



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE CIENCIAS QUÍMICAS

**“COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LOS FILTROS DE
MACROFITAS EN FLOTACIÓN FMF, PARA EL TRATAMIENTO
DE AGUAS DE LAGOS EUTRÓFICOS.”**

TRABAJO DE TITULACIÓN

TIPO: PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERA EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

AUTORA: QUINTANA PÉREZ DIANA CAROLINA

TUTORA: ING. SOFÍA GODOY

Riobamba-Ecuador

2017

@2017, Diana Carolina Quintana Pérez

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE CIENCIAS QUÍMICAS

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo investigativo: COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LOS FILTROS DE MACROFITAS EN FLOTACIÓN FMF, PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS DE LAGOS EUTRÓFICOS, de responsabilidad de la señorita Diana Carolina Quintana Pérez, ha sido minuciosamente revisado por el Tribunal de Trabajo de Titulación, quedando autorizada su presentación.

	Fecha	Firma
Ing. Sofía Godoy Ponce DIRECTORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	_____	_____
Ing. Camilo Haro MIEMBRO DEL TRIBUNAL	_____	_____

Yo, Diana Carolina Quintana Pérez soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en esta Tesis y el patrimonio intelectual de la Tesis de Grado pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Diana Carolina Quintana Pérez

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Diana Carolina Quintana Pérez, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación.

Riobamba, 4 de Agosto del 2017

Diana Carolina Quintana Pérez

0503230799

DEDICATORIA

A mi padre Edmundo Quintana, por ser mi ejemplo de lucha y apoyo incondicional durante todos estos años, por inculcarme valores como la perseverancia y la responsabilidad, por todas sus horas de sacrificio lejos de casa y sobre todo por su amor incondicional.

A mi madre Olga Pérez, por haber luchado conmigo muchas batallas que me enseñaron a ser una persona más humana y sensible, por haber sido las palabras de aliento en los momentos más difíciles y por su compañía llena de amor todos estos años.

A mi abuelito Guillermo, por ser como mi segundo padre y enseñarme todos los días el valor de la paciencia y el trabajo, por haber formado parte de mi formación académica desde niña, por demostrarme su cariño y compartir conmigo sus enseñanzas.

A mi hermano Sebastián, quien es el motivo de mi superación y alegría.

Diana Carolina

AGRADECIMIENTO

Agradezco infinitamente a Dios, por darme la fuerza suficiente para cumplir con mi meta universitaria, guiar mis pasos y bendecirme durante estos 6 años lejos de casa.

A mis padres Edmundo y Olga, por haberme apoyado en todo momento y permitirme cumplir con esta meta personal, porque han sido mi pilar y ejemplo de lucha diaria.

Agradezco también a mi Directora y Miembro del Tribunal, por haber dedicado tiempo valioso a este trabajo de investigación, por haber sido mi guía y compartir conmigo sus conocimientos, haciendo posible con su asesoramiento la realización de este proyecto.

Finalmente agradecer a mis amigos, Pamela, Helen, Diana, William, Lorena; porque se han convertido en mi Familia, hemos compartido muchos momentos juntos y supieron darme su apoyo en este camino.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	XVI
SUMARY.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I	
1 MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	8
1.1. Eutrofización.....	8
1.2. Lagos eutróficos.....	8
1.2.1. <i>Lagos eutróficos del Ecuador</i>	9
1.2.2. <i>Características de lagos eutróficos</i>	9
1.3. Aspectos legales relacionados con las descargas en cuerpos de agua dulce.....	12
1.4. Macrófitas acuáticas.....	13
1.4.1. <i>Características generales</i>	13
1.4.2. <i>Clasificación de las Macrófitas Acuáticas</i>	13
1.4.3. <i>Macrófitas acuáticas empleadas en procesos de Fitorremediación en Ecuador</i>	14
1.5. Totora en humedales artificiales	15
1.5.1. <i>Taxonomía</i>	15
1.5.2. <i>Morfología de la Totora</i>	15
1.5.3. <i>Reproducción de la Totora</i>	17
1.5.4. <i>Tiempo de crecimiento y hábitat</i>	17
1.5.5. <i>Uso de Totora en la fitorremediación</i>	17
1.6. Humedales artificiales.....	18
1.6.1. <i>Filtros de Macrófitas Flotantes</i>	19
1.6.2. <i>Partes del humedal</i>	20
1.6.3. <i>Sustratos como reguladores del crecimiento vegetal</i>	21
1.6.4. <i>Mecanismo de remoción de contaminantes</i>	22

CAPÍTULO II

2 PARTE EXPERIMENTAL.....	26
2.1. Metodología de la Investigación	26
2.1.1. Lugar de la Investigación.....	26
2.1.2. Hipótesis y especificación de las variables	26
2.1.3. Tipo y diseño de la investigación:	26
2.1.4. Unidad de análisis	27
2.1.5. Población de estudio	28
2.1.6. Tamaño de la muestra.....	28
2.1.7. Selección de la muestra.....	28
2.1.8. Técnica de recolección de datos	29
2.2. Procedimientos realizados en el estudio	30
2.2.1. Acondicionamiento de los Filtros de Macrófitas Flotantes	32
2.2.2. Selección de los diferentes parámetros de control a ser aplicados en las unidades experimentales	37
2.2.3. Determinación de la eficiencia de los Filtros de Macrófitas en Flotación a partir de la concentración de nitrógeno y fósforo obtenida en la caracterización de aguas tratadas	42

CAPÍTULO III

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
3.1. Acondicionamiento de las estructuras flotantes para el crecimiento de Totorá en unidades experimentales	44
3.1.1. Dimensionamiento de las unidades experimentales.....	44
3.2. Selección de los diferentes parámetros de control a ser aplicados en las unidades experimentales	45
3.2.1. Caracterización inicial del agua de la Laguna de Colta	45
3.2.2. Definición de los parámetros de control.....	45
3.2.3. Caracterización intermedia del agua de la Laguna de Colta	47
3.2.4. Caracterización final del agua de la Laguna de Colta	50
3.3. Determinación de la eficiencia de los Filtros de Macrófitas en Flotación a partir de la concentración de nitrógeno y fósforo obtenida en la caracterización del agua tratada	54

3.3.1. <i>Análisis estadístico</i>	54
3.3.2 <i>Curvas de eficiencia</i>	62
CONCLUSIONES	64
RECOMENDACIONES	66
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 2-1: Criterios de calidad admisible de la DBO5 para la protección de la vida acuática .	13
Tabla 3-1: Ubicación taxonómica de la Totora.....	15
Tabla 4-1: Características morfológicas y composición química	17
Tabla 5-1: Criterios de diseño para humedales con plantas acuáticas	19
Tabla 1-2: Parámetros y métodos para la caracterización del agua	39
Tabla 2-2: Composición de la solución de sales minerales y fitohormonas biológicamente activas	40
Tabla 3-2: Estructuración de los Filtros de Macrófitas Flotantes.....	41
Tabla 1-3: Resultados del dimensionamiento de las unidades experimentales.....	44
Tabla 2-3: Caracterización inicial del agua de la Laguna de Colta.....	45
Tabla 3-3: Temperaturas promedio registradas dentro del invernadero	46
Tabla 4-3: Caracterización intermedia de las unidades experimentales B1, B2 Y B3.....	47
Tabla 5-3: Caracterización final de las unidades experimentales B1, B2 Y B3.	50
Tabla 6-3: Matriz de Correlaciones	54
Tabla 7-3: KMO y Prueba de Barlett.....	54
Tabla 8-3: Comunalidades	55
Tabla 9-3: Varianza total explicada	55
Tabla 10-3: Matriz de componentes rotados.....	56
Tabla 11-3: Estadísticos de Contraste.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Principales procesos de depuración en humedales artificiales.....	20
Figura 1-2: Diagrama del procedimiento realizado en la Investigación	31
Figura 1-3: Porcentaje de remoción en el Biofiltro B1	48
Figura 2-3: Porcentaje de remoción en el Biofiltro B2.....	48
Figura 3-3: Porcentaje de remoción en el Biofiltro B3.....	48
Figura 4-3: Porcentaje de remoción en el Biofiltro B1.....	51
Figura 5-3: Porcentaje de remoción en el Biofiltro B2.....	52
Figura 6-3: Porcentaje de remoción en el Biofiltro B3.....	52
Figura 7-3: Gráfico de sedimentación del análisis DCP.....	56
Figura 8-3: Gráfico de componentes en espacio rotado del análisis DCP.....	57
Figura 9-3: Gráfico de barras del análisis estadístico DCP	57
Figura 10-3: Gráfico de barras del análisis estadístico DCP.....	58
Figura 11-3: Gráfico de barras del análisis DCP	58
Figura 12-3: Gráfico de barras del análisis estadístico DCP	59
Figura 13-3: Gráfico de barras del análisis estadístico DCP	59
Figura 14-3: Gráfico de barras del análisis estadístico DCP	60
Figura 15-3: Gráfico de barras del análisis estadístico DCP	60
Figura 16-3: Gráfico de barras del análisis estadístico para Pruebas No Paramétricas	61
Figura 17-3: Curvas de Eficiencia para la Remoción de Nitrógeno Total y Fosfatos, Biofiltro 1	62
Figura 18-3: Curvas de Eficiencia para la Remoción de Nitrógeno Total y Fosfatos, Biofiltro 2	62
Figura 19-3: Curvas de Eficiencia para la Remoción de Nitrógeno Total y Fosfatos, Biofiltro 3	63

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1-2: Invernadero para los Filtros de Macrófitas Flotantes	28
Fotografía 2-2: Totorá utilizada en el proceso inicial de Fitorremediación	34
Fotografía 3-2: Estructuración del Biofiltro	34
Fotografía 4-2: Biofiltro conformado por agua de la Laguna de Colta y Totorá.....	35
Fotografía 5-2: Biofiltro conformado por agua de la Laguna de Colta, Totorá y Oxigenación	36
Fotografía 6-2: Biofiltro conformado por agua de la Laguna de Colta, Totorá, Oxigenación y Bioestimulante	36
Fotografía 7-2: Filtros de Macrófitas Flotantes con sus réplicas respectivas	40
Fotografía 8-2: Caracterización de parámetros Físico-Químicos	41
Fotografía 9-2: Medición de la DQO.	42
Fotografía 10-2: Medición de la Turbidez.....	42
Fotografía 11-2: Medición de la DBO.....	42

ÍNDICE DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS}

%	Porcentaje
pH	Potencial de Hidrógeno
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
EDAR	Estación de Depuración de Aguas Residuales
FMF	Filtros de Macrófitas Flotantes
N₂	Nitrógeno Molecular
NO₃	Nitrato
NO₂	Nitritos
NH₄	Amonio
H⁺	Catión Hidrógeno
OH	Grupo Hidróxido
CO₃²⁻	Carbonatos
SO₄²⁻	Ion Sulfato
Ca⁺²	Ion Calcio
Mg⁺²	Ion Magnesio
Na⁺	Ion Sodio
K⁺	Ion Potasio
CO₂	Dióxido de Carbono
MAE	Ministerio del Ambiente del Ecuador
DBO₅	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
mm	Milímetros
cm	Centímetros
gO₂/m²d	Gramos de Oxígeno por metro cuadrado día
PO₄³⁻	Fosfato
EPA	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos
B1	Biofiltro 1
B2	Biofiltro 2
B3	Biofiltro 3
TDS	Sólidos Disueltos Totales
m³	Metros Cúbicos

INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
Km	Kilómetros
m.s.n.m	Metros sobre el nivel del mar
DCP	Diseño de Componentes Principales
mg/l	Miligramos por litro
UFC	Unidades Formadoras de Colonias
mS/cm	Milisiemens por centímetro
NTU	Unidades Nefelométricas
KMO	Kaiser Meyer Olkin

RESUMEN

En el presente estudio, se determinó la eficiencia de los Filtros de Macrófitas Flotantes FMF en la remoción de Nitrógeno y Fósforo (nutrientes eutrofizantes), para el tratamiento de aguas residuales presentes en la Laguna de Colta, ecosistema considerado en riesgo debido a que se encuentra influenciado tanto por actividades agrícolas y de pastoreo de las comunidades situadas en las afueras, como por las escorrentías superficiales; causando el crecimiento descontrolado de especies vegetales acuáticas, proceso conocido como eutrofización. Para llevar a cabo esta investigación se construyeron tres biofiltros con tres réplicas cada uno (B1, B2 y B3); en cada biofiltro se utilizó Totorá (macrófita), sobre una estructura flotante, con la finalidad de controlar su proliferación; gracias a su particularidad de transportar el oxígeno presente en la atmósfera e introducirlo a través de sus raíces al agua, se permitió la reproducción de microorganismos aerobios, que degradaron la materia orgánica y nutrientes. Tanto el Biofiltro 1 (B1), Biofiltro 2 (B2) y Biofiltro 3 (B3), estuvieron conformados por agua de la Laguna de Colta y Totorá, siendo la oxigenación y una solución de sales minerales y fitohormonas biológicamente activas (bioestimulante para el crecimiento de Totorá), las variables de control utilizadas para su comparación; efectuándose de esta manera caracterizaciones 15 y 30 días después de haber iniciado con el tratamiento, obteniendo resultados cuantitativos suficientes que permitieron determinar que los tres biofiltros (B1, B2 y B3), junto con sus respectivas réplicas redujeron el Nitrógeno Total y Fosfatos en un porcentaje mayor al 90%. Lo que permitió concluir que los Filtros de Macrófitas Flotantes FMF, corresponden a una tecnología verde e innovadora en vías de desarrollo, frente a otros tratamientos convencionales y que mediante una correcta aplicación, podrían generar a futuro una solución a la contaminación de ecosistemas acuáticos por aguas residuales. Se recomienda realizar nuevos ensayos, que permitan determinar la eficiencia de los filtros FMF frente a otros componentes con distintas cargas contaminantes y que a la vez representen un problema ambiental.

Palabras clave: <BIOTECNOLOGÍA>, <FITORREMEDIACIÓN>, <CARACTERIZACIÓN DL AGUA>, <ESCORRENTÍA SUPERFICIAL>, <NITRÓGENO>, <FÓSFORO>, <EUTROFIZACIÓN>, <FILTROS DE MACRÓFITAS FLOTANTES>, <COLTA (CANTÓN)>.

SUMMARY

In the present study, the efficiency of the Flotates Macrophyte Filters FMF in the removal of Nitrogen and Phosphorus (eutrophic nutrients) were determined for the treatment of waste water in the Laguna de Colta, an ecosystem considered at risk due to the fact that Influenced both by agricultural activities and grazing of communities located on the outskirts, by surface runoff; causing the uncontrolled growth of aquatic plant species process known as eutrophication. To carry out this research three biofilters were built with three replicates each one (B1, B2 and B3); in each biofilter Totora (macrophyte) was used on a floating structure, in order to control its proliferation; thanks to its peculiarity of transporting the oxygen present in the atmosphere and introduce it through its races to the water, allowed the reproduction of aerobic microorganisms that degraded the organic matter and nutrients. Such: Biofilter 1 (B1), Biofilter 2 (B2) and Biofilter 3 (B3), were formed by water from the Laguna de Colta and Totora, being oxygenation and a solution of biologically active minerals and phytohormones (biostimulants for growth of Totora), the control variables used for comparison; made of this characterizations 15 and 30 days after having started with the treatment, obtaining quantitative results sufficient that allowed to determine that the three biofilters (B1, B2 and B3), along with their respective replicas reduced the total nitrogen and phosphates in a percentage higher than 90%. This allowed us to conclude that the FMF Flotates Macrophytes Filters correspond to a green technology and innovative ways development, compared to other conventional treatment, through a correct application could generate in the future a solution to the contamination of aquatic ecosystems by waste water. It is recommended to carry out new tests, which allow to determine the efficiency of the FMF filters against other components with different pollutant loads and at the same time represent an environmental problem.

KEYWORDS: <BIOTECHNOLOGY>, < FITORREMEDICATION>, <WATER CHARACTERIZATION>, <SURFACE SLIDING>, < NITROGEN>, <PHOSPHORUS>, <EUTROPHIZATION>, <FLOTANT MACROPHITES>, <COLTA (CANTON)>.

INTRODUCCIÓN

Identificación del problema

La eutrofización de los diferentes cuerpos de agua superficial en el Ecuador como ríos, arroyos, lagos y lagunas está influenciada en su mayoría por fuentes naturales y antropogénicas, como es el caso de la descarga de aguas residuales, con gran cantidad de residuos sólidos y líquidos; provenientes de actividades por asentamientos humanos y escorrentías del suelo debido a las precipitaciones y vertidos agrícolas que acumulan distintas concentraciones de contaminantes. Entre los contaminantes presentes tenemos: sedimentos con gran cantidad de materia orgánica, restos de fertilizantes, plaguicidas, detergentes y jabones, incrementando los valores de nitrógeno y fósforo que son considerados nutrientes esenciales para las plantas, y en concentraciones elevadas provocan el crecimiento desmedido de vegetación en el agua, lo que se relaciona con la reducción del oxígeno disuelto y la capacidad biológica de los mismos.

La autodepuración es un fenómeno que se da en la mayoría de las aguas superficiales, y es de gran importancia debido a que les permite regenerarse por sí solas, gracias a principios físicos, químicos y biológicos que se dan de forma natural durante su trayecto a diferentes distancias y velocidades. El agua entra en contacto con el oxígeno de la atmósfera permitiendo que los contaminantes se diluyan, disminuyendo su peligrosidad y permanencia, siempre y cuando la carga contaminante no supere su capacidad de regeneración. Al hablar de lagos o lagunas, la situación se torna distinta puesto que al no existir circulación interna del agua y al ser cuerpos monomíticos, se ven influenciados básicamente por el viento y escorrentías superficiales. (Mazzeo, et al., 2005, pp. 40-43)

Entre los cuerpos de agua dulce más propensos a la eutrofización se encuentran lagos y lagunas, como es el caso de la Laguna de Colta, ubicada en el Cantón Colta, Provincia de Chimborazo, con una longitud de 2500 metros y 1000 metros de ancho y una temperatura que varía entre 12°C hasta 15°C. Esta microcuenca se encuentra rodeada por 15 comunidades, siendo sus principales actividades la agricultura y el pastoreo. (Moreta , 2008) Con el paso de los años, la Laguna se ha convertido en el principal receptor de efluentes provenientes de actividades antrópicas,

provocando en sus aguas el crecimiento de gran cantidad de Totorá, causante de los procesos de eutrofización. (Delgadillo, et al., 2016, p. 21)

La Totorá es una planta invasiva de gran productividad, que a través del tiempo se ha tornado complejo su control, pues esta no necesita de condiciones favorables como temperatura ambiental óptima, oxigenación alta, sustrato específico y un pH determinado para su desarrollo. Al contrario es resistente a la falta de oxígeno y requiere de nutrientes como nitrógeno y fósforo (causantes de la eutrofización) para su reproducción, comúnmente encontrados en aguas residuales de origen antrópico (Delgadillo, et al., 2016, pp. 21-26), causando de esta manera el deterioro de la Laguna, debido a la disminución de oxígeno disuelto por la descomposición de la materia orgánica, aumento de sedimentos y turbiedad, que determinan la coloración verde-grisácea y reducción del espejo de agua. (Moreta , 2008, pp. 1-5)

Frente a esta realidad, la presente investigación pretende realizar el análisis de estudios previos, que describan procesos iniciales de eutrofización en lagos y lagunas, relacionados con los distintos focos contaminadores situados alrededor de los mismos.

