



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**ESTUDIO COMPARATIVO DE LA REMOCIÓN DE NUTRIENTES Y CARGA ORGÁNICA EN
AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS, TRATADAS EN UN BIOFILTRO TIPO WETLAND DE
FLUJO SUBSUPERFICIAL CON DOS VARIEDADES DE MACRÓFITAS**

Nancy Melissa García

Asesorado por el Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

Guatemala, mayo de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO COMPARATIVO DE LA REMOCIÓN DE NUTRIENTES Y CARGA ORGÁNICA EN
AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS, TRATADAS EN UN BIOFILTRO TIPO WETLAND DE
FLUJO SUBSUPERFICIAL CON DOS VARIEDADES DE MACRÓFITAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

NANCY MELISSA GARCIA

ASESORADO POR EL ING. JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA AMBIENTAL

GUATEMALA, MAYO DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

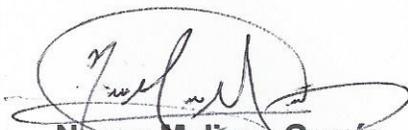
DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Pablo Enrique Morales Paniagua
EXAMINADOR	Ing. Walter Arnoldo Bardales Espinoza
EXAMINADORA	Inga. Casta Petrona Zeceña Zeceña
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ESTUDIO COMPARATIVO DE LA REMOCIÓN DE NUTRIENTES Y CARGA ORGÁNICA EN AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS, TRATADAS EN UN BIOFILTRO TIPO WETLAND DE FLUJO SUBSUPERFICIAL CON DOS VARIEDADES DE MACRÓFITAS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 26 de noviembre de 2015.



Nancy Melissa García

Guatemala, 19 de septiembre 2018

Ingeniero

Carlos Salvador Wong Davi

Director Escuela de Ingeniería Química

Facultad de Ingeniería

Universidad San Carlos de Guatemala

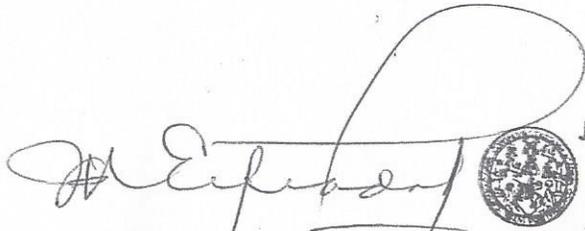
Presente

Ingeniero Wong:

Por medio de la presente HAGO CONSTAR que he revisado y dado mi aprobación al Informe Final de Trabajo de Graduación titulado "ESTUDIO COMPARATIVO DE LA REMOCIÓN DE NUTRIENTES Y CARGA ORGÁNICA EN AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS, TRATADAS EN UN BIOFILTRO TIPO WETLAND DE FLUJO SUBSUPERFICIAL CON DOS VARIEDADES DE MACRÓFITAS", de la estudiante de Ingeniería Ambiental, Nancy Melissa García quien se identifica con el carné universitario numero 2012-12940 y DPI numero 2425726930101.

Sin otro particular, me suscribo a usted.

Atentamente,



Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

Asesor

Jorge Mario ESTRADA ASTURIAS
Ingeniero Químico, Col. 685
M. Sc. Ingeniería Sanitaria
PROFESOR TITULAR
Escuela de Ing. Química USAC



Guatemala, 07 de marzo de 2019.
Ref. EIQ.TG-IF.012.2019.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **091-2015** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN
-Modalidad Seminario de Investigación-

Solicitado por la estudiante universitaria: **Nancy Melissa García**.
Identificada con número de carné: **2425 72693 0101**.
Identificada con registro académico: **2012-12940**.
Previo a optar al título de **INGENIERA AMBIENTAL**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

ESTUDIO COMPARATIVO DE LA REMOCIÓN DE NUTRIENTES Y CARGA ORGÁNICA EN AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS, TRATADAS EN UN BIOFILTRO TIPO WETLAND DE FLUJO SUBSUPERFICIAL CON DOS VARIEDADES DE MACRÓFITAS

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Jorge Mario Estrada Asturias**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"



Ing. Pablo Enrique Morales Paniagua
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.036.2019

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del **Trabajo de Graduación** de la carrera de **Ingeniería Ambiental** de la estudiante, **NANCY MELISSA GARCÍA** titulado: **"ESTUDIO COMPARATIVO DE LA REMOCIÓN DE NUTRIENTES Y CARGA ORGÁNICA EN AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS, TRATADAS EN UN BIOFILTRO TIPO WETLAND DE FLUJO SUBSUPERFICIAL CON DOS VARIEDADES DE MACRÓFITAS "**.
Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, mayo 2019 **FACULTAD DE INGENIERIA USAC**
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
DIRECTOR

Cc: Archivo
CSWD/ale

Universidad de San Carlos
De Guatemala

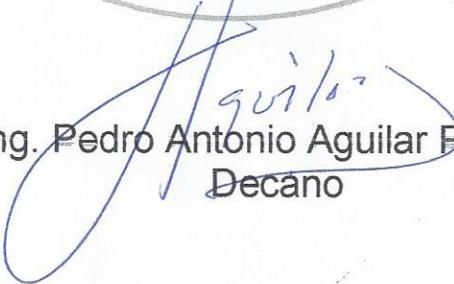


Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.263-2019

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química del trabajo de graduación titulado: **"ESTUDIO COMPARATIVO DE LA REMOCIÓN DE NUTRIENTES Y CARGA ORGÁNICA EN AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS, TRATADAS EN UN BIOFILTRO TIPO WETLAND DE FLUJO SUBSUPERFICIAL CON DOS VARIEDADES DE MACRÓFITAS"** presentado por la estudiante: **Nancy Melissa García** después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, mayo de 2019

/echm



ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por ser mi guía y fortaleza.

Mi madre

Eva García, por su amor, fe, esfuerzo y paciencia.

Mis hermanas

Analy y Andrea García, por su apoyo, compañía y ayuda.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por la vida, la sabiduría y el amor.
Mi madre	Por su amor, fe, esfuerzo y paciencia.
Mis hermanas	Por su apoyo incondicional, compañía y ayuda.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi <i>alma mater</i> .
Facultad de Ingeniería	Por la formación profesional brindada a lo largo de mi carrera universitaria.
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria	Principalmente, al ingeniero Pedro Saravia, por la confianza brindada al permitirme realizar la fase experimental del presente trabajo de graduación en la planta de tratamiento de aguas residuales.
Ingeniero Jorge Mario Estrada Asturias	Por el apoyo y asesoramiento brindado para realizar el presente trabajo de graduación y por la orientación brindada en el ámbito personal.
Mis tíos	Por su ejemplo y apoyo.

Ingeniera Ivonne Liere

Por su apoyo incondicional y compañía en cada etapa, por su comprensión y amistad a lo largo de este camino y por cada momento que atesoraré en mi memoria.

Mis amigos

Por su paciencia y por cada momento de alegría compartido.

Mis catedráticos

Por los conocimientos y las experiencias compartidos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
LISTA DE SÍMBOLOS	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN.....	IX
OBJETIVOS.....	XI
INTRODUCCIÓN	XIII
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. El agua en Guatemala.....	5
2.2. Aguas residuales	5
2.2.1. Importancia de la remoción de contaminantes en agua residual	6
2.3. Tratamiento de aguas residuales domésticas	8
2.4. Fitorremediación.....	9
2.4.1. Tipos de macrófitas	10
2.4.1.1. Macrófitas emergentes	11
2.4.1.2. Macrófitas flotantes.....	11
2.4.1.3. Macrófitas sumergidas.....	11
2.4.2. Sistemas de fitorremediación acuática	12
2.5. Tratamiento de aguas residuales con plantas acuáticas	12
2.5.1. Macrófitas de raíces flotantes en la depuración de aguas residuales.....	13
2.5.1.1. Jacinto de agua	15

2.5.2.	Macrófitas enraizadas en la depuración de aguas residuales	16
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	19
3.1.	Variables	19
3.2.	Delimitación de campo de estudio	19
3.3.	Recursos humanos disponibles	20
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	21
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa.....	22
3.5.1.	Recolección y traslado de muestras de agua residual.....	23
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	23
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	25
3.7.1.	Muestra de cálculo	25
4.	RESULTADOS.....	29
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	33
	CONCLUSIONES.....	37
	RECOMENDACIONES	39
	BIBLIOGRAFÍA.....	41
	APÉNDICES.....	43

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ubicación de la Planta de tratamiento 'Ing. Arturo Pazos Sosa' de la colonia Aurora 2	20
2.	Remoción de nitrógeno en ambos biofiltros	30
3.	Remoción de ortofosfatos en ambos biofiltros	30
4.	Remoción de DBO ₅ en ambos biofiltros	31
5.	Remoción de DQO en ambos biofiltros	31

TABLAS

I.	Variables de importancia para el estudio	19
II.	Material y equipo	22
III.	Cristalería y equipo de laboratorio.....	22
IV.	Valores obtenidos de la caracterización hidráulica de operación del biofiltro tipo <i>wetland</i> de flujo subsuperficial con Jacinto de agua (<i>Eichhornia crassipes</i>).....	26
V.	Valores obtenidos de la caracterización hidráulica de operación del biofiltro tipo <i>wetland</i> de flujo subsuperficial con Tul (<i>Typha sp.</i>)	26
VI.	Valores obtenidos de la caracterización fisicoquímica en la entrada del biofiltro tipo <i>wetland</i> de flujo subsuperficial con Jacinto de agua (<i>Eichhornia crassipes</i>).....	27
VII.	Valores obtenidos de la caracterización fisicoquímica en la salida del biofiltro tipo <i>wetland</i> de flujo subsuperficial con Jacinto de agua (<i>Eichhornia crassipes</i>).....	27

