encuentra casi restringida al tracto intestinal de los animales portadores, debido a esto, se puede inferir que una vez fuera del tracto intestinal no se multiplicarán con facilidad alterando el tiempo estimado de la contaminación.



- Para la cuantificación de las coliformes fecales, los procedimientos llevados a cabo en el laboratorio, aunque se puede llegar a dar el caso de que algunas bacterias den un falso negativo a la prueba de temperatura (Apella & Araujo, 2019).

2.7. ANTECEDENTES EN EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL CON MICROALGAS

De acuerdo con Hernandez Criado *et al.* (2018), aunque las investigaciones relacionadas con el campo de las microalgas comenzaron en 1890 con el aislamiento de *Chlorella vulgaris*, y su mantenimiento, en la década de los 40s se reconoce a Gary Caldwell por el ser primer personaje que notó en sus primeros estudios la existencia de la posibilidad de utilizar a las microalgas como organismos purificadores de las aguas residuales, lo anterior debido a su capacidad de aprovechar los nutrientes que se encuentran en ellas (Salazar, 2006). Posteriormente, en el año de 1957 el científico estadounidense William Joseph Oswald sentó los fundamentos de la ficología aplicada a los sistemas de tratamiento de agua residual con su publicación "*Algae in Waste Treatment [with Discussion]*" en el cual se proponía a las algas como un elemento clave en el tratamiento terciario de agua residual doméstica (Oswald *et al.*, 1957).

Bajo esta tesis propuesta, resaltaron varios factores que afectaban la calidad final del agua presente en un sistema tratado biológicamente. Dentro de estos factores, los autores resaltan la profundidad del estanque, la incidencia de la luz solar, la presencia de compuestos tóxicos, la cantidad de oxígeno disponible, el pH y la temperatura, así como la presencia de nutrientes en el cuerpo de agua. Bajo este sistema, las algas se mostraron capaces de remover nutrientes (como nitrógeno y fósforo), metales pesados y patógenos (Muñoz & Guieysse, 2006). Pueden modificar el pH, color, turbidez, alcalinidad y color entre otros factores. Debido a su capacidad de fotosintetizar de manera rápida, liberan más oxígeno del que consumen y captan más dióxido de carbono del que emiten (Barlandas, 2018). El siguiente gran paso fue dado en la década de los 60s en California cuando se planteó el sistema de cultivo más grande de Estados Unidos desencadenando una ola de inversiones en diversos países para impulsar el cultivo



masivo de microalgas en sistemas abiertos y cerrados con distintas finalidades Salazar (2006). Hoy en día, las ventajas del tratamiento de agua residual mediante el uso de microalgas son variadas. De acuerdo con Salazar (2006) se puede mejorar la calidad del efluente utilizando un proceso que es de bajo costo energético mientras se aprovechan los nutrientes al incorporarse a la biomasa y producir oxígeno.

2.7.1. PROPIEDADES DE LAS MICROALGAS EN UN SISTEMA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO

De acuerdo con Muñoz & Guieysse (2006):

- Las microalgas asimilan una cantidad considerable de nutrientes, esto debido a sus requerimientos de nitrógeno y fósforo para la formación de proteínas, ácidos nucleicos y fosfolípidos (que constituye 45-60% de su peso seco).
- Pueden acumular metales pesados por absorción física, absorción química, intercambio de iones, reacciones de óxido-reducción o cristalización en la superficie celular además de que pueden secretar metabolitos que promuevan la quelación con los metales y el aumento del pH asociado favorece la precipitación de estos.
- Debido al aumento del pH, la temperatura y el nivel de oxígeno disuelto, las microalgas son capaces de favorecer la desactivación de patógenos potenciales, así como la precipitación de ortofosfatos, la eliminación de nitrógenos amoniacal por intercambio gaseoso.
- Pueden ser utilizadas como bioindicadores debido a la sensibilidad a cambios ecológicos en el entorno.
- Además de sus evidentes ventajas para el tratamiento de aguas residuales, los productos de las microalgas pueden permitir ahorros económicos sustanciales referentes a la producción de biogás.
- Llegan a favorecer la oxidación continua de la materia orgánica, oxigenación del agua y ayudan a disminuir la demanda biológica de oxígeno.



2.7.2. TIPOS DE TRATAMIENTO ESPECÍFICOS CON MICROALGAS

Se muestran algunos de los principales tipos de tratamiento con microalgas adaptado de (Salazar, 2006) (Tabla 9).

Tabla 9. Principales tipos de tratamiento de agua residual con microalgas

Pileta no aireada	En cuanto a la eficiencia y producción de microalgas, este sistema no resulta ser del todo conveniente, sin embargo, tiene la posibilidad de combinar dos tipos de tratamiento (secundario y terciario) y su diseño es simple y de poca profundidad
Pileta aireada	Hay una mayor oxigenación (y con esto un aumento en la eficiencia de recuperación de biomasa) y tiene un sistema de filtración a través de grava.
Lagunas de oxidación	La profundidad que tienen estos sistemas es baja (de 30 a 60 cm), debido a la gran oxigenación que presentan, a la aeración y agitación, tienen una gran reducción bacteriana y una gran proliferación de microalgas
Lagunas de alta tasa de oxidación	Este diseño resulta parecido al anterior, se aplica a las aguas residuales con tratamiento secundario siendo inoculadas con una cantidad de biomasa considerable. El tipo de biomasa obtenida es mixta mejorando la tasa de oxidación y la de remoción

Fuente: (Salazar, 2006).

2.7.3. REACTORES RACEWAY

Estos sistemas son conductos de circuito cerrado de poca profundidad que utilizan mezcladores de paletas para mantener el agua en circulación. Se consideran los sistemas más rentables para el cultivo de las microalgas. En condiciones de laboratorio se utilizan velocidades mayores de mezclado, condiciones de luz optimizadas y, generalmente, medio



sintético que ayude a una proliferación temprana mientras que en condiciones industriales se suele presentar una menor producción (Quiroz-Arita *et al.*, 2020).

Actualmente, la popularidad de estos reactores se ha esparcido a tal grado que alrededor del 90% de la producción algal mundial se lleva a cabo utilizando estos sistemas debido a estudios recientes que han mostrado su efectividad en términos de producción así como de adaptabilidad para integrar estos reactores en distintos ámbitos como en el tratamiento de las aguas residuales (Barceló-Villalobos *et al.*, 2019).

2.8. NORMATIVIDAD MEXICANA EN MATERIA DE TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL

De acuerdo con el artículo 4 de la Constitución política de los Estados Unidos Mexicanos: “Toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible”. Entre las leyes que regulan y protegen a los recursos hídricos del país se pueden encontrar la Ley de Aguas Nacionales (LAN) que se encarga de regular el uso, aprovechamiento, distribución, preservación y calidad para lograr un desarrollo integral y sustentable en materia de este recurso y la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) que se encarga de expedir las NOM que protegen las aguas nacionales de la contaminación y establecen los parámetros bajo los cuales se fijarán los estándares de calidad en distintos ámbitos (Cázares, 2014).

Es así como la LGEEPA establece que todas las aguas residuales deben de cumplir con un tratamiento previo antes de su descarga en cuerpos de agua nacionales. La CONAGUA se encarga de vigilar el cumplimiento de las condiciones de descarga del agua residual y establece los permisos de descarga con este mismo fin. Se presenta la normatividad vigente en México en materia de aguas residuales a continuación (Tabla 10).



Tabla 10. Normas Oficiales Mexicanas en materia de tratamiento de aguas residuales

NOM-001-SEMARNAT-1996	Establece los límites máximos de contaminantes permisibles en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales
NOM-002-SEMARNAT-1996	Establece los límites máximos de contaminantes permisibles en las descargas de aguas residuales en los sistemas de alcantarillado urbano y municipal
NOM-003-SEMARNAT-1997	Establece los límites máximos de contaminantes permisibles para las aguas residuales tratadas que se destinen al reúso en servicios al público
NOM-004-SEMARNAT-2001	Establece los límites máximos de contaminantes en lodos y biosólidos para su aprovechamiento y disposición final
NOM-014-SEMARNAT-2003	Establece los requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada

Fuente: (CONAGUA, 2015).

2.8.1. NOM-003-SEMARNAT-1997

Como se mencionó anteriormente, la NOM-003-SEMARNAT-1997 es la encargada de establecer los límites máximos permisibles para los contaminantes presentes en aguas residuales tratadas que se reutilizarán en servicios con contacto al público, así como los servicios con contacto indirecto. Considerados dentro de los servicios con contacto directo con el público se encuentran el llenado de lagos y estanques artificiales, llenado de fuentes de ornato, lavado de vehículos y riego de parques y jardines. Dentro de los servicios con contacto indirecto con el público se encuentran el riego de jardines y camellones en autopistas, fuentes de ornato, campos de golf, abastecimiento de hidrantes contra incendio, lagos artificiales no recreativos y barreras hidráulicas de seguridad de peatones.



A continuación, se muestran los parámetros aplicables a esta norma, así como los límites máximos permisibles para dichos parámetros (Tabla 11).

Tabla 11. Límites máximos permisibles en los parámetros aplicables a la NOM-003-SEMARNAT-1997

Tipo de reúso	Coliformes Fecales NMP/100 mL	Huevos de Helminto (h/L)	Grasas y aceites (mg/L)	DBO5 mg/L	SST mg/L
Servicios al público con contacto directo	240	≤1	15	20	20
Servicios al público con contacto indirecto u ocasional	1000	≤5	15	30	30

Fuente: (NOM-003-SEMARNAT-1997)



3. JUSTIFICACIÓN

El continuo crecimiento de la población y el asentamiento de comunidades en las periferias de las ciudades principales supone un problema importante en materia de disponibilidad de recursos hídricos. En México del total de la cantidad de agua que es utilizada por la población se estima que sólo se trata alrededor del 47.5% (CONAGUA, 2015). El reúso del agua residual resulta indispensable para mantener una política sustentable a largo plazo, la propuesta de tratamiento de aguas residuales mediante el uso de microalgas se presenta como una alternativa viable para muchos de los problemas iniciales en cuanto al manejo de proyectos relacionados con la administración de recursos hídricos. Lo anterior se refiere a un aumento en la viabilidad económica de los proyectos con la reducción de costos iniciales y de mantenimiento y con esto un beneficio para su venta a los sectores industriales y agropecuarios (entre otros) tanto del sector público como del privado (Ansa, 2013).

Debido a la baja disponibilidad de agua, el tratamiento de aguas residuales y su uso posterior ofrece una alternativa para satisfacer la demanda de este recurso. Un ejemplo de esto se puede ver en el aprovechamiento de los nutrientes y el bajo costo del reúso de agua residual en el sector agrícola (Ortiz, 2011). La Ciudad de México tiene un estimado de 8,985,339 habitantes y se considera que su población produce un volumen de agua residual de alrededor de $57 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, este volumen es conducido a través de un sistema de drenaje hasta Hidalgo donde un volumen considerable es utilizado para regar cultivos en el Valle de Mezquital. El agua residual es una buena fuente de materia orgánica y de nutrientes (nitrógeno y fósforo, por ejemplo), sin embargo, estos nutrientes no suelen venir libres de contaminantes que se pudieran presentar en el agua residual (Pérez *et al.*, 2018). Lo anterior es un ejemplo de que cada vez se hace más evidente la necesidad de contar con un sistema de administración de agua potable y para reúso en el país; lograr una sustentabilidad económica y ambiental se vuelve un punto crítico bajo estas circunstancias. La inversión en una infraestructura apropiada para el tratamiento de agua residual es un elemento importante (según el Banco de Desarrollo de América Latina, una inversión de 12 mmdd sería una inversión adecuada) (López *et al.*,



2016). Además de los problemas de origen antrópico citados anteriormente, el ciclo del agua se ve comprometido debido al calentamiento global. Los cambios en las olas de calor, inundaciones, sequías, etc. afectan a más sectores productivos en los que el agua ocupa un papel crucial en algún momento del proceso como en la ganadería en el norte del país (López *et al.*, 2016).

Frente a la siempre creciente demanda, las aguas residuales están cobrando importancia como fuente de agua alternativa fiable, cambiando el paradigma de la gestión de aguas residuales de “tratamiento y eliminación” a “reutilización, reciclado y recuperación del recurso”. En este sentido, las aguas residuales ya no se consideran como un problema que necesite solución, sino como parte de la solución a los retos a los que se enfrentan las sociedades hoy en día (ONU, 2017).

De tal manera que se ha empezado a visualizar que el futuro del agua está en su tratamiento; y en este sentido, el sistema escala piloto Atzintli se conceptualiza en el contexto de la valorización de las aguas residuales para generar diversos productos de valor agregado mediante el cultivo de microalgas para lograr el tratamiento terciario de las aguas residuales.

Un punto importante que vale la pena mencionar son todas las aplicaciones que se le puede dar a la biomasa producida durante el proceso de tratamiento, entre las principales que se pueden destacar encontramos los siguientes:

- En el área médica como lo son compuestos isotópicos, vitaminas (principalmente C y E) y metabolitos secundarios que se pueden sintetizar como antibióticos.
- En la agricultura y producción de alimentos. Como fertilizante por su capacidad de absorción de nutrientes como lo son el nitrógeno, fósforo y azufre. Como suplementos alimenticios en forma de proteínas y aminoácidos específicos (prolina, arginina, ácido aspártico, etc.) así como la utilización de pigmentos carotenoides y ficobiliproteínas.
- En la industria energética con la producción de biocombustibles y en la producción de bioplásticos.



- En la industria cosmética especies de los géneros *Arthospira* y *Chlorella* suelen utilizarse el cuidado de la piel en forma de cremas antiedad, antiirritantes, productos refrescantes, regenerantes y estimulantes (Hernández-Pérez & Labbé, 2014).

A través de la prueba y puesta en marcha de un sistema de tratamiento de agua residual nuevo para México, bajo los parámetros de la normatividad mexicana vigente, se busca proponer un camino para la mitigación de los problemas previamente mencionados. Y con algunos ajustes de escala, el panorama presentado puede llegar a ser bastante favorable para su posterior aplicación (a largo plazo) a nivel municipal e industrial; y con un interés económico de inversión tanto en el sector público como en el sector privado.

No obstante, para probar mayores escalas del tratamiento, es necesario validar que las condiciones bajo las cuales opera actualmente el sistema provean de un efluente que cumple con la normatividad vigente para su reúso. De tal manera que se realicen en su caso, los ajustes necesarios al sistema para cumplir con la normatividad.

En este sentido, la presente tesis está dirigida a determinar si la calidad del agua que se produce en el sistema de cultivo de microalgas Atzintli instalado por el Instituto de Ingeniería, UNAM, tiene la calidad requerida para su reúso en servicios con contacto directo o indirecto conforme a la NOM-003-SEMARNAT-1997. Los resultados servirán para evaluar si las condiciones de operación del sistema son adecuadas, o es necesario realizar cambios y mejoras tanto a las instalaciones como a las condiciones de cultivo de las microalgas.



4. OBJETIVOS

4.1. GENERAL

Determinar si la calidad del agua del efluente de agua tratada en el modelo didáctico escala piloto para el tratamiento de aguas residuales con microalgas, captura de CO₂ y flotación con ozono (“Atzintli”), se encuentra dentro de los parámetros de la NOM-003-SEMARNAT-1997.

4.2. PARTICULARES

- 4.2.1. Evaluar la calidad del agua residual respecto al contenido de grasas y aceites, sólidos totales suspendidos, huevos de helminto, demanda biológica de oxígeno y coliformes totales en el influente del modelo didáctico escala piloto para determinar la carga de contaminantes que ingresan al sistema.
- 4.2.2. Evaluar la calidad del agua tratada respecto al contenido de grasas y aceites, sólidos totales suspendidos, huevos de helminto, demanda biológica de oxígeno y coliformes totales en el efluente del modelo didáctico para establecer la remoción de contaminantes durante el proceso.
- 4.2.3. Con base en los resultados, determinar si el agua que es tratada en el modelo didáctico escala piloto Atzintli cumple con los requerimientos para el reúso en servicios al público con contacto directo o con la calidad requerida para el reúso servicios al público con contacto indirecto u ocasional.



5. HIPÓTESIS

La tecnología de tratamiento de aguas residuales utilizando microalgas, implementada en el modelo didáctico escala piloto Atzintli produce agua tratada que cumple con los parámetros de calidad requeridos para ser reutilizada en servicios al público con contacto directo o indirecto establecidos en la NOM-003-SEMARNAT-1997.



6. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO UTILIZADO EN LA PLANTA “ATZINTLI”

El modelo didáctico para el tratamiento de agua residual se compone de un sistema Raceway, esto quiere decir que el sistema está compuesto de canales en un circuito cerrado de recirculación del agua. Típicamente, estos sistemas mantienen una baja profundidad (alrededor de 0.3 m), los canales por los cuales está compuesto mantienen una estructura paralela entre sí, el fondo del estanque es liso mientras que en uno de sus extremos se encuentra el sistema de circulación que mantiene el cultivo en circulación. La estructura fundamental del reactor está formada por un perfil de acero tubular y malla de acero, se tiene una geomembrana de PVC para la contención del agua y láminas de PVC para formar la mampara. Las dimensiones son las siguientes:

- 6.7 metros de largo
- 0.6 metros de ancho (0.3 m por canal)
- 0.8 metros de altura

Para lograr una mezcla óptima en el cultivo de microalgas se emplea un mezclador de hélice, mientras que para alimentar al reactor se utiliza una bomba que suministra agua de la planta de tratamiento de la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales de la UNAM.

Parte del diseño de Atzintli, nombre de origen náhuatl que quiere decir “agua”, fue realizado por especialistas de la Universidad de Newcastle - UK, mientras que el Instituto de Ingeniería de la UNAM completó el diseño y construyó cada uno de los componentes del sistema. Está construido de metal y recubierto con una geomembrana. El diseño consiste principalmente de: un reactor de alta tasa (Raceway), sedimentador de alta tasa y sistema de ozonoflotación (Ilustración 1).

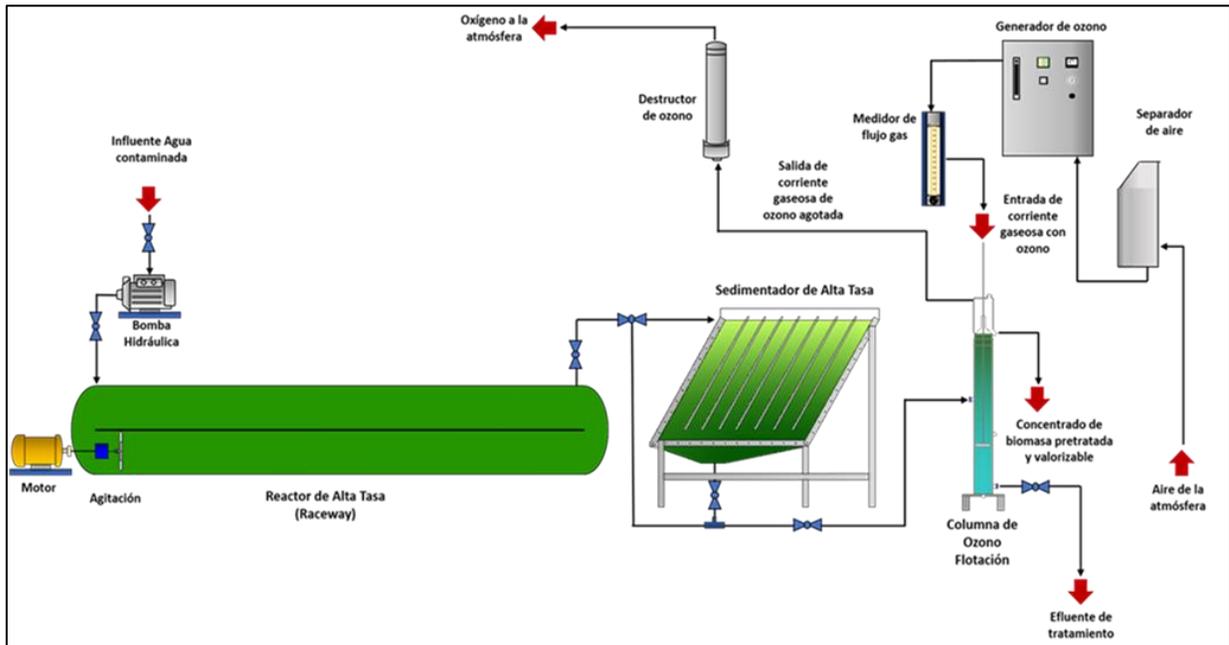


Ilustración 1. Componentes del modelo didáctico escala piloto Atzintli.

Fuente: Manual de Operación y Procedimientos - Atzintli.

El arreglo experimental del modelo didáctico Atzintli, permite que la biomasa microalgal producida durante el tratamiento pueda ser dispuesta a un sedimentador, donde es concentrada; así mismo el agua tratada que se genera puede ser enviada a la reserva ecológica. A continuación se puede ver una parte del reactor raceway, en concreto, del sistema de mezcla (Ilustración 2).



Ilustración 2. Sistema de mezcla del reactor

El equipo utilizado para el monitoreo del pH, conductividad, temperatura, oxígeno disuelto y otros parámetros es una sonda “EXO 3” la cual recopila datos cada hora.

La Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) se encuentra dentro de las instalaciones de la Universidad Nacional Autónoma de México, en el campus de Ciudad Universitaria en las coordenadas $19^{\circ}19'14.6''N$ $99^{\circ}10'36.4''W$ (Ilustración 3).