Antecedentes de la Investigación

La Laguna de Colta se caracteriza por ser un ecosistema léntico de agua dulce, considerada como Patrimonio Nacional de uso público y principal recurso paisajístico, esencial para el desarrollo de diversas especies acuáticas (animales y vegetales). Actualmente se encuentra delimitada por 15 comunidades, cuyas actividades se centran en la agricultura y el pastoreo, principales efluentes de la misma, que aportan con gran cantidad de nutrientes (nitrógeno y fósforo) y que causan la erosión del suelo debido a escorrentías superficiales provocadas por precipitaciones, que arrastran hacia el agua contaminantes como pesticidas y fertilizantes. Además el fácil acceso a este ecosistema acuático, ha determinado el incremento de sedimentos debido al uso del suelo en sus zonas litorales, afectado también por la falta de saneamiento ambiental que ha incrementado la materia orgánica en el agua. (Moreta , 2008, p. 3)

Una de las alternativas de saneamiento ambiental, es el uso de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), que cumplen con una serie de procedimientos físicos y químicos con el propósito de eliminar la mayor cantidad posible de contaminantes previo a su descarga.

Comúnmente son 4 etapas por las que pasan los distintos efluentes contaminados, que inicia con un Pretratamiento para la eliminación de materias sólidas de gran tamaño, seguido por el Tratamiento Primario para eliminar materia flotante y sedimentable, continuando con un Tratamiento Secundario que tiene por objetivo eliminar la materia orgánica, para finalmente culminar con un Tratamiento Terciario que permitirá eliminar nutrientes del agua y sustancias patógenas. (Hoover y Porgues, 1952; citados en Centa, 2008, pp. 25-30)

A estos procedimientos (físicos-químicos) también se suman tratamientos menos convencionales, como es el caso de la Fitorremediación, una tecnología ecológica e innovadora que consiste en el uso de especies vegetales capaces de degradar, acumular y absorber distintos contaminantes presentes en aguas residuales mediante sus raíces (rizofiltración) y transformarlos en componentes menos nocivos para el ambiente, considerándose de esta manera al uso de plantas en la biorremediación, como una alternativa sustentable y de bajo costo económico para la restauración de efluentes contaminados. (Poveda, 2014, pp. 5-15)

Así por ejemplo en la Universidad del Sur de Alabama, para el tratamiento de aguas residuales se utilizaron tres mecanismos para la reducción de contaminantes, en donde el efluente ingresaba primero por un decantador para la eliminación de residuos sólidos de mayor tamaño, posteriormente era depositado en un humedal artificial, conformado por plantas acuáticas cultivadas sobre un sustrato de piedra y finalmente era dirigido hacia lagunas con plantas flotantes para remover nutrientes como el nitrógeno y fósforo, gracias a este sistema el agua tratada se utilizaba para fines de riego. (Hidalgo, et al., 2005, pp. 17-20)

En la Universidad de Florida (EEUU), se realizaron diversas investigaciones con especies acuáticas como *Lemma minor*, utilizadas en humedales artificiales como plantas flotantes para la fitorremediación de aguas residuales con niveles altos de materia orgánica, obteniendo resultados positivos en la eliminación del 89% y 67% para nitrógeno y fósforo respectivamente. Dos años después se utilizó la misma especie vegetal para el tratamiento de efluentes contaminados en Cuba, en donde se obtiene como dato importante, la estrecha relación existente entre el tamaño de la planta y su sistema radicular, con el nivel de absorción de contaminantes presentes en el agua. (Martelo & Lara, 2012, p. 227)

Para la estructuración de estos humedales artificiales también conocidos como Biofiltros Verdes la utilización de plantas nativas es una opción económica e innovadora, al eliminar compuestos altamente tóxicos en ríos, efluentes agropecuarios y agroindustriales y que, debido al fácil acceso que se tiene a ellas han sido aplicadas en diversas investigaciones, reduciendo nutrientes como nitrógeno y fósforo en porcentajes mayores al 90% en la cuenca del río Parismina al este de Costa Rica. (Harvey y Fox; citados en Martelo y Lara, 2012, p. 228)

En el Lago Ypacaraí en Paraguay, se construyeron islas artificiales conformadas por Totorá (*Typha sp*) para la fitorremediación de sus aguas contaminadas con materia orgánica, proveniente de actividades antrópicas. Estos humedales se implementaron a orillas del mismo, teniéndose una gran captación de nutrientes (nitrógeno y fósforo), que limitaron el desarrollo y floración de algas y permitieron el crecimiento controlado de Totorá y de sus raíces, que inyectan grandes cantidades de oxígeno, favoreciendo a la recuperación del ecosistema acuático. (Mandua, 2015, p. 1)

En diversos países europeos como España, Alemania, Francia y Bélgica se han construido 4 depuradoras de agua residual basadas en la técnica del sistema FMF (Filtros de Macrófitas Flotantes), reutilizando el efluente de éstas en los fluxómetros de urinarios, como diluyente de productos químicos, en la depuración de las aguas de los inodoros de aviones, riego de jardines, agua sanitaria de lavabos y las duchas de las propias Estaciones de Depuración de Aguas Residuales (EDAR). Dicha experiencia fue desarrollada en el Aeropuerto de Madrid-Barajas, donde se utilizó plantas acuáticas emergentes como los juncos, enneas, carrizo, etc., que al mantenerlas en flotación sobre canales o estanques, multiplicaron su característica depuradora, evitando el problema de la colmatación que se dan en los filtros verdes de flujo subterráneo debido al abundante crecimiento de raíces y rizomas. (AENA, 2001, p. 1)

La Totorá es una macrófita que se encuentra presente en lagos eutróficos del Ecuador, posee gran capacidad de adaptación a elevadas condiciones de humedad e inundación, además de bajas concentraciones de oxígeno (zonas pantanosas y/o sumergidas en agua). (Once & Ruiz, 2014, p. 37) Una de sus ventajas es la asimilación directa de nitrógeno y fósforo, incorporándolos a su tejido vegetal, permitiendo además el desarrollo de microorganismos. (Valdés et al. & citados en Ruiz y Once, 2014).

En nuestro país, la Totora es un recurso muy abundante, principalmente en la zona andina, utilizada para distintos propósitos, sobre todo en la artesanía. En su papel de planta fitodepuradora permite la asimilación de nutrientes que son retirados del agua gracias a una característica esencial, transportar grandes cantidades de oxígeno desde el tallo a las raíces y rizomas. (Delgadillo et al 2016, pp. 21-26)

Como ejemplo de humedales artificiales construidos en el Ecuador, en el Cantón de Pujilí, Provincia de Cotopaxi, la fundación Funhabit creada en el año 2011, se encarga del tratamiento de aguas residuales mediante el uso de humedales con Totoras cultivadas sobre un sustrato, con la finalidad de reutilizarla como agua de riego y jardinería. (Funhabit, 2011)

El río Shushufindi, ubicado en la Provincia de Sucumbios, es el principal receptor de aguas residuales, aproximadamente 5000 tanques sépticos que son limpiados cada semana son vertidos de manera puntual al río equivaliendo a descargas de 1800 habitantes, siendo necesario y urgente la eliminación de estos tanques para reducir la contaminación del río, por lo que en el año 2000 el proyecto PATRA puso en marcha el estudio y diseño de humedales artificiales. (Galvez, 2003, pp. 8-16). Entre las especies vegetales más utilizadas para la construcción de estos sistemas, se encuentran los pastos, como es el caso del pasto de elefante, saboya, miel y gramalote, estos tienen la capacidad de remover contaminantes orgánicos, siendo implementados en sistemas de aguas residuales provenientes de mataderos (Shushufindi), conformados por un sedimentador y dos humedales artificiales horizontales. (Lavigne y Jankiewics; 2000 citados en Guanoluisa , 2012)

En la comunidad de Soldados, perteneciente al Cantón de Cuenca en la Provincia del Azuay se han construido diversas plantas de tratamiento de aguas residuales, observando en los dos últimos años una concentración de sólidos totales y fósforo en un nivel medio. Esta planta de tratamiento está conformada por fosas sépticas seguidas por un humedal artificial que se encarga del tratamiento secundario del agua residual. (Once & Ruiz, 2014, p. 18).

Justificación del Proyecto

Los Filtros de Macrófitas Flotantes (FMF) durante el proceso de fitorremediación permiten la recuperación de aguas contaminadas mediante el uso de Totoras en sistemas acuáticos, que utilizan

la energía solar durante la fotosíntesis para transformarla en energía química y poder cumplir con su metabolismo. Durante este proceso estos sistemas se alimentan de nutrientes como nitrógeno y fósforo, causantes de la eutrofización. (Fernández et al.,2004;citados en Delgadillo et al., 2016).

Aprovechando de esta manera la capacidad de la Totorá para sobrevivir y desarrollarse en condiciones adversas, gracias a sus características particulares como su capacidad de tomar el oxígeno de la atmósfera e introducirlo al agua por medio de sus raíces, absorber nitrógeno y fósforo como nutrientes para su crecimiento, permitir el desarrollo de microorganismos aerobios y anaerobios que aportan con la descomposición de contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en el agua, mediante diversos procesos de fitorremediación como: fitoextracción, fitovolatilización, fitoestabilización, fitotransformación, fitoestimulación, fitodegradación y rizofiltración. (Ghosh y Singh,2005; citados en Sandoval, M; Celis, J; Junod, J, 2005).

Por lo que este trabajo investigativo va en concordancia con las líneas de investigación de la carrera de Ingeniería en Biotecnología Ambiental, pues aplica principios ingenieriles y a su vez fundamentos biotecnológicos para la propuesta de soluciones ambientales.

OBJETIVOS

Objetivo general:

Comparar la eficiencia de los Filtros de Macrófitas Flotantes en el tratamiento de aguas de lagos eutróficos.

Objetivos específicos:

- ✓ Acondicionar a las estructuras flotantes para el crecimiento de Totorá en unidades experimentales
- ✓ Establecer los diferentes parámetros de control a ser aplicados en las unidades experimentales
- ✓ Determinar la eficiencia de los Filtros de Macrófitas Flotantes a partir de la concentración de nitrógeno y fósforo obtenida en la caracterización de aguas tratadas.

CAPÍTULO I

1 MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1. Eutrofización

Es el proceso que se da en sistemas acuáticos como lagos y lagunas debido al aumento excesivo de nutrientes que provocan el crecimiento de especies vegetales como algas y plantas superiores. (Ryding y Rast, 1992; citados en Mazzeo, 2005). La causa principal se debe al aumento de nitrógeno y fósforo provenientes de agentes externos, arrastrados por la precipitación y erosión del suelo, además por vertidos de origen antrópico que incluyen el uso de fertilizantes agrícolas, siendo los ríos y arroyos las vías principales para la descarga de los componentes mencionados en los sistemas acuáticos. (Esteves, 1988; citados en Mazzeo et al, 2005, p. 40)

De acuerdo a la productividad biológica y cantidad de nutrientes, los lagos se pueden clasificar en:

- ✓ Lagos oligotróficos.- son pobres en nutrientes (nitrógeno y fósforo) lo que limita la floración de vegetación acuática, permitiendo la entrada de luz y desarrollo de la vida acuática.
- ✓ Lagos eutróficos.- contienen gran cantidad de nitrógeno y fósforo, permitiendo el desarrollo de especies vegetales acuáticas que al morir y descomponerse consumen el oxígeno disuelto del agua. (Moreta, 2008)

1.2. Lagos eutróficos

Corresponden a aguas saladas o dulces de distinto origen, provenientes de ríos, aguas freáticas y de precipitaciones. Este ecosistema evoluciona de forma lenta dependiendo del tiempo, clima y de su profundidad. (Sánchez, 2011) Los lagos eutróficos tienden acumular en sus sedimentos la mayor cantidad de nutrientes, producto de la descomposición y decantación de la materia orgánica

a través de procesos físicos-químicos y por la incorporación de biomasa a organismos animales y vegetales, lo que provoca la reproducción de algas y plantas superiores. (Mazzeo, et al., 2005, p. 41)

Con el paso del tiempo, la materia orgánica acumulada y su proceso de descomposición provocan la formación de sedimentos en el fondo del agua, reduciendo su profundidad y transparencia (espejo de agua), todo esto debido al aumento de la turbiedad, transformando de a poco los sistemas acuáticos en humedales que finalmente se convertirán en ecosistemas terrestres. (Mazzeo, et al., 2005, p. 39)

1.2.1. Lagos eutróficos del Ecuador

La mayoría de lagos y lagunas del Ecuador, que se ven influenciados por escorrentías superficiales e influentes contaminados (ríos), se consideran eutróficos, debido a que sus aportes causan el crecimiento descontrolado de macrófitas (plantas acuáticas), que se desarrollan por la presencia de nutrientes como nitrógeno, fósforo (proveniente de sedimentos) y materia orgánica, resultando de actividades de origen antropogénico (agricultura y ganadería), que causan también la erosión del suelo. (Kiersch, et al., 2003)

La cercanía de estos cuerpos de agua con centros poblados, a determinado el grado de productividad biológica vegetativa, siendo Imbabura la Provincia con mayor cantidad de lagos, como el lago San Pablo, Yaguarcocha y Mojanda, y en la Provincia de Chimborazo con la Laguna de Colta y la Laguna de San Antonio un claro ejemplo de eutrofización. (Liceo Integral Cuenca, 2011)

1.2.2. Características de lagos eutróficos

Temperatura

La temperatura se encuentra influenciada por la energía solar; a medida que esta aumenta, calienta el agua en las capas superficiales, siempre y cuando no tenga movimiento, causando una estratificación vertical, debido a que a mayor profundidad habrá menor temperatura, este es un

de los factores con mayor influencia sobre lagos, estableciendo su densidad, viscosidad y movimiento. (Chang, 2009, p. 4)

Fósforo Total

Proviene de vertidos de aguas residuales de origen industrial y doméstico así como de las escorrentías superficiales con presencia de detergentes polifosfatados, estos componentes impulsan el crecimiento de especies vegetales y algas, que al cumplir con su ciclo vital y morir acumulan sedimentos en el fondo de los lagos, disminuyendo su profundidad. (Moreta , 2008, pp. 21-29)

Nitrógeno Total

Su fijación se ve influenciada por acción de algas fotosintéticas, bacterias presentes en los sedimentos y sedimentos nitrogenados, además por agentes externos como la precipitación, nitrógeno atmosférico y escorrentías, encontrándose en lagos eutróficos principalmente en forma de nitrógeno molecular (N_2), nitratos (NO_3), nitritos (NO_2) y amoníaco (NH_4). (Moreta , 2008, pp. 21-29)

Turbiedad

Está determinada por la presencia de materia orgánica suspendida, disuelta, sólidos orgánicos e inorgánicos y partículas coloidales, siendo su medición uno de los mecanismos más fáciles para reconocer el tipo de tratamiento que debe recibir el agua contaminada. (Moreta , 2008, pp. 21-29)

Color del agua

En lagos eutróficos, este depende de la presencia de especies vegetales como las algas, que al contener clorofila le dan un color verdoso, mientras que componentes como el hierro, manganeso y cromato le confieren un color amarillo-pardo. (Moreta , 2008, pp. 21-29)

Sólidos disueltos

Corresponde a la materia orgánica e inorgánica, resultado de la evaporación de los residuos sólidos presentes en aguas filtradas, este parámetro determina el desarrollo de la vida acuática. (Moreta , 2008, pp. 21-29)

Alcalinidad

Se refiere a la presencia de compuestos como carbonatos, bicarbonatos, hidróxidos, boratos, silicatos y fosfatos, indicando en lagos la capacidad de recibir H⁺ u OH sin cambiar su pH. (Moreta , 2008, pp. 21-29)

Conductividad

Está determinada por la presencia de sales, que al disociarse genera iones positivos y negativos, comúnmente conocidos como electrolitos que tiene la capacidad para conducir energía eléctrica, encontrándose en dependencia de la concentración de diversos aniones (CO₃²⁻, HCO₃⁻, SO₄⁻²) y cationes (Ca⁺², Mg⁺², Na⁺ y K⁺). (Moreta , 2008, pp. 21-29)

pH

Permite determinar en el agua el grado de acidez o alcalinidad, es así que, lagos eutróficos con alta presencia de materia orgánica poseen valores de pH ácido, dependiendo en gran medida de las características del suelo que los rodea. (Moreta , 2008, pp. 21-29)

Dióxido de carbono

Proviene de la atmósfera, a la vez que está determinado por la respiración de los organismos presentes en el agua; niveles altos de CO₂ en lagos eutróficos corresponden a concentraciones bajas de oxígeno, teniendo alta relación con el pH de medio acuático. (Moreta , 2008, pp. 21-29)

1.3. Aspectos legales relacionados con las descargas en cuerpos de agua dulce.

Las descargas de aguas residuales provenientes de actividades antrópicas hacia los recursos hídricos naturales como lagos y lagunas, se encuentran reguladas por el Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE) a través de las diferentes direcciones provinciales del Ambiente, que se rigen según el Art. 259 del Acuerdo Ministerial No. 061, llevándose a cabo más de 450 inspecciones de control de descargas a nivel nacional en Enero y Febrero del 2017, en donde se verifica que los componentes no superen el límite permisible de sustancias nocivas. Generalmente el tratamiento físico-químico es la técnica más utilizada para la reducción de la contaminación orgánica, siendo obligatorio previo a su descarga por toda empresa o actividad cuyos residuos pongan en riesgo la preservación de la vida acuática. (Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE), 2017)

De acuerdo al Anexo I del libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente, las normas generales para descarga de efluentes a cuerpos de agua dulce son:

Tabla 1-1 Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce

Parámetro	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Coliformes fecales	NMP	NMP/100ml	10000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	DBO ₅	mg/l	100
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	200
Fósforo Total	P	mg/l	10
Nitratos + Nitritos	Expresado como Nitrógeno (N)	mg/l	10
Nitrógeno Total Kjeldahl	N	mg/l	50

Sólidos totales	ST	mg/l	1 600
Temperatura	°C		Condición natural

Fuente: (TULSMA, 2014)

Realizado por: Diana Quintana 2017

De acuerdo al Anexo I del libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente, los criterios de calidad para la preservación de la vida acuática en aguas dulces son:

Tabla 2-1: Criterios de calidad admisible de la DBO₅ para la protección de la vida acuática

Objetivos de calidad	DBO₅ (mg/l)	Condición de la vida acuática
I	1	Vida acuática no impactada
II	1-2	Vida acuática no impactada
III	2-6	Vida acuática con impacto moderado

Realizado por: Diana Quintana, 2017

Fuente: (TULSMA, 2014)

1.4. Macrófitas acuáticas

1.4.1. Características generales

Se desarrollan en ecosistemas inundados como humedales, pantanos, lagos y lagunas, soportando precipitaciones durante largos periodos de tiempo, así como cargas orgánicas con gran cantidad de nutrientes (nitrógeno y fósforo), de donde toman energía para cumplir con su metabolismo. Su altura está comprendida entre 1 y 4 metros, y se encuentran formando un denso tapiz de plantas emergentes, es decir, con raíces arraigadas en los sedimentos del fondo del agua y tallos que sobresalen para conformar un amplio ecosistema de aves y peces. (Torres, s.f., pp. 10-11)

1.4.2. Clasificación de las Macrófitas Acuáticas

De acuerdo a las formas de vida, las macrófitas se clasifican en:

Macrófitas emergentes

Se caracterizan porque sus raíces se encuentran ancladas a los sedimentos del fondo, mientras sus tallos y hojas emergen por encima del agua, siendo perennes y erectas, capaces de alcanzar una altura de hasta 3 metros. Sus hojas pueden ser planas, gruesas y esponjosas, observándose gran cantidad de canales que permiten la entrada del aire proveniente de la atmósfera. (Curt, 2005, pp. 91-92)