VIII.	Valores obtenidos de la caracterización fisicoquímica en la entrada del biofiltro tipo <i>wetland</i> de flujo subsuperficial con Tul (<i>Typha sp.</i>)28
IX.	Valores obtenidos de la caracterización fisicoquímica en la salida del biofiltro tipo <i>wetland</i> de flujo subsuperficial con Tul (<i>Typha sp.</i>)28
X.	Porcentaje de remoción en el biofiltro tipo <i>wetland</i> de flujo subsuperficial con Jacinto de agua (<i>Eichhornia crassipes</i>).....29
XI.	Porcentaje de remoción en el biofiltro tipo <i>wetland</i> de flujo subsuperficial con Tul (<i>Typha sp.</i>)29

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Z_{α}^2	Coeficiente prefijado para cierto nivel de confianza
δ	Error estándar de amplitud del intervalo de confianza
$^{\circ}\text{C}$	Grados centígrados
l	Litro
m	Metro
mg	Miligramo
pH	Potencial hidrógeno
q	Probabilidad absoluta
\bar{X}	Promedio
p	Proporción esperada
s	Segundo
n	Tamaño del espacio muestral

GLOSARIO

Aguas residuales	Aguas de abastecimiento de una población, después de haber sido impurificadas por diversos usos.
Caudal	Cantidad de fluido que circula por unidad de tiempo en determinado sistema.
DBO₅	Cantidad de oxígeno necesario para degradar por vía bioquímica los contaminantes presentes en el agua.
DQO	Cantidad de oxígeno necesario para degradar por vía química los contaminantes presentes en el agua.
Eutrofización	Incremento de sustancias nutritivas en aguas dulces de lagos y embalses, que provoca un exceso de fitoplancton.
Fitorremediación	Es una tecnología sustentable basada en la utilización plantas para disminuir la concentración o peligrosidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos <i>in situ</i> .
Léntico	Cuerpos hídricos cerrados que no presentan corriente continua, como los lagos, las lagunas, los esteros o los pantanos.

Lótico	Cuerpos hídricos que se mantienen en movimiento continuo en una dirección definida impulsados por la fuerza de gravedad, como ríos, arroyos y manantiales.
Macrófita	Formas macroscópicas de vegetación acuática utilizadas para el tratamiento de aguas residuales.
Patógenos	Agente biológico externo que se aloja en un ente biológico determinado produciendo enfermedad.
pH	El potencial hidrógeno es el coeficiente que indica el la alcalinidad o acidez de una solución, es la medida de la cantidad de iones de hidrógeno que contiene una solución determinada.
<i>Wetland</i>	También conocido como humedal artificial de flujo subsuperficial o biofiltro de flujo subsuperficial. Es un sistema diseñado para el tratamiento del agua residual, construido típicamente en forma de un lecho o zanja que contiene un medio apropiado para el crecimiento de plantas acuáticas.

RESUMEN

El presente estudio consistió en la comparación de la eficiencia en la remoción de nutrientes y carga orgánica de aguas residuales domésticas tratadas en un biofiltro tipo *wetland* de flujo subsuperficial, utilizando dos variedades de macrófitas. La comparación se realizó entre una macrófita de raíces suspendidas, Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), y una de raíces fijas, Tul (*Typha sp.*).

La determinación de la eficiencia se llevó a cabo a través de una caracterización fisicoquímica de nutrientes, fósforo y nitrógeno, y una medición de carga orgánica en el agua residual doméstica en la entrada y salida del biofiltro, utilizando Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y Tul (*Typha sp.*) como tratamiento terciario. Los análisis de laboratorio antes mencionados se realizaron en el Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria 'Dra. Alba Tabarini Molina' perteneciente al Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Facultad de Ingeniería, Universidad San Carlos de Guatemala, ciudad universitaria, zona 12, Guatemala, Guatemala.

Además, se realizó una caracterización hidráulica de operación del biofiltro con ambas macrófitas para determinar la influencia de las características hidráulicas del afluente en la eficiencia antes determinada. Finalmente, con los valores de la eficiencia en la remoción de nitrógeno, fósforo y carga orgánica se compararon los resultados para determinar las diferencias de remoción en el tratamiento de aguas residuales domésticas.

OBJETIVOS

General

Comparar la eficiencia de la remoción de nutrientes y carga orgánica en aguas residuales domésticas tratadas en un biofiltro tipo *wetland* de flujo subsuperficial con dos variedades de macrófitas.

Específicos

1. Realizar una caracterización fisicoquímica de nutrientes y carga orgánica del agua residual en la entrada y salida de un biofiltro tipo *wetland* de flujo subsuperficial, utilizando Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y Tul (*Typha sp.*).
2. Realizar una caracterización hidráulica de operación del biofiltro tipo *wetland* de flujo subsuperficial, utilizando Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y Tul (*Typha sp.*).
3. Determinar la eficiencia en la remoción de nutrientes y carga orgánica de los tratamientos de fitorremediación, utilizando Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y Tul (*Typha sp.*), en aguas residuales domésticas.
4. Comparar las eficiencias de remoción de ambas macrófitas utilizadas, Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y Tul (*Typha sp.*).

INTRODUCCIÓN

Cada día las poblaciones en el mundo aumentan, y con ello el consumo de agua. El recurso se extrae, utiliza y desecha en cuerpos hídricos, muchas veces sin tratamiento alguno. En Guatemala existe evidencia del problema que representa la falta de tratamiento de aguas residuales de todo tipo. Tanto en cuerpos lóticos y lénticos, la eutrofización provocada por el aumento de nutrientes y carga orgánica en los cuerpos hídricos receptores es evidente.

La falta de tratamiento puede atribuirse a varias causas, entre ellas al alto costo que representa. Las alternativas de bajo costo en el tratamiento de aguas residuales emergen como una solución. Una de estas alternativas se conoce como fitorremediación. El término se compone de dos palabras 'fito', que en griego significa planta o vegetal, y 'remediar' del latín *remediare*, que significa corregir el daño. El éxito de la fitorremediación es una función no solo de la especie utilizada para el tratamiento, sino también del conocimiento de las características hidráulicas y fisicoquímicas del afluente.

La fitorremediación puede llevarse a cabo utilizando macrófitas acuáticas; estas poseen la habilidad, hasta cierto punto, de asimilar todos los constituyentes del agua residual considerados como contaminantes y utilizarlos como alimento. Aun así los sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales que emplean esta tecnología no han sido estudiados a profundidad para aprovechar los beneficios de remoción que se obtienen con esta alternativa de bajo costo.

La concentración de nutrientes característicos de la eutrofización de cuerpos hídricos, como fósforo y nitrógeno, y la carga orgánica presente en las aguas residuales pueden reducirse del efluente a través de sistemas de tratamiento que empleen la fitorremediación.

1. ANTECEDENTES

Los primeros sistemas de tratamiento de aguas residuales a base de plantas se implementaron en los países europeos a principios del año 1960, utilizando juncos o carrizos. Desde entonces este tipo de tratamientos biológicos se han estudiado, implementado y mejorado.

Las técnicas de fitorremediación se caracterizan por ser una práctica de limpieza pasiva y estéticamente agradable que aprovechan la capacidad de las plantas y la energía solar para el tratamiento de una gran variedad de contaminantes del medio ambiente.

- La efectividad de las macrófitas como sistemas de depuración de aguas cargadas con nutrientes ha sido estudiada por varios investigadores. En 1989, Balls, Hill, Moss, Bryan y Irvine, Krain, investigaron el proceso de eutrofización en lagos poco profundos, y encontraron que las comunidades de plantas sumergidas son reemplazadas por poblaciones densas de fitoplancton, cuando hay una fuerte contaminación por altas concentraciones de fósforo y nitrato de amonio. Notaron que las concentraciones de fósforo reactivo no aumentaron en la columna de agua cuando existían plantas sumergidas y los niveles de nitrato y amonio se mantuvieron bajos, pero al extraer las plantas manualmente las concentraciones aumentaron.
- En 2001, Roston, Dennis, Valentim, Mario Y Mazzola, Mortis, realizaron el estudio: *uso de leitos cultivados como alternativa de post tratamiento de reactor anaeróbico*. En el mismo se analizó el comportamiento de las

macrófitas (*Typha spp*) y (*Eleocharis sp.*) al utilizarlas en un sistema de depuración de aguas residuales asociado con un reactor anaerobio. Tras los primeros dos años de funcionamiento la reducción de sólidos suspendidos fue de 90 % a 97 % y entre 60 % a 85 % de la DQO, cuando se recibía un caudal de 200 l/d. Cuando el caudal se duplicó se observaron algunos problemas en el crecimiento de (*Eleocharis sp.*); sin embargo, hubo una reducción entre 73 % a 97 % de sólidos suspendidos y entre 67 a 97 % de DQO. En las pruebas con 600 l/d, los sólidos suspendidos se redujeron entre 60 % a 80 %, mientras que la DQO entre 55 % a 60 %.

- En 1991, Pezzolesi, T.P., Zartman, R.E., Fish, E.B. y Hickey, M.G., determinaron la captación de nutrientes que realizaron las macrófitas (*Typha domingensis* Pers. Y *Persicaria pensylvanica*) en un *wetland* marino natural, que recibía efluentes de actividades agrícolas y aguas residuales ya tratadas por sistemas de depuración secundarios. Al analizar los resultados concluyeron que el sistema funcionó bastante bien como receptor de aguas residuales, donde ambas especies de macrófitas resultaron efectivas al remover nitrógeno, fósforo, cobre, e incluso hierro. Al comparar ambas especies, se observó que (*T. domingensis*) era mejor en la concentración de nutrientes.
- A pesar de los estudios exitosos sobre la utilización de macrófitas en el tratamiento de aguas residuales, los resultados no son siempre satisfactorios. En 2000, Nichols, D. S., y Higgins, D. A., estudiaron la efectividad de las macrófitas, (*Typha sp.*) y (*Sphagnum spp.*), durante diez años en un pequeño turbal natural de 8,3 Ha, que recibió los efluentes de una planta de tratamiento de aguas residuales. Este se utilizaría como tratamiento terciario de los riles.