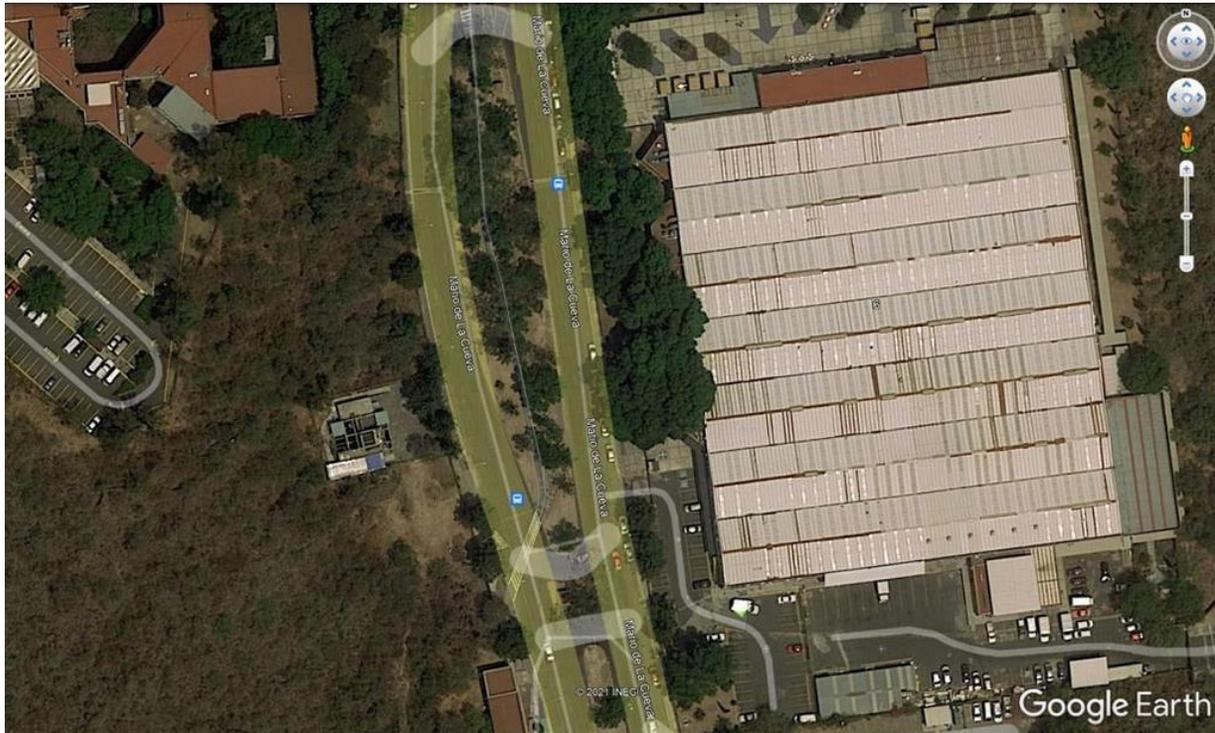


Ilustración 3. Localización de la PTAR, reactor y sedimentador

Fuente: Google. (s.f.), Datos del mapa 2021 INEGI

Una vista más completa de las instalaciones (por dentro y por fuera) se muestra a continuación (Ilustración 4).



Ilustración 4. Instalaciones de la planta piloto "Atzintli"

Además del reactor Raceway, existe un sedimentador que se encuentra a su lado cuyo propósito es recuperar la biomasa concentrada durante el tratamiento como producto de valor agregado (Ilustración 5).

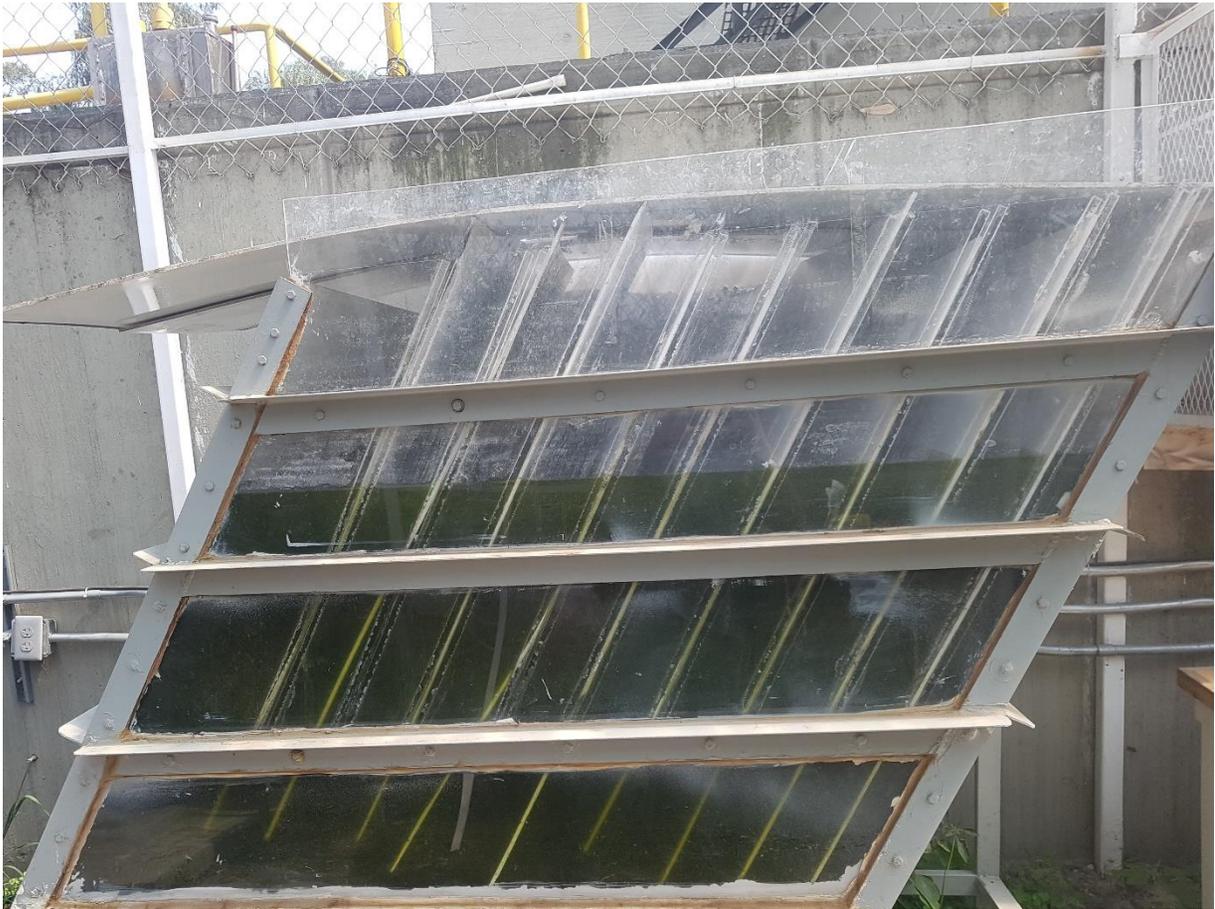


Ilustración 5. Sedimentador

6.1. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA SUJETA A TRATAMIENTO

El agua que alimenta al reactor Raceway del modelo didáctico, proviene del efluente de la Planta de Tratamiento de Agua Residual de la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales (FCPyS), la cual a su vez recibe las aguas residuales de la zona cultural del campus central (Ciudad Universitaria) de la UNAM. De acuerdo con González-Barceló (2013), el proceso por el cual es sometida el agua al entrar a esta PTAR es el siguiente:

El agua residual pasa a través de una rejilla de cribado colocada en el cárcamo de bombeo para ser bombeada después a una malla de cribado más fino y así remover los sólidos suspendidos.



Estos sólidos quedan detenidos en la malla y caen por gravedad al tanque de estabilización de lodos mientras el efluente se dirige a un tanque de igualación con un sistema de aireación. Una vez que el agua residual está igualada, ésta pasa al tratamiento biológico el cual está compuesto por reactores aerobios que tienen películas fijas de biomasa en forma de biorreactores a las cuales se les suministra aire continuamente desde la parte inferior para así lograr una remoción de la carga orgánica. Para remover los sólidos generados por las biorreactores, el agua residual pasa por gravedad al separador de sólidos compuesto por placas corrugadas inclinadas haciendo que los sólidos se sedimenten y sean transportados posteriormente por una bomba al tanque de estabilización. Después de pasar por el separador de sólidos, el agua clarificada es sometida a una filtración a presión con grava y arena además de adicionarle una solución de hipoclorito de sodio hasta llegar a la cisterna de almacenamiento y esperar para su reutilización o disposición final. La calidad del agua que se consigue en la PTAR-FCPyS, corresponde a un nivel secundario.

La finalidad de alimentar el modelo con agua proveniente de la PTAR-FCPyS, es disminuir la carga bacteriana que presentan las aguas residuales crudas, ya que esto limitaría el crecimiento de las microalgas y por ende el correcto funcionamiento del modelo. De tal manera que el tratamiento biológico que se le da al agua mediante el cultivo de las microalgas es complementario al tratamiento secundario que recibe en la PTAR-FCPyS para conseguir una calidad de agua nivel terciario.



7. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Para cumplir con el objetivo planteado en el presente trabajo se evaluó la calidad del agua tanto en el influente, como del efluente del modelo didáctico escala piloto para el tratamiento de aguas residuales mediante microalgas, conforme a la NOM-003-SEMARNAT-1997. Los parámetros evaluados fueron: Coliformes Fecales (UFC/100 mL), Huevos de Helminto (h/L), Grasas y aceites (mg/L), DBO₅ (mg/L) y SST (mg/L). El diseño del experimento se encuentra delimitado por las características propias del cultivo. Mediante pruebas preliminares se determinó que un tiempo de corrida de 15 días aproximadamente, optimizaba los resultados en cuanto al tiempo de retención hidráulica y obtención de datos dentro de los parámetros establecidos en la norma. Dicho esto, se diseñaron corridas basadas en el crecimiento de las microalgas y dentro del tiempo óptimo referente (15 días).

7.1. TIPO Y TOMA DE MUESTRAS

La toma de las muestras está dada de acuerdo con los parámetros mencionados por la NOM-003-SEMARNAT-1997 y la NOM pertinente para cada uno de los casos. A continuación, se muestran desglosados los procedimientos seguidos para la determinación de los 5 parámetros de las tomas de muestras.

7.1.1. MUESTRA DE GRASAS Y ACEITES

Se utilizó una botella de plástico y un embudo para obtener 1 L de muestra (ya sea de agua residual o de cultivo inicial o final). Una vez con el volumen deseado, se procedió a llevarlo al laboratorio y depositarlo en un vaso de precipitados de 1 L. El análisis de la prueba de grasas y aceites no se realizó el mismo día de su colecta, de este modo, se ajustó el pH a 2 al momento del arribo de la muestra al laboratorio con ácido sulfúrico concentrado y se almacenó en la cámara fría con su respectivo etiquetado.



7.1.2. MUESTRA DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)

Se utilizó una botella de plástico (de volumen variable) y se recolectó una cantidad de 0.5 hasta 1 L de muestra de cultivo (para la mayoría de las mediciones de cultivo inicial y final en cada uno de los periodos de evaluación). La muestra fue transportada al laboratorio y vertida en un vaso de precipitados utilizando una malla filtrante.

7.1.3. MUESTRA DE HUEVOS DE HELMINTO

Para la evaluación de huevos de helminto se utilizaron garrafones de 10 L para cada una de las evaluaciones al cultivo de microalgas previamente lavados y desinfectados en los cuales se recolectó un volumen aproximado de 8 L. La muestra fue transportada al laboratorio y se dejó sedimentar alrededor de 5 días antes de proceder a su análisis a una temperatura de $4^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

7.1.4. MUESTRA PARA DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO (DBO)

Se utilizó una botella (con capacidad de 1 a 2 L de acuerdo con la cantidad que se iba a introducir a los equipos) y un embudo para la obtención de la muestra. Esta fue llevada al laboratorio y filtrada posteriormente.

7.1.5. MUESTRA PARA COLIFORMES FECALES

La toma de la muestra fue mediante un embudo y recolectando un volumen variable (entre 100 y 150 mL aproximadamente) vertido en bolsas "Whirl-Pak", las bolsas fueron transportadas al laboratorio y las pruebas fueron realizadas el mismo día de la toma a temperatura ambiente.

7.1.6. PERIODICIDAD DE LA TOMA DE MUESTRAS Y NÚMERO DE REPETICIONES POR MUESTRA

Cabe hacer mención que los muestreos realizados se vieron obstaculizados por el inicio de la pandemia COVID19, ya que se tenía programado realizar mediciones por lo menos durante los



meses de enero, febrero, marzo, abril y mayo del año 2020. Se esperaba retomar los muestreos una vez que se iniciaran actividades presenciales, no obstante, y debido a la situación que se ha presentado, los datos que se muestran en el análisis de resultados son los recopilados hasta el momento de la cancelación de actividades en la UNAM.

A continuación, se presentan los días de la toma de muestra (tomando como día 1 el momento de la puesta en marcha del reactor con agua de suministro público, agua residual y microalgas) y el número de corrida y tipo de muestra de los 5 parámetros estudiados (Tabla 12).

Tabla 12. Plan de trabajo para la toma de muestras

Pruebas realizadas							
Días	# Corrida	Tipo de muestra	Grasas y Aceites	SST	Huevos de Helminto	DBO₅	Coliformes Fecales
3	1	Inicial	XX	XX	XX	XX	XX
15		Final	XX	XX	XX	XX	XX
3	2	Inicial	XX	XX	XX	XX	XX
15		Final	XX	XX	XX	XX	XX
3	3	Inicial	XX	XX	XX	XX	XX
15		Final	XX	XX	XX	XX	XX
3	4	Inicial	XX	XX	XX	XX	XX
15		Final	XX	XX	XX	XX	XX
3	5	Inicial	XX	XX	XX	XX	XX
15		Final	XX	XX	XX	XX	XX

Donde:

SST= Sólidos Suspendidos Totales

DBO= Demanda Biológica de Oxígeno

X= Repeticiones por muestra



8. MATERIALES Y METODOLOGÍA

Para la determinación de los valores y concentraciones de los parámetros establecidos en la NOM-SEMARNAT-1997, se aplicaron los métodos de prueba indicados en las normas mexicanas. Para cada una de las pruebas se llevó a cabo la metodología vigente en México, la cual, se podrá ver a continuación descrita de primera mano y en la parte anexa la fuente de donde fue extraída.

8.1. Medición de grasas y aceites

NMX-AA-005-SCFI-2013

MÉTODO DE PRUEBA

(CANCELA A LA NMX-AA-005-SCFI-2000).

Antes de la toma de la muestra, se prepararon los matraces donde se realizó de manera posterior la extracción. La preparación consistió en introducirlos al horno con una temperatura de $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 2 horas, posteriormente se dejaron enfriar en el desecador durante 30 minutos y finalmente, se pesaron en la balanza para así tener la medida de masa constante.

Se tomó 1 L de muestra de agua residual para cada una de las ocasiones en las que se realizó esta prueba. Una vez trasladada al laboratorio se procedió a acidificar la muestra con 2 mL de ácido sulfúrico 1:1.

Se preparó el material filtrante con un trozo de papel filtro en el embudo de Büchner, se colocó el embudo en un matraz Kitazato y se procedió a agregar 100 mL de la suspensión de tierra de diatomeas sobre el filtro y lavándolo con 100 mL de agua destilada para asegurar que todo el contenido de la tierra de diatomeas quedara retenido en el trozo de papel filtro. Durante este



paso y el siguiente se aseguró que en todo momento el papel filtro cubriera la totalidad de los orificios del embudo de Büchner.

Se transfirió el total de la muestra (previamente acidificada) a través del embudo de Büchner mientras se aplicaba vacío hasta el cese del paso de agua de manera que la totalidad de la muestra acidificada quedara impregnada en el papel filtro con la tierra de diatomeas.

Con ayuda de pinzas, se transfirió el material filtrante a un cartucho de extracción de celulosa. Se limpiaron las paredes del embudo y del recipiente con papel filtro impregnado de hexano, para así, colocarlo posteriormente dentro del mismo cartucho de extracción.

Una vez teniendo el material filtrante dentro del cartucho de extracción, se secó en el horno a $103\text{ }^{\circ}\text{C} + 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, por un período de 30 minutos; transcurrido este período se colocó en el equipo de extracción soxhlet.

Se adicionaron 200 mL de hexano al recipiente de extracción y se procedió a montar el equipo de extracción evitando el contacto directo con las manos y el embudo y/o cartucho de extracción (utilizando pinzas y guantes de látex).

Se colocó el equipo de extracción sobre la malla de calentamiento regulando la temperatura para lograr una extracción aproximadamente cada 3 minutos (velocidad de 20 ciclos/hora) durante 4 horas (tomando en cuenta el tiempo transcurrido a partir de la primera extracción). Considerando que la malla calentadora no presenta un regulador de ciclos de extracción, se llegó a la conclusión de que la configuración del nivel 7.6 es la indicada para lograr las 20 extracciones por minuto por medio de una prueba preliminar.

Una vez terminada la extracción, se tomó el matraz y se llevó a un equipo rotavapor hasta recuperar la totalidad del disolvente para reutilizarlo en una extracción posterior. En este equipo se logró la extracción a una temperatura de 69°C y se recolectó el hexano recuperado en un recipiente etiquetado para usarlo posteriormente en futuras extracciones.



El recipiente de extracción se llevó al horno a $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ por un período de 30 minutos, posteriormente se dejó enfriar durante otros 30 minutos en el desecador hasta alcanzar la temperatura ambiente.

Con ayuda de pinzas, se llevó el matraz a la balanza y se procedió a pesar. Por diferencia de pesos se cuantificó la cantidad de grasas y aceites presentes en la muestra para cada una de las repeticiones realizadas.

8.2. Medición de Sólidos Suspendidos Totales (SST)

NMX-AA-034-SCFI-2015

MÉTODO DE PRUEBA

(CANCELA A LA NMX-AA-034-SCFI-2001).

Se colocaron los filtros sobre charolas de aluminio y se dejaron durante 2 horas en el horno a una temperatura de $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, una vez transcurrido este tiempo, se tomaron los filtros en sus charolas y se dejaron 30 minutos en el desecador para que estos alcanzaran la temperatura ambiente y así, una menor variación al registrar los pesos de estos.

Los filtros se pesaron en la balanza analítica y su peso fue registrado (el valor anotado correspondería al peso inicial de los filtros).

Una vez con la muestra, se procedió a homogeneizarla agitando la botella que contuvo a la muestra desde su toma hasta su llegada al laboratorio. Después de tener la muestra homogeneizada, esta se hizo pasar a través de una malla para eliminar sólidos mayores que se pudieran presentar en la muestra (larvas y huevos de insectos, por ejemplo). Se colocaron los filtros previamente pesados en el matraz Kitazato y se procedió a verter 10 mL de la muestra en cada uno de los filtros con una pipeta aforada mientras se aplicó vacío.



Con ayuda de pinzas, se tomaron los filtros y fueron trasladados a su contenedor de aluminio correspondiente y estos a su vez al horno donde pasaron 2 horas a una temperatura de $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, posteriormente se dejaron 30 minutos en el desecador hasta alcanzar una temperatura ambiente.

Finalmente, se procedió a pesar los filtros (este valor correspondería al peso final de cada una de las muestras) y se cuantificaron los Sólidos Totales Suspendidos por diferencia de peso.

8.3. Medición del número de huevos de helminto

NMX-AA-113-SCFI-2012

MÉTODO DE PRUEBA

(CANCELA A LA NMX-AA-113-SCFI-1999)

Se tomaron 5 L de agua residual para cada una de las veces que se hizo la prueba. Una vez con la muestra en el laboratorio, esta se hizo pasar a través de un tamiz de 170 micras después de haber sido almacenada por 5 días aproximadamente.

Se lavó el tamiz con agua destilada y se recuperó junto con el sedimento del filtrado, posteriormente, se concentró el sedimento en un frasco especial de 0.5L para introducirlo a la centrífuga refrigerada, la muestra se centrifugó a 400 G durante 5 minutos desechando después el sobrenadante y conservando el sedimento.

Se desechó el sobrenadante y se resuspendió con 150 mL de la disolución de sulfato de zinc homogeneizando la mezcla con ayuda de un agitador de madera.



La muestra se centrifugó a 1000 G durante 5 minutos recuperando ahora el sobrenadante y colocándolo en un recipiente de plástico. Se adicionaron 300 ml de agua destilada y se centrifugó a 400 G durante 5 minutos.

Se decantó el sobrenadante y se resuspendió en 15 mL de la disolución alcohol-ácido utilizando un agitador de tubos más 10 mL de acetato de etilo. Se agitó el contenedor y se abrió eventualmente (una vez cada 20 segundos durante un minuto aproximadamente). Todo esto realizándose en la campana de extracción.

Se centrifugó la mezcla a 660 G durante 3 minutos, se decantó el sobrenadante (dejando sólo 1 mL aproximadamente) cuidando de no perder el paquete de los sólidos.

Se procedió a la cuantificación observando directamente al microscopio en una cámara de conteo de Neubauer reportando los resultados como huevos de helminto por litro.