Macrófitas flotantes

Son plantas acuáticas angiospermas no enraizadas, y que comúnmente se encuentran en climas tropicales. Sus tallos y hojas son flotantes o aéreos, su reproducción se da mediante semillas y por propagación vegetativa. (Curt, 2005, pp. 103-105)

Macrófitas sumergidas

Corresponden a especies vegetales que se encuentran completamente sumergidas en el agua, a profundidades comprendidas entre los 10 y 11 metros. (Sculthorpe & cook, 1990, p. 6)

1.4.3. Macrófitas acuáticas empleadas en procesos de Fitorremediación en Ecuador

De acuerdo con Carrión & Cuenca (2010, pp.2-3), la fitorremediación en el Ecuador mediante el uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales de origen antropogénico, se ha centrado en la capacidad de depuración de seis especies de plantas acuáticas:

- ✓ El Jacinto de agua (*Eichornia crassipes*)
- ✓ Berro (*Nasturtium officinale*)
- ✓ Elodea Egeria densa (*Elodea densa*)
- ✓ Totorá (*Typha domingensis*)
- ✓ Aguapey (*Pontederia cordata*)
- ✓ Lenteja de agua (*Lemna spp*)

A estas especies vegetales se las considera como depuradoras de contaminantes, debido a que su desarrollo y crecimiento se ve influenciado por la presencia de nitrógeno y fósforo; además se debe tomar en cuenta el utilizar plantas nativas del lugar de donde se requiera realizar el tratamiento. (Carrión & Cuenca , 2010, p. 3)

1.5. Totora en humedales artificiales

La Totora es una planta acuática que se encuentra formando parte de la ecología de diversos lagos y lagunas del Ecuador, es elemental para la conservación de los humedales de la cuenca andina, siempre y cuando su cultivo sea manejado y controlado de manera adecuada. Además conforma el hábitat para muchas especies biológicas como peces y aves, sirve también como alimento para el ganado y como abono orgánico para la agricultura. (Pelt-Adesu, 2004, p. 4)

1.5.1. Taxonomía

De acuerdo a Pelt-Adesu (2004), la clasificación taxonómica de la Totora corresponde a:

Tabla 3-1: Ubicación taxonómica de la Totora

Reino	Vegetal
División	Fanerógama
Subdivisión	Angiospermas
Clase	Monocotiledóneas
Orden	Cyperales
Familia	Typhaceae
Genero	Typha
Especie	T.domingensis
Nombre común	Totora

Realizado por: Diana Quintana, 2016

Fuente: (Pelt-Adesu, 2004)

1.5.2. Morfología de la Totora

La Torora proviene de los vegetales vasculares, sus paredes son muy delgadas con el propósito de permitir el paso de gases, agua, nutrientes y tejidos, con grandes espacios intercelulares que permiten el almacenamiento y circulación de aire; que posteriormente llegará a las raíces como oxígeno para el agua. (Fernández et al.,2004;citados en Delgadillo et al., 2016)

Raíz

Sus raíces son adventicias, originándose a partir de un rizoma maduro, conformadas también por raíces secundarias, siendo su crecimiento horizontal, paralelo a la superficie del suelo o de algún sustrato. Su diámetro aproximado es de 1 mm, y su grosor está determinado por la edad de la planta, que también dependerá del medio en el cual se desarrolle. (Pelt-Adesu, 2004, p. 5)

Rizomas

Los rizomas son tallos que se desarrollan en la parte subterránea y crecen de forma paralela al medio en donde se encuentren, presentando raíces adventicias por un extremo, y ramas con yemas y hojas del otro. (Aycachi Inga, 2004; citado en Delgadillo et al, 2016)

En su corteza se pueden observar nudos, separados con una distancia entre 2-6 cm, que a partir de las yemas germinarán los tallos. Muchas de las sustancias de reserva que le permiten a la planta sobrevivir en condiciones adversas como la sequía, se almacenan en los rizomas. (Pelt-Adesu, 2004, p. 5)

Tallo

Su altura puede variar entre 1 y 4 metros, siendo lisos, trígono o subteretes, conformados por aerénquimas (tallo aéreo), que almacenan gran cantidad de aire llevándolo hacia sus raíces y dándoles facilidad para flotar. (Delgadillo, et al., 2016, p. 23)

De acuerdo a su ubicación en el medio, se clasifican:

- ✓ Tallo aéreo.- su color es verde, por la alta cantidad de clorofila, encontrándose afuera del agua, influyendo en la temperatura, clima, nutrientes y edad de la planta.

- ✓ Tallo sumergido.- este inicia con los rizomas, su coloración es blanca, debido a la poca cantidad de clorofila pero contiene disacáridos, los mismos que pueden ser utilizados como alimento. Este puede crecer de 30-100 cm cada 4 meses. (Pelt-Adesu, 2004, p. 6)

Las características morfológicas y composición química de la Totora se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4-1: Características morfológicas y composición química

Altura de la planta	3,20-4,20 m.
Espesor	0,5-5,0 cm de diámetro
Densidad	280 tallos aéreos/ metro
Composición química	Hemicelulosa, x-celulosa y lignina

Realizado por: Diana Quintana, 2016

Fuente:(Palomino & Cabrera , 2008)

1.5.3. Reproducción de la Totora

Su reproducción es vegetativa, desarrollando células denominadas meristemos, las mismas que se agrupan en rizomas, dando lugar a nuevas plantas. (Delgadillo, et al., 2016, p. 24)

1.5.4. Tiempo de crecimiento y hábitat

Son plantas acuáticas que viven en zonas pantanosas, su crecimiento puede tardar entre 3 y 12 meses. Gracias a sus tallos erguidos, flexibles y livianos, la realización de la fotosíntesis se da con gran facilidad. La Totora por lo general se encuentra sumergida en lagos y lagunas, siendo su máxima profundidad 4.5 metros. (Wust, 2003; citado en Palomino y Cabrera, 2008)

Tienen capacidad de sobrevivir en condiciones soleadas, con rangos de temperatura que va desde los 16 °C hasta los 27 °C, tolerando un pH comprendido entre 4 y 9. (Delgadillo, et al., 2016, p. 25)

1.5.5. Uso de Totora en la fitorremediación

El uso de la Totora en la fitorremediación mediante la aplicación y construcción de humedales artificiales, es una práctica ambiental favorable con la naturaleza que permite degradar y

transformar la materia orgánica y nutrientes (fósforo y nitrógeno), presentes en el agua residual, y que provocan el crecimiento descontrolado de especies vegetales como algas y plantas superiores. (Márquez, 2016, pp. 22-23)

La Totorá es una macrófita emergente cuya capacidad fitorremediadora se centra en la amplia superficie específica, conformada por sus raíces y raicillas que se encuentran libres; evitando así la colmatación de sus raíces con los sedimentos, que por lo general, se forman en humedales convencionales. (Curt, 2005, pp. 83-84)

De acuerdo con Curt (2005, p. 79), el uso de esta especie vegetal en humedales flotantes, permite la remoción de contaminantes en efluentes eutrofizados agrarios, industriales y naturales con altos niveles de nitrógeno, fósforo y potasio. Los procesos físicos, químicos y biológicos de fitorremediación se resumen en:

- ✓ Asimilación de nutrientes por parte de las raíces
- ✓ Introducción de oxígeno proveniente de la atmósfera a través del tallo hacia el sistema radicular.
- ✓ Degradación de materia orgánica por parte de microorganismos aerobios.
- ✓ Filtración de sólidos en suspensión

1.6. Humedales artificiales

Son sistemas de tratamiento de aguas residuales no convencionales, que utilizan plantas para cumplir con procesos de fitorremediación, mediante interacciones físicas, químicas y biológicas entre especies vegetales conocidas como macrófitas y su medio. Los humedales construidos permiten tratar aguas de origen doméstico, urbano, industrial, minero, agrícola y lodos residuales. (García et al., 2004; citados en Delgadillo et al, 2016)

Su mecanismo consiste en eliminar nitrógeno, fósforo, sólidos en suspensión y patógenos, a través de la energía solar para que especies como algas, musgos, helechos y plantas acuáticas vasculares realicen la fotosíntesis, que es el medio por el cual estas absorben los contaminantes que les permite cumplir con su metabolismo. (Delgadillo, et al., 2016, pp. 15-16)

1.6.1. Filtros de Macrófitas Flotantes

Son sistemas que funcionan como lagunas y humedales artificiales, con una profundidad entre 0.25-0.6 metros. Se encuentran constituidos por macrófitas sobre estructuras flotantes, que no requieren el uso de algún sustrato como arena, grava o tierra sobre el que se deban cultivar, es decir permiten que las raíces y rizomas de las especies vegetales queden completamente bañadas por el agua residual a tratar. (Hadley y Tanner, 2008; citados en Márquez, 2016)

Entre las ventajas del uso de estos sistemas tenemos:

- ✓ Permite mayor variabilidad del nivel del agua
- ✓ Las raíces del agua llegan hasta profundidades de 1 m
- ✓ La superficie necesaria para tratar el agua es menor que los humedales convencionales
- ✓ Pueden absorber coloides y sólidos disueltos (Márquez, 2016, pp. 25-26)

La US Environmental Protection Agency – EPA generó ciertas consideraciones para la construcción de humedales flotantes con plantas acuáticas, clasificándolos de acuerdo a su contenido de oxígeno disuelto y el método de aireación utilizado.

Entre los criterios tenemos:

Tabla 5-1: Criterios de diseño para humedales con plantas acuáticas

Criterio	Aerobio sin aireación	Aerobio con aireación
Tipo de afluente	Primario	Primario
DBO del afluente (mg/l)	130-180	130-180
Carga orgánica (kg DBO/ ha.d)	40-80	150-300
DBO ₅	< 30	< 15
SS	< 30	< 15
NT	< 15	< 15
Profundidad (m)	0,3-0,6	0,9-1,4
Tiempo de retención (d)	10-36	4-8

Realizado por: Diana Quintana. 2016

Fuente: (EPA, 2006)

Las plantas deben colocarse 5 cm por debajo de la superficie del agua y sus tallos pueden ser podados a una altura máxima de 30 cm antes de su implantación. (Hazelip, 2004; citado en Delgadillo et al, 2016)

Una consideración importante es el tiempo de adaptación por el que deben pasar las especies vegetales, siendo de aproximadamente 30 días, donde deben sembrarse a una distancia entre los 10 y 30 centímetros, dependiendo de la rapidez con la que se requiera tratar el agua residual y el crecimiento de sus raíces; así también la distancia entre las estructuras flotantes debe ser de 0,50 centímetros, para cumplir con los estándares establecidos. (Fernández, 1998, p. 5)

1.6.2. Partes del humedal

La Figura 1-1 muestra de los procesos dentro de humedales artificiales, que permiten la reducción de contaminantes de aguas residuales:

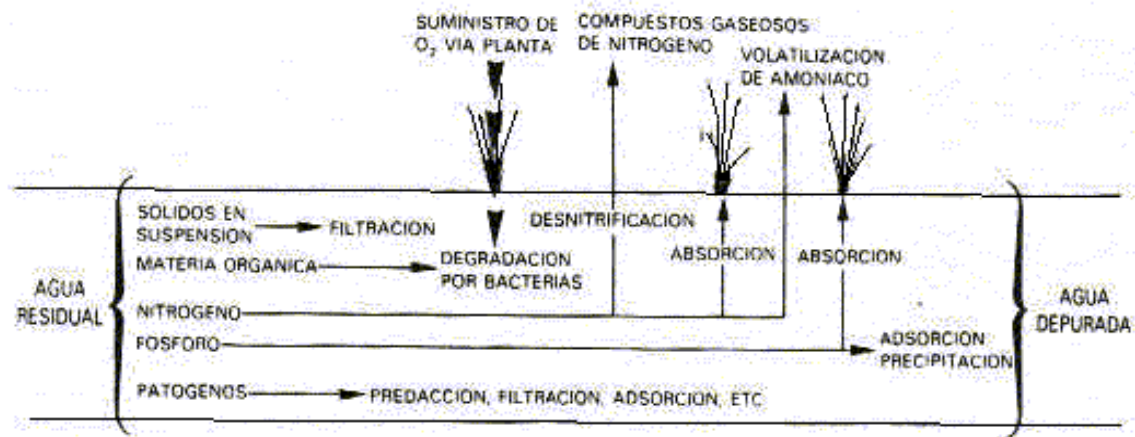


Figura 1-1: Principales procesos de depuración en humedales artificiales
Fuente: (Centa, 2008)

Especies vegetales

Las especies utilizadas para la construcción de humedales flotantes son diversas y dependen de las condiciones climáticas a las que se desea que el sistema se adapte, teniendo como ejemplos principalmente a: *Typha latifolia*, *T. angustifolia*, *Phragmites australis*, *Panicum hemitomon*, *Glyceria maxima*, *Carex lasiocarpa*, *Menyanthes trifoliolate*, *Myrica gale*, y *Chamaedaphne calyculata*. (Márquez, 2016, p. 27)

Las macrófitas flotantes desempeñan su papel de fitodepuradoras, gracias a la acción de sus raíces y rizomas, que a su vez introducen el oxígeno de la atmósfera a través de sus tallos y hojas hacia el agua, desarrollando un ambiente aerobio fundamental para la reproducción de microorganismos que sean capaces de degradar la materia orgánica presente en el medio y cumplir con los procesos de nitrificación. (Arias, 2004; citado en Delgadillo et al., 2016)

Microorganismos

Dentro de un sistema de fitodepuración de aguas residuales encontramos a microorganismos aerobios que se desarrollan en las raíces de las plantas, gracias al oxígeno captado por sus tallos, permitiendo la degradación de la materia orgánica, reducción de fósforo, nitrógeno y organismos patógenos. (Arias, 2004; citado en Delgadillo et al., 2016)

La función de los microorganismos es transformar las sustancias orgánicas e inorgánicas, en elementos menos nocivos y gaseosos para su eliminación directa a la atmósfera; mediante mecanismos fotosintéticos donde obtienen su energía (al consumir carbono y nutrientes). (Lara, 1999; citado en Delgadillo et al., 2016, p. 22)

1.6.3. Sustratos como reguladores del crecimiento vegetal

Consisten en soluciones que contienen sales minerales y fitohormonas biológicamente activas, que a bajas concentraciones regulan el desarrollo, crecimiento y metabolismo de las plantas. Las fitohormonas por ejemplo se encuentran de forma natural en las especies vegetales, teniendo principalmente a las auxinas, giberelinas, citocininas, ácido abscísico y etileno. Las funciones principales se basan en el crecimiento celular y la formación de raíces adventicias. (CANNA Research, 2016)

Las funciones de estos reguladores se basan en la división celular, expansión celular y metabolismo celular, los mismos que dependerán del transporte, síntesis y degradación que se da en los tejidos de las plantas.

1.6.4. Mecanismo de remoción de contaminantes

Remoción de sólidos suspendidos

De acuerdo con Centa (2008, pp.230-235), para la remoción de sólidos en suspensión, se requiere de dos procedimientos:

- ✓ Sedimentación.- ocurre por medio de la gravedad, en donde la materia orgánica decanta al fondo del humedal.
- ✓ Filtración.- permite reducir la presencia de materia orgánica, gracias al contacto directo del agua con las raíces de las plantas.

Remoción de materia orgánica

La degradación de la materia orgánica se efectúa por acción de microorganismos aerobios y en ocasiones por anaerobios, que se encuentran adheridos a las raíces y rizomas de las plantas, además de la decantación de la materia orgánica por acción de la gravedad y rizofiltración. (Kolb, 1998; citado en Delgadillo et al, , 2016).

Para que los microorganismos puedan llevar a cabo procesos de fitorremediación, en agua residual, se requiere como fuente de energía a la luz solar, por lo que toman el nombre de organismos fotótrofos y quimiótrofos. (Cooper, 1996; citado en Delgadillo et al, 2016)

Durante la degradación aeróbica, los microorganismos con mayor desarrollo son los quimioheterótrofos, los cuales oxidan la materia orgánica y la transforman en amonio, mientras los quimioautótrofos transforman el nitrógeno amoniacal en nitratos y nitritos, mediante la nitrificación. (Delgadillo, et al., 2016, p. 15). Este proceso aeróbico se da gracias al aporte de oxígeno por parte de las plantas, que llega a las raíces y rizomas durante el mecanismo de fotosíntesis. (Centa, 2008, p. 232)

La cantidad de oxígeno suministrado por parte de las macrófitas varía, siendo discutido en diversas investigaciones, así por ejemplo (Tanner y col, 2003; citados en Centa , 2008), propone una

cantidad de oxígeno que va de 0,5-0,6 (gO₂/m²d), mientras que (USEPA, 1988; citado en Centa, 2008), determina que las plantas acuáticas aportan con niveles 20 g O₂/m²d.

Reducción de nitrógeno

El nitrógeno en el agua residual se encuentra presente en diversas formas como por ejemplo: nitratos (NO₃⁻), nitritos (NO₂⁻), amonio (NH₄⁺), nitrógeno orgánico y nitrógeno gaseoso (N₂, NO_x).

Dentro de los diferentes mecanismos de remoción de nitrógeno se encuentran:

✓ Remoción físico-química de nitrógeno

La remoción de nitrógeno orgánico relacionado con la presencia de materia orgánica se da mediante procesos de: filtración, intercepción, floculación y sedimentación, siendo las raíces de las plantas encargadas de la absorción y adsorción del nitrógeno. En el caso del amonio (NH₄), su eliminación se da por volatilización, debido a los cambios de pH generados en procesos fotosintéticos, que producen que el ion amonio pase a amoníaco gaseoso y salga del sistema hacia la atmósfera. (Curt, 2005, pp. 72-73)

✓ Remoción biológica del nitrógeno

Se da por procesos de: amonificación, nitrificación, desnitrificación y fijación de nitrógeno. La amonificación consiste en la transformación de nitrógeno orgánico durante la degradación de la materia orgánica (proceso aeróbico), en nitrógeno amoniacal para ser volatilizado en forma de amoníaco gaseoso hacia la atmósfera, o para ser consumido por microorganismos. La nitrificación es el proceso por el cual se transforma el amonio en nitratos, gracias a la acción de organismos nitrificantes suspendidos en las raíces de la Totorá, siendo el primer paso la oxidación de amonio a nitritos mediante bacterias Nitrosomonas, para luego pasar de nitritos a nitratos por acción de bacterias Nitrobacter (pH alcalino). Finalmente durante la desnitrificación, se da la reducción de

nitratos a nitrógeno gaseoso (N_2) y óxido de nitrógeno (N_2O), llevándose a cabo en el fondo de los filtros, debido a la baja presencia de oxígeno y gran cantidad de sedimentos. (Curt, 2005, pp. 73-74)

Reducción de fósforo

Por lo general, en aguas contaminadas por descargas residuales, el fósforo se encuentra en forma de fosfatos orgánicos procedentes de restos orgánicos y también como fósforo inorgánico proveniente de productos de limpieza y fertilizantes agrícolas.