- Los resultados mostraron que el pH del agua purificada aumentó de 4,2 a 6,7. Además, el turbal solo removió 37 % del nitrógeno y 17 % del fósforo proveniente de la planta de tratamiento, valores considerados de poco impacto. Al finalizar la investigación se concluyó que este tipo de ecosistemas no constituye una buena alternativa para ser usado como tratamiento terciario de aguas residuales.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. El agua en Guatemala

El recurso natural agua es indispensable para todo ser viviente, juega un papel insustituible en todos los aspectos de la vida. En Guatemala el agua es considerada constitucionalmente como un bien de dominio público, es patrimonio del Estado y de los particulares. En el país existen 38 ríos principales, lo cuales se distribuyen en tres vertientes hidrográficas, 18 ríos desembocan en la vertiente del Pacífico; 10 en la del Atlántico y los 10 restantes en la del Golfo de México. Al año 2009, 14 de estos ríos habían superado los límites permitidos de elementos contaminantes, físicos, tóxicos, materia orgánica, materiales cancerígenos e incluso microorganismos; límites que también se excedieron en 4 lagos importantes de Guatemala en el análisis realizado.

Una de las principales fuentes de contaminación de cuerpos hídricos en Guatemala son las aguas residuales de los centros urbanos; estos efluentes contaminados se vierten, muchas veces sin ningún tipo de tratamiento, en los cauces de los ríos. Las descargas poseen altas concentraciones de bacterias, nutrientes y patógenos que favorecen el crecimiento y reproducción de algas en los cuerpos receptores de los ríos que las transportan; los cuerpos lénticos presentan crecimiento de estos organismos acuáticos y con ello las consecuencias negativas que representan para la biota presente en este ecosistema.¹

2.2. Aguas residuales

Definen que las aguas residuales son fundamentalmente las aguas de abastecimiento de una población, después de haber sido impurificadas por diversos usos a los que son sometidas. Desde el punto de vista de su origen, las aguas residuales resultan de la combinación de los líquidos o desechos sólidos arrastrados por el agua, procedentes de las casas de habitación, de los edificios comerciales e instituciones, junto con los desechos provenientes de los establecimientos de actividades industriales, y las aguas subterráneas, aguas superficiales o de precipitación que puedan agregarse en el curso².

¹ Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar. *Vulnerabilidad local y creciente construcción del riesgo*. p. 44.

² CRITES, Ron y TCHOBANOGLIOUS, George. *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. p. 125.

Las aguas residuales se caracterizan por su composición física, química, y biológica. Las principales propiedades físicas y los principales constituyentes químicos y biológicos presentes en las aguas residuales, son:

- Propiedades físicas: color, olor, cantidad de sólidos, temperatura

- Constituyentes químicos
 - Orgánicos: carbohidratos, grasas animales, aceites, pesticidas, fenoles, proteínas, contaminantes prioritarios, agentes tensoactivos, compuestos orgánicos volátiles, otros.

 - Inorgánicos: alcalinidad, cloruros, metales pesados, nitrógeno, pH, fósforo, contaminantes prioritarios, azufre.

 - Gases: sulfuro de hidrógeno, metano, oxígeno.

- Constituyentes biológicos: animales, plantas, protistas y virus.

2.2.1. Importancia de la remoción de contaminantes en agua residual

- Sólidos en suspensión: los sólidos en suspensión pueden dar lugar al desarrollo de depósitos de lodos y de condiciones anaerobias, cuando se vierte agua residual sin tratar al entorno acuático.

- Materia orgánica biodegradable: compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos y grasas animales. Si se descargan al entorno

sin tratar, su estabilización biológica puede llevar al agotamiento de los recursos naturales de oxígeno y al desarrollo de condiciones sépticas.

- Patógenos: al verter agua contaminada en el entorno acuático pueden transmitirse enfermedades contagiosas por medio de los organismos patógenos presentes en el agua residual.
- Nutrientes: tanto el nitrógeno como el fósforo, junto con el carbono, son nutrientes esenciales para el crecimiento. Cuando se vierten al entorno acuático, estos nutrientes pueden favorecer el crecimiento de una vida acuática no deseada.
- Contaminantes prioritarios: son compuestos orgánicos o inorgánicos determinados en base a su carcinogenicidad, mutagenicidad, teratogenicidad o toxicidad aguda conocida o sospechada, al vertirse en el entorno acuático sin tratamiento, se expone a la biota presente a las consecuencias adversas del contacto con estos compuestos.
- Materia orgánica refractaria: esta materia orgánica tiende a resistir los métodos convencionales de tratamiento. Ejemplos típicos son los agentes tensoactivos, los fenoles y los pesticidas agrícolas que se convierten en peligros latentes para los organismos vivos presentes en el entorno acuático.
- Metales pesados: los metales pesados son, frecuentemente, añadidos al agua residual en el curso de ciertas actividades comerciales e industriales, y puede ser necesario eliminarlos si se pretende reutilizar el agua residual.

- Sólidos inorgánicos disueltos: los constituyentes inorgánicos tales como el calcio, sodio y los sulfatos, se añaden al agua de suministro como consecuencia del uso del agua, y es posible que deban eliminarse si se va a reutilizar el agua residual.

2.3. Tratamiento de aguas residuales domésticas

Se refieren al tratamiento de las aguas residuales como un proceso por el cual los sólidos que el líquido contiene son separados parcialmente, haciendo que el resto de los sólidos orgánicos complejos muy putrescibles queden convertidos en sólidos minerales o en sólidos orgánicos relativamente estables. La magnitud de este cambio depende del proceso de tratamiento empleado. Una vez completado todo el proceso de tratamiento es aun necesario disponer de los líquidos y los sólidos que se hayan separado. El sitio en donde se lleva a cabo dicho proceso es denominado planta de tratamiento de agua residual³.

- Tratamiento preliminar: en la mayoría de las plantas, el tratamiento preliminar sirve para proteger el equipo de bombeo y hacer más fáciles los procesos subsecuentes del tratamiento. Los dispositivos para el tratamiento preliminar están destinados a eliminar o separar los sólidos mayores o flotantes, a eliminar los sólidos inorgánicos pesados y eliminar cantidades excesivas de aceites o grasas.
- Tratamiento primario: por este tratamiento se separan o eliminan la mayoría de los sólidos suspendidos en las aguas negras, o sea aproximadamente de 40 % a 60 %, mediante el proceso físico de asentamiento en tanques de sedimentación. Cuando se agregan ciertos productos químicos en los tanques primarios, se eliminan casi todos los sólidos coloidales, así como los sedimentables, o sea un total de 80 % a 90 % de los sólidos suspendidos. El efluente del tratamiento primario

³ CRITES, Ron y TCHOBANOGLOUS, George. *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. p. 128.

suele contener una cantidad considerable de materia orgánica y una DBO alta.

- Tratamiento secundario: este tratamiento debe hacerse cuando las aguas residuales todavía contienen, después del tratamiento primario, más sólidos orgánicos en suspensión o solución que los que puedan ser asimilados por las aguas receptoras sin oponerse a su uso normal adecuado. El tratamiento secundario depende principalmente de los organismos aerobios, para la descomposición de los sólidos orgánicos hasta transformarlos en sólidos inorgánicos o en sólidos orgánicos estables.
- Tratamiento terciario: el tratamiento terciario o avanzado consiste en un proceso físicoquímico que utiliza la precipitación, la filtración y/o la cloración para reducir drásticamente los niveles de nutrientes tales como nitrógeno y fósforo del efluente final. El agua residual que recibe un tratamiento terciario adecuado no permite un desarrollo microbiano considerable.

Al final del proceso de tratamiento el tipo de utilización que se dará a las aguas depende de los resultados del análisis físicoquímico y bacteriológico que presente.

2.4. Fitorremediación

Indican en su trabajo *Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones*, que la utilización de plantas, específicamente juncos y carrizos, para el tratamiento de aguas residuales fue implementado por primera vez a principios de 1960 en países europeos como una alternativa de tratamiento. A partir de ese punto los sistemas de tratamiento de aguas residuales conocidos como sistemas de fitorremediación acuática, se han estudiado, mejorado e implementado en diversos proyectos y cada vez su aceptación es mayor debido a la sustentabilidad

del proceso y la eficiencia demostrada del tratamiento. El término fitorremediación establecido en 1991 se refiere a remediar, corregir o enmendar un daño por medio de plantas o vegetales. El término proviene de la palabra *fito*, *ta*, griego que se refiere a planta o vegetal y del latín *remediare*, que se refiere a poner remedio al daño.⁴

La fitorremediación es una tecnología sustentable basada en la utilización plantas para disminuir la concentración o peligrosidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos *in situ*. La tecnología puede aplicarse a suelos, sedimentos, agua y aire, donde a través de procesos bioquímicos que las plantas y microorganismos asociados a sus sistemas de raíz realizan se reducen los contaminantes presentes en el afluente a tratar. Dentro de los procesos que desarrollan los microorganismos se pueden mencionar la degradación, estabilización, mineralización, reducción y volatilización de los contaminantes presentes en el sistema en que las plantas sean utilizadas.

Las plantas utilizadas en la fitorremediación acuática se conocen como macrófitas. Estas son implementadas en cuerpos hídricos confinados o bien como parte de plantas de tratamiento de aguas residuales, Las macrófitas pueden ser clasificadas en tres tipos según su forma de vida. Esta clasificación las divide como macrófitas emergentes, macrófitas flotantes y macrófitas sumergidas.

2.4.1. Tipos de macrófitas

A continuación, se describen los diferentes tipos de macrófitas.

⁴ ÑUNEZ, Roberto; MEAS, Yunny; ORTEGA, Raúl; OLGUÍN Eugenia. Indican en su trabajo *Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones*. p. 201.

2.4.1.1. Macrófitas emergentes

La característica principal de este tipo de plantas acuáticas es que la raíz se encuentra enterrada en los sedimentos pero su parte superior se extiende hacia arriba, superando la superficie del agua. Entre estas se pueden mencionar el carrizo (*Phragmites communis*), el platanillo (*Sagitaria latifolia*) y el tule (*Typha domingensis*).