8.4. Medición de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)

Se tomaron muestras de agua proveniente del cultivo de microalgas al iniciar el tratamiento y al finalizarlo por duplicados, de acuerdo con el manual de usuario del equipo utilizado y del valor esperado de la DBO, se decidió utilizar un volumen de 365 mL de agua para el análisis de la muestra. El agua proveniente del cultivo fue filtrada antes de ser colocada en las botellas correspondientes.

Para la preparación de las botellas del equipo “Oxi-Top”, estas se lavaron con agua y se llenaron de ácido sulfúrico al 2% durante 30 minutos, posteriormente se enjuagaron con agua destilada (procesos que se repetía entre cada una de las muestras a analizar).

Una vez aplicado el tratamiento en las botellas “Oxi-Top”, se procedió a vaciar el contenido de la muestra dentro de ellas (365 mL), el siguiente paso fue configurarlas dejando un agitador imantado dentro de las mismas y 3 pellets de hidróxido de sodio en el compartimento negro



antes de poner la tapa. Se colocaron las botellas a la incubadora en condiciones de oscuridad a una temperatura de 20°C durante 5 días asegurándose de que la agitación fuera continua durante todo el proceso. Finalmente, se colectaron los datos de las botellas. De acuerdo con el volumen utilizado en el proceso (365 mL), se multiplicó el promedio de los valores obtenidos por el factor especificado en el manual (2) para obtener así el valor estimado de la DBO.

8.5. Medición de coliformes fecales

Para la determinación de las bacterias indicadoras Coliformes Fecales, se siguió la metodología de filtración de membrana usando como medio de cultivo agar mFC. La metodología consiste en filtrar un volumen de muestra, ya sea un volumen directo o diluciones dependiendo del tipo de muestra. Para el caso de aguas residuales y residuales tratadas, invariablemente se realizan diluciones. Cabe hacer mención que, para determinar una dilución adecuada durante el análisis, deben poder contarse alrededor de 20 colonias. Para el caso de los Coliformes Fecales, las colonias características deben ser color azul oscuro, redondas y cremosas cuando se utiliza agar mFC.

Se tomó un volumen de aproximadamente 100 mL de muestra, tanto del influente como del efluente, del proceso de tratamiento mediante microalgas (modelo Atzintli). Es necesario precisar que la toma de muestra es crucial en la determinación de las bacterias, debe tomarse con la mayor asepsia posible y las muestras deben ser colectadas en frascos esterilizados previamente o en bolsas especiales estériles de fabricación. Para el presente trabajo se utilizaron bolsas Whirl-Pak® estériles para toma de muestra.

Las muestras se trasladaron al laboratorio y fueron analizadas dentro de las siguientes 4 horas posteriores a la toma de muestra. Tanto para el influente como para el efluente se llevaron a cabo diluciones. En análisis preliminares de diagnóstico, se determinó que las diluciones idóneas para llevar un correcto análisis microbiológico de dichas muestras fueron entre 10^{-3} y 10^{-4} para el influente y volumen directo (1 mL) y dilución 10^{-1} para el efluente.

En un área microbiológica y en condiciones aséptica, se llevó a cabo el análisis bacteriológico. El procedimiento de dilución de las muestras se representa a continuación (Ilustración 6).

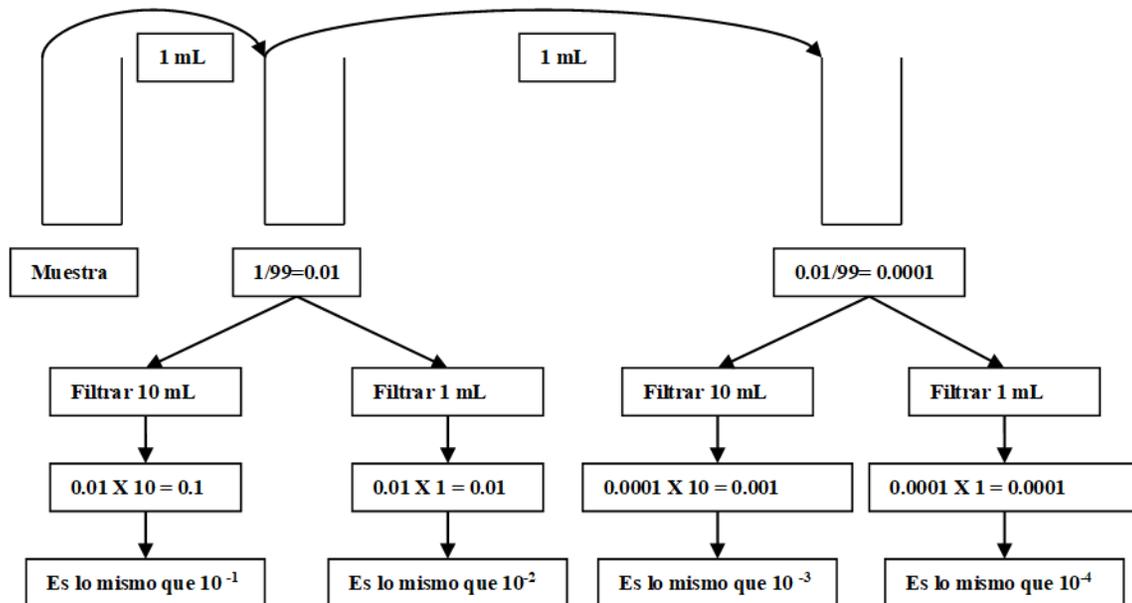


Ilustración 6. Procedimiento de dilución para el análisis bacteriológico

Con la finalidad de retener en una membrana filtrante las bacterias Coliformes Fecales contenidas en las muestras, a partir de cada dilución se filtró el volumen correspondiente a través de una membrana de celulosa: Filtros S-Pak, poro 0.45 μm , diámetro 47 mm, color blanco, superficie cuadrículada, HAWG047S6 Millipore. Posterior a la filtración, y con la ayuda de pinzas estériles, las membranas se colocaron en cajas de Petri conteniendo agar mFC. Las cajas se colocaron en bolsas con cierre hermético y se incubaron en baño de agua por 18-24 hrs a una temperatura de 44.5 ± 0.5 °C.

Una vez transcurrido el tiempo de incubación se procedió al conteo de las colonias con la morfología característica para Coliformes Fecales y se realizaron los cálculos correspondientes



considerando el volumen directo filtrado de la muestra y/o en su caso la dilución aplicada, expresando el resultado como UFC/100 ml de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\frac{UFC}{100} mL = \frac{\text{Colonias coliformes contadas}}{\text{Volumen filtrado de muestra}} \times 100$$



9. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en este trabajo entre el mes de agosto del año 2019 hasta el mes de marzo del año 2020 (Tabla 13).

Debido a la naturaleza de los datos, esto es: un número muestral (n) pequeño, ausencia de una distribución normal en los datos obtenidos y un error estándar considerable, se decidió hacer una prueba de Wilcoxon de datos pareados para cada uno de los parámetros para así poder comprobar si existe diferencia significativa en las medianas de cada conjunto de datos.

Para esta prueba, la hipótesis nula (en adelante H_0) es que la mediana de un grupo "X" es igual a la mediana de un grupo "X₁" después de haberle aplicado el tratamiento mientras que la hipótesis alternativa (H_a) es que existe una diferencia entre las medianas de un grupo "X" y un grupo "X₁" después de haber aplicado el tratamiento.

Para la realización de esta prueba se utilizó el programa de RStudio utilizando los siguientes datos para cada uno de los parámetros evaluados.

Para la comparación de cada uno de los parámetros se tomaron en cuenta las gráficas realizadas para establecer si la relación existente es proporcional o inversamente proporcional con respecto a los demás parámetros, así como los datos esperados de acuerdo con la literatura.



Tabla 13. Resultados generales obtenidos durante la experimentación

		Parámetros de la NOM-003-SEMARNAT-1997									
		Coliformes Fecales UFC/100mL		DBO mg/L		SST mg/L		Grasas y Aceites mg/L		Huevos de Helmintho h/L	
13/agosto/2019 al 26/agosto/2019	Infuente	1x10 ⁵	Ausente	10	10	410	410	10	10	Ausente	Ausente
	Efluente	Ausente	Ausente	16	16.4	530	540	0	0	Ausente	Ausente
30/agosto/2019 al 23/septiembre/2019	Infuente	1x10 ⁵	Ausente	11.2	12	330	330	10	10	Ausente	Ausente
	Efluente	Ausente	Ausente	14.8	15.2	620	640	0	0	Ausente	Ausente
27/septiembre/2019 al 14/octubre/2019	Infuente	2x10 ⁵	2x10 ⁵	6.2	6.4	70	70	10	10	Ausente	Ausente
	Efluente	1x10 ³	1x10 ³	8.4	8.4	530	540	0	0	Ausente	Ausente
17/octubre/2019 al 4/noviembre/2019	Infuente	1x10 ⁵	Ausente	12.4	12.8	590	560	10	10	Ausente	Ausente
	Efluente	Ausente	Ausente	16.8	16.8	590	590	0	0	Ausente	Ausente
26/febrero/2020 al 12 /marzo/2020	Infuente	4x10 ⁵	3x10 ⁵	15.2	16.4	495	500	10	10	Ausente	Ausente
	Efluente	Ausente	Ausente	29.6	28.4	840	820	0	0	Ausente	Ausente

Nota: Cada uno de los datos mostrados en la Tabla corresponden al promedio de dos muestras



9.1. Resultados y análisis de grasas y aceites

Para el caso de las grasas y aceites, cada análisis de las muestras se llevó a cabo tanto al inicio como al final del tratamiento, las mediciones iniciales se cuantificaron en 10 mg/L, mientras que en las mediciones finales siempre se obtuvo el mismo resultado (0 mg/L) como se muestran a continuación (Tabla 14).

Tabla 14. Resultados iniciales y finales de grasas y aceites

Parámetros establecidos en la NOM-003-SEMARNAT-1997		RESULTADOS GRASAS Y ACEITES mg/L	
Contacto directo	Contacto indirecto	Mediciones iniciales	Mediciones finales
		10	0
		10	0
		10	0
		10	0
15mg/L	15 mg/L	10	0
		10	0
		10	0
		10	0
		10	0
		10	0

Nota: Cada uno de los datos mostrados en la Tabla corresponden al promedio de dos muestras

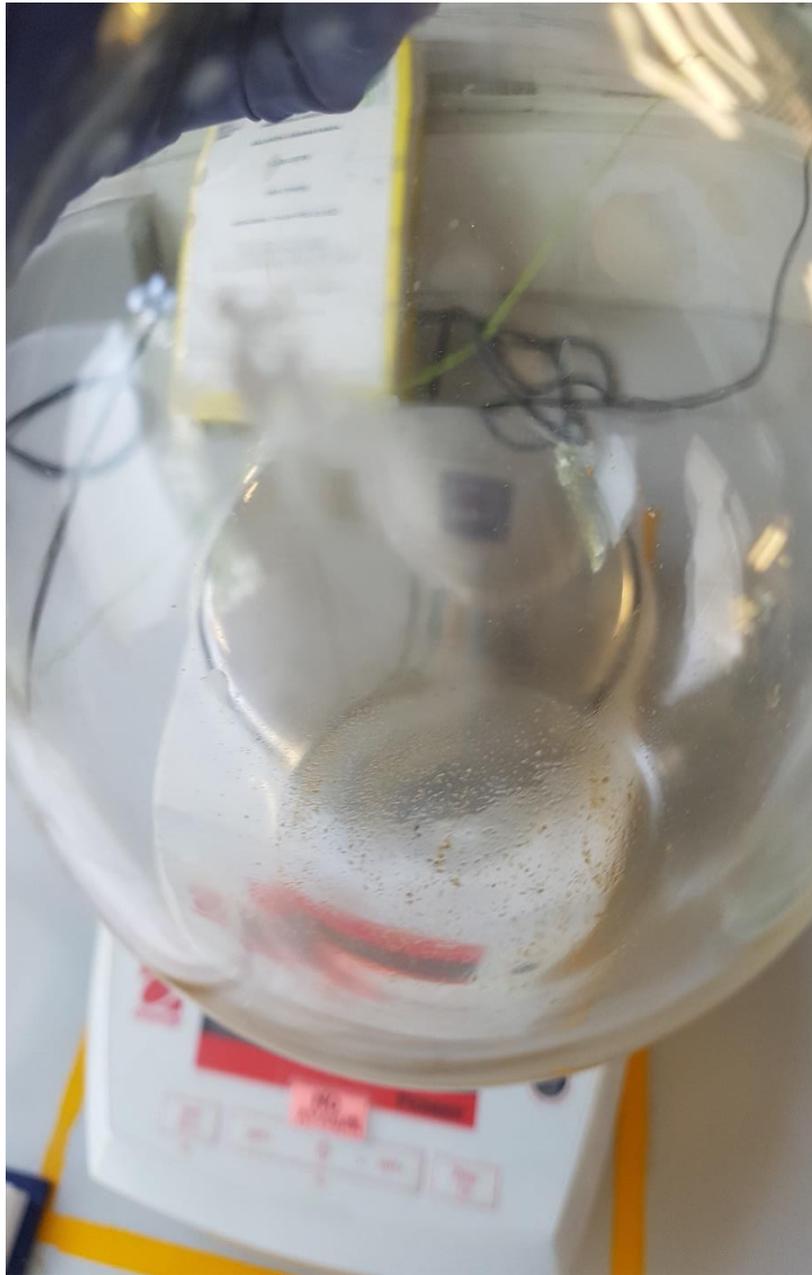


Ilustración 7. Matraz de bola después de cuantificación de grasas

Se puede apreciar en el fondo del matraz las trazas de grasas y aceites después de su separación (Ilustración 7).

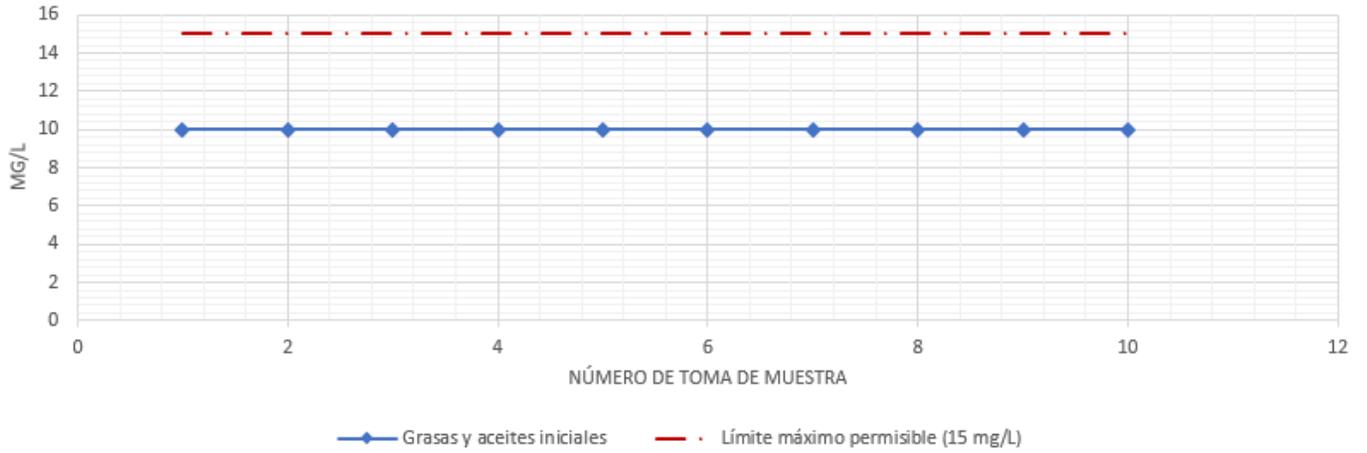


Ilustración 8. Montaje de equipo de extracción soxhlet

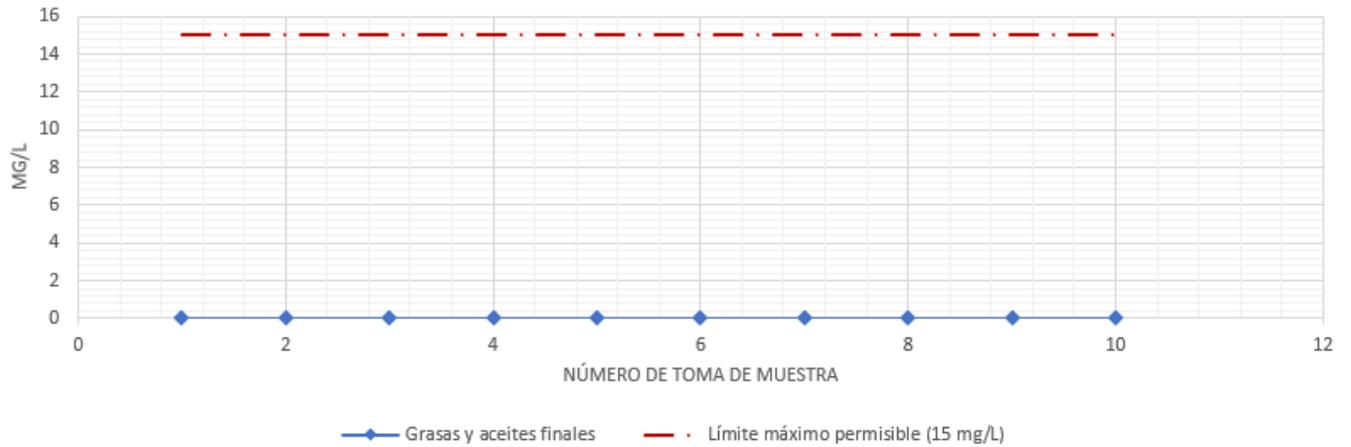
Se puede apreciar el cartucho de extracción (donde se encuentran las grasas y aceites al inicio del proceso), así como el matraz de bola (donde se depositarán las grasas y aceites al finalizar el proceso) (Ilustración 8).

Del mismo modo, a continuación, se puede apreciar el comportamiento de los datos obtenidos al inicio y al finalizar el tratamiento (Gráfica 1).

VARIACIONES DE RESULTADOS DE GRASAS Y ACEITES INICIALES



VARIACIONES DE RESULTADOS DE GRASAS Y ACEITES FINALES



Gráfica 1. Comportamiento del parámetro de grasas y aceites antes y después del tratamiento mediante el cultivo de microalgas



Algunos de los parámetros estadísticos de interés obtenidos a partir de los datos de estas muestras son los siguientes:

Mediciones de Grasas y aceites iniciales						
Mínimo	1º cuartil	Mediana	Promedio	3º cuartil	Máximo	Desviación estándar
0	0	0	4	10	10	5.1639

Mediciones de Grasas y aceites finales						
Mínimo	1º cuartil	Mediana	Promedio	3º cuartil	Máximo	Desviación estándar
0	0	0	0	0	0	0

Prueba de Wilcoxon en grasas y aceites

Datos iniciales	Datos finales
10	0
10	0
10	0
10	0
10	0
10	0
10	0
10	0
10	0
10	0
10	0



Utilizando el software de RStudio:

```
wilcox.test(Datos$`Grasas iniciales`, Datos$`Grasas finales`, alternative = "two.sided", mu=0, paired=TRUE)
```

```
V = 55, p-value = 0.001565
```

```
median(Datos$`Grasas iniciales`, na.rm=TRUE)
```

```
10
```

```
median(Datos$`Grasas finales`, na.rm=TRUE)
```

```
0
```

De acuerdo con los datos obtenidos y después de realizar la prueba de Wilcoxon, se concluye que existe una diferencia estadísticamente significativa después de aplicar el tratamiento tomando en cuenta de que el valor de $p = 0.001565$. El hecho de que la mediana sea menor después de aplicar el tratamiento indica que existe una remoción de la cantidad de grasas y aceites al finalizar el tratamiento. Al iniciar el tratamiento de agua residual con microalgas la cantidad de grasas presentes es mínima, ya que las mediciones iniciales indicaron una concentración de 10 mg/L (Histograma 1). Lo anterior se debe no sólo al hecho de que el agua ya pasó por un tratamiento anterior sino a que el tipo de influente y la zona de la que se alimenta no se presenta como muy probable a contener grasas en el sistema de alcantarillado. Sin embargo, existen diversos autores que hablan sobre la reducción de grasas y aceites utilizando microalgas. Uno de estos ejemplos de encuentra en el trabajo desarrollado por (Ortiz Aguilar, 2015) en el cual se evaluó la remoción de grasas y aceites de un efluente de aguas residuales obtenidos de la industria chocolatera utilizando a la microalga *Chlorella vulgaris*. Los resultados obtenidos muestran que, en tan sólo 7 días, se logró obtener una reducción del 84% con respecto a las mediciones iniciales y, al final del tratamiento, una reducción del 94% a lo largo de 21 días.