Dentro de los diferentes mecanismos de remoción de fósforo se encuentran:

✓ Remoción físico-química del fósforo

El fósforo presente en partículas sólidas se sedimenta en el fondo de los biofiltros, o también queda atrapado en las biopelículas formadas por las Totoras, siendo el principal mecanismo de la disminución en humedales artificiales. Los fosfatos en un pH básico forman precipitados insolubles de calcio, y en concentraciones ácidas forman precipitados de aluminio y hierro. (Curt, 2005, pp. 75-76)

✓ Remoción biológica del fósforo

Para que el fósforo orgánico disuelto en partículas e insoluble sea asimilado por las plantas durante su fase de crecimiento, es necesario que sea transformado en fósforo inorgánico, mediante la acción de microorganismos presentes en las raíces de la Totoras y en los sedimentos, por lo que se requiere la cosecha de la biomasa vegetal para que esta no regrese al sistema. (Curt, 2005, pp. 75-76)

En aguas residuales, el fósforo se puede encontrar en tres formas: fosfato orgánico, ortofosfato y polifosfato, alrededor del 24 % se encuentra en forma de ortofosfato como PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4 , H_3PO_4 , siendo muy importante valorar el fósforo orgánico en plantas de tratamiento mediante humedales artificiales. (Gray, 1989; citado en Delgadillo et al, 2016)

De acuerdo con Centa (2008, p. 235), los mecanismos por los cuales se puede reducir el fósforo en humedales con macrófitas se resumen en:

- ✓ Absorción directa gracias a las plantas
- ✓ Precipitaciones que tienen lugar al reaccionar el fósforo con aluminio, hierro y calcio, dando lugar a fosfatos insolubles.

Reducción de organismos patógenos

Es muy importante analizar la presencia de microorganismos patógenos en el agua como virus y bacterias, debido a que su consumo trae consigo problemas para la salud. Además estos pueden sobrevivir en condiciones de temperaturas bajas y con presencia de materia orgánica. (Delgadillo, et al., 2016, p. 18)

De acuerdo con Centa (2008, p.236), los mecanismos por los cuales se pueden eliminar a los microorganismos son:

- ✓ La producción de antibióticos por parte de las raíces de las plantas, siendo tóxicos para las bacterias y virus.
- ✓ La acción depredadora de protozoos y bacteriófagos.

CAPITULO II

2 PARTE EXPERIMENTAL

2.1. Metodología de la Investigación

2.1.1. Lugar de la Investigación

Laguna de Colta, Cantón Colta, Provincia de Chimborazo

2.1.2. Hipótesis y especificación de las variables

Hipótesis general:

Los Filtros de Macrófitas en Flotación con base en Totora son eficientes para el tratamiento de aguas de lagos eutróficos.

2.1.3. Tipo y diseño de la investigación:

Se trata de una investigación descriptiva-experimental, debido a que se manipularon diferentes parámetros de control para la obtención de resultados cuantitativos, así como para la caracterización y evaluación de las unidades experimentales.

2.1.4. Unidad de análisis

Para el dimensionamiento y construcción de las unidades experimentales, se tomó como referencia los criterios de diseño para humedales con plantas acuáticas de la Tabla 1-5 según la EPA (2006). La unidad de análisis estuvo conformada por tres biofiltros, cada una con sus respectivas réplicas, como se detalla a continuación:

- ✓ **Biofiltro 1: B1:** En el Biofiltro 1 (B1), se colocó Totorá sobre estructuras flotantes, esto permitió mantener a las raíces dentro del agua a depurar (Laguna de Colta) y a los tallos en el exterior. A estas unidades experimentales se las consideraron blanco de la investigación, debido a que en ellas no se aplicaron variables de control, permitiendo comparar sus resultados con los obtenidos en los Biofiltros B2 y B3, las mismas que se identificaron de la siguiente manera:

B1r1 (Biofiltro 1 réplica 1), B1r2 (Biofiltro 1 réplica 2), B1r3 (Biofiltro 1 réplica 3)

- ✓ **Biofiltro2: B2:** En el Biofiltro 2 (B2), se colocó Totorá sobre estructuras flotantes, esto permitió mantener a las raíces dentro del agua a depurar (Laguna de Colta) y a los tallos en el exterior. A estas unidades experimentales se añadió oxigenación, como primera variable de control las 24 horas al día durante los 7 días de la semana, identificándose de la siguiente manera:

B2r1 (Biofiltro 2 réplica 1), B2r2 (Biofiltro 2 réplica 2), B2r3 (Biofiltro 2 réplica 3)

- ✓ **Biofiltro 3: B3:** En el Biofiltro 3 (B3), se colocó Totorá sobre estructuras flotantes, esto permitió mantener a las raíces dentro del agua a depurar (Laguna de Colta) y a los tallos en el exterior. A estas unidades experimentales se añadió además de la oxigenación, una solución de sales minerales y fitohormonas para estimular el crecimiento de las especies vegetales, como segunda variable de control, identificándose de la siguiente manera:

B3r1 (Biofiltro 3 réplica1), B3r2 (Biofiltro 3 réplica 2), B3r3 (Biofiltro 3 réplica 3)

Las tres unidades experimentales y sus respectivas réplicas se colocaron dentro de un invernadero de 5 metros de largo por 3 metros de ancho, con la finalidad de evitar que las variaciones del clima afecten el desarrollo de las plantas y la veracidad de los resultados.



Fotografía 2-1: Invernadero para los Filtros de Macrófitas Flotantes
Realizado por: Diana Quintana, 2017

2.1.5. Población de estudio

Filtros de macrófitas flotantes con totora y agua eutrófica de la Laguna de Colta

2.1.6. Tamaño de la muestra

Tres unidades experimentales con tres repeticiones por cada una de ellas. En cada unidad experimental se trabajó con 8 plántulas de totora y agua de la Laguna a depurar.

2.1.7. Selección de la muestra

Para la caracterización inicial, las muestras de agua se obtuvieron de la Laguna de Colta; mientras que, para la caracterización intermedia y final, las muestras se recolectaron de los biofiltros propuestos.

2.1.8. Técnica de recolección de datos

Para el desarrollo de la investigación se utilizaron diferentes métodos y técnicas experimentales requeridas para la caracterización del agua; además del control de las diferentes condiciones de campo.

2.1.8.1. Técnica experimental:

Los datos de la caracterización del agua en cada unidad de análisis, fueron recogidos en tres etapas, al inicio, al intermedio y al final:

- ✓ Para conocer el estado actual de la Laguna de Colta se realizó una caracterización inicial de parámetros tales como nitrógeno total, fosfatos, DBO₅, DQO, coliformes totales, Sólidos Disueltos Totales (TDS), temperatura, pH, turbiedad y conductividad.
- ✓ Posterior a los 15 días de tratamiento y con la finalidad de evaluar la remoción de contaminantes, se realizó una segunda caracterización de nitrógeno total, fosfatos, temperatura, Sólidos Disueltos Totales (TDS), turbiedad, pH y conductividad.
- ✓ Posterior a los 30 días y para evaluar la calidad del agua al final del tratamiento, se realizó una caracterización final de nitrógeno total, fosfatos, DBO₅, DQO, coliformes totales, Sólidos Disueltos Totales (TDS), temperatura, pH, turbiedad y conductividad.

2.1.8.2. Técnica de observación:

Las técnicas de observación empleadas durante la fase de investigación se muestran a continuación:

- ✓ Crecimiento y desarrollo de la Totora.- Determinación del tamaño de los tallos y raíces de las especies vegetales, al inicio y al final del tratamiento en cada una de las unidades experimentales.
- ✓ Monitoreo de la temperatura, pH, olor y color.- Registro de la temperatura y pH durante 4 semanas; determinación subjetiva del color y el olor del agua.

- ✓ Formación de fangos.- Verificación de la presencia de fangos en cada una de las unidades experimentales.
- ✓ Estabilidad de las estructuras flotantes.- Control de las estructuras flotantes dispuestas sobre el agua a depurar.

2.2. Procedimientos realizados en el estudio

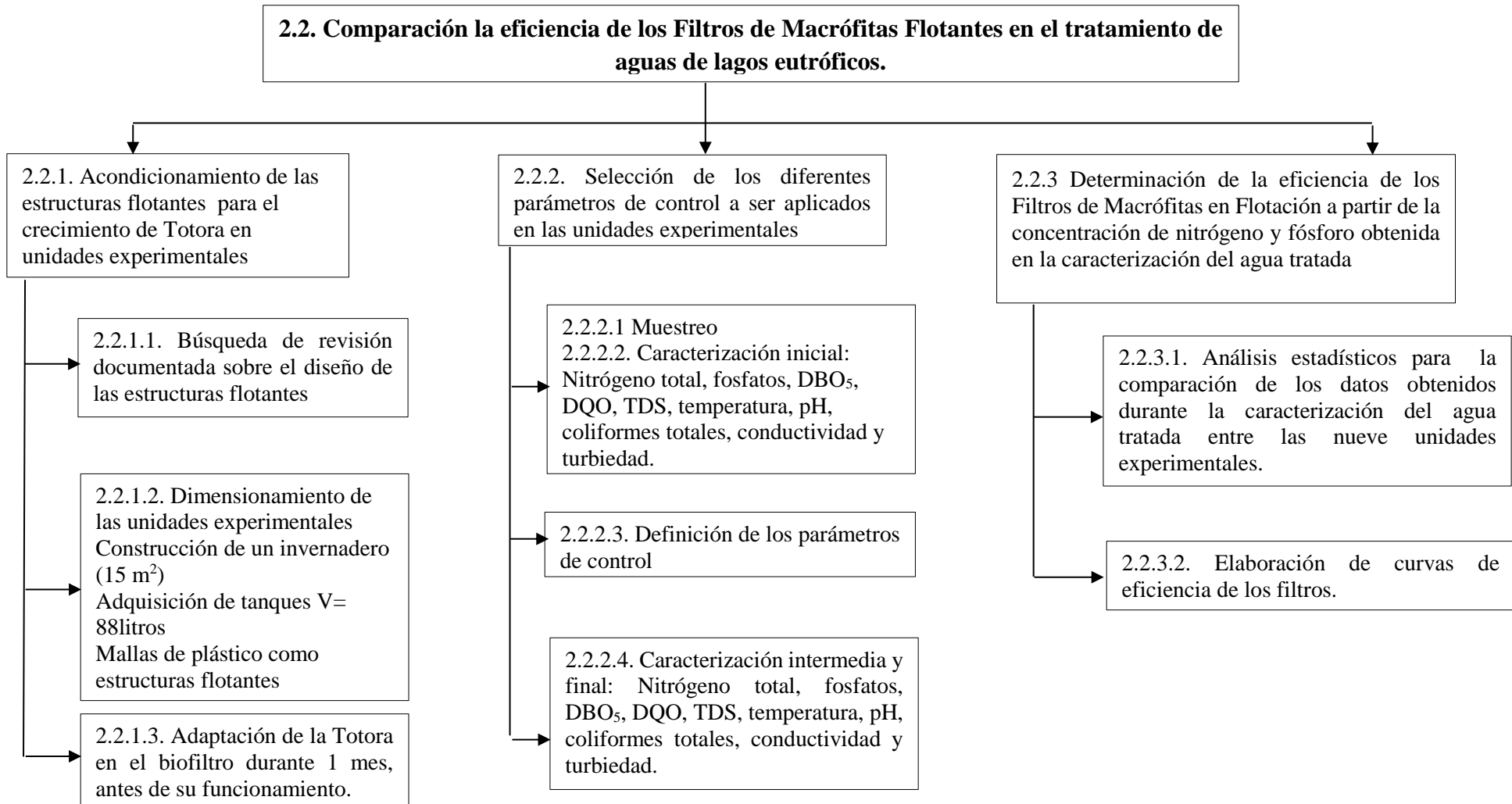


Figura 2-1: Diagrama del procedimiento realizado en la Investigación

2.2.1. Acondicionamiento de los Filtros de Macrófitas Flotantes

2.2.1.1. Revisión documentada

Para el diseño, acondicionamiento e implantación de las unidades de análisis se consideraron estudios sobre humedales construidos con plantas acuáticas, entre los cuales se encuentran: “Procedimiento de depuración de aguas residuales y vertidos contaminantes en base a cultivos de macrófitas emergentes convertidas en flotantes” según Fernández, 1998; y “Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales”, según Delgadillo et al, 2016. Estas investigaciones permitieron analizar los principales parámetros de dimensionamiento para las unidades experimentales propuestas.

2.2.1.2. Dimensionamiento de las Unidades experimentales

El trabajo de investigación se lo realizó durante los meses de Diciembre 2016 y Enero 2017. Con el propósito de lograr una remediación eficiente de contaminantes, se utilizaron plantas jóvenes, con tallos de 30 cm de alto y raíces con una longitud aproximada a los 5 cm (Fernandez, 2006, pp. 1-10). Las plantas fueron adaptadas a las condiciones del invernadero (temperatura mínima de 16 °C y temperatura máxima de 26 °C), colocando a las mismas sobre estructura flotantes en el agua a tratar (Laguna de Colta) por aproximadamente 30 días. De acuerdo con Fernández et al (1998, pp. 1-10) y Delgadillo et al (2016, pp 15-30) para el diseño de Filtros con Macrófitas Flotantes se debe partir de los siguientes criterios:

- ✓ Profundidad del humedal: 25- 50 cm
- ✓ Distancia entre plantas: 10-30 cm
- ✓ Relación largo-ancho: 2:1
- ✓ Separación entre estructuras flotantes: 50 cm
- ✓ Número de plantas: 8-10 por metro

Dimensionamiento de los tanques:

Tomando en cuenta la morfología de la Totora y las dimensiones propuestas por los estudios mencionados anteriormente, se trabajó con tanques de 1 m de largo; 0,56 m de ancho y 0,3 m de altura. Dichas dimensiones permitieron establecer el volumen de agua a tratar, el mismo que fue calculado a partir de la ecuación de un recipiente elipsoide:

$$V = \frac{4}{3} \times \Pi \times r_1 \times r_2 \times r_3 \text{ Ecuación 2-1}$$

Donde r_1 , r_2 , r_3 representan los valores del largo, ancho y alto de los tanques respectivamente divididos por dos; obteniendo los siguientes resultados:

$$r_1 = 0,50 \text{ m (largo)}$$

$$r_2 = 0,28 \text{ m (ancho)}$$

$$r_3 = 0,15 \text{ m (alto)}$$

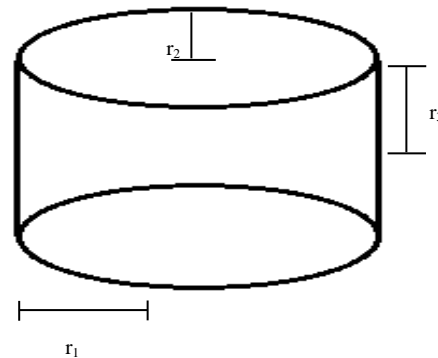


Ilustración 1: Dimensiones de los tanques.
Realizado por: Diana Quintana, 2017.

$$V = \frac{4}{3} \times \Pi \times 0,50m \times 0,28m \times 0,15m \text{ Ecuación 2-2}$$

$$V_{\text{biofiltro}} = 0,0880 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{biofiltro}} = 88 \text{ L}$$

2.2.2.3. Construcción de las unidades experimentales

La especie vegetal utilizada en los biofiltros fue la Totorá, una macrófita acuática que al crecer de forma natural en este ecosistema, se consideró apta para el proceso de fitorremediación, debido a que el agua eutrófica a tratar, se obtuvo del mismo lugar. En el proceso inicial del tratamiento, el tamaño de los tallos y raíces fueron de 30 cm y 5 cm respectivamente, como se muestra en la siguiente imagen:



Fotografía 2-2: Totorá utilizada en el proceso inicial de Fitorremediación
Realizado por: Diana Quintana, 2017.

Las estructuras flotantes seleccionadas para el proceso de construcción de las unidades experimentales fueron mallas de plástico (dos por cada tanque), sobre cada una se colocaron 4 plantas, con una separación de 10 cm, introduciendo solamente la raíz y parte del tallo sumergible de la Totorá. Finalmente, para estabilizar a las especies vegetales se utilizó alambre plastificado, como se muestra en la siguiente imagen:



Fotografía 2-3: Estructuración del Biofiltro
Realizado por: Diana Quintana, 2017.

Dónde:

- A: tanque contenedor del agua
- B: Estructura flotante
- C: Totora
- D: Agua eutrofizada (Laguna de Colta)
- E: Alambres plastificados

De esta manera, las tres unidades de análisis y sus réplicas correspondientes, fueron conformadas en tanques con capacidad para 88 litros (ecuación 2-2), colmadas con agua de la Laguna de Colta; además en cada biofiltro se colocaron 8 plántulas de Totora y se consideraron por cada uno de ellos ciertas variables, tal como se describe a continuación:

✓ **Biofiltros B1r1, B1r2, B1r3: Totora + Agua**

El tiempo de tratamiento correspondiente fue de 30 días, sin recirculación del agua.



Fotografía 2-4: Biofiltro conformado por agua de la Laguna de Colta y Totora
Realizado por: Diana Quintana, 2017.

✓ **Biofiltros B2r1, B2r2, B2r3: Agua + Totora + Oxigenación**

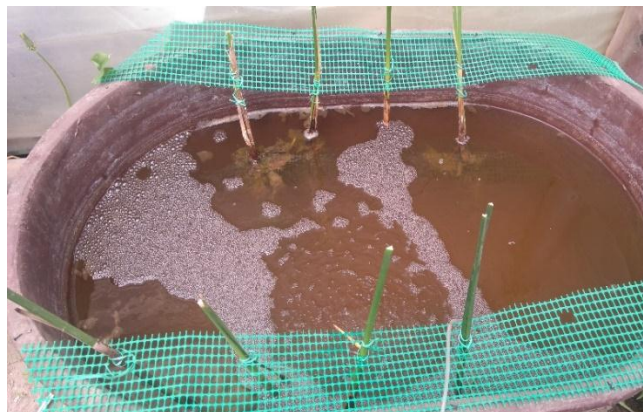
Contaron con difusores horizontales de piedra mineral, con una longitud de 15 cm, aportando burbujas de oxígeno las 24 horas/día durante los 7 días de la semana. El tiempo de tratamiento correspondiente fue de 30 días, sin recirculación del agua.



Fotografía 2-5: Biofiltro conformado por agua de la Laguna de Colta, Totora y Oxigenación
Realizado por: Diana Quintana, 2017.

✓ **Biofiltros B3r1, B3r2, B3r3: Agua + Totora + Oxígeno + Sustrato**

Además de la oxigenación se adicionó una solución que contiene sales minerales y fitohormonas biológicamente activas, que favoreció al crecimiento de las plantas. Su composición se describe en la Tabla 2-2. El tiempo de tratamiento correspondiente fue de 30 días, sin recirculación del agua.



Fotografía 2-6: Biofiltro conformado por agua de la Laguna de Colta, Totoras, Oxigenación y Bioestimulante
Realizado por: Diana Quintana, 2017.

2.2.2. Selección de los diferentes parámetros de control a ser aplicados en las unidades experimentales

2.2.2.1. Muestreo

Para la realización del muestreo se tomó en cuenta la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2169:2013 sobre muestreo, manejo y conservación de muestras, con la finalidad de evitar la contaminación de las muestras y de generar resultados certeros con un mínimo de error.

El agua para el tratamiento en los biofiltros, se obtuvo de la Laguna de Colta, en el cantón con el mismo nombre, a 20 km de la ciudad de Riobamba, ubicada a 1°43' latitud Sur y 78°45' longitud Oeste, a una altitud de 3.300 m.s.n.m, la temperatura promedio de la laguna es 14 °C, con una longitud de 2.800 metros y 1.000 metros de ancho.

El muestreo previo a la caracterización inicial del agua de la Laguna de Colta, se lo realizó mediante muestras integradas, es decir una mezcla de muestras individuales recogidas en lugares diferentes de la Laguna; mientras tanto para las caracterizaciones intermedias y finales, las muestras se obtuvieron de los biofiltros y sus réplicas correspondientes.