2.4.1.2. Macrófitas flotantes

Estas pueden dividirse en dos grupos. El primer conjunto se conoce como plantas de libre flotación, es decir no fijas. Estas poseen tallos y hojas que se desarrollan sobre la superficie del agua y sus raíces cuelgan en el agua de forma vertical sin necesidad de estar fijas a un sustrato. Entre estas se puede mencionar el lirio acuático (*Eichhornia crassipes*), y la lenteja de agua (*Lemna spp.* y *Salvinia minima*). El segundo grupo se conoce como plantas de hoja flotante o fijas, como su nombre lo indica sus hojas flotan sobre la superficie del agua, pero las raíces están fijas en un sustrato, en los sedimentos. Entre estas se encuentran los nenúfares (*Nymphaea elegans* y *Nymphoides fallax*).

2.4.1.3. Macrófitas sumergidas

Estas se desarrollan completamente debajo del agua. Sus órganos reproductores pueden estar sumergidos junto a toda la planta o pueden emerger y quedar por encima de la superficie del agua.

Entre esta clasificación de macrófitas se encuentra el bejuquillo (*Cerathophyllum demersum*), la hidrilla o maleza (*Hydrilla verticillata*) y los pastos (*Phyllospadix terreyi*).

2.4.2. Sistemas de fitorremediación acuática

“Dentro de estos sistemas se encuentran los humedales construidos, los sistemas de tratamiento con plantas acuáticas, la combinación de estos últimos conocido como sistema de tratamiento integral y por último los sistemas de rizofiltración”.⁵

2.5. Tratamiento de aguas residuales con plantas acuáticas

“Indican que los sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales con plantas acuáticas pueden ser naturales o artificiales, estos últimos diseñados y construidos por el hombre. Los mismos se han desarrollado como un tratamiento secundario o terciario alternativo. De la misma forma que las microalgas, las plantas acuáticas o macrófitas son utilizadas para asimilar y descomponer nutrientes, materia orgánica e inorgánica. Las macrófitas han demostrado ser eficientes en la remoción de nutrientes y metales pesados”.⁶

La función de las plantas acuáticas es inyectar grandes cantidades de oxígeno hacia sus raíces, característica que constituye una de las propiedades de las macrófitas. La planta aprovecha una parte de la cantidad de oxígeno total y el resto es absorbido por los microorganismos, bacterias y hongos, que se asocian a la raíz de la planta y están encargados de metabolizar los contaminantes del sistema, de esta forma la planta extrae el contaminante del agua residual. Esta es la base para de la tecnología de los biofiltros tipo *wetland*.

⁵ CELIS HIDALGO, J.; JUNOD MONTANO, J.; SANDOVAL ESTRADA, M. *Recientes aplicaciones e la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas*. p. 23

⁶ *Ibíd.*

Los biofiltros de tratamiento de agua tipo *wetland* se pueden establecer con sistemas de macrófitas de especies flotantes, especies sumergidas o con especies enraizadas. Esta tecnología se divide en tres procesos: primero los residuos deben pasar por un decantador que al final se conecta a un humedal artificial donde los líquidos escurren bajo un lecho de piedras de cinco centímetros, en el cual se encuentran las plantas acuáticas; el fin de esto es evitar mal olor y la crianza de zancudos. Para finalizar se descargan los líquidos en una laguna con plantas flotantes donde se remueven los nutrientes, nitrógeno y fósforo, así se completa el proceso de depuración de las aguas residuales domésticas con el sistema de biofiltros *wetland*.

El agua obtenida como resultado del tratamiento en los biofiltros tipo *wetland* se considera apta para ser utilizada en riego o para ser descartada en cursos de agua. Los sistemas de depuración de aguas residuales que utilizan plantas acuáticas para la remoción de contaminantes consiste en estanques o canales de 0,4 a 1,5 metros de profundidad. En estos se desarrollan macrófitas flotantes que son alimentadas con agua residual.

2.5.1. Macrófitas de raíces flotantes en la depuración de aguas residuales

La composición que presentan estas plantas acuáticas depende de la especie. Las macrófitas flotantes son un grupo variado y amplio, entre ellas se pueden mencionar al Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), la redondita de agua (*Hydrocotyle ranunculoides*), la lechuga de agua (*Pistia stratiotes*), la salvinia (*Salvinia spp.*), incluyendo algunas especies de lentejas de agua (*Lemna spp.*, *Spirodella spp.*).

El funcionamiento de los sistemas de tratamiento donde se utilizan este tipo de macrófitas se basa en la filtración y sedimentación de sólidos como primer mecanismo; seguido de la incorporación de nutrientes en las plantas que durante la etapa de crecimiento los absorben e incorporan en su propia estructura, que funciona como sustrato para los microorganismos que realizan transformación químicas, entre ellas nitrificación y desnitrificación. Por último, los microorganismos facultativos que se encuentran en las raíces de las plantas degradan la materia orgánica.

En estos sistemas de tratamiento las macrófitas flotantes se ubican sobre la lámina de agua en unidades que se disponen como canales en serie o estanques por los que el paso del agua es continuo. Una posible desventaja, dependiendo de la especie a utilizar, es que estos sistemas necesitan la remoción periódica de las plantas. Sin embargo, existen muchas ventajas, las raíces de las macrófitas utilizadas en estos sistemas constituyen un excelente medio para la filtración de sólidos suspendidos; además, estos sistemas tienden a permanecer libres de algas ya que las macrófitas reducen el paso de la luz solar y la transferencia de gases de la atmósfera al agua, manteniendo condiciones anaeróbicas.

Estas condiciones estarán en función de algunos parámetros de diseño como la carga orgánica, el tiempo de retención, el tipo de especie seleccionada para el tratamiento y la densidad de las plantas en el agua. El desarrollo del medio filtrante, en estos casos las raíces de las plantas acuáticas, dependerá de la disponibilidad de los nutrientes y de la demanda de los nutrientes de la planta; al mismo tiempo su densidad y profundidad dependerá de la calidad del agua, la temperatura, el régimen de cosecha, entre otros.

“Una característica más de las macrófitas de raíces flotantes es que en sus tejidos se pueden retener varios metales pesados, como cadmio, mercurio, y arsénico. Según algunos autores el mecanismo de funcionamiento comienza cuando las raíces absorben los metales y luego se forman complejos entre el metal pesado y los aminoácidos presentes dentro de la célula. Otros sugieren que son los microorganismos presentes en las raíces de la planta los responsables de la creación de sólidos que floculan y por gravedad sedimentan.”⁷

2.5.1.1. Jacinto de agua

“Señalan que esta macrófita es una planta perenne en agua dulce que se caracteriza por su desarrollo ascendente, posee un tallo vegetativo muy corto junto a hojas color verde brillante y espigas de flores de lavanda. La planta flota, en parte, gracias a sus elongados y abultados pecíolos”⁸.

En regiones tropicales y subtropicales el Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) es estudiado gracias a sus características depuradoras y a la facilidad de proliferación que presenta. Dentro de sus características se encuentra su sistema de raíces en las que pueden habitar microorganismos que favorecen la acción depuradora.

“Esta macrófita obtiene, de las aguas servidas, nitrógeno, fósforo, iones de potasio, amonio, calcio, carbonato, cloro, hierro, fosfato, magnesio, nitrito y sulfato, siendo estos los nutrientes más importantes para su crecimiento y reproducción, asimilándolos por medio de las raíces sumergidas en el agua del biofiltro en que se encuentran.

Otros compuestos orgánicos como ácido fórmico, fenoles, colorantes, e incluso pesticidas pueden ser removidos por el Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*). Además, se ha demostrado que es capaz de disminuir los niveles de DBO (demanda bioquímica de oxígeno), DQO (demanda química de oxígeno), y sólidos suspendidos. De igual forma, reducen la concentración de bacterias ya que estas se acumulan en las raíces sumergidas de la macrófita.”⁹

⁷ CELIS HIDALGO, J.; JUNOD MONTANO, J.; SANDOVAL ESTRADA, M. *Recientes aplicaciones e la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas*. p. 25.

⁸ MARTELO, J., LARA BORRERO, J.A. *Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales; una revisión del estado de arte*. p. 85.

⁹ CELIS HIDALGO, J.; JUNOD MONTANO, J.; SANDOVAL ESTRADA, M. *Recientes aplicaciones e la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas*. p. 25.

Indican que en aguas residuales la macrófitas han demostrado ser eficientes en la remoción de contaminantes. Varias especies se han estudiado en este ámbito; sin embargo, el Jacinto de agua se considera de especial interés por sus características depuradoras. Esta especie, según investigaciones anteriores, alcanza reducciones de DBO5 (demanda bioquímica de oxígeno) de 95 % y de DQO (demanda química de oxígeno) de 90,2 %. Al mismo tiempo se registran remociones máximas de fósforo total y nitrógeno total de 91,7 % y 98,5 % para cada uno.¹⁰

En lo que se refiere a sólidos suspendidos, se ha comprobado que las raíces disminuyen como mínimo 21 % y máximo 91 %. Así también, la remoción de metales va desde 85 % hasta 95 % para el cobre, cadmio, cromo, hierro y zinc.

2.5.2. Macrófitas enraizantes en la depuración de aguas residuales

Hidalgo et al., “indican que en los sistemas de depuración que utilizan este tipo de macrófitas se observan plantas de las que sobresalen tallos y hojas emergen del agua, pudiendo llegar hasta los 2 o 3 m de altura. A este tipo de plantas acuáticas se les conoce como halófitas y se caracterizan por vivir en aguas de poca profundidad pero están arraigadas al suelo. Las especies utilizadas en estos sistemas son conocidas comúnmente como junco de agua, hierba de maná, carrizo, lirio amarillo, espaldaña fina, juncos, eneas y espaldañas”.¹¹

Su utilización como sistema de tratamiento se desarrolla en un lecho artificial de arena o grava donde el paso de agua residual, que ya ha pasado por procesos de decantación, es continuo. Las tifáceas del género *Typha sp.*, se utilizan en estos procesos, en canales que pueden medir de 2 a 4 m de

¹⁰ MARTELO, J., LARA BORRERO, J.A. *Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales; una revisión del estado de arte.* p. 85.