Una de las posibles explicaciones para este fenómeno podría ser encontrada en el trabajo de Puerta (2010), en el cual se evaluaron distintas microalgas con asociaciones bacterianas y su efecto en las aguas residuales contenidas en un efluente de una central extractora de aceite de palma. Los resultados obtenidos indican una mayor presencia de lipasas en microalgas de



los géneros *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Euglena* y *Chlamydomonas*. Un dato interesante que menciona es que la detección del tipo de lipasa parece variar de acuerdo con el sustrato que esté presente (y al tipo de esterasa que pueda actuar sobre los mismos). Estas enzimas lipolíticas se caracterizan por intervenir en la fase agua/lípido, pueden llegar a ser muy específicas y, debido a esto, tener muchas aplicaciones en diferentes ámbitos. Aunque los valores registrados al final de cada una de las pruebas realizadas se mantuvieron constantes en cuanto a la ausencia de grasas y aceites, hace falta la realización de pruebas de tipo control (en las que se introduzca una cantidad conocida de grasas y aceites durante el tratamiento) para verificar si realmente se puede apreciar el efecto de las microalgas sobre estos contaminantes. Del mismo modo, cabe remarcar que, tanto los valores obtenidos al inicio del tratamiento como al final de este se encuentran dentro de los parámetros permisibles de la NOM-003-SEMARNAT-1997 y la reducción de 10 mg/L que se encontraron en las muestras, parecen indicar que el uso de microalgas para el tratamiento de aguas residuales es efectivo para la remoción de grasas y aceites.

9.2. Resultados y análisis de Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Para el caso de los Sólidos Suspendidos Totales (SST) se obtuvieron distintos valores tanto iniciales como finales, sin embargo, un patrón de aumento fue evidente en cada uno de los ciclos llevados a cabo durante la realización de este trabajo. Los resultados obtenidos son los siguientes (Tabla 15).

Tabla 15. Resultados iniciales y finales de Sólidos Suspendidos Totales

Parámetros establecidos en la NOM-003-SEMARNAT-1997		RESULTADOS SST mg/L	
Contacto directo	Contacto indirecto	Mediciones iniciales	Mediciones finales
		410	530
		410	540
		330	620
		330	640
		70	530
20 mg/L	30 mg/L	70	540
		560	590
		590	590
		495	840
		500	820

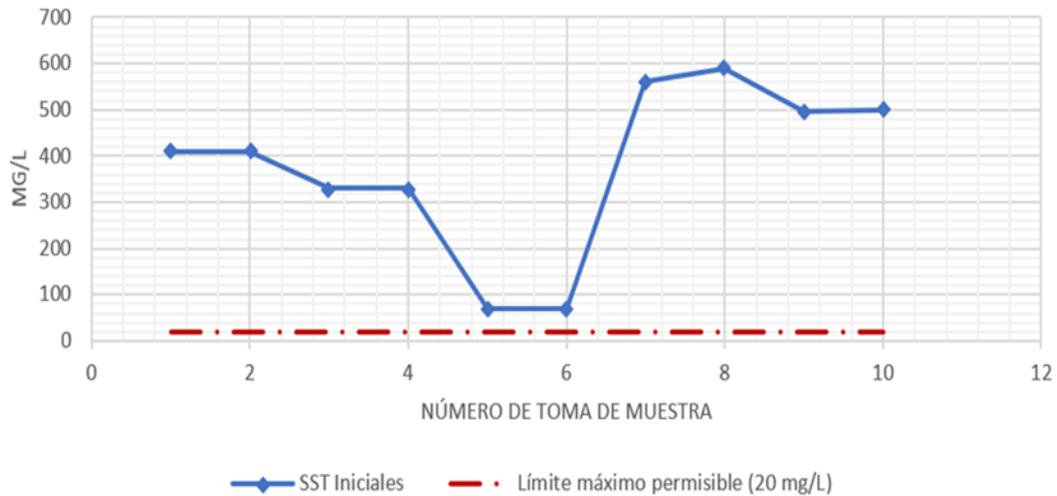


Ilustración 9. Filtros en horno de secado

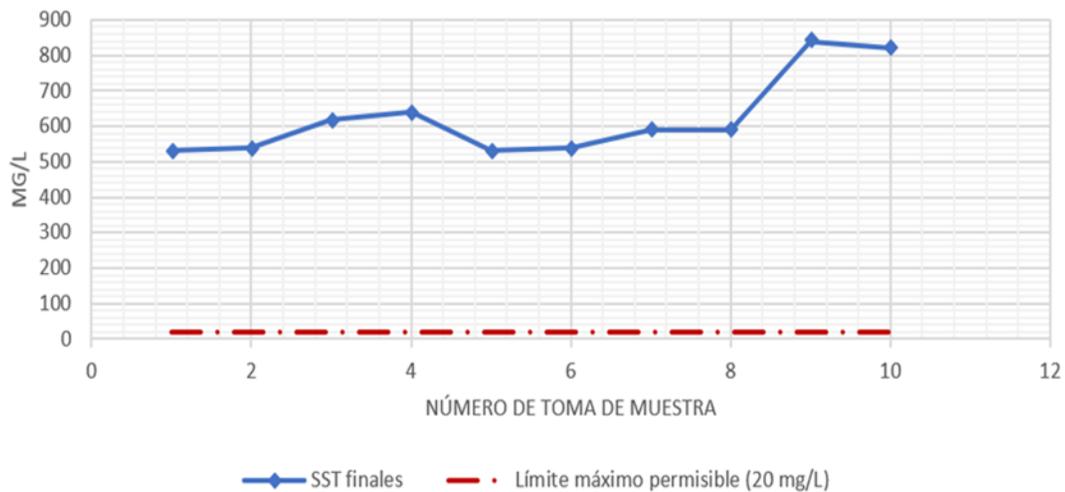
Se muestra el proceso de secado para cuantificar únicamente los SST (Ilustración 9).

A continuación, se muestra el comportamiento de los datos de SST antes y después de aplicar el tratamiento (Gráfica 2).

VARIACIONES DE RESULTADOS DE SST INICIALES



VARIACIONES DE RESULTADOS DE SST FINALES



Gráfica 2. Comportamiento del parámetro Sólidos Suspendidos Totales antes y después del tratamiento mediante el cultivo de microalgas



Algunos de los parámetros estadísticos de interés obtenidos a partir de los datos de estas muestras son los siguientes:

Mediciones de SST iniciales						
Mínimo	1º cuartil	Mediana	Promedio	3º cuartil	Máximo	Desviación estándar
70	330	410	376	498	590	183.4855

Mediciones de SST finales						
Mínimo	1º cuartil	Mediana	Promedio	3º cuartil	Máximo	Desviación estándar
530	540	590	624	635	840	115.2003

Prueba de Wilcoxon en Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Datos iniciales	Datos finales
410	530
410	540
330	620
330	640
70	530
70	540
560	590
590	590
495	840
500	820

Utilizando el software de RStudio:

```
wilcox.test(Datos$`SST iniciales`, Datos$`SST finales`, alternative = "two.sided", mu=0,
paired=TRUE, exact = FALSE)
```

V = 0, p-value = 0.009152

```
median(Datos$`SST iniciales`, na.rm=TRUE)
```

410

```
median (Datos$`SST finales`, na.rm=TRUE)
```



590

De acuerdo con los datos obtenidos y después de realizar la prueba de Wilcoxon, se concluye que existe una diferencia estadísticamente significativa después de aplicar el tratamiento tomando en cuenta de que el valor de $p = 0.009152$, el hecho de que la mediana sea mayor después de aplicar el tratamiento indica que existe un aumento en los valores de SST al finalizar el tratamiento.

En materia de sólidos suspendidos totales, los resultados obtenidos en este trabajo muestran una constante en cuanto al aumento de estos conforme pasa el tiempo (Histograma 2). Con un rango inicial de 70 mg/L a 590 mg/L y un rango final de 530 mg/L a 840 mg/L se obtuvo un aumento promedio de 65%.

En este trabajo se relacionaron los datos de SST obtenidos directamente con el crecimiento algal, siguiendo trabajos previamente realizados en el grupo de trabajo como se puede consultar en (Valeriano González *et al.*, 2020). Durante la metodología realizada, se utilizaron filtros de fibra de vidrio con un tamaño de poro de 1.6 micras para así poder retener a las microalgas presentes. Los datos iniciales obtenidos de los SST rebasan sobresalientemente a los límites máximos permisibles por la NOM-003-SEMARNAT-199, sin embargo, estos son después de inocular a las microalgas en el reactor. El agua residual utilizada para la alimentación del reactor oscila dentro de los 10-30 mg/L por lo que se encuentra dentro de los parámetros establecidos en la norma.

Para lograr hacer un análisis acertado de los SST es importante remitirnos a la literatura que considera el tipo de tratamiento y las posibles aplicaciones que se le puede dar al efluente final. Aquí, las concentraciones iniciales oscilaban dentro de los 20 a 30 mg/L incrementándose al final del tratamiento a valores cercanos a 10,000 mg/L siendo el aumento de 3 a 4 órdenes de magnitud, el autor menciona que el hecho de que las microalgas se conglomeren en agregados densos da la posibilidad de una colecta facilitada para una digestión posterior de las microalgas en distintos productos y para facilitar un uso en el agua tratada.



De acuerdo con Mara *et al.* (1992), invariablemente se espera un aumento en los sólidos suspendidos totales al tener un tratamiento terciario con microalgas por el continuo aumento de la biomasa, esto sin deteriorar la calidad del agua. Habría que considerar el tipo de uso que se le dará al efluente una vez terminado el tratamiento, por ejemplo, la descarga de estos efluentes a un campo abierto brindaría aplicaciones favorables a la agricultura actuando como una liberación lenta de fertilizante en el suelo proporcionando concentraciones adecuadas de nitrógenos, fósforo y potasio, así como nutrientes importantes en el crecimiento de especies vegetales como lo son el hierro, magnesio y azufre. Lo anterior reduciendo el uso de fertilizantes químicos y manteniendo la tierra en mejores condiciones para los cultivos. Del mismo modo, podrían existir ventajas al descargar el efluente en un cuerpo de agua controlado para así aumentar la productividad primaria y resultando en un beneficio en la industria pesquera (Mara *et al.*, 1992).



9.3. Resultados y análisis de huevos de helminto

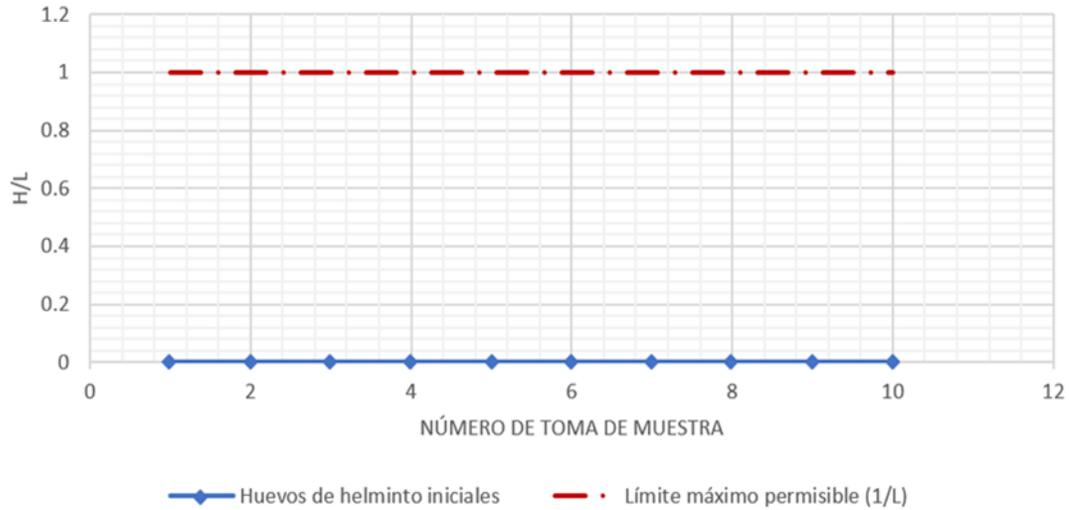
Los resultados en esta sección fueron concluyentes mostrando siempre el mismo valor. Como se muestra a continuación (Tabla 16). Desde la muestra tomada del influente no se detectó la presencia de huevos de helminto.

Tabla 16. Resultados iniciales y finales de número de huevos de helminto

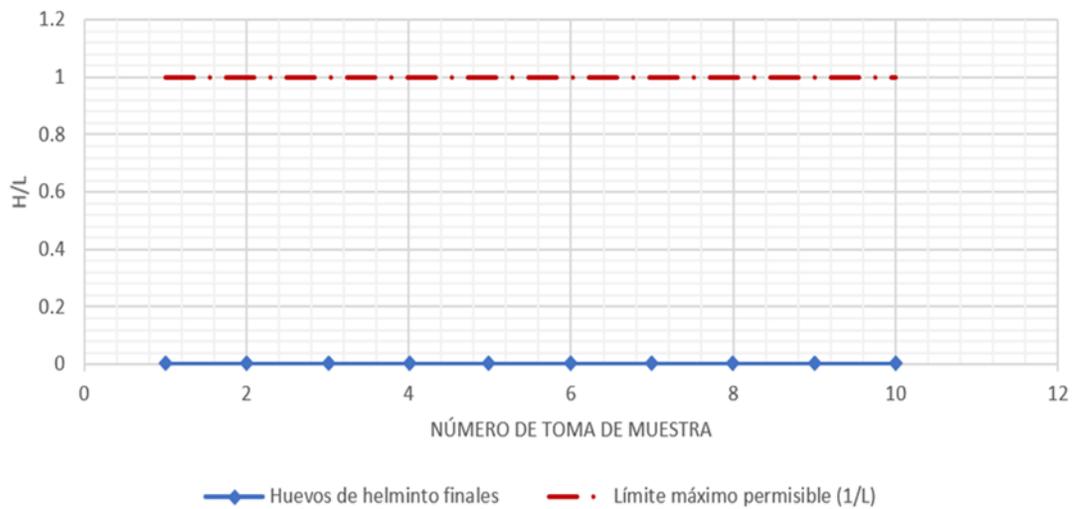
Parámetros establecidos en la NOM-003-SEMARNAT-1997		RESULTADOS Huevos de helminto #huevos/L	
Contacto directo	Contacto indirecto	Mediciones iniciales	Mediciones finales
		0	0
		0	0
		0	0
		0	0
≥ 1	≤ 5	0	0
		0	0
		0	0
		0	0
		0	0
		0	0

En la siguiente gráfica se puede ver el comportamiento de los datos de huevos de helminto antes y después de aplicar el tratamiento (Gráfica 3).

VARIACIONES DE RESULTADOS DE HUEVOS DE HELMINTO INICIALES



VARIACIONES DE RESULTADOS DE HUEVOS DE HELMINTO FINALES



Gráfica 3. Comportamiento del parámetro huevos de helminto antes y después del tratamiento mediante el cultivo de microalgas



Algunos de los parámetros estadísticos de interés obtenidos a partir de los datos de estas muestras son los siguientes:

Mediciones de Huevos del helminto iniciales						
Mínimo	1º cuartil	Mediana	Promedio	3º cuartil	Máximo	Desviación estándar
0	0	0	0	0	0	0

Mediciones de Huevos de helminto finales						
Mínimo	1º cuartil	Mediana	Promedio	3º cuartil	Máximo	Desviación estándar
0	0	0	0	0	0	0

Prueba de Wilcoxon en huevos de helminto

Datos iniciales	Datos finales
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0



Utilizando el software de RStudio:

```
wilcox.test(Datos$`Huevos iniciales`, Datosposibles$`Huevos finales`,alternative =  
"two.sided", mu=0, paired=TRUE, exact = FALSE)
```

```
V = 0, p-value = NA
```

```
median(Datos$`Huevos iniciales`, na.rm=TRUE)
```

```
0
```

```
median(Datos$`Huevos finales`, na.rm=TRUE)
```

```
0
```

De acuerdo con los datos obtenidos y después de realizar la prueba de Wilcoxon, se concluye que no existe una diferencia estadísticamente significativa después de aplicar el tratamiento tomando en cuenta de que el valor de $p = NA$ (debido a que todos los valores presentados son iguales a 0), el hecho de que la mediana sea igual después de aplicar el tratamiento indica que los datos de huevos del helminto permanecen invariables después de aplicar el tratamiento.

Los resultados obtenidos en la sección de la determinación de huevos de helminto indican que hay una ausencia de estos tanto al inicio como al final del tratamiento (Histograma 3).

De acuerdo al trabajo realizado por Campos *et al.* (2018) en el cual se realizaron diversos trabajos de cuantificación de huevos de helminto en distintos medios (aguas residuales, suelo y pastizales), en el sedimento es donde se concentra la mayor cantidad de huevos debido a los procesos de sedimentación que se llevan a cabo a lo largo de su estadía en el agua residual. Lo anterior no pudo haber sido un impedimento en cuanto a su ausencia en los resultados debido a que en el reactor biológico existe un sistema de resuspensión además de que antes de tomar la muestra esta se resuspende de manera manual al pasar una escoba que acarrea las partículas sedimentadas y las devuelve a la columna de agua.

En el trabajo realizado por Chavez *et al.* (2004), se evaluó la relación existente entre la concentración de los sólidos suspendidos totales en las aguas residuales, así como el tamaño



de las partículas presenten obteniendo resultados que mostraban una estrecha relación entre la presencia de huevos de helminto y partículas en un intervalo de 20 a 80 μm así como valores totales de SST en un intervalo de 115 y 170 mg/L. A diferencia de los resultados mostrados en este trabajo, el origen del agua residual era completamente urbano y no se encontraba restringido a una fracción de la comunidad universitaria y la cantidad de sólidos al finalizar es explicada debido a una proliferación en las microalgas y no a un aumento en los contaminantes y microorganismos. Además de que Jimenez & C. Galvan (2007), destacan que los tratamientos primarios avanzados donde se emplean medios físicos y tratamientos químicos logran emplear una menor dosis de coagulantes combinados con floculantes de alta carga dando lugar a una reducción considerable en la cantidad de sólidos suspendidos así como una reducción desde el 90% hasta el 99% de los huevos que se presentaban en el influente, así, de un influente que podía contener alrededor de 120 huevos de helminto se observa una reducción con valores en el efluente de entre 0.5 a 3 huevos de helminto por litro.

Aunado a las explicaciones que se pueden relacionar con los parámetros cuantificables propios del agua residual, existen otros motivos que se deben de considerar para explicar esta ausencia. Uno de estos motivos puede ser las condiciones socioeconómicas de la zona. De acuerdo con Agudelo-Lopez *et al.* (2008), existe una mayor prevalencia de parásitos intestinales y mayores tasas de infección por helmintos en poblaciones con bajos recursos y hábitos deficientes de higiene que no sólo son factores relacionados a un bajo nivel de vida de la población sino también a la cercanía a cuerpos de aguas residuales incrementando así el riesgo de contacto o consumo de alimentos contaminados



9.4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO (DBO)

Los resultados obtenidos para la Demanda Biológica de Oxígeno muestran un patrón de aumento al igual que los datos obtenidos en los SST con respecto a las mediciones iniciales y finales respectivamente (Tabla 17).

Tabla 17. Resultados iniciales y finales de DBO

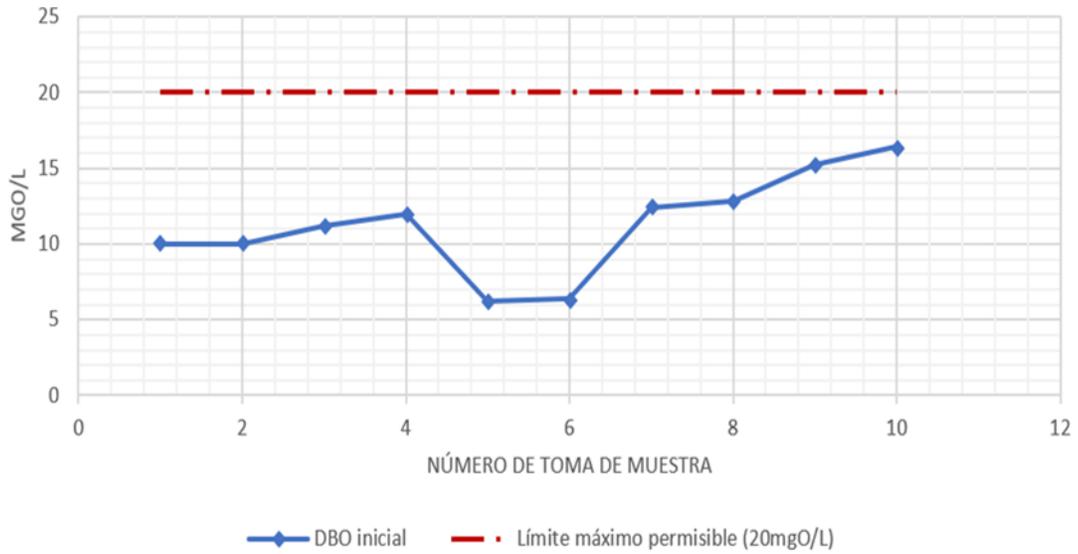
Parámetros establecidos en la NOM-003-SEMARNAT-1997		RESULTADOS DBO mgO/L	
Contacto directo	Contacto indirecto	Mediciones iniciales	Mediciones finales
		10	16
		10	16.4
		11.2	14.8
		12	15.2
20 mg/L	30 mg/L	6.2	8.4
		6.4	8.4
		12.4	16.8
		12.8	16.8
		15.2	29.6
		16.4	28.4



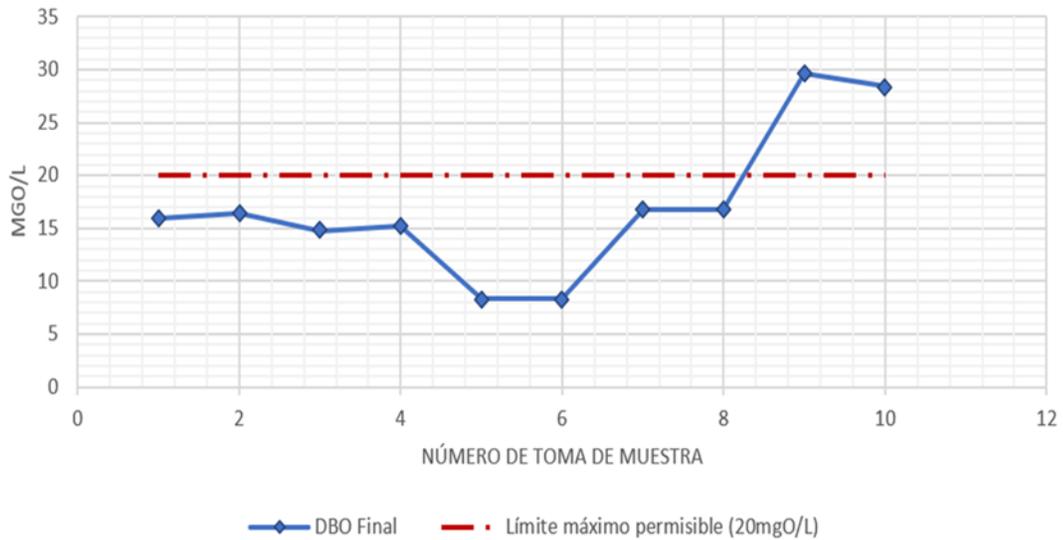
Ilustración 10. Botellas de DBO

Se pueden observar las botellas de DBO antes de que se les colocase la muestra de agua a analizar (Ilustración 10).