Muestreo de parámetros microbiológicos

Se analizó la presencia de Coliformes Totales como parámetro microbiológico, tomándose en consideración los criterios establecidos en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2169:2013, mostrados a continuación:

- ✓ Con la finalidad de evitar contaminación cruzada, los envases se abrieron y cerraron dentro del agua durante la toma de la muestra.
- ✓ Se tomaron dos muestras de 200 ml de agua en envases plásticos esterilizados.
- ✓ Se realizó un muestreo directo, es decir sin homogenización.
- ✓ La profundidad del muestreo fue aproximadamente a los 10 cm, sugerida para espejos de agua con poco movimiento. (CATHALAC , 2013)

- ✓ Las muestras se colocaron en un cooler con hielo suficiente para conservarlas hasta su análisis en el laboratorio.
- ✓ Los análisis microbiológicos se realizaron inmediatamente, en un tiempo máximo de 1 hora.

Muestreo de parámetros físicos y químicos

Tomando en cuenta las consideraciones establecidas en la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2169:2013, el muestreo de los parámetros físico-químicos se efectuaron de la siguiente manera:

- ✓ Con la finalidad de conformar una muestra integrada, se tomaron 4 muestras individuales, en diferentes lugares de la Laguna.
- ✓ Se utilizaron recipientes de plástico de 1 L de capacidad.
- ✓ Antes de tomar la muestra, se homogenizaron los envases con el agua de la Laguna.
- ✓ Se llenaron los recipientes completamente, sin dejar espacios de aire, para limitar la agitación de las muestras durante el transporte.
- ✓ Para las caracterizaciones intermedias y finales, procedentes de los biofiltros y sus respectivas réplicas, se tomó una sola muestra por cada biofiltro.
- ✓ La profundidad del muestreo fue aproximadamente a los 10 cm, sugerida para espejos de agua con poco movimiento. (CATHALAC , 2013, pp. 19-20)
- ✓ El análisis se efectuó en un tiempo máximo de 1 hora.

2.2.2.2. Caracterización inicial del agua

La caracterización inicial, intermedia y final, durante el desarrollo de la investigación, se las llevó a cabo en el laboratorio de Calidad del Agua de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Durante el análisis inicial, se determinaron parámetros físicos, químicos y biológicos como la temperatura, turbidez, DBO₅, DQO, fosfatos, nitrógeno total, pH, sólidos disueltos totales (TDS), conductividad y coliformes totales; los mismos que fueron analizados de acuerdo a las siguientes metodologías descritas en la siguiente tabla:

Tabla 1-2: Parámetros y métodos para la caracterización del agua

Parámetro	Método
DBO ₅	BOD TRACK 5210B
DQO	HACH (CAT 2125925)
Nitrógeno Total	HR 10072
Fosfatos	HACH DR 2800
pH	MULTIPARAMÉTRICO 4500B
Temperatura del agua	APHA 2550 B
Conductividad	MULTIPARAMÉTRICO 2510B
Sólidos disueltos totales	MULTIPARAMÉTRICO 2540C
Turbidez	NEFELOMÉTRICO 2130B
Temperatura Ambiente	APHA 2550 B

Fuente: (Laboratorio de Calidad del Agua, ESPOCH, 2016

Realizado por: Diana Quintana, 2017.

Los parámetros analizados in-situ fueron la temperatura del agua en los biofiltros, la temperatura ambiente (invernadero) y el pH, utilizando para ello un multiparámetro portátil (Consort C562), tal monitoreo se lo efectuó semanalmente.

El nitrógeno y el fósforo se consideran nutrientes esenciales para el crecimiento de las especies vegetales acuáticas (Pelt-Adesu, 2004, pp. 1-10), por lo que, para determinar la relación existente entre la velocidad de crecimiento de la Totorá y la remoción de dichos componentes, se registró el tamaño de los tallos y raíces de las especies vegetales presentes en los biofiltros, tanto al inicio como a los 30 días de haber finalizado con el tratamiento.

2.2.2.3. Definición de los parámetros de control

Una vez que las unidades experimentales se construyeron, las variables de control se incorporaron a los sistemas de la siguiente manera:

- ✓ Oxigenación como única variable de control definida en los biofiltros B2r1, B2r2 y B2r3
- ✓ Oxigenación junto con la adición de sales minerales en los biofiltros B3r1, B3r2 y B3r3.

Tomando en cuenta las especificaciones del fabricante, la cantidad de solución a ser suministrada fue de 0,22 L por cada biofiltro, este valor fue determinado de acuerdo al siguiente cálculo:

0,5 L de sustrato → 200 L de agua

Cantidad de sustrato → 88 L de agua a tratar

$$\text{Cantidad de sustrato} = \frac{88 \text{ L de agua} \times 0,5 \text{ L de sustrato}}{200 \text{ L de agua}} \quad \text{Ecuación 2-3}$$

Cantidad de sustrato = 0,22 L/ biofiltro



Fotografía 2-7: Filtros de Macrófitas Flotantes con sus réplicas respectivas
Realizado por: Diana Quintana, 2017.

La composición de la solución de sales minerales y fitohormonas biológicamente activas, utilizada como bioestimulante para el crecimiento de las especies vegetales, se describe en la siguiente tabla:

Tabla 2-1: Composición de la solución de sales minerales y fitohormonas biológicamente activas

Microelementos y extractos de origen vegetal y fitohormonas biológicamente activas	% en Peso
Extractos de origen vegetal y fitohormonas biológicamente activas	78,87
Manganeso (Mn)	0,12
Zinc (Zn)	0,37
Hierro (Fe)	0,49
Magnesio (Mg)	0,14
Boro (B)	0,30
Azufre (S)	0,44
Giberelinas	32,2 ppm
Ácido indolacético	32,2 ppm
Zeatina	83,2 ppm
Ingredientes inertes diluyentes y acondicionadores	19,27
Total	100

Fuente: (Grupo Bioquímico Mexicano, S.A de C.V, 2016)
Realizado por: Diana Quintana, 2017.

Finalmente, las unidades experimentales quedaron estructuradas como se describe a continuación:

Tabla 3-2: Estructuración de los Filtros de Macrófitas Flotantes

Unidades experimentales	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
Biofiltro 1 (B1) Blanco de la investigación	Agua + 8 Totoras	Agua + 8 Totoras	Agua + 8 Totoras
Biofiltro 2 (B2)	Agua + 8 Totoras+ sistema de oxigenación 24h/7días a la semana	Agua + 8 Totoras+ sistema de oxigenación 24h/7 días a la semana	Agua + 8 Totoras+ sistema de oxigenación 24h/7días a la semana
Biofiltro 3 (B3)	Agua + 8 Totoras + sistema de oxigenación + 0,22 L sustrato/biofiltro	Agua + 8 Totoras+ sistema de oxigenación + 0,22 L sustrato/biofiltro	Agua + 8 Totoras+ sistema de oxigenación + 0,22 L sustrato/biofiltro

Realizado por: Diana Quintana, 2017.

2.2.2.4. Caracterización intermedia y final del agua

Con la finalidad de verificar la reducción de nitrógeno y fósforo, se realizó la caracterización intermedia y final de los parámetros establecidos para la investigación. Es así que, una vez puesto en marcha el sistema, se realizaron los análisis de los biofiltros B1r1, B1r2, B1r3; B2r1, B2r2, B2r3; B3r1, B3r2 y B3r3, posterior a los 15 y 30 días del tratamiento del agua, donde se caracterizaron los parámetros descritos en la Tabla 2-1.



Fotografía 2-8: Caracterización de parámetros Físico-Químicos
Realizado por: Diana Quintana, 2017.



Fotografía 2-9: Medición de la DQO.
Realizado por: Diana Quintana, 2017.



Fotografía 2-10: Medición de la Turbidez
Realizado por: Diana Quintana, 2017.



Fotografía 2-11: Medición de la DBO
Realizado por: Diana Quintana, 2017.

2.2.3. Determinación de la eficiencia de los Filtros de Macrófitas en Flotación a partir de la concentración de nitrógeno y fósforo obtenida en la caracterización de aguas tratadas

2.2.3.1. Análisis estadísticos para la comparación de los datos obtenidos durante la caracterización del agua tratada.

En el presente estudio se pudo establecer la eficiencia de los filtros a partir de los resultados de las caracterizaciones del agua tratada; utilizándose para ello las concentraciones de nitrógeno total, fosfatos, DBO₅, DQO, conductividad, turbidez, pH, coliformes totales, temperatura, sólidos disueltos totales; valores que fueron sometidos a dos pruebas estadísticas: Diseño de

Componentes Principales (DCP) y Pruebas no Paramétricas, con la finalidad de establecer el mejor tratamiento en la remoción de nutrientes eutrofizantes.

2.2.3.2. *Elaboración de curvas de eficiencia de los filtros*

Para la elaboración de las curvas de eficiencia, se tomó en cuenta las concentraciones iniciales y un promedio de las concentraciones finales de fosfatos y nitrógeno total de los biofiltros B1, B2 y B3. Los porcentajes de eficiencia en la remoción de los parámetros mencionados, se determinó mediante la siguiente ecuación (Scavo, 2004; citado en Gutiérrez et al, 2014):

$$\% \text{ de remoción} = \frac{(\text{concentración de entrada}) - (\text{concentración de salida})}{(\text{concentración de entrada})} * 100 \quad \text{Ecuación 2-4}$$

CAPITULO III

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Acondicionamiento de las estructuras flotantes para el crecimiento de *Totora* en unidades experimentales

3.1.1. Dimensionamiento de las unidades experimentales

Dimensionamiento de los tanques

Para el dimensionamiento de las unidades experimentales se tomó en cuenta los criterios sobre la construcción de humedales con plantas acuáticas descritos en la Tabla 1-5; además el volumen de agua a tratar se determinó mediante la ecuación 2-1, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 1-3: Resultados del dimensionamiento de las unidades experimentales

Parámetros	B1 (Blanco)	B2	B3
Longitud	1 m	1 m	1 m
Altura	0,30 m	0,30 m	0,30 m
Ancho	0,56 m	0,56 m	0,56 m
Volumen	88 L	88 L	88 L
Distancia entre estructuras flotantes	0,5 m	0,5 m	0,5 m
Plantas / biofiltro	8 plantas	8 plantas	8 plantas
Separación entre plantas	0,10 m	0,10 m	0,10 m
Profundidad de implantación	0,05 m	0,05 m	0,05 m
Tipo de agua	Agua lacustre	Agua lacustre	Agua lacustre
Oxigenación	No	24/ d, 7 días a la semana	24h/d, 7 días a la semana
Tiempo de retención	30 días	30 días	30 días
Sustrato	No	No	Si

Realizado por: Diana Quintana, 2017

3.2. Selección de los diferentes parámetros de control a ser aplicados en las unidades experimentales

3.2.1. Caracterización inicial del agua de la Laguna de Colta

Se realizó la caracterización física, química y biológica del agua de la Laguna de Colta con la finalidad de conocer su estado natural antes de iniciar con el tratamiento en los biofiltros; obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 2-3: Caracterización inicial del agua de la Laguna de Colta

Parámetros	Unidad	Valor
Nitrógeno Total	(mg/l N)	60
Fosfatos	(mg/l PO ₄ ³⁻)	20
pH		10
Temperatura	(°C)	20
TDS	(mg/l)	1000
Conductividad	(mS/cm)	2,07
Turbiedad	(NTU)	11,1
DBO	(mg/l)	40
DQO	(mg/l)	60
Coliformes totales	(UFC)	192

Realizado por: Diana Quintana, 2017

En la Tabla 2-3 se observan niveles representativos de nitrógeno total (60mg/l) y fosfatos (20mg/l), los mismos que se encuentran estrechamente relacionados con la acumulación de sedimentos que aportan con nutrientes y materia orgánica, debido a la falta de saneamiento ambiental de las aguas residuales generadas por actividades antrópicas de la zona de estudio como la agricultura, ganadería, pastoreo y urbanización (Martelo & Lara, 2012). Otro parámetro importante de la calidad y la efectividad del tratamiento en el agua son las coliformes totales, su caracterización mostró niveles elevados (192 UFC), un claro indicativo de contaminación del agua, producto de las excretas de animales y personas, debido a la presencia de nutrientes y materia orgánica, que generan un ambiente óptimo para su reproducción. (Anon., 2008)

3.2.2. Definición de los parámetros de control

Una vez que se definieron a la oxigenación y la solución de sales minerales como variables de control en los Biofiltros B2, B3 y sus réplicas correspondientes, se realizó la caracterización 15 y 30 días después de haber iniciado con el tratamiento de los siguientes parámetros:

- ✓ Nitrógeno total
- ✓ Fosfatos
- ✓ Conductividad
- ✓ Turbidez
- ✓ Temperatura
- ✓ pH
- ✓ Sólidos disueltos totales
- ✓ DBO₅
- ✓ DQO.
- ✓ Coliformes totales

La temperatura fue un parámetro monitoreado durante 4 semanas, posterior al funcionamiento los sistemas de tratamiento, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 3-1: Temperaturas promedio registradas dentro del invernadero

	T mín. °C	T máx. °C	T mín. °C	T máx. °C
	9:00 – 13:00		14: 00 - 22:00	
Semana 1	17	25	25	22
Semana 2	17	25	25	21
Semana 3	17	24	24	20
Semana 4	17	26	26	21

Realizado por: Diana Quintana, 2017

La Tabla 3-3 muestra los valores de las temperaturas (°C) tomadas mediante un termómetro ambiental, las mismas que se registraron en horas de la mañana (9:00-13:00) y tarde (14:00 - 22:00). Debido al aumento de la radiación solar en horas de la tarde, la temperatura promedio del invernadero fue de 25°C, lo que favoreció al incremento de la población microbiana encargados de la oxidación de la materia orgánica presente en el agua y al crecimiento y desarrollo de las plantas; rangos determinados entre 20°C y 30°C aceleran las reacciones químicas encargadas del proceso fotosintético. (CANNA Research, 2015)

3.2.3. Caracterización intermedia del agua de la Laguna de Colta

Posterior a los 15 días del funcionamiento de los biofiltros, se realizó la caracterización físico-química de los parámetros establecidos, además se determinó el porcentaje de remoción por cada réplica mediante la ecuación 2-4, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 4-3: Caracterización intermedia de las unidades experimentales B1, B2 Y B3.

Caracterización intermedia del Biofiltro B1					
Parámetro	Unidad	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Promedio de remoción %
Nitrógeno Total	(mg/l N)	2	5	2,4	94,78
Fosfatos	(mg/l PO ₄ ³⁻)	0,11	0,18	0,09	99,37
pH		9,48	9,22	9,33	6,57
Temperatura	(°C)	22,3	22,3	22,3	
TDS	(mg/l)	860	670	940	17,67
Conductividad	(mS/cm)	1,61	1,25	1,76	25,61
Turbiedad	(NTU)	2,32	1,44	2,25	81,95
Caracterización intermedia del Biofiltro B2					
Nitrógeno Total	(mg/l N)	4	3,5	3,8	93,71
Fosfatos	(mg/l PO ₄ ³⁻)	0,27	0,05	0,18	99,17
pH		9,24	9,22	9,30	7,47
Temperatura	(°C)	22,6	22,6	22,6	
TDS	(mg/l)	670	690	700	31,33
Conductividad	(mS/cm)	1,25	1,35	1,45	34,787
Turbiedad	(NTU)	1,54	1,38	1,02	88,17
Caracterización intermedia del Biofiltro B3					
Nitrógeno Total	(mg/l N)	15	14,5	12	76,94
Fosfatos	(mg/l PO ₄ ³⁻)	0,78	7	10	70,37
pH		8,58	9,33	8,05	13,47
Temperatura	(°C)	22,5	22,5	22,5	
TDS	(mg/l)	820	720	650	27
Conductividad	(mS/cm)	1,54	1,35	1,80	24,47
Turbiedad	(NTU)	18,5	17,0	19,0	0

Realizado por: Diana Quintana, 2017.

La Tabla 4-3 muestra los resultados de la caracterización de los parámetros físicos y químicos posterior a los 15 días del tratamiento con las unidades experimentales y sus respectivas réplicas. En los biofiltros B1, B2 y B3, el nitrógeno total se reduce a valores cercanos a 5 mg/l, 4 mg/l y 15 mg/l respectivamente; mientras que los Fosfatos se reducen a valores cercanos a 1mg/l en B1

y B2 y 10 mg/l en B3. El valor del pH se mantuvo constante en las unidades experimentales; los sólidos disueltos totales (TDS), conductividad y turbiedad disminuyeron en los biofiltros B1 y B2 lo que no sucedió en el biofiltro B3, debido a que la turbiedad aumentó a un valor cercano a 19 NTU.

Los resultados de las caracterizaciones de los parámetros establecidos permitieron determinar los porcentajes promedio de remoción de los mismos en cada biofiltro (ecuación 2-4), como se muestra a continuación:

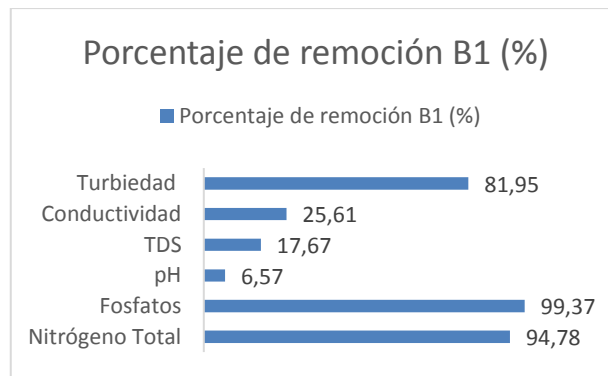


Figura 1-3: Porcentaje de remoción en el Biofiltro B1
Fuente: Realizado por: Diana Quintana, 2017.

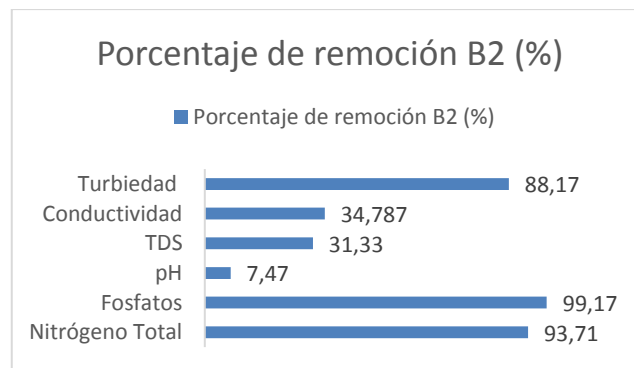


Figura 2-3: Porcentaje de remoción en el Biofiltro B2
Fuente: Realizado por: Diana Quintana, 2017.

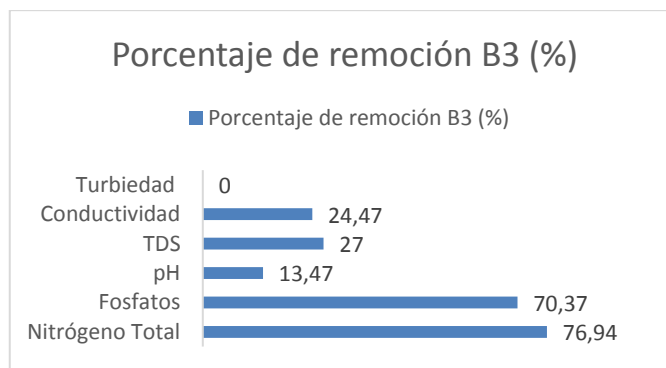


Figura 3-1: Porcentaje de remoción en el Biofiltro B3
Fuente: Realizado por: Diana Quintana, 2017.