¹¹ CELIS HIDALGO, J.; JUNOD MONTANO, J.; SANDOVAL ESTRADA, M. *Recientes aplicaciones e la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas.* p. 27

ancho, 0,5 a 1 m de profundidad y 100 m de longitud. En estos el agua fluye de forma horizontal y debe inundar el sustrato al que se adhieren las raíces de las macrófitas.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

A continuación, se describen las variables de importancia para el estudio.

Tabla I. **Variables de importancia para el estudio**

Variable	Dependiente	Independiente
Nitrógeno	X	
Fósforo	X	
DBO ₅	X	
DQO	X	
pH de la muestra	X	
Temperatura de la muestra	X	
Variedad de macrófita		X
Dimensiones del biofiltro		X
Caudal del afluente		X
Temperatura del afluente		X
pH del afluente		X

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación de campo de estudio

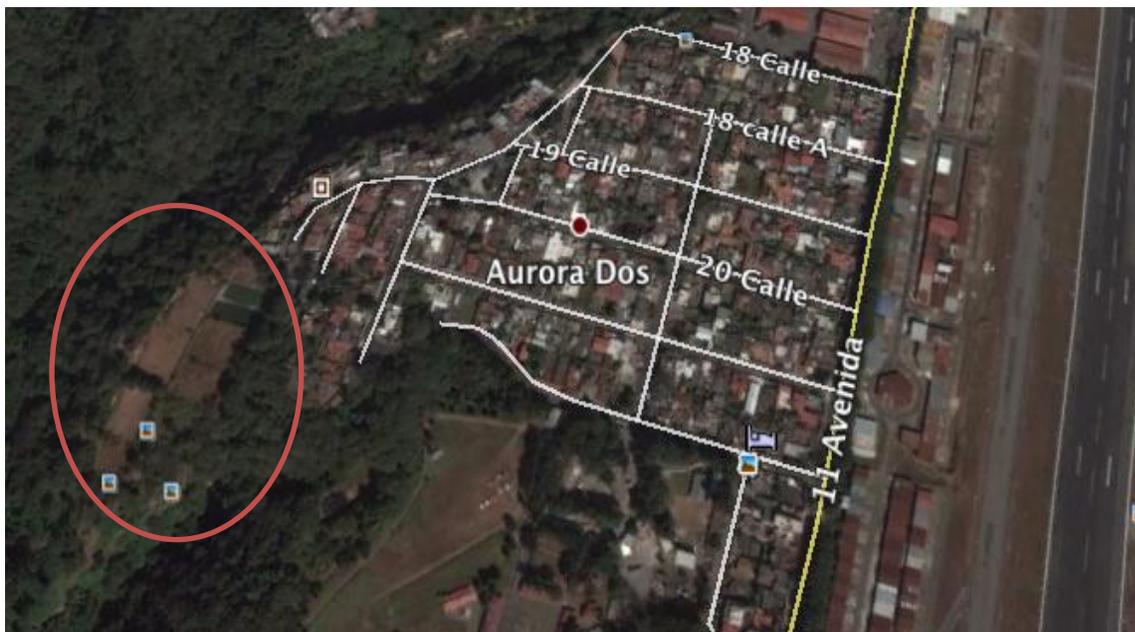
El estudio se llevó a cabo en la planta de tratamiento de aguas residuales domiciliarias 'Ing. Arturo Pazos Sosa' de la colonia Aurora 2 ubicada en la zona 13 de la ciudad de Guatemala.

El agua residual domiciliar se refiere a la generada por las actividades domésticas, se pueden mencionar el uso del lavamanos, lavatrastos, lavadora,

pilas, servicios sanitarios y otras actividades donde se utilice agua y esta se conduzcan a través de un alcantarillado.

En dicha planta se estudiaron dos biofiltros tipo *wetland*, uno con Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), una macrófita de raíces suspendidas y otro con Tul (*Typha sp.*), una macrófita de raíces fijas.

Figura 1. **Ubicación de la Planta de tratamiento 'Ing. Arturo Pazos Sosa' de la colonia Aurora 2**



Fuente: Google Earth. *Planta de tratamiento 'Ing. Arturo Pazos Sosa' de la colonia Aurora 2.*
www.maps-google.com/. Consulta: 30 de diciembre de 2015.

3.3. Recursos humanos disponibles

Las personas que participaron directamente en la ejecución del proyecto se enumeran a continuación:

- Investigadora: Nancy Melissa García.
- Asesor: Ing. Qco. Jorge Mario Estrada Asturias.
- Operador de planta de tratamiento de aguas residuales.
- Personal del Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria 'Dra. Alba Tabarini Molina' perteneciente al Centro de Investigaciones de Ingeniería.

3.4. Recursos materiales disponibles

El equipo y material que se utilizó en la ejecución del proyecto fue el siguiente:

- Planta de tratamiento de aguas residuales domésticas que posea:
 - Biofiltro tipo *wetland* con macrófitas de raíces suspendidas, Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*).
 - Biofiltro tipo *wetland* con macrófitas de raíces fijas, Tul (*Typha sp.*).
- Muestras de agua residual recolectadas.
- Espacio físico para realizar las pruebas de laboratorio.
- Reactivos necesarios para los análisis de laboratorio.

Tabla II. **Material y equipo**

Descripción	Unidades
Medidor de pH y temperatura	1
Recipiente de aforo	1
Cronómetro	1
Caja de guantes desechables	1
Recipientes para recolección de muestras de agua residual	4
Papel mayordomo (rollo)	1
Hielera	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Cristalería y equipo de laboratorio**

Descripción	Unidades
Celdas	8
Pipetas	3
Perilla de succión	1
Pizeta	1
Probeta	1
Probeta graduada	4
Rejilla porta celdas	1
Beacker	2
Termoreactor	1
Espectrofotómetro	1
Potenciómetro	1
Lector de DBO	1
Camara de refrigeración 20 °C	1

Fuente: elaboración propia.

3.5. **Técnica cualitativa o cuantitativa**

Para alcanzar los objetivos se evaluaron y compararon las eficiencias de remoción por medio de porcentajes, con lo cual se puede concluir que el estudio es netamente cuantitativo.

La caracterización hidráulica del biofiltro se realizó directamente en el lugar, durante la visita, se midió el caudal, la temperatura y el pH de las aguas residuales domésticas antes de la entrada al biofiltro y a la salida del mismo. La medición de parámetros de calidad de las muestras de agua fueron analizadas en el laboratorio por medio de la lectura fotométrica de la reacción.

3.5.1. Recolección y traslado de muestras de agua residual

Las muestras se recolectaron cada quince días, en la entrada y salida los dos biofiltros. Para la recolección se utilizaron recipientes plásticos con la capacidad requerida. Se tomó una muestra en el lugar y fue trasladada al laboratorio en una hielera para conservar la temperatura inicial.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Las muestras se recolectaron en la entrada y en la salida de cada biofiltro. Se tomaron en total 5 muestras en cada punto, cada quince días.

Para la determinación del tamaño muestral se tomó como base el muestreo aleatorio simple con valores estadísticos típicos, el grado de significancia $\alpha = 0,05$ con un nivel de confianza 95 %.

Debido a que no se estableció un dato finito del número de corridas a realizar para que los resultados del análisis sean representativos, el tamaño muestral fue determinado de la siguiente manera:

$$n = \frac{Z_{\alpha}^2 \times p \times q}{\delta^2} \quad [\text{Ec. 1}]$$

Donde:

- n = tamaño del espacio muestral.
- Z_{α}^2 = coeficiente prefijado para cierto nivel de confianza ($Z_{\alpha} = 1,96$ establece 95 % de nivel de confianza).
- p = proporción esperada (5 % para este caso).
- $q = 1-p$ ($q = 1-0.05 = 0,95$ para este caso).
- δ = error estándar de amplitud del intervalo de confianza, establecido por el experimentador (en este caso se establecerá un 20 %).

Sustituyendo valores en la ecuación anterior, el tamaño del espacio muestral será:

$$n = \frac{1,96^2 \times 0,05 \times 0,95}{0,20^2} = 4,56$$

El tamaño muestral no puede estar fraccionado, por lo que se aproxima al entero superior. En este caso fue 5.

La certeza de los resultados obtenidos depende en gran manera de la cantidad de muestras a analizar, el espacio muestral debe ser representativo para que los resultados sean útiles.

Además de los análisis que se realizaron en el laboratorio a las muestras de agua antes mencionadas, se realizaron mediciones *in situ* de las características hidráulicas del biofiltro utilizado para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Se midió el caudal, la temperatura el y pH del agua servida cada vez que se realizó un muestreo.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

La información se ordenó y recolectó de la siguiente manera:

3.7.1. Muestra de cálculo

- Porcentaje de eficiencia de remoción de los parámetros de calidad fisicoquímicos de las aguas residuales, tales como: DBO₅, DQO, amoníaco libre, nitritos, nitratos, ortofosfatos, pH.

$$\% \text{ eficiencia} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \quad [\text{Ec 2}]$$

Donde:

- C_i= concentración inicial del nutriente en la entrada del biofiltro (mg/l)
- C_f= concentración final del nutriente en la salida del biofiltro (mg/l)

Nota: este procedimiento se realizó para determinar el porcentaje de eficiencia de remoción de todos los parámetros medidos.

Los resultados obtenidos de los análisis de laboratorio se presentarán de la siguiente forma:

Tabla IV. **Valores obtenidos de la caracterización hidráulica de operación del biofiltro tipo *wetland* de flujo subsuperficial con Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*)**

Parámetro	Número de muestra					X
	1	2	3	4	5	
Caudal entrada (l/s)	0,143	0,197	0,163	0,228	0,201	0,186
Caudal salida (l/s)	0,129	0,122	0,138	0,201	0,080	0,134
Temperatura (°C)	24,6	24,1	25,2	27,1	26,5	25,5
pH	7,7	7,2	7,1	6,9	7,0	7,2

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Valores obtenidos de la caracterización hidráulica de operación del biofiltro tipo *wetland* de flujo subsuperficial con Tul (*Typha sp.*)**

Parámetro	Número de muestra					X
	1	2	3	4	5	
Caudal entrada (l/s)	0,129	0,147	---	0,122	0,166	0,141
Caudal salida (l/s)	0,074	---	0,055	0,059	0,076	0,331
Temperatura (°C)	24,6	23,5	---	26,8	26,8	25,4
pH	7,1	7,1	---	7,0	6,6	6,9

Fuente: elaboración propia.