VARIACIONES DE RESULTADOS DE DBO INICIAL



VARIACIONES DE RESULTADOS DE DBO FINAL



Gráfica 4. Comportamiento del parámetro DBO antes y después del tratamiento mediante el cultivo de microalgas

Un ejemplo gráfico del comportamiento de la DBO se puede ver en la gráfica previa (Gráfica 4)



Mediciones de DBO inicial						
Mínimo	1º cuartil	Mediana	Promedio	3º cuartil	Máximo	Desviación estándar
6.2	10	11.6	11.26	12.7	16.4	3.3093

Mediciones de DBO final						
Mínimo	1º cuartil	Mediana	Promedio	3º cuartil	Máximo	Desviación estándar
8.4	14.9	16.2	17.08	16.8	29.6	7.0403

Prueba de Wilcoxon en la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)

Datos iniciales	Datos finales
10	16
10	16.4
11.2	14.8
12	15.2
6.2	8.4
6.4	8.4
12.4	16.8
12.8	16.8
15.2	29.6
16.4	28.4



Utilizando el software de RStudio:

```
wilcox.test(Datos$`DBO inicial`, Datos$`DBO final`,alternative = "two.sided", mu=0,  
paired=TRUE)
```

V = 0, p-value = 0.001953

```
median(Datos$`DBO inicial`, na.rm=TRUE)
```

11.6

```
median(Datos$`DBO final`, na.rm=TRUE)
```

16.2

De acuerdo con los datos obtenidos y después de realizar la prueba de Wilcoxon, se concluye que existe una diferencia estadísticamente significativa después de aplicar el tratamiento tomando en cuenta de que el valor de $p = 0.001953$, el hecho de que la mediana sea mayor después de aplicar el tratamiento indica que existe un aumento en los valores de DBO al finalizar el tratamiento.

Los resultados de DBO difieren con aquellos que se han reportado previamente en la literatura. De acuerdo con Maynard *et al.* (1999) ya que existe un claro aumento de este parámetro al finalizar el tratamiento (Histograma 4), generalmente los sistemas de tratamiento de terciarios de agua residual, no está diseñados precisamente para remover la DBO (aunque pueden llegar a ser conocidos por eso), esto se debe a que los niveles de oxígeno presentes al iniciar el tratamiento terciario ya se encuentran dentro de valores permisibles (dependiendo de la normatividad vigente) así como es el caso de los resultados obtenidos en este trabajo. Generalmente, los tratamientos terciarios se encuentran orientados a la remoción de nutrientes y patógenos.

Del mismo modo, Mara *et al.* (1992), sugieren que en las lagunas terciarias de tratamiento de agua residual se puede presentar un aumento considerable en la demanda biológica de oxígeno, así como en los sólidos suspendidos (alrededor del 50 al 90%) debido al contenido algal, entre las razones posibles se encuentran las siguientes:



- Las microalgas no se degradan de manera inmediata una vez que se busca que contribuyan a la demanda de oxígeno del agua receptora.
- Si las condiciones son favorables, las microalgas pueden crecer y multiplicarse y llegar a competir con otros grupos microalgales como lo son las Cyanophytas
- La DBO que se llegue a registrar durante el tratamiento terciario se debe a la oxidación primaria de la materia orgánica por bacterias heterotróficas

Otra de las explicaciones por las que se llegan a encontrar tasas de remoción bajas o aumentos en la DBO es porque este parámetro suele estar ligado a las cargas orgánicas iniciales que se le suministran al sistema, así, la mayor parte de la DBO del efluente está relacionada con los sólidos que ingresan al mismo (Mara *et al.*, 1992)

Además de la cuestión ligada al aumento de la biomasa existen distintas razones por las cuales puede aumentar la DBO al aplicar un tratamiento terciario con microalgas, se sabe que existen especies de bacterias que pueden inhibir el crecimiento algal al sintetizar enzimas que llegan a romper la pared celular (Cole, 1982). Sin embargo, también existen especies de bacterias que pueden coexistir en una relación simbiótica con microalgas, dado este caso, las bacterias ayudan a descomponer compuestos más difíciles de digerir para las microalgas en amonio, nitrógeno, fosfatos y CO₂ (por ejemplo) que son más fácilmente digeribles mientras que las algas ayudan al suministro de nutrientes como la vitamina B₁₂ (Croft *et al.*, 2005).

Podemos encontrar una justificación en el aumento de la DBO en el trabajo de Cho *et al.* (2015), donde se inocularon distintas concentraciones iniciales de *Chlorella vulgaris* en coexistencia con bacterias presentes en el agua residual, mostrando que en todos los lotes en los que hubo un inóculo algal inicial se obtuvo un mayor crecimiento bacteriano, sin embargo, entre mayor fuese la concentración inicial algal, menor era el conteo en las bacterias. Lo anterior quiere decir que la presencia inicial de microalgas parece dar como resultado invariable una presencia de bacterias, sin embargo, entre más grande sea la concentración



inicial de microalgas, menor será el conteo bacteriano. Así, una explicación posible al aumento de la DBO al finalizar el tratamiento se puede deber a la presencia de las microalgas, quienes, a su vez, fomentaron un crecimiento bacteriano que aumentó los valores de este parámetro.

Basados en las afirmaciones anteriores, parece existir una relación compleja entre las microalgas y las bacterias en donde se puede ver que, en concentraciones relativamente bajas de bacterias, además de que las bacterias pueden ayudar a incrementar el crecimiento algal en un ciclo de retroalimentación positiva, ayudan a reducir la cantidad de contaminantes presentes. Al haber una concentración algal relativamente alta al inicio del tratamiento podría ocasionar una competencia por los nutrientes disponibles o la excreta de sustancias tóxicas para el crecimiento bacteriano.

En la metodología llevada a cabo en este trabajo, se filtró el agua obtenida del reactor con un filtro de 1.6 micras antes de realizar la prueba de la DBO, lo anterior con la finalidad de remover a las microalgas presentes en el agua tratada. Los resultados se podrían explicar considerando que existen microalgas que tienen un tamaño menor al poro previamente mencionado, así como las bacterias presentes en ese momento que pudieron atravesar el filtro. Siendo así, se podría llegar a inferir que, aunque el tratamiento ha sido demostrado como eficiente en la remoción de las coliformes fecales, puede existir una relación simbiótica con otro tipo de bacterias lo cual llega a causar un aumento en su número y con ello un aumento en la DBO. Tomando en cuenta las observaciones de Mara *et al.* (1992), esto no debería de ser un problema al ingresar agua a un sistema terciario en donde los niveles de DBO deberían de suponerse como aceptables en ese momento.

El valor de r entre los datos de DBO y SST iniciales muestra que existe una fuerte correlación entre estos parámetros (0.84) y esta correlación parece hacerse más fuerte conforme avanza el tratamiento teniendo un valor superior al finalizarlo (0.91). Estos datos sugieren que, en efecto, el aumento de la DBO parece estar estrechamente relacionado al crecimiento algal.



9.5. Resultados y análisis de coliformes fecales

Para el caso de los resultados obtenidos en la sección de los coliformes fecales se obtuvieron resultados consistentes en todas las muestras analizadas en ambos puntos de muestreo del proceso (tanto en el influente como en el efluente) (Tabla 18).

Tabla 18. Resultados iniciales y finales de coliformes fecales

Parámetros establecidos en la NOM-003-SEMARNAT-1997		RESULTADOS Coliformes fecales UFC/100ml	
Contacto directo	Contacto indirecto	Mediciones iniciales	Mediciones finales
240 NMP/100	1,000 NMP/100	1x10 ⁵	Ausentes
		Ausentes	Ausentes
		1x10 ⁵	Ausentes
		Ausentes	Ausentes
		2x10 ⁵	1x10 ³
		2x10 ⁵	1x10 ³
		1x10 ⁵	Ausentes
		Ausentes	Ausentes
		4x10 ⁵	Ausentes
		3x10 ⁵	Ausentes



Ilustración 11. Proceso de filtración de coliformes

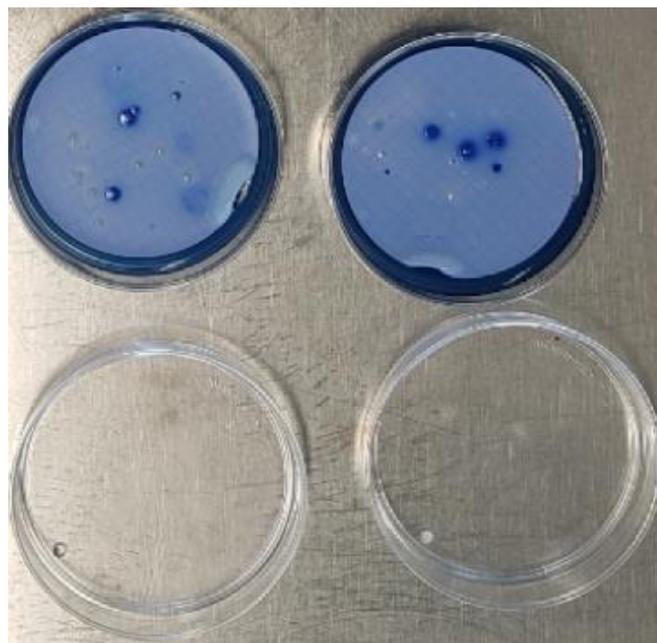


Ilustración 12. Cuantificación final de coliformes



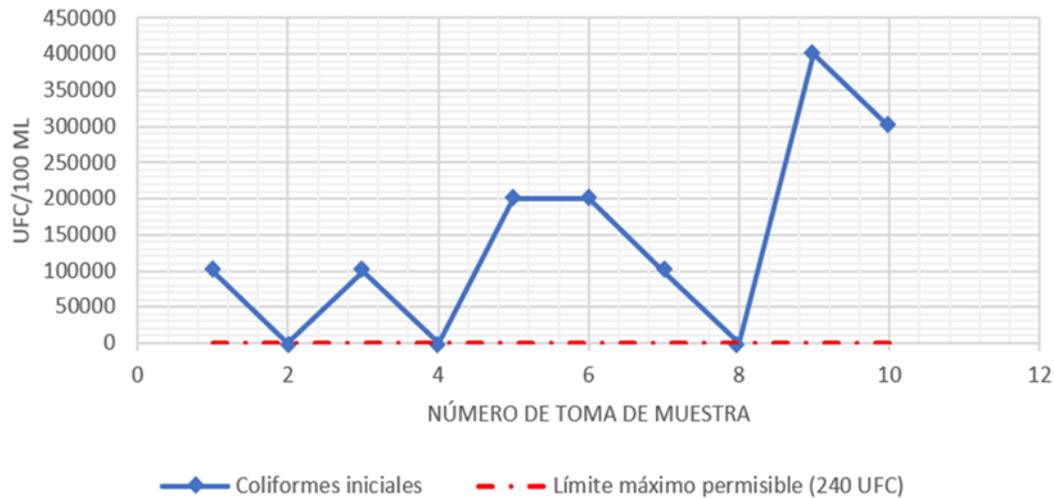
Ilustración 13. Cuantificación inicial de coliformes

Parte del procedimiento es mostrado, en concreto, la filtración de la muestra tomada del reactor a través de los filtros donde se espera cuantificar a las coliformes (Ilustración 11)

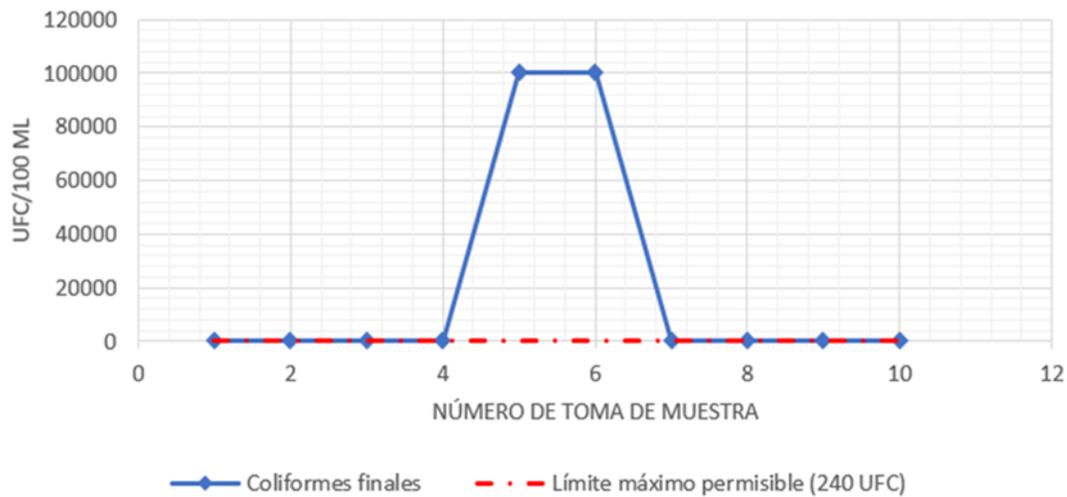
Es posible ver una diferencia a simple vista dentro de las cajas de Petri (Ilustración 12 y 13). Siguiendo el procedimiento estándar y, en algunos casos, fue posible ver a las colonias de las coliformes fecales (Ilustración 12).

A continuación, se muestra de manera gráfica el comportamiento de los datos obtenidos para las coliformes fecales antes y después del tratamiento (Gráfica 5).

VARIACIONES DE RESULTADOS DE COLIFORMES INICIALES



VARIACIONES DE RESULTADOS DE COLIFORMES FINALES



Gráfica 5. Comportamiento del parámetro Coliformes Fecales antes y después del tratamiento mediante el cultivo de microalgas

Algunos de los parámetros estadísticos de interés obtenidos a partir de los datos de estas muestras son los siguientes:

**Mediciones de Coliformes fecales iniciales**

Mínimo	1º cuartil	Mediana	Promedio	3º cuartil	Máximo	Desviación estándar
0	2.5×10^4	1×10^5	1.4×10^5	2×10^5	4×10^5	134,989,7

Mediciones de Coliformes fecales finales

Mínimo	1º cuartil	Mediana	Promedio	3º cuartil	Máximo	Desviación estándar
0	0	0	2×10^2	0	1×10^3	42,163.7

Prueba de Wilcoxon en coliformes fecales

Datos iniciales	Datos finales
100000	0
0	0
100000	0
0	0
200000	1×10^3
200000	1×10^3
100000	0
0	0
400000	0
300000	0



Utilizando el Software de RStudio

```
100ilcox.test(Datos$`Coliformes iniciales`, Datos$`Coliformes finales`, alternative = "two.sided",  
mu=0, paired=TRUE)
```

V = 28, p-value = 0.01788

```
median(Datos$`Coliformes iniciales`, na.rm=TRUE)
```

1e+05

```
median(Datos$`Coliformes finales`, na.rm=TRUE)
```

0

De acuerdo con los datos obtenidos y después de realizar la prueba de Wilcoxon, se concluye que existe una diferencia estadísticamente significativa después de aplicar el tratamiento tomando en cuenta de que el valor de $p = 0.01788$, el hecho de que la mediana sea mayor al iniciar el tratamiento indica que existe una disminución en los valores de coliformes al finalizar el tratamiento.

Los resultados obtenidos en la sección de las coliformes fecales mostraron un claro patrón en cuanto a la eliminación o fuerte reducción de estos organismos siendo que en el 80% de los casos se logró una reducción del 100% por debajo del límite de detección del método (comparando los datos iniciales y los datos finales) y en el 20% restante se obtuvo una reducción del 50% (Histograma 5). De acuerdo con Maynard *et al.* (1999), la remoción bacteriana en cuerpos de agua residual tratados en lagunas terciarias es un proceso que se encuentra mediado por múltiples factores (físicos, químicos y biológicos) siendo la temperatura un factor que se ha posicionado como uno de los principales mediadores del proceso. Así, se ha observado que a una mayor temperatura se logra un mayor porcentaje de remoción en todos los grupos de coliformes, sin embargo, aún se desconoce si es una relación directa o indirecta que puede estar ligada a otra causa.

Del mismo modo, la existencia de toxinas algales sigue siendo centro de debate. De acuerdo con Mezriouri *et al.* (1994) sus resultados mostraron que algunas cyanophytas secretan sustancias que pueden resultar tóxicas para organismos como *E. coli* y *Vibrio cholerae*, sin



embargo, poco ha sido el trabajo para investigar exactamente a la toxina y su mecanismo de acción. En el trabajo de Toms *et al.* (1995) obtuvieron resultados en los que la aseveración anterior se ve cuestionada. Encontraron que las bacterias puestas en tanques morían más rápidamente a comparación de aquellas que se encontraban en tanques con microalgas. Aunque lo anterior se puede deber meramente a un efecto de la luz ultravioleta impactado directamente (en el caso del tanque sin microalgas) o indirectamente (en el caso del tanque con las microalgas) no existe una evidencia directa de la producción de toxinas en este caso, aunque existe la hipótesis de que este comportamiento se vea restringido a un cierto grupo de microalgas y no a las algas en general. Ansa (2013) encontró que en condiciones de oscuridad las algas pueden producir sustancias que resultan tóxicas para las coliformes, pero, de nuevo, sugiere que investigaciones posteriores son necesarias para determinar el tipo de sustancia y el mecanismo bajo el cual opera.

De acuerdo con Ansa (2013), uno de los factores claves que se ven involucrados en la reducción de las coliformes fecales es la presencia de la clorofila "A" en condiciones de luz. En su trabajo encontró que a una concentración de 10 ± 2 mg/L se obtiene una remoción óptima además de que existen variables que afectan la concentración de la clorofila como la cantidad de carga orgánica en las aguas residuales. Del mismo modo, el tiempo de retención se vuelve un factor importante en la inactivación de las coliformes. Algunos autores como Oragui *et al.* (1987) encontraron que a un mayor tiempo de retención se obtenían valores más altos de otros parámetros como la temperatura y el pH, siendo el último uno de los parámetros claves en la eliminación de las coliformes de acuerdo con el trabajo realizado por Parhad & Rao (1974) en el cual mantuvieron dos botellas con agua residual estéril inoculada con *E. coli* y *Chlorella*, mientras a una botella se le fue aplicado un tratamiento con un buffer a pH de 7.5 a la otra botella se le dejó sin tratamiento. Bajo las mismas condiciones de luz y temperatura se observó que la botella a la que no se le aplicó el tratamiento tuvo un aumento en el pH hasta 10.4 logrando una remoción del 100% mientras que en la botella a la que se le aplicó el buffer no se observó remoción.



9.6. Porcentaje de aumento/disminución en los parámetros

Al comparar las medias iniciales con las finales hay un claro patrón de disminución en los parámetros de grasas y aceites y coliformes fecales. Para el caso de la DBO₅ y SST un aumento considerable y para los huevos de helminto una ausencia en ambas etapas del muestreo (tanto inicial como final) (Tabla 19).