Las Figuras 1-3, 2-3 y 3-3 representan el promedio de remoción (%) de los parámetros físicos y químicos caracterizados en los sistemas de tratamiento. Los porcentajes de reducción para nitrógeno total en los biofiltros B1, B2 y B3 fueron del 94,78%; 93,71% y 76,94% respectivamente; donde la Totorá y la oxigenación permitieron la reproducción de microorganismos encargados en la transformación del nitrógeno orgánico en nitrógeno amoniacal (amonificación), debido a que estos obtienen energía al oxidar la materia orgánica presente en el agua. La temperatura promedio registrada en el invernadero fue de 25 °C y el pH se mantuvo constante en todas las unidades experimentales (alcalino), ambos parámetros óptimos para la reproducción de bacterias nitrificantes que dieron como resultado la formación de nitritos y nitratos (nitrificación). Estos compuestos fueron finalmente asimilados por las plantas para la síntesis de proteínas durante su metabolismo y por los microorganismos del sistema (Curt, 2009, pp. 73-75).

La remoción de fosfatos en los biofiltros B1, B2 y B3 fueron del 99,37%; 99,17% y 70,37% respectivamente, porcentajes altos que explican la capacidad de las plantas para absorber este compuesto e integrarlo a su metabolismo durante la fotosíntesis (Korkusuz et al, 2004; citados en Romero et al, 2009); además, tienen la capacidad de incorporar este nutriente en su tejido vegetal durante el crecimiento (Lahora Cano, 2004; citado en Delgadillo et al, 2016). El crecimiento de las raíces de la Totorá fue en promedio entre 15 y 20 centímetros durante los 30 días de tratamiento, tal como se muestra en los resultados descritos en el Anexo H.

La remoción de la turbiedad en los biofiltros B1, B2 y B3 fue del 81,95% y 88,17% respectivamente; este parámetro representa indirectamente a los sólidos suspendidos presentes en el agua, atribuyendo los altos porcentajes de su reducción al mecanismo de rizofiltración por parte de la Totorá (Guardián & Coto, 2010, p. 21). Por lo contrario, en los biofiltros B3r1, B3r2 y B3r3, no existió remoción alguna (0%), debido a la adición de sales minerales que actuaron como estimulante para la reproducción de bacterias, lo que generó un incremento de la turbiedad.

Los procesos de mineralización y descomposición de nitrógeno y fósforo llevados a cabo en las unidades experimentales, no influyeron en la conductividad y los sólidos disueltos totales (TDS). Al estar estos parámetros estrechamente relacionados, los porcentajes de reducción para ambos fueron menores al 40%, debido a la presencia de sedimentos en el fondo de los humedales. (Hernández, 2012, p. 86)

3.2.4. Caracterización final del agua de la Laguna de Colta

Posterior a los 30 días del funcionamiento de los biofiltros, se realizó la caracterización física, química y biológica de los parámetros establecidos, además se determinó el porcentaje de remoción por cada réplica mediante la ecuación 2-4, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 5-3: Caracterización final de las unidades experimentales B1, B2 Y B3.

Caracterización final del Biofiltro B1					
Parámetros	Unidad	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Promedio de remoción %
Nitrógeno Total	(mg/l N)	No detectable	No detectable	No detectable	100
Fosfatos	(mg/l PO ₄ ³⁻)	0,75	0,80	0,90	95,92
pH		9,60	9,30	9,02	6,9
Temperatura	(°C)	18,8	18,8	18,8	
TDS	(mg/l)	700	690	685	30,83
Conductividad	(mS/cm)	1,31	1,34	1,33	35,91
Turbiedad	(NTU)	1,20	1,30	1,40	88,29
DBO₅	(mg/l)	8,0	8,3	8,4	79,42
DQO	(mg/l)	40,0	40,2	40,4	33
Coliformes Totales	UFC	30	40	35	81,77
Caracterización final del Biofiltro B2					
Nitrógeno Total	(mg/l N)	No detectable	No detectable	No detectable	100
Fosfatos	(mg/l PO ₄ ³⁻)	0,45	0,50	0,55	97,5
pH		9,52	9,55	9,54	4,63
Temperatura	(°C)	18,8	18,8	18,8	
TDS	(mg/l)	490	480	489	51,37
Conductividad	(mS/cm)	1,38	1,45	1,50	30,26
Turbiedad	(NTU)	1,02	2,0	2,80	82,52
DBO	(mg/l)	6,5	7,0	7,5	82,5
DQO	(mg/l)	90	80	92	0
Coliformes totales	UFC	25	30	35	84,37
Caracterización final del Biofiltro B3					
Nitrógeno Total	(mg/l N)	2	2,5	1,5	96,67
Fosfatos	(mg/l PO ₄ ³⁻)	0,54	0,60	0,65	97,02
pH		9,51	9,30	9,20	6,63
Temperatura	(°C)	18,8	18,8	18,8	
TDS	(mg/l)	800	820	870	17
Conductividad	(mS/cm)	1,53	1,60	1,63	23,35

Turbiedad	(NTU)	12	15	20	0
DBO₅	(mg/l)	29,5	35	42	11,25
DQO	(mg/l)	202	180	193	0
Coliformes totales	UFC	216	200	180	0

Realizado por: Diana Quintana, 2017

La Tabla 5-3 muestra los resultados de la caracterización de los parámetros físicos, químicos y biológicos posterior a los 30 días del tratamiento; donde en los biofiltros B1, B2 se observa el consumo de nitrógeno total, es decir existió una remoción completa. En el biofiltro B3 se obtuvieron valores cercanos a 3 mg/l; para los fosfatos tanto en los biofiltros B1, B2 y B3 se obtuvieron valores cercanos a 1mg/l. El valor del pH se mantuvo constante (superior a 9) y alcalino en las nueve unidades experimentales; los sólidos disueltos totales (TDS), conductividad y turbiedad disminuyeron en los biofiltros B1 y B2, lo que no sucedió en el biofiltro B3, debido a que este último parámetro aumentó a un valor cercano a 20 NTU.

La DBO₅ se redujo a valores cercanos a 8mg/l para los biofiltros B1 y B2 y 40mg/l para el biofiltro B3. La DQO solamente presentó valores de reducción en el biofiltro B1 (40 mg/l), lo que no sucedió en el biofiltro B2 y B3, donde los valores aumentaron entre 100 mg/l y 200 mg/l.

Las coliformes totales se redujeron a valores cercanos a las 40 UFC para los biofiltros B1 y B2, por lo contrario en el biofiltro B3 aumentaron hasta valores por encima de 200 UFC.

Los resultados de las caracterizaciones de los parámetros establecidos permitieron determinar los porcentajes promedio de remoción de los mismos en cada biofiltro (ecuación 2-4), como se muestra a continuación:

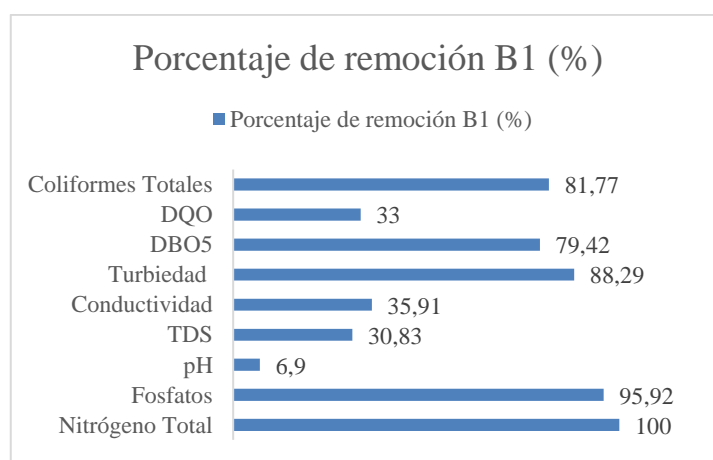


Figura: 4-3: Porcentaje de remoción en el Biofiltro B1
Fuente: Realizado por: Diana Quintana, 2017.

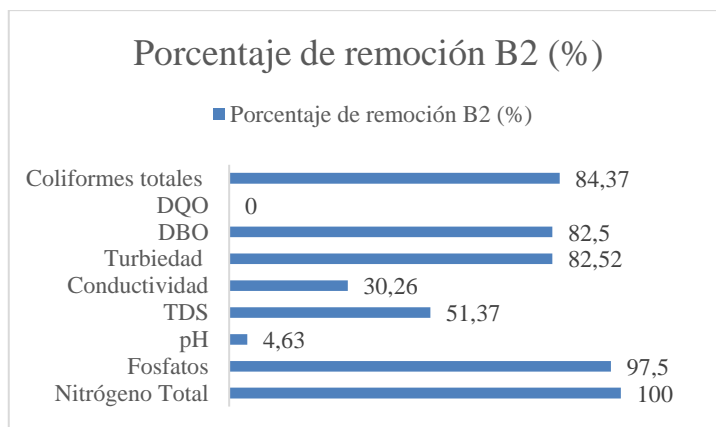


Figura 5-3: Porcentaje de remoción en el Biofiltro B2

Fuente: Realizado por: Diana Quintana, 2017.

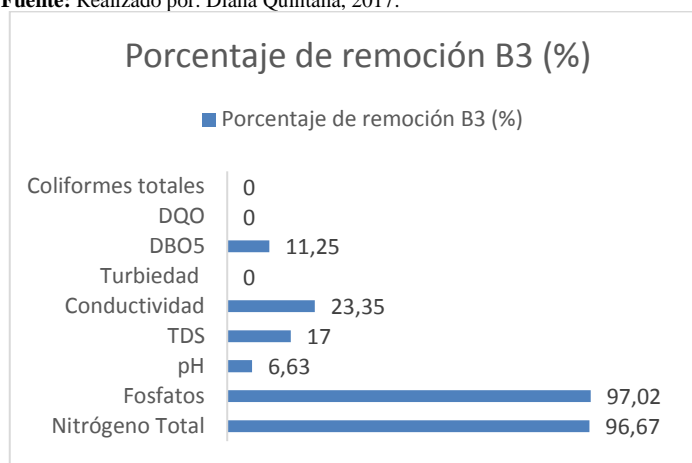


Figura 6-3: Porcentaje de remoción en el Biofiltro B3

Fuente: Realizado por: Diana Quintana, 2017.

Las Figuras 4-3, 5-3 y 6-3 representan el promedio de remoción (%) de los parámetros físicos, químicos y biológicos caracterizados en los sistemas de tratamiento. Los porcentajes de reducción para nitrógeno total en los biofiltros B1 y B2 fueron del 100%; para el biofiltro B3 fue de 96,67% igualmente alto. Tanto la temperatura promedio (25°C) como el pH (alcalino), se mantuvieron en el rango óptimo para la reproducción de microorganismos nitrificantes, lo que indica que el ciclo de remoción de nitrógeno continuó posterior a los 15 días de tratamiento, transformando estos compuestos a nitritos y nitratos, este último vital para la síntesis de proteínas durante el crecimiento de las especies vegetales. Finalmente el nitrógeno fue totalmente asimilado y retirado del sistema por las plantas, gracias a los mecanismos de mineralización y descomposición por parte de los microorganismos. (Lara-Borrego, 1999; citados en Hernández, 2009)

Los porcentajes de remoción de fosfatos en los biofiltros B1, B2 y B3 fueron del 95,92%, 97,5% y 97,02% respectivamente, lo que indica que posterior a los 30 días de tratamiento, no existió mayor remoción de este parámetro; debido a que su eliminación del sistema se encuentra limitado

por la forma del fósforo presente en el agua, la asimilación por parte de las plantas y la biomasa (microorganismos) (Karpiscak y Foster, 2000; citados en Romero et al, 2009).

Los porcentajes de remoción de la DBO₅ en los biofiltros B1 y B2 fueron del 79,42% y 82,5% respectivamente. La temperatura promedio registrada en el invernadero fue de 25°C, que favoreció al desarrollo de microorganismos presentes en el agua, encargados de la oxidación de la materia orgánica, debido también al ambiente aeróbico que se generó con la presencia de la Totorá y los oxigenadores (B2). Estos porcentajes fueron altos en comparación con el biofiltro B3 (11,25%), donde la baja remoción se relaciona con el proceso de descomposición de los compuestos orgánicos adicionados en la solución de sales minerales suministradas, debido a que al incrementar la materia orgánica, los microorganismos requieren mayor cantidad de oxígeno para poder degradarla en elementos inorgánicos, que causan el aumento de los niveles de la DBO₅. (Álvarez & Bécares, 2006, pp. 1-8)

La remoción para la DQO en el biofiltro B1 fue del 33%, debido al incremento de la actividad microbiana que utiliza la materia orgánica para su metabolismo y a las reacciones de óxido-reducción que se dan dentro del humedal (Kadlec et al, 2000; citados en Romero et al, 2009). Por el contrario, en los biofiltros B2 y B3, posterior a los 30 días de tratamiento, este parámetro se incrementó, siendo la razón principal el arrastre de las raíces y el desprendimiento de la biopelícula situada alrededor de los rizomas, debido al proceso de aireación incorporado en los biofiltros, que al degradarse incrementan la materia orgánica, elevando el nivel de la DQO (Quipezco, 2002; citado en Romero et al, 2009).

Las coliformes totales llegaron a porcentajes de reducción de 81,77% y 84,37% para los biofiltros B1 y B2 respectivamente; sabiendo que a la radiación solar, filtración por parte de las plantas y presencia de microorganismos depredadores se les confiere la capacidad para su eliminación. (Delgadillo, et al., 2016, pp. 22-25) En el biofiltro B3 no existió remoción de patógenos (0%), pero si se incrementó, debido a que la solución suministrada, favoreció el desarrollo de los mismos

3.3. Determinación de la eficiencia de los Filtros de Macrófitas en Flotación a partir de la concentración de nitrógeno y fósforo obtenida en la caracterización del agua tratada

3.3.1. Análisis estadístico

3.3.1.1. Diseño de Componentes Principales

Tabla 6-3: Matriz de Correlaciones

Correlación	Biofiltro_FMF	Biofiltro_FMF	Nitrógeno total	Fosfatos	TDS	Turbiedad	Conductividad
		1,000	0,542	0,440	0,072	0,844	0,361
	Nitrógeno Total	0,542	1,000	0,664	0,206	0,655	0,185
	Fosfatos	0,440	0,664	1,000	-0,091	0,568	0,311
	TDS	0,072	0,206	-0,091	1,000	0,388	0,451
	Turbiedad	0,844	0,655	0,568	0,388	1,000	0,523
	Conductividad	0,361	0,185	0,311	0,451	0,523	1,000
Sig. (Unilateral)	Biofiltro_FMF		0,010	0,034	0,388	0,000	
	Nitrógeno Total	0,010		0,001	0,206	0,002	0,070
	Fosfatos	0,034	0,001		0,359	0,007	0,232
	TDS	0,388	0,206	0,359		0,056	0,105
	Turbiedad	0,000	0,002	0,007	0,056		0,030
	Conductividad	0,070	0,232	0,105	0,030	0,013	0,013

a. determinante =,020

La Tabla 6-3 muestra las correlaciones existentes entre los Biofiltros (B1, B2, B3) y las variables respuesta: Nitrógeno Total, Fosfatos, Sólidos Disueltos Totales (TDS), Turbiedad y Conductividad, observándose que el valor de la determinante (a) corresponde a 0,020 y al ser cercano a 0 indica que si existe una correlación entre las variables y los biofiltros.

Tabla 7-3: KMO y Prueba de Barlett

Media de adecuación muestral de Kaiser-Meyer-Olkin	0,515
Chi-cuadrado aproximado	55,621
Prueba de esfericidad de Barlett gl	15
Significancia	0,000

Realizado por: Diana Quintana, 2017.

La Tabla 7-3 muestra los resultados de la prueba de KMO, siendo su valor igual a 0,515 y mayor a 0,5 indica que la adecuación muestral es apropiada.

Planteamiento de Hipótesis del Análisis estadístico:

Ho: se puede realizar el Diseño de Componentes Principales (DCP) siempre y cuando la significancia sea menor a 0,05

Hi: no se puede realizar el Diseño de Componentes Principales (DCP) siempre y cuando la significancia sea mayor a 0,05

Decisión: como la significancia es 0 no existen argumentos para rechazar la hipótesis nula, por lo tanto si se puede realizar el análisis DCP.

Tabla 8-3: Comunalidades

	Inicial	Extracción
Biofiltro_FMF	1,000	0,691
Nitrógeno total	1,000	0,699
Fosfatos	1,000	0,726
TDS	1,000	0,815
Turbiedad	1,000	0,897
Conductividad		0,649

Realizado por: Diana Quintana, 2017.

La Tabla 8-3 muestra las Comunalidades existentes entre los Biofiltros (B1, B2, B3) y las variables respuesta: nitrógeno total, fosfatos, sólidos disueltos totales (TDS), turbiedad y conductividad, al ser los valores de extracción mayor a 0,40 se supera el 40% mínimo requerido para el análisis DCP.

Tabla 9-3: Varianza total explicada

Componente	Autovalores iniciales			Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción			Suma de las saturaciones al cuadrado de la rotación		
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado
1	3,189	53,153	53,153	3,189	53,153	53,153	2,800	46,660	46,660
2	1,287	21,454	74,607	1,287	21,454	74,607	1,667	27,948	74,607
3	0,653	10,888	85,495						
4	0,615	10,252	95,747						
5	0,193	3,223	98,970						
6	0,062	1,030	100,000						

Realizado por: Diana Quintana, 2017.

La Tabla 9-3 corresponde a la Varianza Total Explicada, mostrando un Porcentaje Acumulado igual a 74,607%, mayor al 65% mínimo requerido, es decir que si se genera una explicación al problema de la investigación.

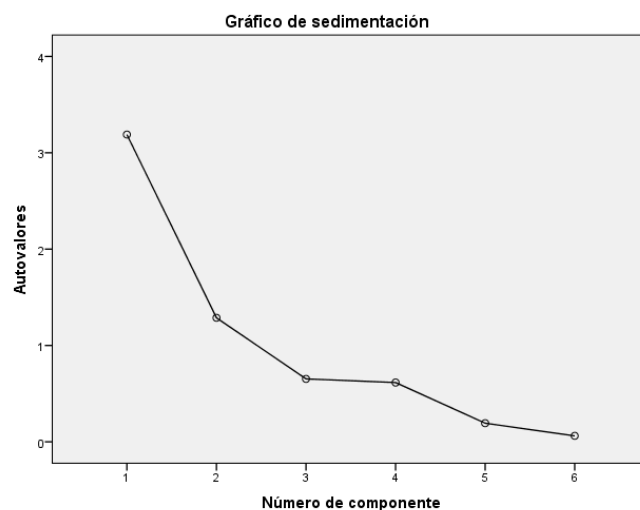


Figura 7-3: Gráfico de sedimentación del análisis DCP
Fuente: realizado por: Diana Quintana, 2017.

Para la explicación de la Figura 7-3 pertinente a la sedimentación del análisis DCP remitirse a la Tabla 9-3.

Tabla 10-3: Matriz de componentes rotados

	Componentes	
	1	2
Fosfatos	0,848	
Nitrógeno Total	0,830	0,106
Turbiedad	0,813	0,485
Biofiltro_FMF	0,801	0,224
TDS		0,901
Conductividad	0,297	0,749

Realizado por: Diana Quintana, 2017.