Nota: se descarta el resultado del caudal de salida del segundo muestreo del biofiltro debido a que el resultado se desvió del promedio de mediciones. La tercera caracterización de entrada del biofiltro tipo *wetland* de flujo subsuperficial con Tul (*Typha sp.*) no se realizó debido a que en ese momento el afluente no estaba presente por escases de agua en las residencias.

Tabla VI. **Valores obtenidos de la caracterización fisicoquímica en la entrada del biofiltro tipo *wetland* de flujo subsuperficial con Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*)**

Parámetro	Numero de muestra					X
	1	2	3	4	5	
Nitrógeno total (mg/l)	88,4	115,0	105,2	106,9	72,8	97,7
Ortofosfatos (mg/l)	22,3	15,0	19,5	13,9	17,3	17,6
DBO ₅ (mg/l)	118,2	63,0	53,6	79,6	71,5	77,2
DQO (mg/l)	139,0	143,0	132,0	192,0	212,0	163,6
Temperatura (°C)	24,6	24,1	25,2	27,1	26,5	25,5
pH	7,7	7,2	7,1	6,9	7,0	7,2

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Valores obtenidos de la caracterización fisicoquímica en la salida del biofiltro tipo *wetland* de flujo subsuperficial con Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*)**

Parámetro	Numero de muestra					X
	1	2	3	4	5	
Nitrógeno total (mg/l)	57,0	96,5	76,0	86,8	41,8	71,6
Ortofosfatos (mg/l)	10,1	14,2	14,7	19,1	24,6	16,5
DBO ₅ (mg/l)	52,4	25,3	44,8	63,4	34,5	44,1
DQO (mg/l)	97,0	102,0	73,0	148,0	88,0	101,6
Temperatura (°C)	24,4	23,4	25,0	26,6	25,8	25,0
pH	7,2	7,2	7,0	7,0	6,9	7,1

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Valores obtenidos de la caracterización fisicoquímica en la entrada del biofiltro tipo *wetland* de flujo subsuperficial con Tul (*Typha sp.*)**

Parámetro	Número de muestra					X
	1	2	3	4	5	
Nitrógeno total (mg/l)	79,5	132,9	---	40,7	97,0	81,5
Ortofosfatos (mg/l)	11,1	14,4	---	31,5	16,8	18,5
DBO ₅ (mg/l)	182,0	220,0	---	198,0	209,0	202,3
DQO (mg/l)	402,0	524,0	---	591,0	624,0	535,3
Temperatura (°C)	24,6	23,5	---	26,8	26,8	25,4
pH	7,1	7,1	---	7,0	6,6	6,9

Fuente: elaboración propia.

Nota: la tercera caracterización de entrada del biofiltro tipo *wetland* de flujo subsuperficial con Tul (*Typha sp.*) no se realizó debido a que en ese momento el afluente no estaba presente por escasas de agua en las residencias.

Tabla IX. **Valores obtenidos de la caracterización fisicoquímica en la salida del biofiltro tipo *wetland* de flujo subsuperficial con Tul (*Typha sp.*)**

Parámetro	Número de muestra					X
	1	2	3	4	5	
Nitrógeno total (mg/l)	17,6	90,1	93,2	82,7	36,8	64,1
Ortofosfatos (mg/l)	13,2	20,2	15,5	18,9	61,0	25,8
DBO ₅ (mg/l)	44,0	72,0	104,2	157,0	103,4	96,1
DQO (mg/l)	135,0	138,0	132,0	235,0	188,0	165,6
Temperatura (°C)	24,5	23,2	24,5	26,9	26,4	25,1
pH	6,8	6,8	6,9	6,6	6,6	6,7

Fuente: elaboración propia.

4. RESULTADOS

Tabla X. **Porcentaje de remoción en el biofiltro tipo *wetland* de flujo subsuperficial con Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*)**

Parámetro	Entrada	Salida	Diferencia	% eficiencia de remoción
Nitrógeno total (mg/l)	97,7	71,6	-26,0	26,65 %
Ortofosfatos (mg/l)	17,6	16,5	-1,1	6,02 %
DBO ₅ (mg/l)	77,2	44,1	-33,1	42,90 %
DQO (mg/l)	163,6	101,6	-62,0	37,90 %
pH	7,2	7,1	-0,1	---

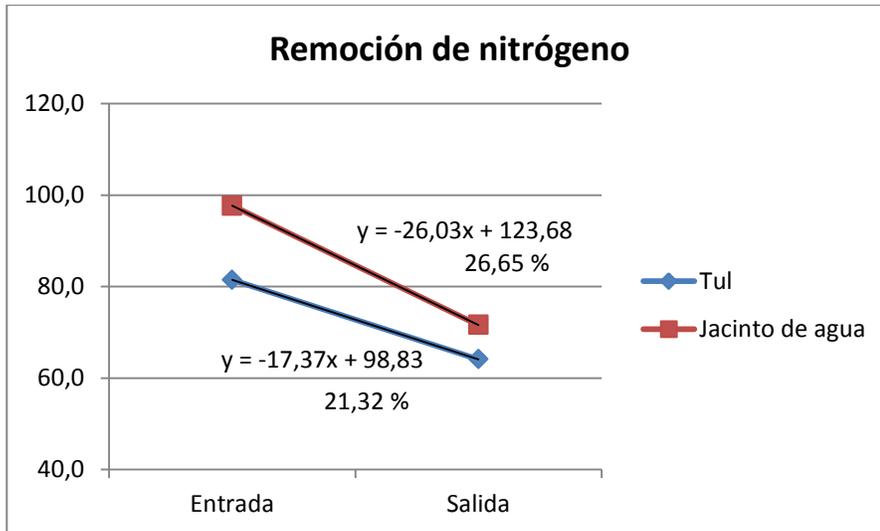
Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Porcentaje de remoción en el biofiltro tipo *wetland* de flujo subsuperficial con Tul (*Typha sp.*)**

Parámetro	Entrada	Salida	Diferencia	% eficiencia de remoción
Nitrógeno total (mg/l)	81,5	64,1	-17,4	21,32 %
Ortofosfatos (mg/l)	18,5	25,8	+7,3	39,62 %
DBO ₅ (mg/l)	202,3	96,1	-106,1	52,47 %
DQO (mg/l)	535,3	165,6	-369,7	69,06 %
pH	6,9	6,7	-0,2	---

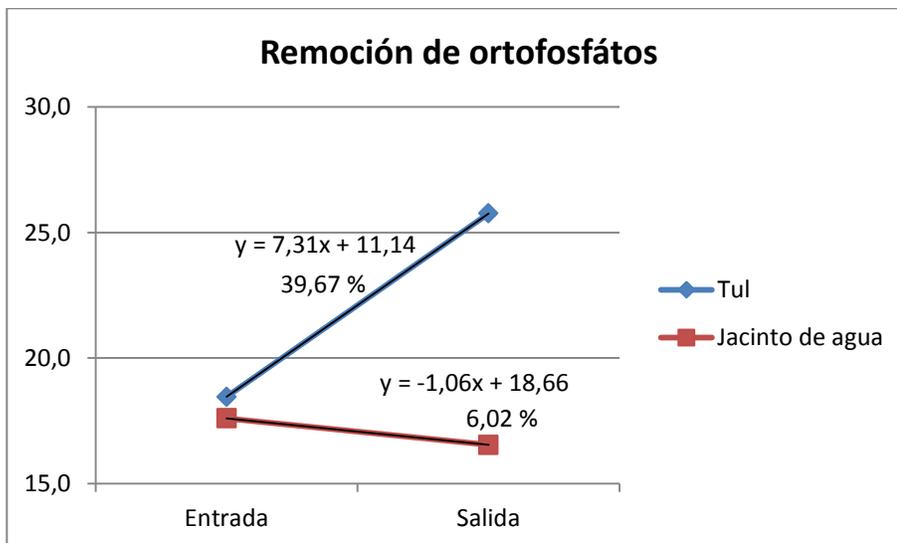
Fuente: elaboración propia.

Figura 2. Remoción de nitrógeno en ambos biofiltros



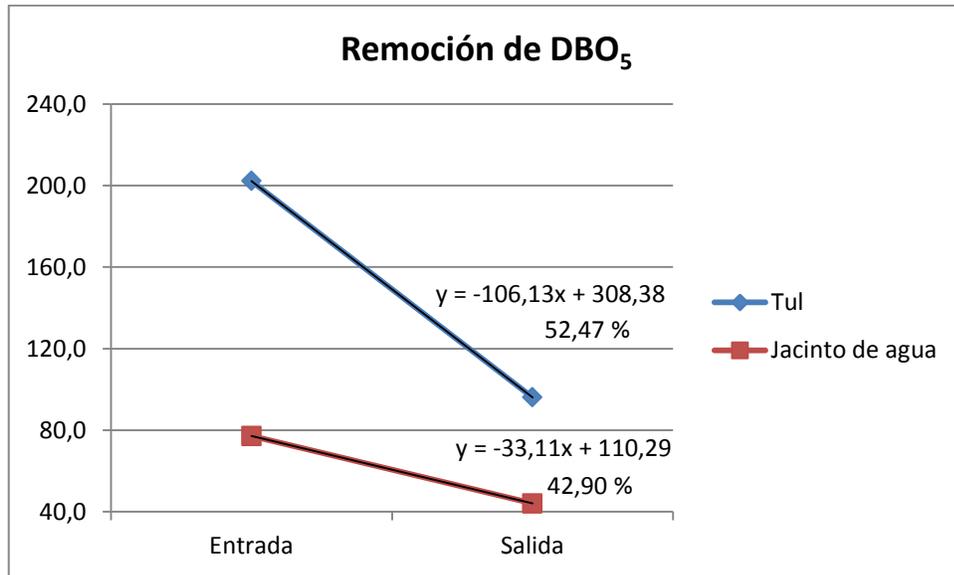
Fuente: elaboración propia.