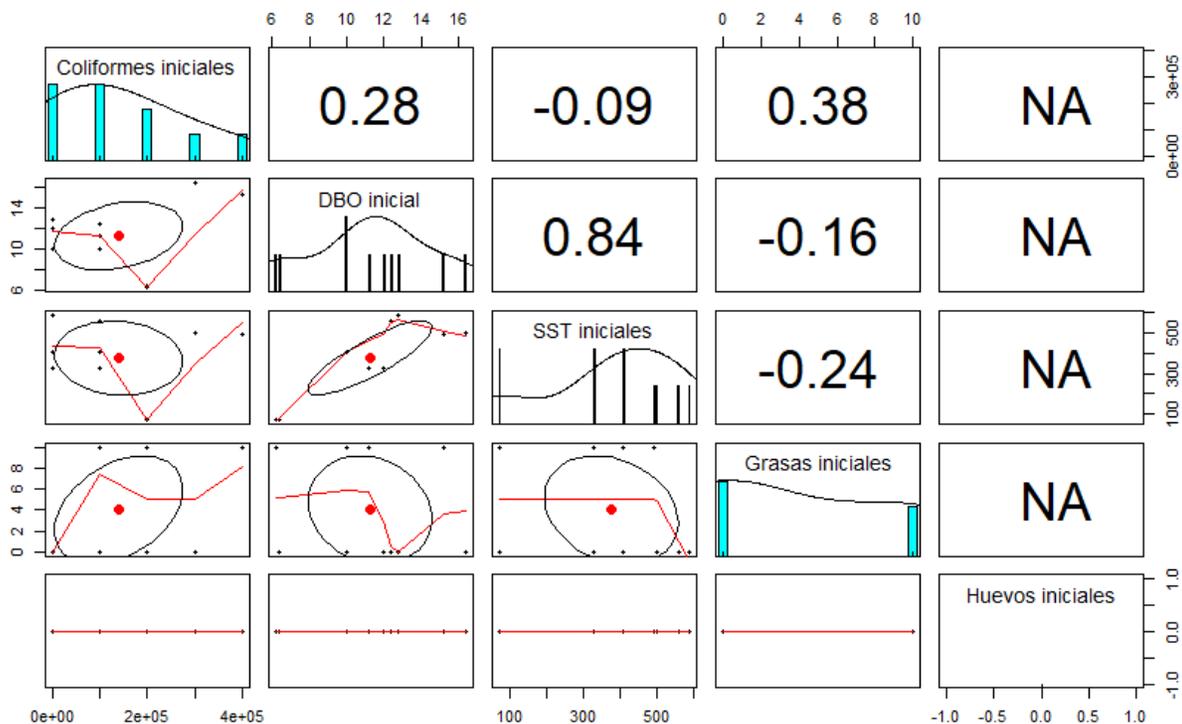
Tabla 19. Porcentaje de aumento o disminución en los parámetros

	Porcentaje de aumento/disminución en los parámetros				
	Grasas y aceites	SST	Huevos de helminto	DBO ₅	Coliformes fecales
Media inicial	4	376.5	0	11.26	1.4 x 10 ⁵
Media final	0	624	0	17.08	2 x 10 ²
Media de aumento/disminución	-100%	+65.63%	-	+51.68%	-85.71%

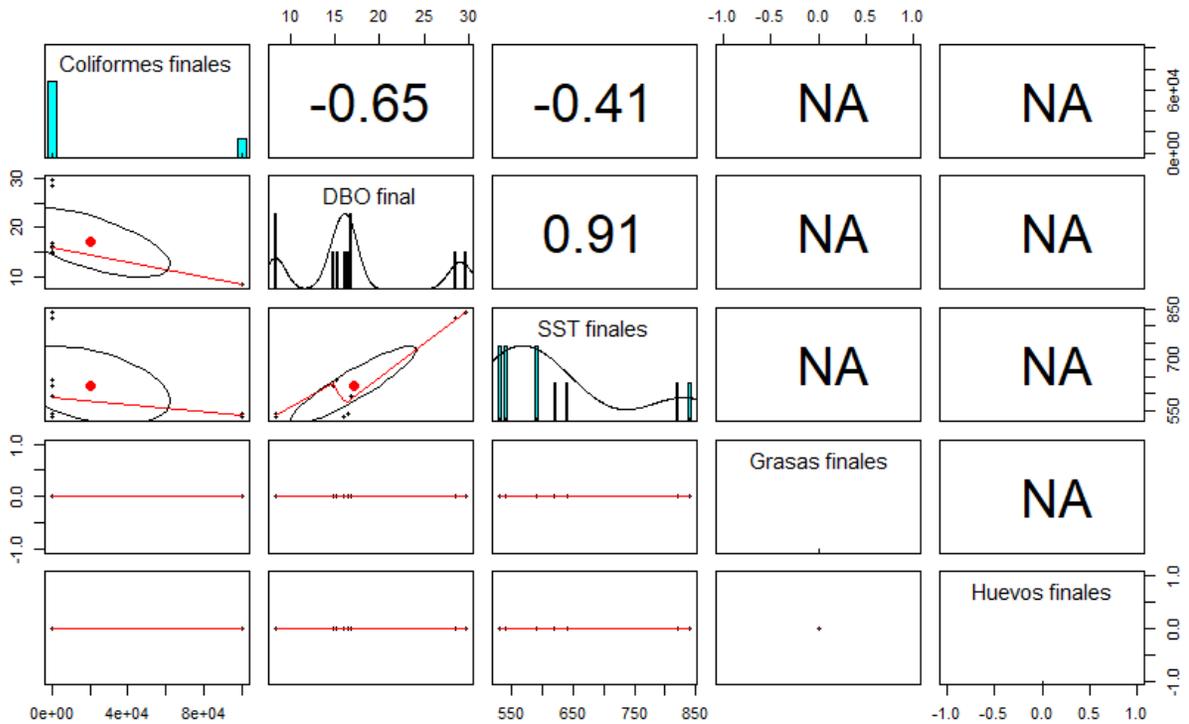
9.7. Análisis de correlación entre parámetros

Para el análisis de correlación, de la misma forma, se utilizó el software estadístico R con el valor de correlación de Pearson y gráficos que muestran la posible relación que puede haber entre parámetros.

A continuación, se muestran las gráficas obtenidas para cada uno de los parámetros relacionados los unos con otros (área inferior izquierda) así como su coeficiente de correlación (área superior derecha) para los datos obtenidos de manera inicial y de manera final respectivamente (Gráfica 6 y 7).



Gráfica 6. Coeficiente de correlación entre datos pareados iniciales



Gráfica 7. Coeficiente de correlación entre datos pareados finales

El valor de r obtenido para los parámetros previamente descritos muestra que no existe una correlación clara entre los mismos a excepción de los parámetros de SST y DBO, siendo así que el valor obtenido para estos dos parámetros fue de 0.84 en el caso de las mediciones iniciales y de 0.91 para las mediciones finales.

En el caso de la prueba de huevos de helminto (tanto iniciales como finales) la obtención de r se vio imposibilitada debido a su ausencia en cada uno de los puntos de la toma de muestra, del mismo modo lo hicieron los valores correspondientes a las grasas y aceites finales.



10. CONCLUSIONES

De acuerdo con la NOM-003-SEMARNAT-1997 el efluente obtenido después del tratamiento biológico mediante el cultivo de microalgas en el modelo Atzintli cumple con los límites en cuatro de los cinco parámetros establecidos por dicha normatividad para su reúso en servicios al público con contacto indirecto u ocasional: Coliformes fecales, huevos de helminto, grasas y aceites y DBO₅. El único parámetro que supera los límites establecidos para su reutilización con contacto indirecto son los SST, lo cual se debe a la producción de biomasa microalgal; una vez cosechada la biomasa se espera que el efluente cumpla en su totalidad con los parámetros establecidos para tal fin.

Para su reúso en servicios al público con contacto directo, fue posible determinar que sólo en 2 de 10 determinaciones, los coliformes fecales se cuantificaron en 1×10^3 UFC/100 mL, para las 8 determinaciones restantes éstos indicadores bacteriológicos estuvieron ausentes. Lo cual indica que el 80 % de las muestras cumplió con lo establecido para su reutilización con contacto directo. Cabe mencionar que la concentración inicial para éste parámetro se cuantificó en el orden de 10^5 UFC/100 mL, lo que indica que el sistema permite una remoción de 2 unidades logarítmicas. Para el caso del parámetro de huevos de helminto, desde el influente se observó ausencia de dichos organismos, de tal manera que durante el desarrollo de la investigación el efluente cumplió 100% con la normatividad respecto al contenido de huevos de helminto. El mismo comportamiento se observó para el parámetro de grasas y aceites. En cuanto a la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), sólo 2 de las 10 muestras analizadas superaron la normatividad para el reúso con contacto directo (valores de 29.6 y 28.4 mg/L), lo cual es atribuible a la producción de biomasa. El valor máximo de producción de SST se registró en 840 mg/L debido a la producción de biomasa.



11. RECOMENDACIONES

Además de los parámetros descritos en la NOM-003-SEMARNAT-1997 resulta necesario considerar parámetros extras para determinar los factores que influyen en el funcionamiento del tratamiento. Así, se considera importante tomar en cuenta el pH, la temperatura, la estacionalidad, así como los nutrientes (nitrógeno y fósforo) presentes y su variación a lo largo del tratamiento. De tal manera que además de corroborar el cumplimiento de la normatividad para reúso sea posible comprobar que el tratamiento a escala piloto cumple con los requerimientos de un efluente con calidad terciaria.

De acuerdo con los resultados obtenidos, sería conveniente probar el tratamiento del agua residual mediante el uso de microalgas, utilizando diferentes calidades de agua que alimenten el modelo, de tal manera que la calidad del agua del influente se acercara más a un influente de aguas residuales municipales.

Debido a las condiciones de la pandemia, no fue posible realizar el número de análisis que se planteó originalmente para éste trabajo. Debido a ello, se recomienda que, de ser posible, se lleven a cabo un mayor número de análisis, de tal manera que se abarque un intervalo de tiempo de funcionamiento del modelo en el que se consideren las condiciones climáticas que prevalecen a lo largo del año, lo cual aportaría más información para escalar las condiciones del modelo.



12. REFERENCIAS

1. Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A.A., Ibraheem, I.B.M., 2012. Microalgae and wastewater treatment. *Saudi. J. Bio. Sci.* 19 (3), 257–275.
2. Agudelo-Lopez, S., Gómez-Rodríguez, L., Coronado, X., Orozco, A., Valencia-Gutierrez, C. A., Restrepo-Betancur, L. F., Galvis-Gómez, L. A., & Botero-Palacio, L. E. (2008). Prevalencia de parasitosis intestinales y factores asociados en un corregimiento de la Costa Atlántica Colombiana. *Revista de Salud Publica*, 10(4), 633–642. <https://doi.org/10.1590/S0124-00642008000400013>
3. Ansa, E. D. O. (2013). The removal of faecal coliforms in waste stabilization pond systems and eutrophic lakes. In *The removal of faecal coliforms in waste stabilization pond systems and eutrophic lakes* (Issue September). <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=lbh&AN=20133159228&login.asp?custid=magn1307&site=ehost-live&custid=magn1307>
4. Apella, M., & Araujo, P. (2019). Microbiología de agua. Conceptos básicos. *Solar Safe Water*, 13–30. <https://doi.org/10.31819/9783954871568-002>
5. Arreguín-Cortés, López-Pérez & Cervantes-Jaimes. Los retos del agua en México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-02-11>
6. Barceló-Villalobos, M., Fernández-del Olmo, P., Guzmán, J. L., Fernández-Sevilla, J. M., & Acién Fernández, F. G. (2019). Evaluation of photosynthetic light integration by microalgae in a pilot-scale raceway reactor. *Bioresource Technology*, 280(February), 404–411. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.02.032>
7. Barlandas, J. (2018). *Construcción y puesta en marcha de reactor de alta tasa en planta piloto de tratamiento de agua residual con microalgas*. Universidad Nacional Autónoma de México.
8. Bernabeu, A., Pérez, O., Gómez, D., Morenilla, J., Amores, S., Bernácer, I., & Esteban, J. (2002).



Identificación de huevos por helmintos en aguas residuales. 35–42.
http://www.bibliotecagbs.com/archivos/ta_221.pdf

9. Bonilla M., S. (2011). *Estudios de calidad del agua en la presa de Valle de Bravo. Proyecto terminal in extenso.pdf.* UNAM.
10. Campos, M. C., Beltrán, M., Fuentes, N., & Moreno, G. (2018). Huevos de helmintos como indicadores de contaminación de origen fecal en aguas de riego agrícola, biosólidos, suelos y pastos. *Biomedica*, 38(1), 42–53. <https://doi.org/10.7705/biomedica.v38i0.3352>
11. Cázares, J. (2014). *Calidad del agua de reuso: Generación-Almacenamiento-Distribución, posterior a la renovación de la planta de tratamiento "Cerro del Agua."* Universidad Nacional Autónoma de México.
12. CENTA. (2008). Manual de depuración de aguas residuales urbanas. *Centa, Secretariado de Alianza Por El Agua, Ecología y Desarrollo.*, 264. <https://doi.org/Z-2802/08>
13. Chavez, A., Jimenez, B., & Maya, C. (2004). Particle size distribution as a useful tool for microbial detection. *Water Science and Technology*, 50(2), 179–186. <https://doi.org/10.2166/wst.2004.0119>
14. Cho, D. H., Ramanan, R., Heo, J., Lee, J., Kim, B. H., Oh, H. M., & Kim, H. S. (2015). Enhancing microalgal biomass productivity by engineering a microalgal-bacterial community. *Bioresource Technology*, 175, 578–585. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.159>
15. Cole, J. J. (1982). Interactions between bacteria and algae in aquatic ecosystems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 13, 291–314. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.13.110182.001451>
16. CONAGUA. (2015). Estadísticas del Agua en México. In SEMARNAT. <https://doi.org/10.1192/bjp.111.479.1009-a>
17. Crites, R., & Tchobanoglous, G. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas*



poblaciones. McGraw-Hill.

18. Croft, M. T., Lawrence, A. D., Raux-Deery, E., Warren, J. ., & Smith, A. . (2005). Algae acquire vitamin B12 through a symbiotic relationship with bacteria. *Nature*, 438, 90–93.
19. Davis, M. L. & Cornwell, D. (2008). *Introduction to Environmental Engineering Fifth Edition*.
20. EPA. (1999). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. *Desinfección Con Luz Ultravioleta*. http://water.epa.gov/aboutow/owm/upload/2004_07_07_septics_cs-99-064.pdf
21. González-Barceló, Ó. (2013). *Propuesta Técnica para recuperación de la planta de tratamiento de aguas residuales de la facultad de ciencias políticas y sociales de la UNAM*
22. Hernández-Pérez, A., & Labbé, J. I. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 49(2), 157–173. <https://doi.org/10.4067/S0718-19572014000200001>
23. Hernandez Criado, J. C., Cruz Cerón, G., & Betancur, J. F. (2018). Microalgas como alternativas para el tratamiento de aguas residuales y la generación de biocombustibles. *Globalización y Desarrollo Sostenible*, February, 278–290. <https://doi.org/10.31338/uw.9788323535102.pp.278-290>
24. Hernández, F. (2016). *Analisis De Ciclo De Vida Como Herramienta De Decisión Para El Tratamiento De Agua Residual En America Latina Y El Caribe* [Universidad Nacional Autónoma de México]. file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/Tesis.pdf
25. Hernández, I., & Martínez, P. (1996). *Detección del cloro residual en el agua para el control de enfermedades gastrointestinales en la comunidad de San Luis Tlaxialtemalco en México, D.F..pdf*. Universidad Nacional Autónoma de México.
26. Ingraham, J., & Ingraham, C. (2015). Introducción a la microbiología. In *Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>



27. Jimenez, B. M., & C. Galvan, M. (2007). Helminth ova control in wastewater and sludge for advanced and conventional sanitation. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 56, 147–155.
28. López, I., Vásquez, J., & Álvarez, V. de P. (2016). Remoción biológica de nutrientes en aguas residuales urbanas con fotobiorreactores utilizando microalgas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 17, 3569–3580.
29. Mara, D. D., Mills, S. W., Pearson, H. W., & Alabaster, G. P. (1992). Waste Stabilization Ponds: A Viable Alternative for Small Community Treatment Systems. *Water and Environment Journal*, 6(3), 72–78. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.1992.tb00740.x>
30. Markou, G., Georgakakis, D., 2011. *Cultivation of filamentous cyanobacteria (blue-green algae) in agro-industrial wastes and wastewaters: a review*. *Appl. Energy* 88, 3389–3401.
31. Maynard, H. E., Ouki, S. K., & Williams, S. C. (1999). Tertiary lagoons: A review of removal mechanisms and performance. *Water Research*, 33(1), 1–13. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00198-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00198-5)
32. Menéndez Gutiérrez, C., & Pérez Olmo, J. (2007). *Procesos para el tratamiento biológico de aguas residuales industriales*.
33. Metcalf & Eddy. (1995). *Ingeniería de aguas residuales. Volumen 1: Tratamiento, vertido y reutilización*.
34. Mezriouri, N., Oudra, B., Oufdou, K., Hassani, L., Loudiki, M., & Darley, J. (1994). Effect of microalgae growing on wastewater batch culture on *Escherichia coli* and *Vibrio cholerae* survival. *Wat. Sci. Technol.*, 30(8), 295–302.
35. Muñoz, R., & Guieysse, B. (2006). Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: A review. *Water Research*, 40(15), 2799–2815. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.06.011>



36. Noyola A., Morgan J., G. L. (2013). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. In *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales*. <http://es.slideshare.net/EdwinMamaniVilcapaza/seleccion-de-tecnologias-para-el-tratamiento-de-aguas-residuales-municipales>
37. OMS. (2006). Guías para la calidad del agua potable. *WHO Chronicle*, 1(3), 1–408.
38. ONU (2017). Las Aguas residuales, El recurso desaprovechado. WWAP, Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas.
39. Oragui, J., Curtis, T., Silva, S., & Mara, D. (1987). The removal of excreted bacteria and viruses in deep waste stabilisation ponds. *Wat. Sci. Technol.*, 19, 567–573.
40. Ortiz Aguilar, A. E. (2015). *Biodepuración de grasas y aceites de efluentes de industria chocolatera con la microalga Chlorella vulgaris empacada en un sistema de flujo continuo*.
41. Ortiz, D. (2011). *Efecto del riego con agua residual sobre la eficiencia de la simbiosis Sinorhizobium sp.-alfalfa (Medicago sativa)*. Universidad Nacional Autónoma de México.
42. Ortiz, D. (2014). *Manual de Tratamientos Biológicos de Aguas Residuales para poblaciones medianas de la Región Sur del Ecuador*. 1–388.
file:///C:/Users/COMPAQ/Downloads/TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS DE AGUAS RESIDUALES PARA POBLACIONES.pdf
43. Oswald, A. W. J., Gotaas, H. B., Golueke, C. G., Kellen, W. R., Gloyna, E. F., Sewage, S., Wastes, I., Apr, N., Oswald, J., & Kellen, R. (1957). Algae in Waste Treatment [with Discussion]. *Sewage and Industrial Wastes*, 29(4), 437–457.
44. Pacheco, S. (2011). *Propuesta para Aumentar la Capacidad de la planta de tratamiento de aguas residuales de ciudad universitaria* [Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/457/A-4.pdf?sequence=4>



45. Parhad, N., & Rao, N. (1974). Effect of pH on survival of *E. coli*. *Wat. Pollut. Contr.*, 46(5), 149–161.
46. Pérez, J., Ortega, H., Ramírez, C., Flores, H., Sánchez, E., Can, A., & Mancilla, O. (2018). Concentración de nitrato, fosfato y boro en el agua residual para la irrigación de cultivos en Valle del Mezquital, Hidalgo Nitrate, phosphate and boron content in wastewater for crop irrigation in. *Nova Scientia*, 10(2), 97–119.
47. Puerta, S. M. R. (2010). Evaluación de microalgas y de bacterias asociadas productoras de exoenzimas para tratamiento de aguas residuales de una extractora de aceite de palma. *Trabajo de Grado - UNIVERSIDAD DEL ZULIA*, 1–154.
48. Quiroz-Arita, C., Blaylock, M. L., Gharagozloo, P. E., Bradley, T. H., Dempster, T., McGowen, J., & Davis, R. W. (2020). A dynamic thermal algal growth model for pilot-scale open-channel raceways. *Bioresource Technology Reports*, 10(February), 100405. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100405>
49. REMTAVARES. (2006). *Reactores biológicos secuenciales (SBR): una tecnología versátil para el tratamiento de aguas residuales industriales*. <https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2006/12/01/53336>
50. Rodríguez Fernández-Alba, A., Letón, P., Roberto, G., García, R., Dorado, M., Susana, V., Fernández, V., & Sanz García, J. M. (2006). *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. www.madrimasd.org
51. Russell, D. L. (2007). Practical wastewater treatment. In *Choice Reviews Online* (Vol. 44, Issue 06). <https://doi.org/10.5860/choice.44-3310>
52. Salazar, M. (2006). Aplicación e importancia de las microalgas en el tratamiento de aguas residuales. *ContactoS*, 59, 64–70.
53. Sánchez, Ó., Herzig, M., Peters, E., Márquez, R., & Zambrano, L. (2015). *Perspectivas sobre la*

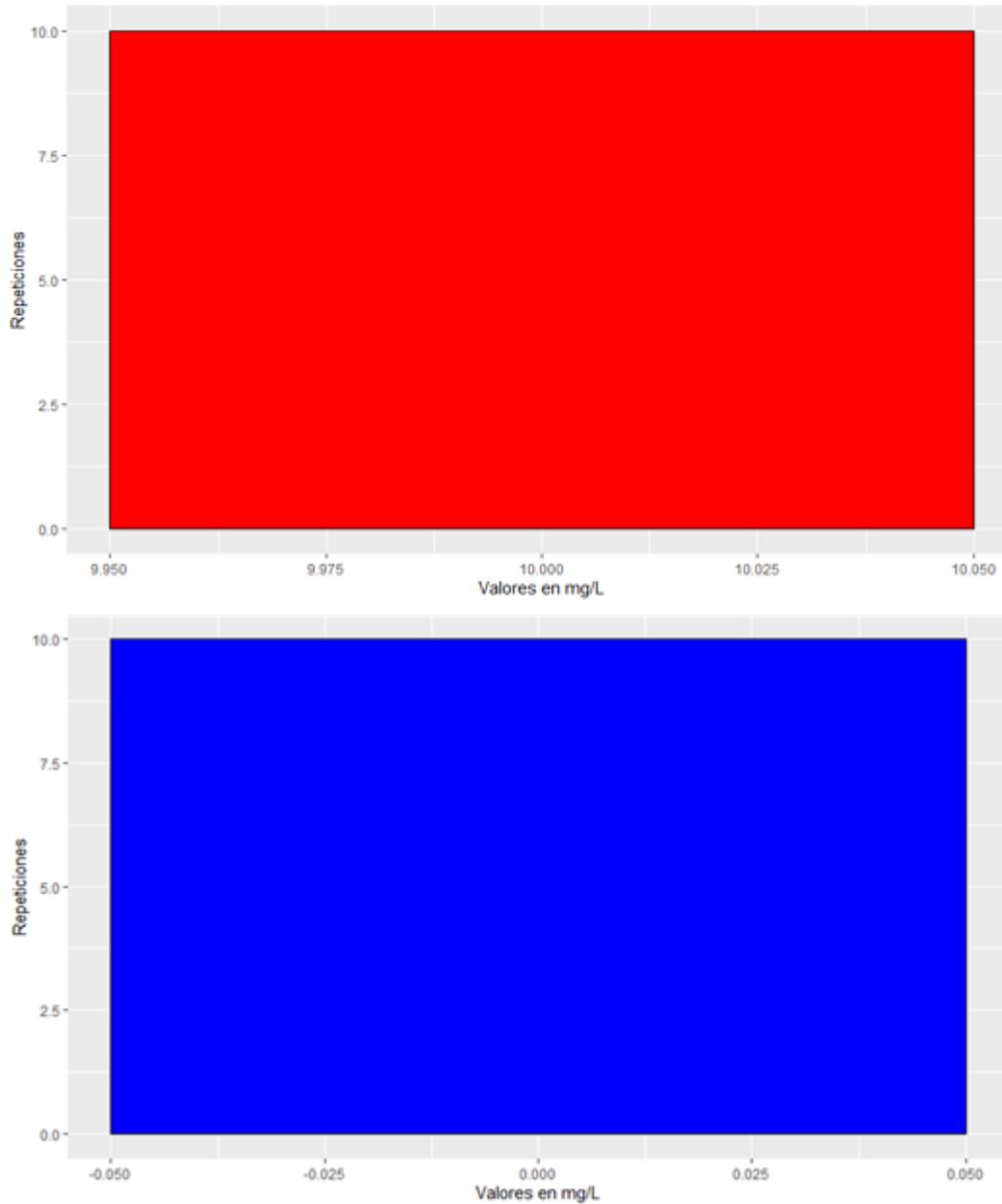


conservación de ecosistemas acuáticos en México.