La Tabla 10-3 representa a los dos componentes que explican las características del agua:

- ✓ Componente 1: fosfatos, nitrógeno total y turbiedad se encuentran relacionados con los Filtros de Macrófitas Flotantes (B1, B2, B3), al ser sus valores numéricos mayores a 0,8.
- ✓ Componente 2: la conductividad y los Sólidos Disueltos Totales se encuentran relacionados entre sí al ser sus valores numéricos mayores a 0,7.

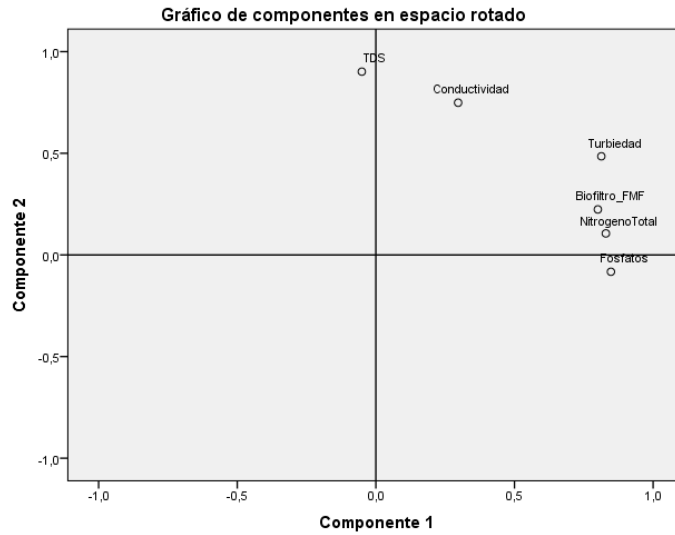


Figura 8-3: Gráfico de componentes en espacio rotado del análisis DCP.
Fuente: Realizado por: Diana Quintana, 2017.

La Figura 8-3 muestra a los componentes en un espacio rotado, apreciándose que la Turbiedad y la Conductividad no rotan convenientemente, posiblemente por errores en el monitoreo.

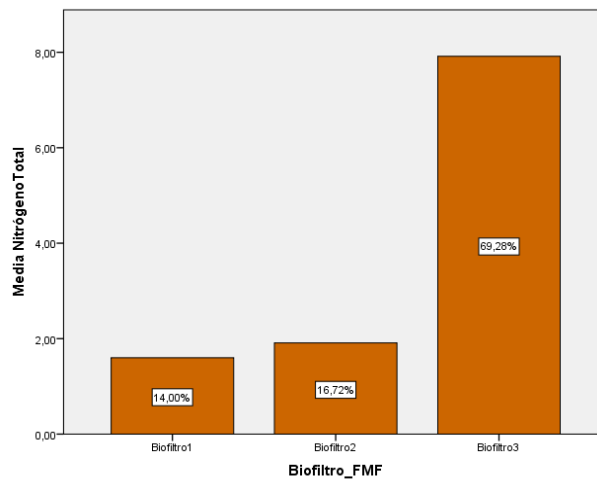


Figura 9-3: Gráfico de barras del análisis estadístico DCP
Fuente: Realizado por: Diana Quintana, 2017.

La Figura 9-3 muestra en el eje de las abscisas los Biofiltros B1, B2, B3 y en el eje de las ordenadas el valor de Nitrógeno Total expresado en (mg/l) durante un tiempo de análisis de 30 días, las barras representan los porcentajes de Nitrógeno Total que no fueron removidos durante el funcionamiento de los Biofiltros.

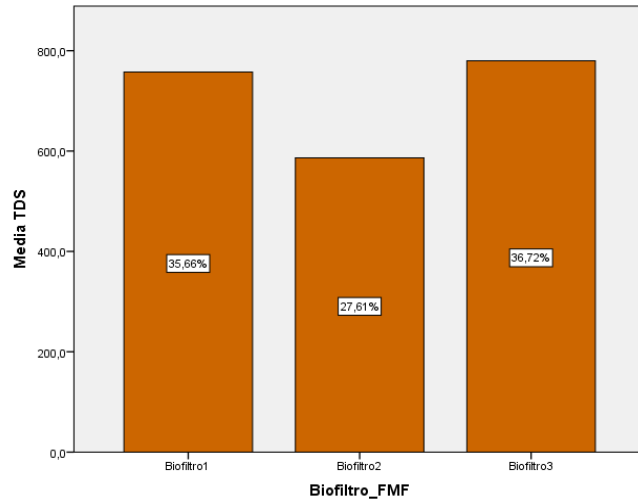


Figura 10-3: Gráfico de barras del análisis estadístico DCP
Fuente: Realizado por: Diana Quintana, 2017.

La Figura 10-3 muestra en el eje de las abscisas los 3 tipos de biofiltros aplicados y en el eje de las ordenadas el valor de Solidos Disueltos Totales (TDS) expresado en (mg/l) durante un tiempo de análisis de 30 días, las barras representan los porcentajes de TDS que no fueron removidos durante el funcionamiento de los Biofiltros.

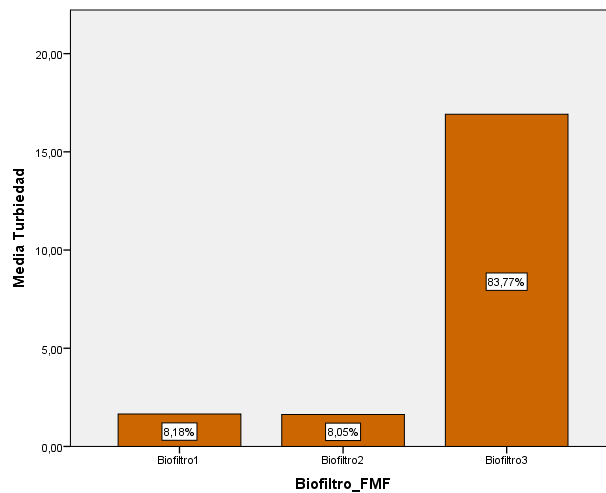


Figura 11-3: Gráfico de barras del análisis DCP
Fuente: Realizado por: Diana Quintana, 2017.

La Figura 11-3 muestra en el eje de las abscisas los 3 tipos de biofiltros aplicados y en el eje de las ordenadas el valor de la Turbiedad expresado en (NTU) durante un tiempo de análisis de 30 días, las barras representan los porcentajes de Turbiedad que no fueron removidos durante el funcionamiento de los Biofiltros.

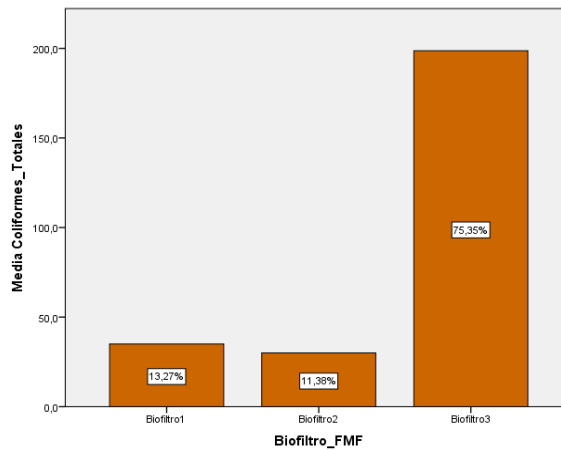


Figura 12-3: Gráfico de barras del análisis estadístico DCP
Fuente: Realizado por: Diana Quintana, 2017.

La Figura 12-3 muestra en el eje de las abscisas los 3 tipos de biofiltros aplicados y en el eje de las ordenadas el valor de Coliformes Totales expresadas en (UFC) durante un tiempo de análisis de 30 días, las barras representan los porcentajes de Coliformes Totales que no fueron removidas durante el funcionamiento de los Biofiltros.

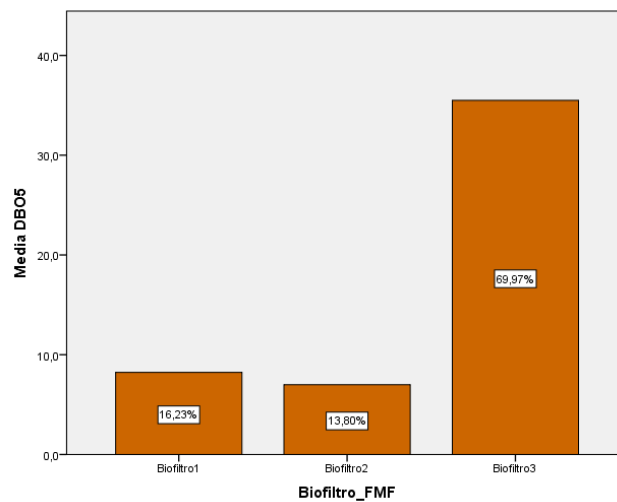


Figura 13-3: Gráfico de barras del análisis estadístico DCP
Fuente: Realizado por: Diana Quintana, 2017.

La Figura 13-3 muestra en el eje de las abscisas los 3 tipos de biofiltros aplicados y en el eje de las ordenadas el valor de la DBO₅ expresado en (mg/l) durante un tiempo de análisis de 30 días, las barras representan los porcentajes de la DBO₅ que no fueron removidos durante el funcionamiento de los Biofiltros.

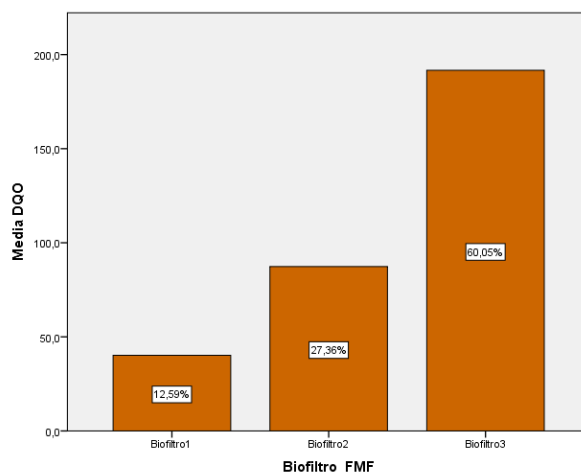


Figura 14-3: Gráfico de barras del análisis estadístico DCP
Realizado por: Diana Quintana, 2017.

La Figura 14-3 muestra en el eje de las abscisas los 3 tipos de biofiltros aplicados y en el eje de las ordenadas el valor de la DQO expresado en (mg/l) durante un tiempo de análisis de 30 días, las barras representan los porcentajes de la DQO que no fueron removidos durante el funcionamiento de los Biofiltros.

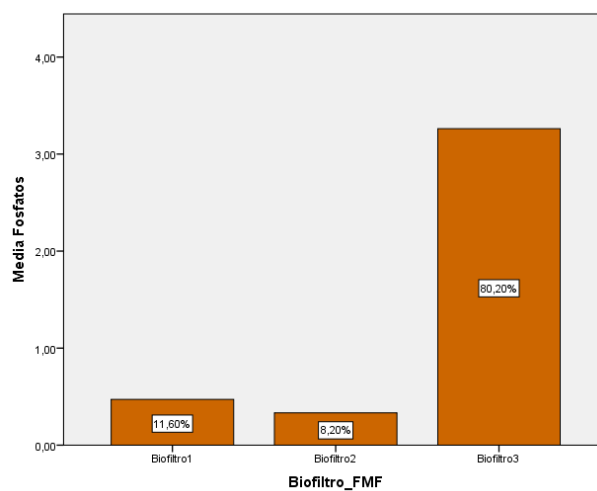


Figura 15-3: Gráfico de barras del análisis estadístico DCP
Realizado por: Diana Quintana, 2017.

La Figura 15-3 muestra en el eje de las abscisas los 3 tipos de biofiltros aplicados y en el eje de las ordenadas el valor de Fosfatos expresado en (mg/l PO_4^{3-}) durante un tiempo de análisis de 30 días, las barras representan los porcentajes de Fosfatos que no fueron removidos durante el funcionamiento de los Biofiltros.

3.3.1.2. Pruebas no paramétricas

Tabla 11-3: Estadísticos de Contraste

	compilatorio - raíces
Z	-5,921 ^b
Sig. asintót. (bilateral)	,000

a. Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon
b. Basado en los rangos negativos.

Planteamiento de hipótesis:

Ho: se relaciona el tamaño del crecimiento de la raíz siempre y cuando la significancia sea mayor o igual a 0,05

Hi: no se relaciona el tamaño del crecimiento de la raíz siempre y cuando la significancia sea menor o igual a 0,05

Decisión: como la significancia es menor a 0,05 se desecha la hipótesis nula por tanto ambas distribuciones no son iguales, lo que quiere decir que si hay una diferencia del tamaño de las raíces al inicio y al final de la investigación.

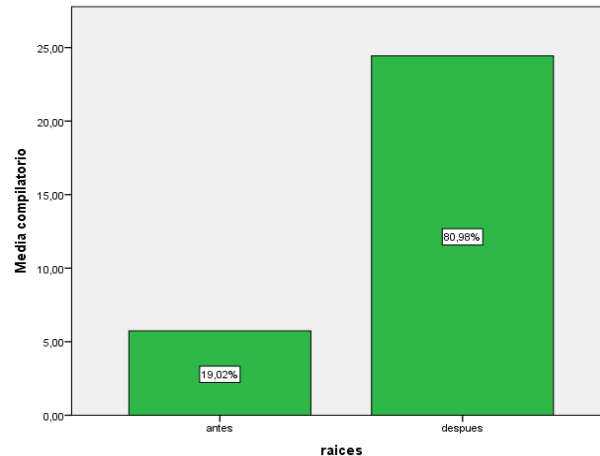


Figura 16-3: Gráfico de barras del análisis estadístico para Pruebas No Paramétricas
Fuente: Realizado por: Diana Quintana, 2017.

La Figura 16-3 muestra en el eje de las abscisas a las raíces de la Totora al inicio y al final de la investigación y en el eje de las ordenadas al crecimiento de las mismas expresadas en (cm) durante un tiempo de análisis de 30 días, las barras representan los porcentajes de crecimiento de las raíces durante el funcionamiento de los Biofiltros.

3.3.2 Curvas de eficiencia

Se realizaron curvas de eficiencia para determinar el biofiltro que obtuvo mayor porcentaje de remoción en nitrógeno total y fosfatos, obteniendo los siguientes resultados:

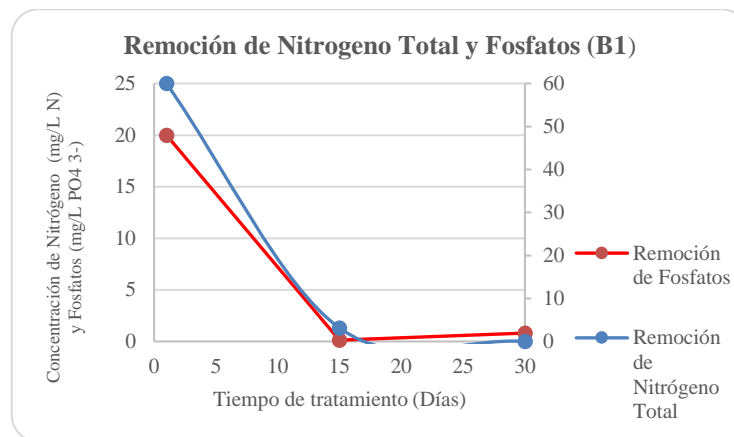


Figura 17-3: Curvas de Eficiencia para la Remoción de Nitrógeno Total y Fosfatos, Biofiltro 1
Fuente: Realizado por: Diana Quintana, 2017.

La Figura 17-3 representa en el eje de las abscisas el tiempo de tratamiento (días) con el Biofiltro 1 y en el eje de las ordenadas la Concentración de Nitrógeno total (mg/L) y Fosfatos (mg/IPO₄³⁻); observando que existe una correlación negativa, es decir que al transcurrir el tiempo estimado de la investigación (30 días), las concentraciones disminuyeron de valores de 60 mg/L y 20 mg/L a valores de 0 mg/L y 0,82 mg/ L de nitrógeno total y fosfatos respectivamente; por lo tanto la eficiencia en la remoción de nitrógeno total fue del 100% y 95,9% para fosfatos.

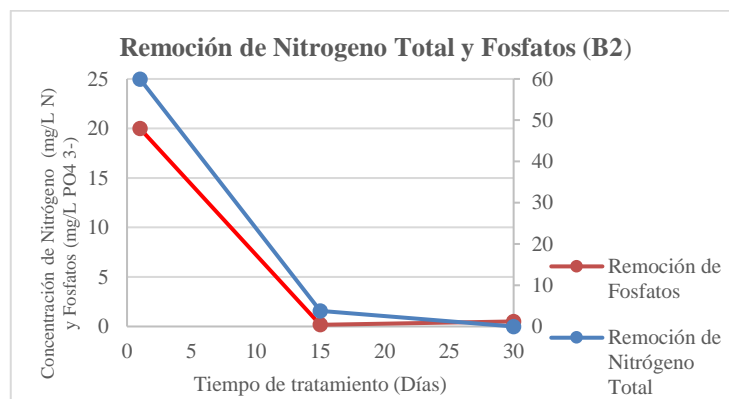


Figura 18-3: Curvas de Eficiencia para la Remoción de Nitrógeno Total y Fosfatos, Biofiltro 2
Fuente: Realizado por: Diana Quintana, 2017.

La Figura 18-3 representa en el eje de las abscisas el tiempo de tratamiento (días) con el Biofiltro 2 y en el eje de las ordenadas la Concentración de Nitrógeno total (mg/L) y Fosfatos (mg/IPO₄³⁻);

observando que existe una correlación negativa, es decir que al transcurrir el tiempo estimado de la investigación (30 días), las concentraciones disminuyeron de valores de 60 mg/L y 20 mg/L a valores de 0 mg/L y 0,5 mg/ L de nitrógeno total y fosfatos respectivamente; por lo tanto la eficiencia en la remoción de nitrógeno total fue del 100% y 97,5% para fosfatos.

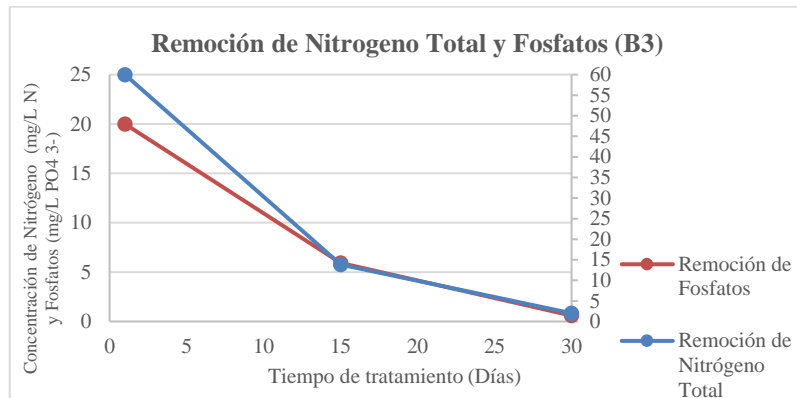


Figura 19-3: Curvas de Eficiencia para la Remoción de Nitrógeno Total y Fosfatos, Biofiltro 3
Fuente: Realizado por: Diana Quintana, 2017.

La Figura 19-3 representa en el eje de las abscisas el tiempo de tratamiento (días) con el Biofiltro 3 y en el eje de las ordenadas la Concentración de Nitrógeno total (mg/L) y Fosfatos (mg/LPO₄³⁻) observando que existe una correlación negativa, es decir que al transcurrir el tiempo estimado de la investigación (30 días), las concentraciones disminuyeron de valores de 60 mg/L y 20 mg/L a valores de 2 mg/L y 0,6 mg/ L de nitrógeno total y fosfatos respectivamente; por lo tanto la eficiencia en la remoción de nitrógeno total fue del 96,67% y 97% para fosfatos.