Figura 3. Remoción de ortofosfatos en ambos biofiltros



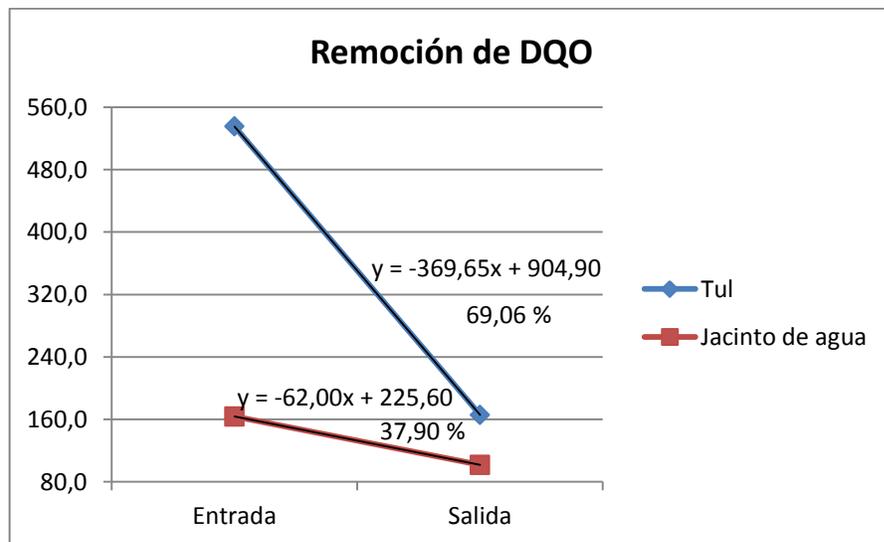
Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Remoción de DBO₅ en ambos biofiltros



Fuente: elaboración propia.

Figura 5. Remoción de DQO en ambos biofiltros



Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En la entrada del biofiltro de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) se determinó la concentración de nutrientes en 97,7 mg/l de nitrógeno y 17,6 mg/l de ortofosfatos. En cuanto a la carga orgánica, se determinó un valor de 77,2 mg/l de DBO₅ y 163,6 mg/l de DQO.

En la entrada del biofiltro de Tul (*Typha sp.*) se determinó la concentración de nutrientes en 81,5 mg/l de nitrógeno y 18,5 mg/l de ortofosfatos. En cuanto a la carga orgánica, se determinó un valor de 202,3 mg/l de DBO₅ y 535,3 mg/l de DQO.

El afluente que ingresa al biofiltro de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) recibe tratamientos preliminares de remoción de sólidos y un tratamiento secundario en un reactor anaerobio, reduciendo la demanda de oxígeno por medio de bacterias; razón por la cual la concentración de carga orgánica es menor en este afluente. El afluente que ingresa al biofiltro de Tul (*Typha sp.*) únicamente recibe un tratamiento de remoción de sólidos grandes, por lo que se evidencia mayor carga orgánica.

El biofiltro de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) opera con un caudal promedio, en la entrada de 0,186 l/s y en la salida de 0,134 l/s que evidencia una reducción del 28,0 %, a una temperatura de 25,5 °C y un pH de 7,2.

El biofiltro de Tul (*Typha sp.*) opera con un caudal promedio, en la entrada de 0,141 l/s y en la salida de 0,066 l/s evidenciando una reducción del 53,0 %, a una temperatura de 25,4 °C y un pH de 6,9.

La remoción de nitrógeno promedio en el biofiltro de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) fue de 26,65 % y en menor magnitud la reducción de ortofosfatos fue de 6,02 %. En cuanto a la carga orgánica, el resultado promedio de remoción durante el periodo de análisis de DBO₅ fue de 42,90 % y para DQO fue de 37,90 %.

La remoción de nitrógeno promedio en el biofiltro de Tul (*Typha sp.*) fue en de 21,32 %. La remoción de nitrógeno evidenció una correlación proporcional directa a la eficiencia de remoción de DBO₅ en el biofiltro. En cuanto a la carga orgánica, el resultado promedio de remoción de DBO₅ fue de 52,47 % y para DQO fue de 69,06 %.

Con base en los resultados de remoción de nitrógeno obtenidos se evidencia que ambos biofiltros remueven en magnitudes similares este nutrientes, sin embargo el biofiltro de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) redujo en promedio 5 % más; esto se debió a que en el cuarto muestreo la remoción de nitrógeno en el biofiltro de Tul fue negativa debido a la baja demanda bioquímica de oxígeno del afluente. En ambos biofiltros la remoción de nitrógeno se ve afectada por la poca disponibilidad de oxígeno, característica de los biofiltros de flujo horizontal, que limita los mecanismos de nitrificación y desnitrificación.

La remoción de fósforo se evidenció únicamente en el biofiltro de Jacinto ya que en el biofiltro de Tul (*Typha sp.*) se obtuvo un aumento de la concentración promedio de este nutriente especialmente, en el quinto muestreo en el que la macrófita se encontraba en su mayor crecimiento. Este aumento se debe a la muerte celular en el biofiltro, considerando que la macrófita enraizada utilizada brota constantemente sustituyendo sus hojas como parte del ciclo natural del crecimiento de la misma.

La reducción de carga orgánica fue mayor en el biofiltro de Tul (*Typha sp.*) que en el de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), a pesar de que la carga recibida en el afluente de este último era mayor. Esto se debe a que el lecho filtrante del biofiltro de Tul permite mayor contacto del agua con los microorganismos que se encuentran en las raíces, los cuales cumplen con la función de metabolizar los contaminantes orgánicos. Además de que el crecimiento del Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) fue más lento debido a que la cantidad de carga orgánica que recibió del afluente era menor.

Aun así, en el máximo punto de crecimiento de ambas macrófitas, el biofiltro de Tul (*Typha sp.*) evidenció una remoción mayor de carga orgánica.

La medición de pH se realizó en la entrada y salida de ambos biofiltros; sin embargo, no se considera un parámetro de reducción significativo para la comparación.

CONCLUSIONES

1. La remoción de carga orgánica en el biofiltro de Tul (*Typha sp.*) en el presente estudio, alcanzó una eficiencia del 69 % en el parámetro de DQO, siendo aproximadamente 50 % mayor que la eficiencia promedio alcanzada por el Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), cuya remoción de DQO fue de 37 %.
2. La remoción del nutriente nitrógeno se evidenció tanto en el biofiltro de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) como en el biofiltro de Tul (*Typha sp.*) en el presente estudio, alcanzando eficiencias similares de 26,65 % y 21,32 %, respectivamente.
3. La remoción del nutriente fósforo, únicamente se evidenció en el biofiltro de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), alcanzando una eficiencia promedio de 6,02 % para el tratamiento de aguas residuales domésticas.
4. Los parámetros hidráulicos fueron constantes durante el periodo de análisis, por lo que no afectaron directamente los resultados de remoción presentes en este estudio.
5. Los resultados de la eficiencia de remoción de carga orgánica fueron mayores en el biofiltro de Tul (*Typha sp.*) en comparación a los resultados obtenidos en el biofiltro de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), caso contrario para la remoción de nutrientes en los que el biofiltro de Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) presenta valores mayores de remoción.

RECOMENDACIONES

1. Incrementar la cantidad de muestreos de las características hidráulicas y fisicoquímicas para realizar una comparación más precisa de la operación de ambas macrófitas.
2. Comparar la remoción de nutrientes y la carga orgánica de ambas macrófitas correlacionando el crecimiento de la biomasa con los porcentajes de remoción para determinar la edad óptima en que la macrófita remueve mayor cantidad de contaminantes.
3. Comparar los resultados de remoción de contaminantes en época seca y época lluviosa para determinar la influencia que tiene en el funcionamiento de los biofiltros.
4. Realizar la caracterización fisicoquímica del efluente de ambos biofiltros en un ambiente controlado, donde se trate el mismo afluente para que las condiciones de operación sean iguales.