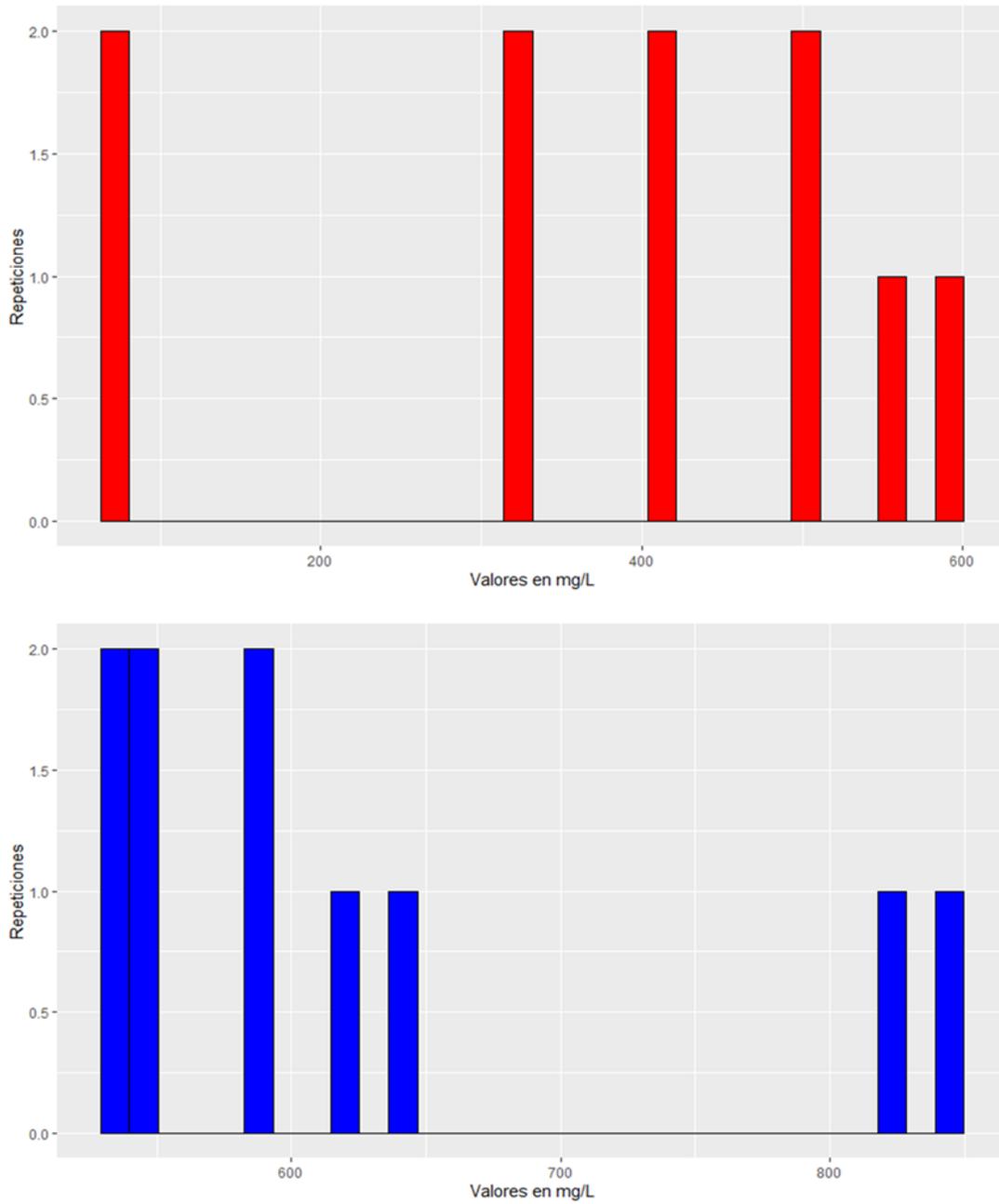
54. Toms, I., Owens, M., & Hall, J. (1995). Observations on the performance of polishing lagoons at a large regional works. In *Wat. Pollut. Contr.*
55. Torres-Lozada, P., Vásquez-Sarria, N., Pérez-Vidal, A., Madera-Parra, C. A., & Rodríguez-Victoria, J. A. (2011). Alternativas de tratamiento biológico aerobio para el agua residual doméstica del municipio de Cali, Colombia. *Afinidad*, 68(555), 381–388.
56. Valeriano González, M. T., Orta Ledesma, M. T., Velasquez-Orta, S. B., & Monje Ramírez, I. (2020). Harvesting microalgae using ozone-air flotation for recovery of biomass, lipids, carbohydrates, and proteins. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 0(0), 1–18. <https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1725144>
57. Vivanco, E., Yaya, R., & Chamy, R. (2016). *Manual técnico sobre tecnologías biológicas anaerobias aplicadas al tratamiento de aguas y residuos industriales*. http://www.cytcd.org/sites/default/files/tratamiento_anaerobio_de_aguas_residuales.pdf
58. Zalakain, G., & Manterola, G. (2011). *Procesos avanzados de biomasa fija sobre lecho móvil para el tratamiento de aguas residuales en la industria farmacéutica* (pp. 98–101).

13. ANEXOS

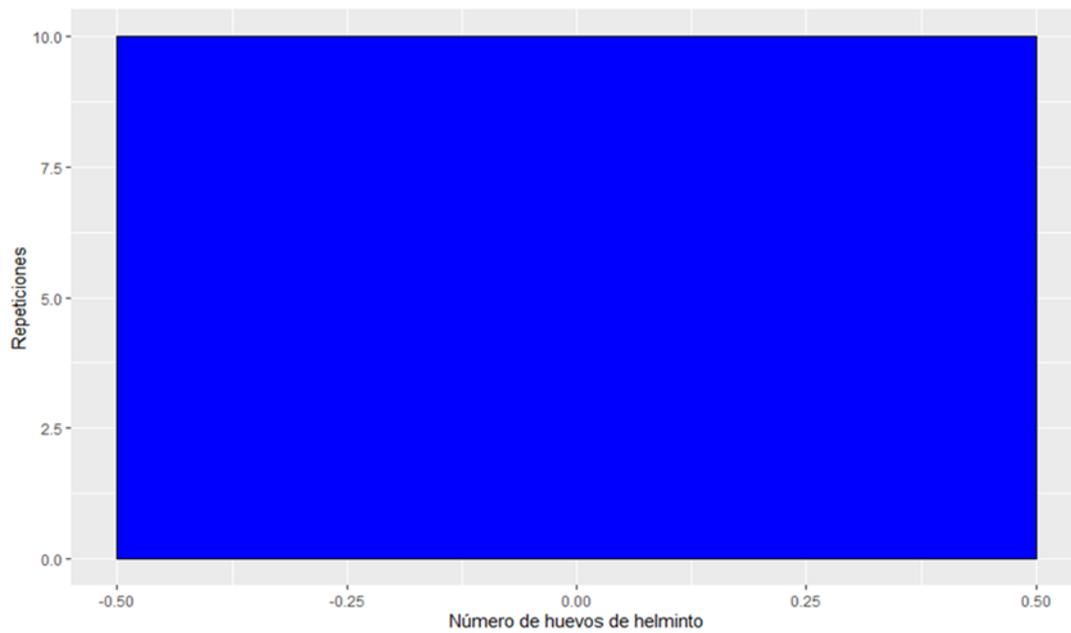
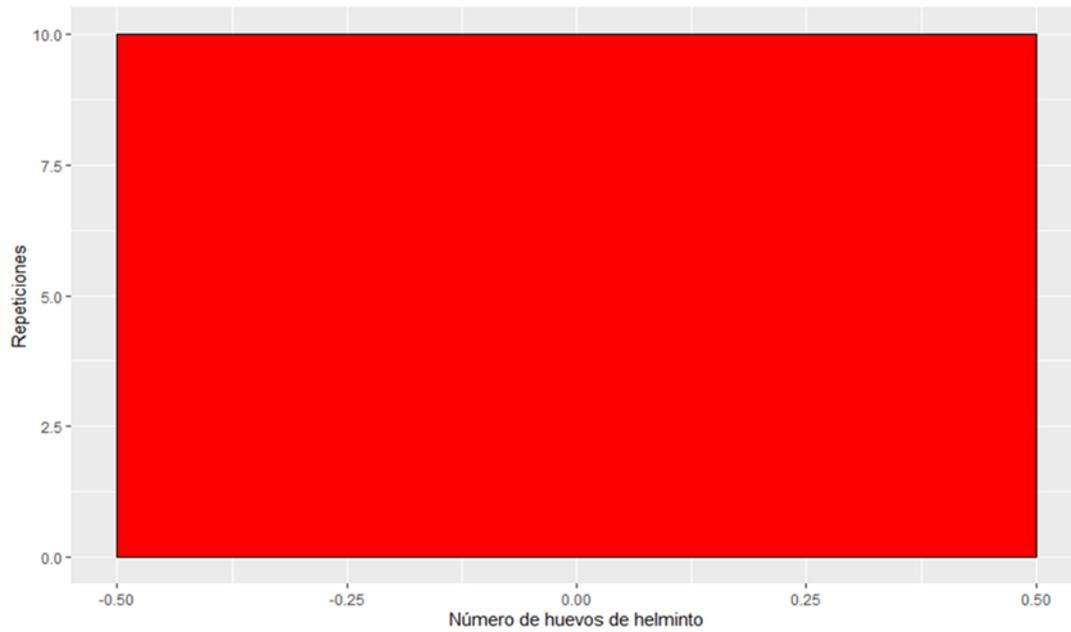
13.1. HISTOGRAMAS



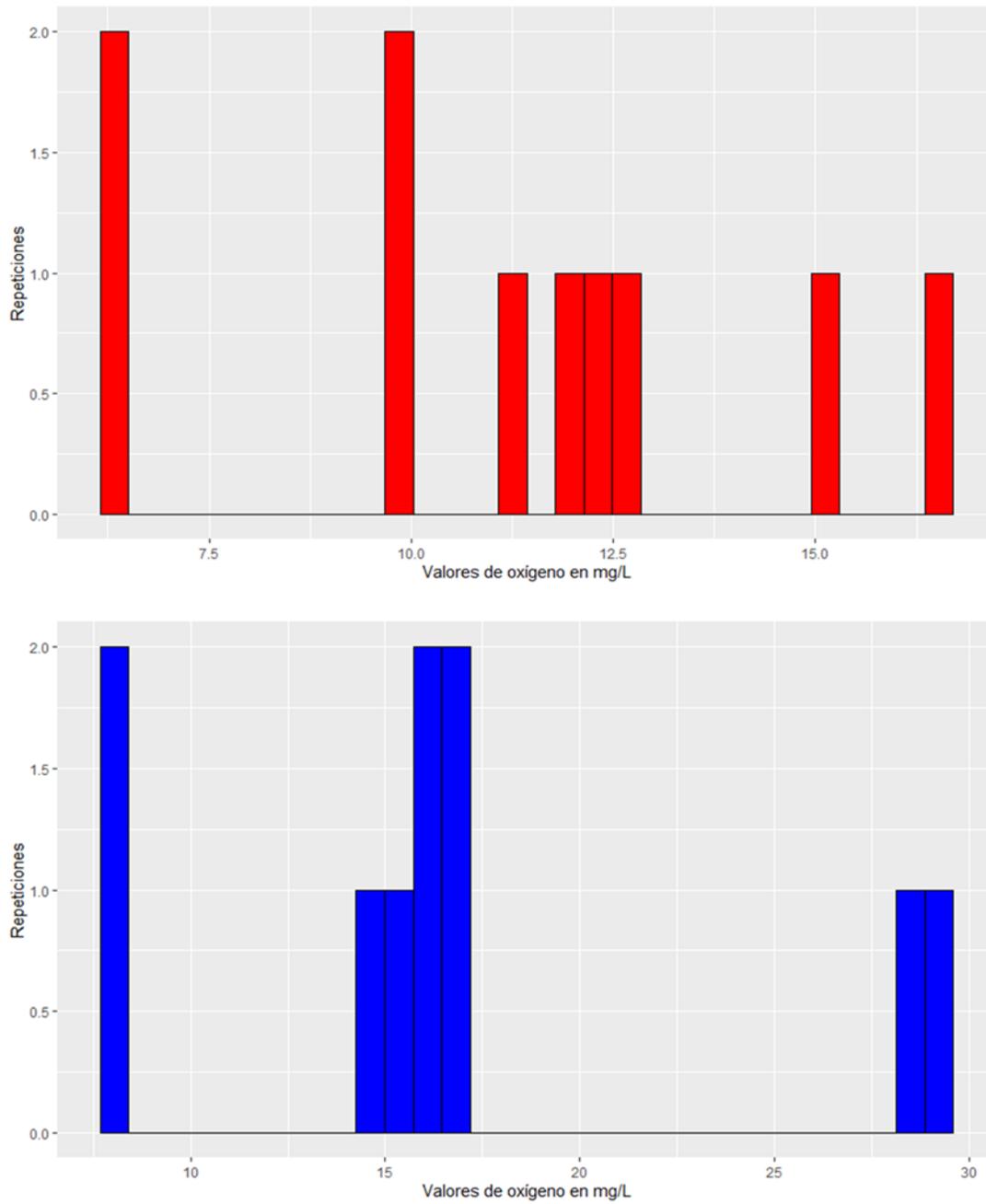
Histograma 1. Frecuencia de resultados de grasas y aceites antes y después del tratamiento mediante cultivo de microalgas



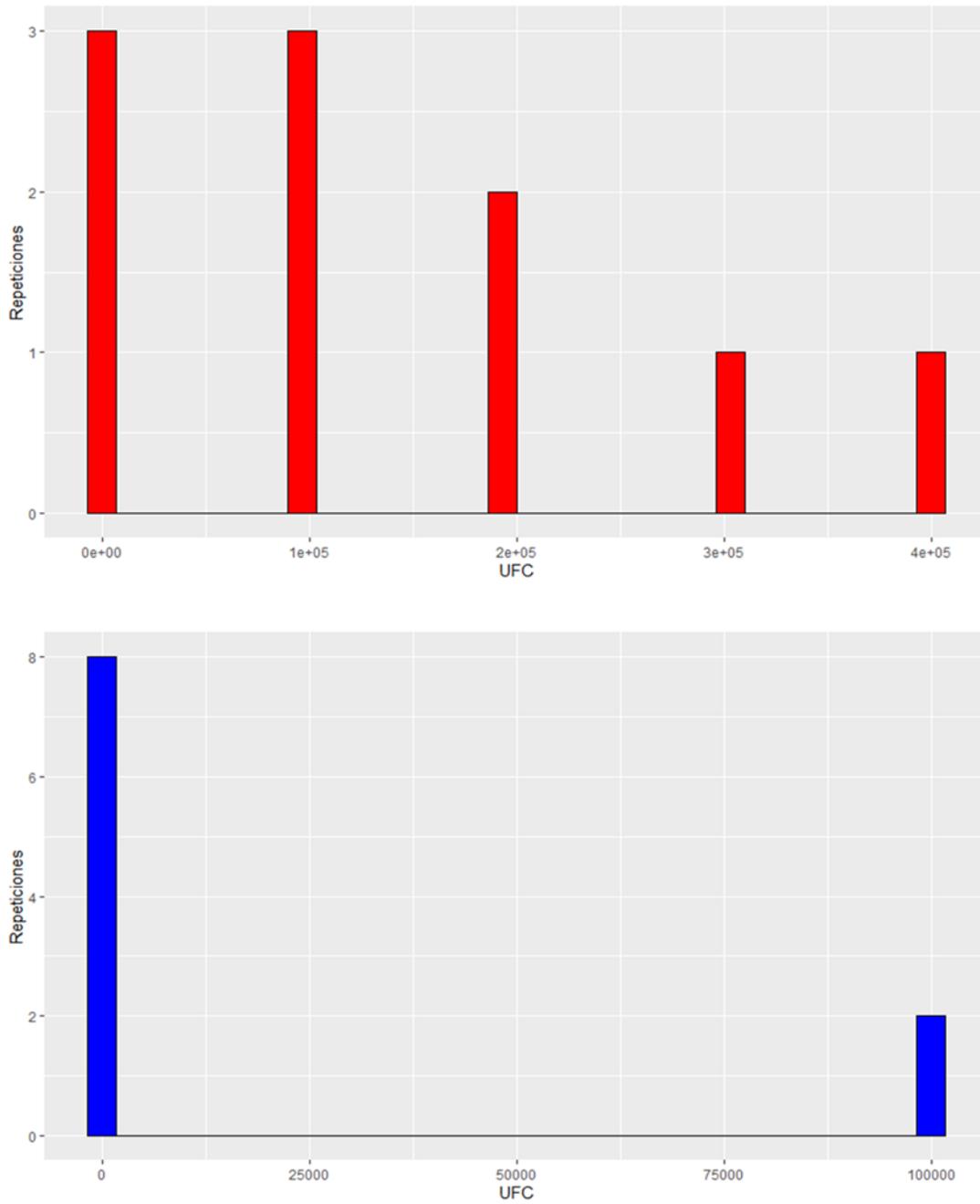
Histograma 2. Frecuencia de resultados de Sólidos Suspendidos Totales antes y después del tratamiento mediante cultivo de microalgas



Histograma 3. Frecuencia de resultados de huevos de helminto antes y después del tratamiento mediante cultivo de microalgas



Histograma 4. Frecuencia de resultados de DBO antes y después del tratamiento mediante cultivo de microalgas



Histograma 5. Frecuencia de resultados de Coliformes Fecales antes y después del tratamiento mediante cultivo de microalgas



ANEXO

NOM-003-SEMARNAT-1997

NORMA Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público.

Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca.

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-003-ECOL-1997, QUE ESTABLECE LOS LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES PARA LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS QUE SE REUSEN EN SERVICIOS AL PUBLICO.

JULIA CARABIAS LILLO, Secretaria de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, con fundamento en lo dispuesto en los artículos 32 Bis fracciones I, IV y V de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal; 5o. fracciones V y XI, 6o., 36, 37, 37 Bis, 117, 118 fracción I, 119, 121, 126, 171 y 173 la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente; 118 fracción III y 122 de la Ley General de Salud; 38 fracción II, 40 fracción X, 41, 45, 46 y 47 fracciones III y IV de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, y

CONSIDERANDO

Que en cumplimiento a lo dispuesto en la fracción I del artículo 47 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, el Proyecto de Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público, se publicó en el **Diario Oficial de la Federación** el 14 de enero de 1998, a fin de que los interesados, en un plazo de 60 días naturales, presentaran sus comentarios al Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Protección Ambiental, sito en avenida Revolución 1425, mezzanine planta alta, colonia Tlacopac, Delegación Alvaro Obregón, código postal 01040, de esta ciudad.

Que durante el plazo a que se refiere el considerando anterior y de conformidad con lo dispuesto en el artículo 45 del ordenamiento legal citado, estuvieron a disposición del público los documentos a que se refiere dicho precepto.

Que de acuerdo con lo que disponen las fracciones II y III del artículo 47 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, los comentarios presentados por los interesados fueron analizados en el seno del citado Comité, realizándose las modificaciones procedentes a dicha Norma; las respuestas a los comentarios de referencia fueron publicadas en el **Diario Oficial de la Federación** el 14 de agosto de 1998.

Que habiéndose cumplido el procedimiento establecido en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización para la elaboración de normas oficiales mexicanas, el Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Protección Ambiental, en sesión de fecha 22 de abril de 1998, aprobó la Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público, por lo que he tenido a bien expedir la siguiente

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-003-ECOL-1997, QUE ESTABLECE LOS LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES PARA LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS QUE SE REUSEN EN SERVICIOS AL PUBLICO

INDICE

1. Objetivo y campo de aplicación
2. Referencias
3. Definiciones
4. Especificaciones
5. Muestreo
6. Métodos de prueba
7. Grado de concordancia con normas y recomendaciones internacionales y con las normas mexicanas tomadas como base para su elaboración
8. Bibliografía
9. Observancia de esta Norma

1. Objetivo y campo de aplicación

Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios 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 reuso.

En el 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 reuso o entrega, incluyendo la conducción o transporte de la misma.

2. Referencias

Norma Mexicana NMX-AA-003

Aguas residuales-Muestreo, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 25 de marzo de 1980.

Norma Mexicana NMX-AA-005

Aguas-Determinación de grasas y aceites-Método de extracción Solhlet, publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 8 de agosto de 1980.

Norma Mexicana NMX-AA-006	Aguas-Determinación de materia flotante-Método visual con malla específica, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 5 de diciembre de 1973.
Norma Mexicana NMX-AA-028	Aguas-Determinación de demanda bioquímica de oxígeno.- Método de incubación por diluciones, publicada en Diario Oficial de la Federación el 6 de julio de 1981.
Norma Mexicana NMX-AA-034	Aguas-Determinación de sólidos en agua.- Método gravimétrico, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 3 de julio de 1981.
Norma Mexicana NMX-AA-42	Aguas-Determinación del número más probable de coliformes totales y fecales.- Método de tubos múltiples de fermentación, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 22 de junio de 1987.
Norma Mexicana NMX-AA-102-1987	Calidad del Agua-Detección y enumeración de organismos coliformes, organismos coliformes termotolerantes y <i>Escherichia coli</i> presuntiva.- Método de filtración en membrana, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de agosto de 1987.
Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996	Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de enero de 1997 y su aclaración, publicada en el citado órgano informativo el 30 de abril de 1997.

3. Definiciones

3.1 Aguas residuales

Las 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 ellas.

3.2 Aguas crudas

Son las aguas residuales sin tratamiento.

3.3 Aguas residuales tratadas

Son aquellas que mediante procesos individuales o combinados de tipo físicos, químicos, biológicos u otros, se han adecuado para hacerlas aptas para su reuso en servicios al público.

3.4 Contaminantes básicos

Son aquellos compuestos o parámetros que pueden ser removidos o estabilizados mediante procesos convencionales. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana sólo se consideran los siguientes: grasas y aceites, materia flotante, demanda bioquímica de oxígeno₅ y sólidos suspendidos totales.

3.5 Contaminantes patógenos y parasitarios

Son los microorganismos, quistes y huevos de parásitos que pueden estar presentes en las aguas residuales y que representan un riesgo a la salud humana, flora o fauna. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana sólo se consideran los coliformes fecales medidos como NMP o UFC/100 ml (número más probable o unidades formadoras de colonias por cada 100 mililitros) y los huevos de helminto medidos como h/l (huevos por litro).

3.6 Entidad pública

Los gobiernos de los estados, del Distrito Federal, y de los municipios, por sí o a través de sus organismos públicos que administren el agua.

3.7 Lago artificial recreativo

Es el vaso de formación artificial alimentado con aguas residuales tratadas con acceso al público para paseos en lancha, prácticas de remo y canotaje donde el usuario tenga contacto directo con el agua.

3.8 Lago artificial no recreativo

Es el vaso de formación artificial alimentado con aguas residuales tratadas que sirve únicamente de ornato, como lagos en campos de golf y parques a los que no tiene acceso el público.

3.9 Límite máximo permisible

Valor o rango asignado a un parámetro, que no debe ser excedido por el responsable del suministro de agua residual tratada.

3.10 Promedio mensual (P.M.)

Es el valor que resulta del promedio de los resultados de los análisis practicados a por lo menos dos muestras simples en un mes.

Para los coliformes fecales es la media geométrica; y para los huevos de helminto, demanda bioquímica de oxígeno₅, sólidos suspendidos totales, metales pesados y ánuos y grasas y aceites, es la media aritmética.

3.11 Reuso en servicios al público con contacto directo

Es el que se destina a actividades donde el público usuario esté expuesto directamente o en contacto físico. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana se consideran los siguientes reusos: llenado de lagos y canales artificiales recreativos con paseos en lancha, remo, canotaje y esquí; fuentes de ornato, lavado de vehículos, riego de parques y jardines.

3.12 Reuso en servicios al público con contacto indirecto u ocasional

Es el que se destina a actividades donde el público en general esté expuesto indirectamente o en contacto físico incidental y que su acceso es restringido, ya sea por barreras físicas o personal de vigilancia. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana se consideran los siguientes reusos: riego de jardines y camellones en autopistas, camellones en avenidas, fuentes de ornato, campos de golf, abastecimiento de hidrantes de sistemas contra incendio, lagos artificiales no recreativos, barreras hidráulicas de seguridad y panteones.

4. Especificaciones

4.1 Los límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales tratadas son los establecidos en la Tabla 1 de esta Norma Oficial Mexicana.

**TABLA 1
LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES**

TIPO DE REUSO	PROMEDIO MENSUAL				
	Coliformes fecales NMP/100 ml	Huevos de helminto (h/l)	Grasas y aceites mg/l	DBO5 mg/l	SST mg/l
SERVICIOS AL PUBLICO CON CONTACTO DIRECTO	240	1	15	20	20
SERVICIOS AL PUBLICO CON CONTACTO INDIRECTO U OCASIONAL	1,000	5	15	30	30

4.2 La materia flotante debe estar ausente en el agua residual tratada, de acuerdo al método de prueba establecido en la Norma Mexicana NMX-AA-006, referida en el punto 2 de esta Norma Oficial Mexicana.

4.3 El agua residual tratada reusada en servicios al público, no deberá contener concentraciones de metales pesados y cianuros mayores a los límites máximos permisibles establecidos en la columna que corresponde a embalses naturales y artificiales con uso en riego agrícola de la Tabla 3 de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, referida en el punto 2 de esta Norma.

4.4 Las entidades públicas responsables del tratamiento de las aguas residuales que reusen en servicios al público, tienen la obligación de realizar el monitoreo de las aguas tratadas en los términos de la presente Norma Oficial Mexicana y de conservar al menos durante los últimos tres años los registros de la información resultante del muestreo y análisis, al momento en que la información sea requerida por la autoridad competente.

5. Muestreo

Los responsables del tratamiento y reuso de las aguas residuales tratadas, tienen la obligación de realizar los muestreos como se establece en la Norma Mexicana NMX-AA-003, referida en el punto 2 de esta Norma Oficial Mexicana. La periodicidad y número de muestras será:

5.1 Para los coliformes fecales, materia flotante, demanda bioquímica de oxígeno₅, sólidos suspendidos totales y grasa y aceites, al menos 4 (cuatro) muestras simples tomadas en días representativos mensualmente.

5.2 Para los huevos de helminto, al menos 2 (dos) muestras compuestas tomadas en días representativos mensualmente.

5.3 Para los metales pesados y cianuros, al menos 2 (dos) muestras simples tomadas en días representativos anualmente.

6. Métodos de prueba

Para determinar los valores y concentraciones de los parámetros establecidos en esta Norma Oficial Mexicana, se deben aplicar los métodos de prueba indicados en las normas mexicanas a que se refiere el punto 2 de esta Norma. Para coliformes fecales, el responsable del tratamiento y reuso del agua residual, podrá realizar los análisis de laboratorio de acuerdo con la NMX-AA-102-1987, siempre y cuando demuestre a la autoridad competente que los resultados de las pruebas guardan una estrecha correlación o son equivalentes a los obtenidos mediante el método de tubos múltiples que se establece en la NMX-AA-42-1987. El responsable del tratamiento y reuso del agua residual, puede solicitar a la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, la aprobación de métodos de prueba alternos. En caso de aprobarse, éstos pueden ser aplicados por otros responsables en situaciones similares. Para la determinación de huevos de helminto se deben aplicar las técnicas de análisis que se señalan en el anexo 1 de esta Norma.

7. Grado de concordancia con normas y lineamientos internacionales y con las normas mexicanas tomadas como base para su elaboración

7.1 No hay normas equivalentes, las disposiciones de carácter interno que existen en otros países no reúnen los elementos y preceptos de orden técnico y jurídico que en esta Norma Oficial Mexicana se integran

y complementan de manera coherente, con base en los fundamentos técnicos y científicos reconocidos internacionalmente; tampoco existen normas mexicanas que hayan servido de base para su elaboración.

8. Bibliografía

8.1 APHA, AWWA, WPCF, 1994. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 19th Edition. U.S.A. (Métodos normalizados para el análisis del agua y aguas residuales 19a. Edición. E.U.A.).

8.2 Code of Federal Regulations 40. Protection of Environmental 1992. (Código de Normas Federales 40. Protección al Ambiente) E.U.A.

8.3 Ingeniería sanitaria y de aguas residuales, 1988. Gordon M. Fair, John Ch. Gerey, Limusa, México.

8.4 Manual de agua, 1989. Frank N. Kemmer, John McCallion Ed. McGraw-Hill. Volúmenes 1 al 3. México.

8.5 Development Document for Effluent Limitation Guidelines and New Source Performance Standard for the 1974. (Documento de desarrollo de la U.S.E.P.A. para guías de límites de efluentes y estándares de evaluación de nuevas fuentes para 1974).

8.6 Water Treatment Handbook, 1991. Degremont 6th Edition Vol. I y II. U.S.A. (Manual de tratamiento de agua 1991) 6a. Edición Vols. I y II. E.U.A.

8.7 Wastewater Engineering Treatment. Disposal and Reuse, 1991. 3rd. Edition. U.S.A. (Ingeniería en el tratamiento de aguas residuales. Disposición y reuso) Metcalf and Eddy. McGraw-Hill International Editions. 3a. Edición. E.U.A.

8.8 Municipal Wastewater Reuse-Selected Readings on Water Reuse-United States Environmental Protection Agency-EPA 430/09-91-022 September, 1991. (Reuso de aguas residuales municipales-lecturas selectivas sobre el reuso del agua-Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América-EPA 430/09-91-022 septiembre 1991).

9. Observancia de esta Norma

9.1 La vigilancia del cumplimiento de esta Norma Oficial Mexicana corresponde a la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, a través de la Comisión Nacional del Agua, y a la Secretaría de Salud, en el ámbito de sus respectivas atribuciones, cuyo personal realizará los trabajos de inspección y vigilancia que sean necesarios. Las violaciones a la misma se sancionarán en los términos de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, la Ley General de Salud y demás ordenamientos jurídicos aplicables.

9.2 La presente Norma Oficial Mexicana entrará en vigor al día siguiente de su publicación en el **Diario Oficial de la Federación**. Las plantas de tratamiento de aguas residuales referidas en esta Norma que antes de su entrada en vigor ya estuvieran en servicio y que no cumplan con los límites máximos permisibles de contaminantes establecidos en ella, tendrán un plazo de un año para cumplir con los lineamientos establecidos en la presente Norma.

México, Distrito Federal, a los diecisiete días del mes de julio de mil novecientos noventa y ocho.- La Secretaria de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, **Julia Carabias Lillo**.- Rúbrica.

ANEXO 1

TECNICA PARA LA DETERMINACION Y CUANTIFICACION DE HUEVOS DE HELMINTO

1. Objetivo

Determinar y cuantificar huevos de helminto en lodos, afluentes y efluentes tratados.

2. Campo de aplicación

Es aplicable para la cuantificación de huevos de helminto en muestras de lodos, afluentes y efluentes de plantas de tratamiento.

3. Definiciones

3.1 Helminto: término designado a un amplio grupo de organismos que incluye a todos los gusanos parásitos (de humanos, animales y vegetales) y de vida libre, con formas y tamaños variados.

3.2 Platyhelminths: gusano dorsoventralmente aplanado, algunos de interés médico son: *Taenia solium*, *Hymenolepis nana* e *Il. diminuta*, entre otros.

3.3 Nematelminths: gusanos de cuerpo alargado y forma cilíndrica. Algunas especies enteroparásitas de humanos y animales son: *Ascaris lumbricoides*, *Toxocara canis*, *Enterobius vermicularis* y *Trichuris trichiura*, entre otros.

3.4 Método difásico: técnica de concentración que utiliza la combinación de dos reactivos no miscibles y donde las partículas (huevos, detritus), se orientan en función de su balance hidrofílico-lipofílico.

3.5 Método de flotación: técnica de concentración donde las partículas de interés permanecen en la superficie de soluciones cuya densidad es mayor. Por ejemplo, la densidad de huevos de helminto se encuentra entre 1.05 a 1.18, mientras que los líquidos de flotación se sitúan entre 1.1 a 1.4.

4. Fundamento

Utiliza la combinación de los principios del método difásico y del método de flotación, obteniendo un rendimiento de un 90%, a partir de muestras artificiales contaminadas con huevos de helminto de ascaris.

5. Equipo

Centrífuga: con intervalos de operación de 1,000 a 2,500 revoluciones por minuto

Periodos de operación de 1 a 3 minutos

Temperatura de operación 20 a 28 °C

Bomba de vacío: adaptada para control de velocidad de succión 1/3 hp

Microscopio óptico: con iluminación Köhler

Aumentos de 10 a 100X; platina móvil; sistema de microfotografía

Agitador de tubos: automático, adaptable con control de velocidad

Parrilla eléctrica: con agitación

Hidrómetro: con intervalo de medición de 1.1 a 1.4 g/cm³

Temperatura de operación: 0 a 4°C

6. Reactivos

- Sulfato de zinc heptahidratado
- Acido sulfúrico
- Eter etílico
- Etanol
- Agua destilada
- Formaldehído

6.1 Solución de sulfato de zinc, gravedad específica de 1.3

- Fórmula
- Sulfato de zinc 800 g
- Agua destilada 1,000 ml

PREPARACION

Disolver 800 g de sulfato de zinc en 1,000 ml de agua destilada y agitar en la parrilla eléctrica hasta homogeneizar, medir la densidad con hidrómetro. Para lograr la densidad deseada agregar reactivo o agua, según sea el caso.

6.2 Solución de alcohol-ácido

- Fórmula
- Acido sulfúrico 0.1 N 650 ml
- Etanol 350 ml

PREPARACION

Homogeneizar 650 ml del ácido sulfúrico al 0.1 N, con 350 ml del etanol para obtener un litro de la solución alcohol-ácida. Almacenarla en recipiente hermético.

7. Material

- Garrafrones de 8 litros
- Tamiz de 160 mm (micras) de poro
- Probetas graduadas (1 litro y 50 ml)
- Gradillas para tubos de centrífuga de 50 ml
- Pipetas de 10 ml de plástico
- Aplicadores de madera
- Recipientes de plástico de 2 litros
- Guantes de plástico
- Vasos de precipitado de 1 litro
- Bulbo de goma
- Magneto
- Cámara de conteo Doncaster
- Celda Sedgwich-Rafter

8. Condiciones de la muestra

- 1 Se transportarán al laboratorio en hieleras con bolsas refrigerantes o bolsas de hielo.
- 2 Los tiempos de conservación en refrigeración y transporte deben reducirse al mínimo.
- 3 Si no es posible refrigerar la muestra líquida, debe fijarse con 10 ml de formaldehído al 4% o procesarse dentro de las 48 horas de su toma.
- 4 Una muestra sólida debe refrigerarse y procesarse en el menor tiempo posible.

9. Interferencias

La sobreposición de estructuras y/o del detritus no eliminado en el sedimento, puede dificultar su lectura, en especial cuando se trata de muestras de lodo. En tal caso, es importante dividir el volumen en alícuotas que se consideren adecuadas.

10. Precauciones

- 1 Durante el procesamiento de la muestra, el analista debe utilizar guantes de plástico para evitar riesgo de infección.
- 2 Lavar y desinfectar el área de trabajo, así como el material utilizado por el analista.

11. Procedimiento

- 1 Muestreo
 - a) Preparar recipientes de 8 litros, desinfectándolos con cloro, enjuagándolos con agua potable a chorro y con agua destilada.
 - b) Tomar 5 litros de la muestra (ya sea del afluente o efluente).

- c) En el caso de que la muestra se trate de lodo, preparar en las mismas condiciones recipientes de plástico de 1 litro con boca ancha.
- d) Tomar X gramos de materia fresca (húmeda) que corresponda a 10 g de materia seca.
- 2 Concentrado y centrifugado de la muestra
 - a) La muestra se deja sedimentar durante 3 horas o toda la noche.
 - b) El sobrenadante se aspira por vacío sin agitar el sedimento.
 - c) Filtrar el sedimento sobre un tamiz de 160 mm (micras), enjuagando también el recipiente donde se encontraba originalmente la muestra y lavar enseguida con 5 litros de agua (potable o destilada).
 - d) Recibir el filtrado en los mismos recipientes de 8 litros.
 - e) En caso de tratarse de lodos, la muestra se filtrará y enjuagará en las mismas condiciones iniciando a partir del inciso c.
 - f) Dejar sedimentar durante 3 horas o toda la noche.
 - g) Aspirar el sobrenadante al máximo y depositar el sedimento en una botella de centrifuga de 250 ml, incluyendo de 2 a 3 enjuagues del recipiente de 8 litros.
 - h) Centrifugar a 400 g por 3 minutos (1,400-2,000 rpm por 3 minutos, según la centrifuga).
 - i) Decantar el sobrenadante por vacío (asegurarse de que exista la pastilla) y resuspender la pastilla en 150 ml de ZnSO₄ con una densidad de 1.3.
 - j) Homogeneizar la pastilla con el agitador automático, o aplicador de madera.
 - k) Centrifugar a 400 g por 3 minutos (1,400-2,000 rpm por 3 minutos).
 - l) Recuperar el sobrenadante virtiéndolo en un frasco de 2 litros y diluir cuando menos en un litro de agua destilada.
 - m) Dejar sedimentar 3 horas o toda la noche.
 - n) Aspirar al máximo el sobrenadante por vacío y resuspender el sedimento agitando, vertir el líquido resultante en 2 tubos de centrifuga de 50 ml y lavar de 2 a 3 veces con agua destilada el recipiente de 2 litros.
 - o) Centrifugar a 480 g por 3 minutos (2,000-2,500 rpm por 3 minutos, según la centrifuga).
 - p) Reagrupar las pastillas en un tubo de 50 ml y centrifugar a 480 g por minutos (2,000-2,500 rpm por 3 minutos).
 - q) Resuspender la pastilla en 15 ml de solución de alcohol-ácido (H₂SO₄ 0.1 N) + C₂H₅OH a 33-35% y adicionar 10 ml de éter etílico.
 - r) Agitar suavemente y abrir de vez en cuando los tubos para dejar escapar el gas (considerar que el éter es sumamente inflamable y tóxico).
 - s) Centrifugar a 660 g por 3 minutos (2,500-3,000 rpm por 3 minutos, según la centrifuga).
 - t) Aspirar al máximo el sobrenadante para dejar menos de 1 ml de líquido, homogeneizar la pastilla y proceder a cuantificar.
- 3 Identificación y cuantificación de la muestra
 - a) Distribuir todo el sedimento en una celda de Sedgwich-Rafter o bien en una cámara de conteo de Doncaster.
 - b) Realizar un barrido total al microscopio.

12. Cálculos

- 1 Para determinar los rpm de la centrifuga utilizada, la fórmula es:

$$rpm = \sqrt{\frac{Kg}{r}}$$

Donde:

g: fuerza relativa de centrifugación

K: constante cuyo valor es 89,456

r: radio de la centrifuga (spindle to the centre of the bracker) en cm

La fórmula para calcular g es:

$$g = \frac{r(rpm)^2}{K}$$

- 2 Para expresar los resultados en número de huevecillos por litro, es importante tomar en cuenta el volumen y tipo de la muestra analizada.

13. Formato

No aplica.

14. Bibliografía

- 1 APHA, AWWA, WPCF, 1992 Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19a. ed., Washington. (Métodos normalizados para el análisis del agua y aguas residuales, 19a. Edición E.U.A.)
- 2 CETESB, São Paulo, 1989 Helmintos e Protozoários Patogénicos Contagem de Ovos e Cistos em Amostras Ambientais.

- 3 Schwartzbrod, J., 1996 Traitement des Eaux Usees de Mexico en Vue d'une Reutilisation a des Fins Agricoles. Reunión de Expertos para el Análisis del Proyecto de Saneamiento del Valle de México. Instituto de Ingeniería UNAM, 86 p.