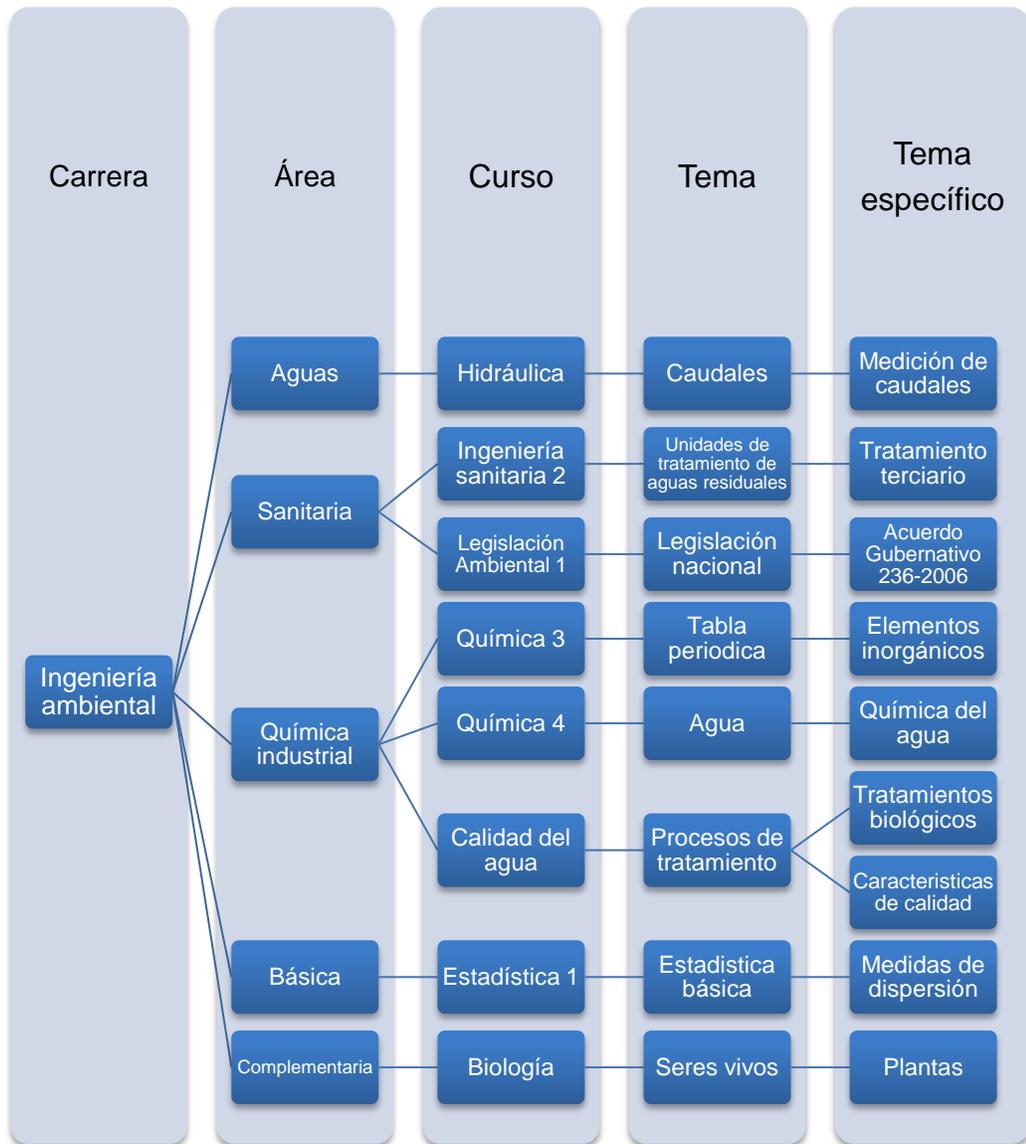
BIBLIOGRAFÍA

1. ARANGO CHAMALÉ, Luis Felipe. *Construcción de un wetland*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2005. 120 p.
2. CAMPOVERDE CADILLO, Martin. *Remoción de materia orgánica mediante *Chrysopogon zizanioides* en el tratamiento secundario de aguas residuales domésticas de CITAR*. Perú: UNTELS, Facultad de Ingeniería y Gestión, 2017. 78 p.
3. CELIS HIDALGO, José; JUNOD MONTANO, Julio; SANDOVAL ESTRADA, Marco. *Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas*. Chile: Universidad de Concepción, 2005. 175 p.
4. CRITES, Ron; TCHOBANOGLOUS, George. *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Colombia: McGraw-Hill, 2000. 182 p.
5. IARNA-URL (Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar). *Perfil ambiental de Guatemala 2010-2012: vulnerabilidad local y creciente construcción del riesgo*. Guatemala: Universidad Rafael Landívar, 2012. 291 p.

6. MARTELO, J., LARA BORRERO, J.A. *Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales; una revisión del estado de arte*. Colombia: ISSN. 2012, 221-143 p.
7. ÑUNEZ, Roberto; MEAS, Yunny; ORTEGA, Raúl; OLGUÍN Eugenia. *Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones*. [En línea]. <http://revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/55_3/Fitorremediacion.pdf>. [Consulta: 27 de mayo de 2017].
8. OROZCO JARAMILLO, Álvaro. *Bioingeniería de aguas residuales, teoría y diseño*. Medellín, Colombia: ACODAL, 2005. 550 p.
9. PLATZER, MICHAEL. *Investigaciones y experiencias con biofiltros en Nicaragua, Centro América*. [En línea]. <<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico26/ii-109.pdf>>. [Consulta: 27 de mayo de 2017].
10. SÁNCHEZ MONTUFAR, J. M. *Determinación de nitrógeno total, fósforo total y metales pesados en macrófitas acuáticas de la especie Eichhornia crassipes (Lirio acuático) de la laguna de Chichoj, Alta Verapaz para sugerir su posible utilización como purificadores biológicos y fertilizante agrícola*. Trabajo de graduación de Licenciatura Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, 1994. 152 p.

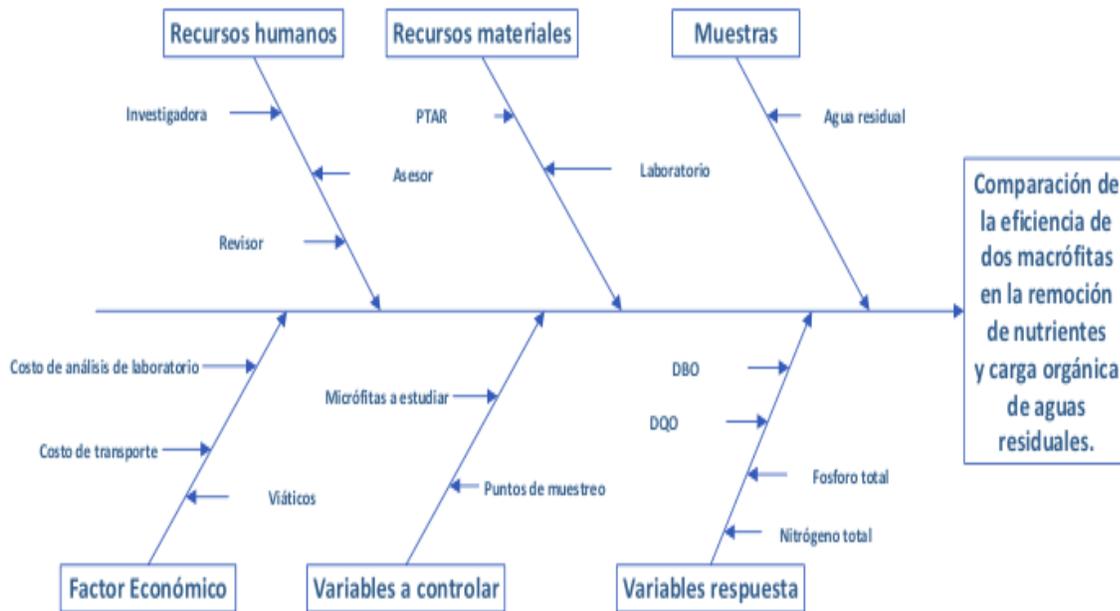
APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Cronograma de muestreo y crecimiento del Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) en el biofiltro**

Actividad	Día 1	Día 21	Día 26	Día 36	Día 41	Día 51	Día 56	Día 66	Día 71	Día 82	Día 87	No. Estimado de matitas	% de ocupación
Introducción de la macrofitas al biofiltro	7 %											10	7 %
Primera toma de muestras para análisis fisicoquímico		14 %										20	14 %
Resultados DBO ₅												60	43 %
Segunda toma de muestras para análisis fisicoquímico				43 %								100	71 %
Resultados DBO ₅												120	86 %
Tercera toma de muestras para análisis fisicoquímico						71 %						140	100 %
Resultados DBO ₅													
Cuarta toma de muestras para análisis fisicoquímico								86 %					
Resultados DBO ₅													
Quinta toma de muestras para análisis fisicoquímico										100 %			
Resultados DBO ₅													

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Evolución del Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) en el biofiltro tipo *wetland* de flujo subsuperficial**

- Día 1: introducción de la macrófita al biofiltro



Se introdujeron al biofiltro cinco matas de Jacinto de agua extraídas del lago de Amatitlán el 30 de enero de 2017.

- Día 21: primera caracterización



Continuación del apéndice 4.

Se realizó la primera caracterización fisicoquímica de nutrientes y carga orgánica el 22 de febrero de 2017.

- Día 36: segunda caracterización



Se realizó la segunda caracterización fisicoquímica de nutrientes y carga orgánica 08 de marzo de 2017.

- Día 51: tercera caracterización



Continuación del apéndice 4.

Se realizó la tercera caracterización fisicoquímica de nutrientes y carga orgánica el 22 de marzo de 2017.

- Día 66: cuarta caracterización



Se realizó la cuarta caracterización fisicoquímica de nutrientes y carga orgánica el 05 de abril de 2017.

Continuación del apéndice 4.

- Día 82: quinta caracterización



Se realizó la quinta caracterización fisicoquímica de nutrientes y carga orgánica el 20 de abril de 2017.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Cronograma de muestreo y crecimiento del Tul (*Typha sp.*) en el biofiltro**

Actividad	Día 1	Día 21	Día 26	Día 36	Día 41	Día 51	Día 56	Día 66	Día 71	Día 82	Día 87	No. Estimado de matitas	% de ocupación
Poda del Tul (<i>Typha sp.</i>)	19 %											30	19 %
Primera toma de muestras para análisis fisicoquímico		38 %										60	38 %
Resultados DBO ₅												75	47 %
Segunda toma de muestras para análisis fisicoquímico				47 %								100	63 %
Resultados DBO ₅												130	81 %
Tercera toma de muestras para análisis fisicoquímico						63 %						160	100 %
Resultados DBO ₅													
Cuarta toma de muestras para análisis fisicoquímico								81 %					
Resultados DBO ₅													
Quinta toma de muestras para análisis fisicoquímico										100 %			
Resultados DBO ₅													

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Evolución del Tul (*Typha sp.*) en el biofiltro tipo *wetland* de flujo subsuperficial**

- Día 1: de la macrófita al biofiltro



Se podó la macrófita para comenzar el ciclo de crecimiento en el biofiltro de Tul el 30 de enero de 2017.

- Día 21: primera caracterización



Se realizó la primera caracterización fisicoquímica de nutrientes y carga orgánica el 22 de febrero de 2017.

Continuación del apéndice 6.

- Día 36: segunda caracterización



Se realizó la segunda caracterización fisicoquímica de nutrientes y carga orgánica el 08 de marzo de 2017.

- Día 51: tercera caracterización



Se realizó la tercera caracterización fisicoquímica de nutrientes y carga orgánica el 22 de marzo del 2017.

Continuación del apéndice 6.

- Día 66: cuarta caracterización



Se realizó la cuarta caracterización fisicoquímica de nutrientes y carga orgánica 05 de abril del 2017.

- Día 82: quinta caracterización



Se realizó la quinta caracterización fisicoquímica de nutrientes y carga orgánica el 20 de abril de 2017.

Fuente: elaboración propia.