CONCLUSIONES

- ✓ Se comparó la eficiencia entre tres Filtros de Macrófitas Flotantes (B1, B2, B3) y sus respectivas réplicas, utilizados en el tratamiento del agua de la Laguna de Colta; a partir de las caracterizaciones iniciales, intermedias y finales de las concentraciones de nitrógeno total y fosfatos de cada biofiltro. Los datos obtenidos se sometieron a pruebas estadísticas, con los que también se realizaron curvas de eficiencia para determinar el tratamiento más efectivo.
- ✓ Los Filtros de Macrófitas Flotantes (FMF) fueron acondicionados de acuerdo a revisión documentada, lo que permitió determinar los criterios para el dimensionamiento de las unidades experimentales; en concordancia con esto, se construyó un invernadero para controlar la temperatura ambiental, dentro del cual se estructuraron los biofiltros propuestos, cada uno con capacidad para tratar 88 litros de agua, sobre los cuales se dispusieron plantas de Totorá, sistemas de aireación y una solución de sales minerales y fitohormonas biológicamente activas.
- ✓ Los parámetros de control establecidos durante la experimentación fueron dos, de esta manera en el biofiltro B2r1, B2r2 y B2r3 se colocó oxigenación (7 días de la semana 24 horas al día), lo que permitió la reproducción de microorganismos aerobios y en el biofiltro B3r1, B3r2 y B3r3 se adicionó una solución de sales minerales (0,22 l/biofiltro) para estimular el crecimiento de la Totorá y sus raíces; en los biofiltros B1r1, B1r2 y B1r3 no se colocaron variables de control, debido a que fueron blanco de la investigación.
- ✓ Se determinó la eficiencia de los Filtros de Macrófitas Flotantes (FMF), mediante la realización de un análisis estadístico DCP, que demostró los biofiltros que obtuvieron mayor porcentaje de remoción en nutrientes eutrofizantes. De esta manera, posterior a los 30 días de tratamiento el nitrógeno total en el biofiltro B1 logró una reducción igual al 86%, seguido por el biofiltro B2 con 83,28% y finalmente el biofiltro B3 con 30,72%; para fosfatos el biofiltro B2 presentó un valor igual al 91,8%, seguido por el biofiltro B1 con 88,4% y finalmente el biofiltro B3 con 19,8%; es decir tanto B1 como B2 son eficientes en el tratamiento para la eliminación de nitrógeno y fósforo; se debe recalcar además que el biofiltro B1 solamente se conformó con Totorá como medio para absorción sin ninguna variable de control, siendo su remoción tan alta como el biofiltro B2 (con oxigenación), además se debe tomar en cuenta la importancia de las estructuras flotantes, que permitieron el contacto directo de las raíces de las plantas con el agua a tratar

- ✓ Finalmente, los porcentajes de remoción para la DBO_5 fueron igual al 86,2%, 83,77% y 30,03% y para la DQO fueron igual al 87,41%, 72,64% y 39,95% en los biofiltros B1, B2 y B3 respectivamente; lo que también demuestra la eficiencia de las unidades experimentales en la eliminación de la materia orgánica.

RECOMENDACIONES

- ✓ Se requiere de un tiempo adecuado de adaptación a condiciones ambientales de la totora, previo a su implantación debido a que estas se han desarrollado bajo condiciones climáticas diferentes, el tiempo puede ser determinado por el investigador y por el desarrollo observado en las plantas.
- ✓ Es recomendable el control de la proliferación de algas dentro de los sistemas de Filtros con Macrófitas Flotantes (FMF), sobre todo si los sistemas acuáticos están expuestos al sol, el crecimiento descontrolado de algas provoca que su metabolismo disminuya la presencia de oxígeno disuelto del agua a la vez que compite por el mismo con las macrófitas utilizadas en la investigación, en este caso, la Totora.
- ✓ Se debe tomar en cuenta la temperatura del invernadero antes del funcionamiento de los Filtros con Macrófitas Flotantes, debido a que en días calurosos estos pueden sobrepasar la temperatura óptima para el crecimiento de la Totora, causando estrés térmico en las plantas y su muerte posterior. Siendo aconsejable construir cortinas que permitan el paso del aire durante el día para generar un equilibrio térmico.
- ✓ Se recomienda la utilización de sustratos de origen inorgánico como piedras minerales que permitan la adsorción con mayor facilidad de contaminantes sólidos, microorganismos, materia orgánica, nutrientes entre otros, que no pueden ser absorbidos directamente por las plantas, gracias a su gran superficie interna y al tener un tiempo de vida largo, evitarán gastos innecesarios pues son de fácil obtención y su tiempo de uso es prolongado.
- ✓ Se considera como un parámetro de control importante a la oxigenación, debido a que permite la reproducción de microorganismos aerobios, fundamentales para la degradación de contaminantes presentes en el agua como sólidos suspendidos y materia orgánica, siendo recomendable el uso de difusores de oxígeno que se distribuyan de manera homogénea en el agua.
- ✓ Si se desea generar nuevos datos sobre la capacidad de absorción de contaminantes presentes en aguas de lagos eutróficos mediante la aplicación de macrófitas acuáticas, se recomienda usar especies vegetales desarrolladas en invernaderos bajo las condiciones de campo a las que

se va a someter la investigación, para posteriormente ser comparadas con especies vegetales propias de la zona del agua que se desee tratar.

- ✓ Se recomienda generar nuevas investigaciones en el campo de macrófitas acuáticas como plantas fitodepuradoras, no solamente para la remoción de nutrientes eutrofizantes como nitrógeno y fósforo , sino también para la remoción de otros contaminantes provenientes de aguas residuales de distinto origen, con la finalidad de presentar a los Filtros con Macrófitas Flotantes como un sistema no convencional orientado a ser una tecnología que permitirá mejorar la calidad de vida de las personas y la conservación de ecosistemas acuáticos.

BIBLIOGRAFÍA

AENA. *Tratamiento de Aguas Residuales mediante Macrófitas Emergentes* [En línea] (Tesis). Instituto Nacional de Tecnologías Educativas y de Formación del Profesorado, España. 2001. pp. 1-10 [Consulta: 30 Noviembre 2016]. Disponible en: <http://platea.pntic.mec.es>

ÁLVAREZ, J. & BÉCARES, E., "El papel de la vegetación en humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales" [En línea], 2006, (España), pp. 1-10. [Consulta: Julio 2017]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/237630103_EL_PAPEL_DE_LA_VEGETACION_EN_HUMEDALES_CONSTRUIDOS_PARA_EL_TRATAMIENTO_DE_AGUAS_RESIDUALES

ANDREO , M. *Demanda biológica de oxígeno* [blog].(Argentina).[Consulta: 10- 12- 2016]. Disponible en: <http://www.cricyt.edu.ar>

ANON. *Aguas residuales: coliformes totales.* [En línea]. 2008. [Consulta: 13 Julio 2017]. Disponible en: http://www.bvsde.paho.org/CDGDWQ/docs_microbiologicos/Indicadores%20PDF/bacterias%20coliformes.pdf].

CARRIÓN, L; & CUENCA, N. "Bioensayo con Macrófitas Flotantes para el Tratamiento de Lixiviados Procedentes del Relleno Sanitario de Pichacay" *Empresa Municipal de Aseo de Cuenca.* [En línea], 2010, (Ecuador). [Consulta: 30 11 2016]. Disponible en: <http://dspace.uazuay.edu.ec>

BRES, P. *Revista de Investigaciones Agropecuarias* [blog]. Argentina: 2011. [Consulta: 30-11-2016]. Disponible en: <http://ria.inta.gov.ar/?p=3023>.

CALLES , J. *El agua en el Ecuador.* [En línea] Ecuador: 2012. [Consulta: 06 -12- 2016].
Disponible en: <http://agua-ecuador.blogspot.com/2012/04/la-contaminacion-del-agua-en-ecuador.html>

CANNA RESEARCH. "Influencia de la temperatura ambiental en las plantas" CANNA Research. [En línea], 2015, (España), pp. 1-10. [Consulta: 13 Julio 2017]. Disponible en: http://www.canna.es/influencia_temperatura_ambiental_en_las_plantas

CATHALAC. *Centro del agua del trópico húmedo para américa latina y el caribe: manual de muestreo para aguas.* [En línea]. Panama, 2013. [Consulta: 09 Mayo 2017]. Disponible en: www.cathalac.org

CENTA. *Manual de Depuración de Aguas Residuales: Alianza por el Agua.* [En línea]. España, Zaragoza, 2008. [Consulta: 12 Diciembre 2016]. Disponible en : <http://alianzaporelagua.org>

CHANG, J. *Limnología: Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar.* [En línea]. Ecuador: J. Chang, 2009. [Consulta: 08 12 2016]. Disponible: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6194/9/Capitulo%203%20%20Factores%20que%20influyen%20en%20los%20lagos.pdf>

CURT, M; et al. *Manual de Fitodepuración: Filtros de macrófitas en flotación.* [En línea]. Madrid- España: Universidad Politecnica de Madrid, 2005 [Consulta: 12 Enero 2017].
Disponible en: <http://www.aguasresiduales.info>

DELGADILLO, O; et al. *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales: Infoandina.* [En línea]. Bolivia: Centro Agua de la UMSS, 2010. [Consulta: 03 Diciembre 2016].
Disponible en: <http://www.infoandina.org/>

ECUADOR. MINISTERIO DEL AMBIENTE. *Las descargas de aguas residuales son controladas por el Ministerio del Ambiente.* [En línea]. Ecuador: Minitserio del Ambiente del Ecuador, 2017. [Consulta: 08 Abril 2017]. Disponible en: <http://www.ambiente.gob.ec/las-descargas-de-aguas-residuales-son-controladas-por-el-ministerio-del-ambiente/>

FERNÁNDEZ, J. *Procedimiento de depuración de aguas residuales y vertidos contaminantes en base a cultivos de Macrófitas emergentes convertidas en flotantes.* [En línea]. Madrid: J. Fernandez, 1998. [Consulta: 28 Diciembre 2016]. Disponible en: <http://www.google.com/patents/WO1998045213A1?cl=es>

FUENTES, F; & MASSOL, A. *Parámetros físico-químicos, salinidad.* [En línea]. Puerto Rico, Universidad de Puerto Rico, 2002. [Consulta: 08 12 2016]. Disponible en: <file:///C:/Users/user/Documents/TESIS/p2-salinidad.pdf>

FUNHABIT. *Sistema de tratamiento de aguas residuales.* [En línea]. Ecuador, Fundación Ecuatoriana del Habitat, 2011. [Consulta: 03 12 2016]. Disponible en: <http://funhabit.org.ec/>

GALÁRRAGA, R. *Gestión de los recursos hídricos del Ecuador* [En línea]. Ecuador, Departamento de Ciencia de agua Escuela Politécnica Nacional, 2004. [Consulta: 04 12 2016]. Disponible: <http://tierra.rediris.es/hidrored/basededatos/docu1.html>

GALVEZ, N. *Biblioteca Virtail de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental* [En línea]. Estados Unidos, 2003. [Consulta: 30-11-2016]. Disponibles: <http://www.bvsde.paho.org>

GOBIERNO AUTÓNOMO DECENTRALIZADO DE COLTA. *Laguna de Colta* [En línea]. Ecuador: Gobierno Municipal de Colta, 2013. [Consulta: 03- 12- 2016]. Disponible en: <http://www.municipiodecolta.gob.ec>

GUARDIÁN, R; & COTO, J. "Uso de la Semilla de Tamarindo en la Coagulación-Floculación de Aguas Residuales". *Tecnología en Marcha* [En línea], 2010, (Costa Rica), pp. 1-9. [Consulta: 09 Julio 2017]. Disponible en: [file: https://Users/user/Documents/TESIS/turbidez.pdf](https://Users/user/Documents/TESIS/turbidez.pdf)

GUANOLUISA L; et al. "Diseño de un sistema de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario el inga mediante electrocoagulación y fitorremediación". [En línea], 2012, (Ecuador), pp. 1-8. [Consulta: 20 ABRIL 2017]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4625/1/CD-4255.pdf>

HERNÁNDEZ, Y. *Propiedades Soportivas del Humedal Ramsar Pátzcuaro* [En línea]. (tesis)(maestría). Instituto de Investigaciones Sobre Recursos Naturales , México, 2012. pp. 1-110. [Consulta: 09 Julio 2017]. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Everardo_Barba/publication/234004679_PROPIEDADES_SORTIVAS_DEL_HUMEDALRAMSAR-PATZCUARO/links/09e4150e1e2a47ed17000000.pdf

HYDROENVIROMENT. *Tipos de sustratos para hidroponía* [En línea]. Mexico: HydroEnviroment, s.f. [Consulta: 13 Diciembre 2016]. Disponible en: <http://hydroenv.com.mx>

INSTITUTO NACIONAL DE METEREOLÓGICO E HIDROLOGÍA .*Pronostico del Tiempo* [En línea]. Ecuador: Instituto Nacional de Meterología e Hidrología, 2017. [Consulta: 24 Enero 2017]. Disponible en: <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/pronostico-del-tiempo/>

INSTITUTO NACIONAL ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN. *Norma Técnica Ecuatoriana Voluntaria: Calidad del agua, muestreo, manejo y conservación de muestras.*Primera Versión.

INTERAPAS. *Sistema de tratamiento de aguas residuales* [En línea]. México: Interapas, 2012. [Consulta: 10 12 2016]. Disponible en: <http://www.interapas.mx>

KIERSCH, B; ET AL. "Las macrófitas de algunos lagos alto-andinos del Ecuador y su bajo potencial como bioindicadores de eutrofización". *Revista de Biología Tropical*. [En línea], 2003, (Ecuador) 52 (4), pp. 1-10. [Consulta: 05 Marzo 2017]. Número ISSN 0034-7744. Disponible en: <http://www.scielo.sa.cr>

LAHORA, C. 2004. "Los humedales artificiales como tratamiento terciario de bajo coste en la depuración de aguas residuales urbanas" *Gestión de Aguas del Levante Alvariense*. [En línea], 2004, (Almería), pp. 1-12. [Consulta: 05 Agosto 2017]. Disponible en: www.gem.es/MATERIALES/DOCUMENT/DOCUMENT/g01/

LICEO INTEGRAL CUENCA. *Lagos y Lagunas del Ecuador* [blog]. Ecuador: Liceo Integral Cuenca, 2011. [Consulta: 05 Marzo 2017]. Disponible en: <http://geografia-liceointegral.blogspot.com>

MANDUA. *La UNA lidera la investigación en biorremediación de aguas superficiales y de efluentes* [En línea]. Paraguay: Universidad Nacional de Asunción, 2015. [Consulta: 30 11 2016]. Disponible en: <http://mandua.com.py>

MÁRQUEZ. "Evaluación de la capacidad de remoción de contaminantes de un lago urbano mediante el uso de humedales flotantes". *Universidad Veracruzana*. [En línea], 2016, (México), pp. 20-40. [Consulta: 13 Diciembre 2016]. Disponible en: <http://cdigital.uv.mx>

MARTELO , J; & LARA, J. 2012." Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales, una revision del estado del arte". *Universidad de EAFIT*. [En línea], 2012, (Colombia) 8 (15), pp. 1-23. [Consulta: 12 Enero 2017]. Número ISSN 1794-9165. Disponible en: <http://publicaciones.eafit.edu.co/>

MAZZEO, N; et al. *Asociación Civil, Investigación y Desarrollo: Eutrofización*. [En línea]. 2005. [Consulta: 27 Febrero 2017]. Disponible: <http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/pasantias/eutrofizacion.pdf>

MENDOZA, M; ET AL. *Determinacion de acidez y alcalinidad n aguas naturales, residuales y residuales tratadas: universidad politécnica de puebla* [En línea]. México: 2014. [Consulta: 08- 12- 2016].Disponible en: <http://www.academia.edu>

PALOMINO, D; & CABRERA, C."Estimación del servicio ambiental de captura del CO2 en la flora de los humedales de Puerto Viejo". *Revista del instituto de investigaciones FIGMMG*. [En línea], 2008, Perú 10 (20), pp. 1-11. [Consulta: 26 Diciembre 2016].Número ISSN 1561-8097. Disponible en: <http://sisbib.unmsm.edu.pe>

PELT-ADESU. *Programa de capacitación sobre el manejo de la Totora* [En línea]. Perú: PELT.ADESU, 2001. [Consulta: 13 Diciembre 2016]. Disponible en: <http://www.alt-perubolivia.org>

POVEDA, R. *Evaluación de especies acuáticas flotantes para la fitorremediación de aguas residuales industrial y de uso agrícola previamente caracterizadas en el canton ambato* [En línea] (*tesis*). *Universidad Técnica de Ambato Facultad de Ciencias e Ingeniería en Alimentos. Ambato-Ecuador. 2014. pp.1-181*. [Consulta: 19 ABRIL 2017]. Disponible en: <file:///C:/Users/user/Documents/TESIS/fitorremediacion%20uso%20de%20macrofitas.pdf>
F

QUER, F. "Plantas Macrófitas". *Plantas y Flores*. [En línea], 2014, (España), pp. 1-5. [Consulta: 06 Marzo 2017]. Disponible en: [file:///C:/Users/user/Documents/TESIS/Plantas%20macr%C3%B3fitas%20 Floresyplantas.net.html](file:///C:/Users/user/Documents/TESIS/Plantas%20macr%C3%B3fitas%20Floresyplantas.net.html)

RODRIGUEZ, C. 2007. *Demanda Química de Oxígeno* [En línea] Colombia: IDEAM, 2007. [Consulta: 14 Enero 2017]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co>

ROMERO; et al. "Tratamiento de Aguas Residuales por un Sistema Piloto de Humedales". *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* [En línea], 2009, (México) 25 (3), pp. 1-10. [Consulta: 08 Julio 2017]. Número ISSN 0188-4999. Disponible en: http://scielo.unam.mx/scielo.php?pid=S0188-49992009000300004&script=sci_arttext

SANDOVAL, M; et al. 2005. "Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con planas acuáticas". [En línea], 2005, (Chile), pp. 1-9. [Último acceso: 03 12 2016]. Número ISSN 0717-196X. Available at: <http://www.ubiobio.cl>

SÁNCHEZ, I.2011. *Ciencias Naturales: El Ecosistema Lacustre* [blog]. Madrid: 2011. [Consulta: 08- 12- 2016]. Disponible en: <http://naturaleseso2.blogspot.com/2011/02/lago.html>

SCULTHORPE; & COOK. *Hidrófitas* [En línea]. Estados Unidos, 1990. [Consulta: 27 Abril 2017]. Disponible en: <http://hydrobio.fcien.edu.uy>

TORRES, J. 2008. Evaluación de impacto ambiental y plan de manejo ambiental del proyecto: "Malecón Escénico Laguna de Colta" cantón Colta, provincia de Chimborazo (tesis (maestría). [En línea] Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. (Riobamba-Ecuador). 2016. pp. 1-216. [Consulta: 18 Abril 2017]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/4818/1/20T00728.pdf>

UNESCO. *Agua para todos, Agua para la vida: Organización de las Naciones Unidas para la Educación la Ciencia y Cultura* [En línea]. Madrid- España: ONUDI, 2014. [Consulta: 06 12 2016]. Disponible en: <http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001295/129556s.pdf>

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR. *Estrategias hacia la Sustentabilidad.* [blog]. Ecuador: Universidad Central del Ecuador, 2010. [Consulta: 05- 12- 2016]. Disponible en: <http://estrategiasecuador.blogspot.com>

VALDÉZ, I; et al. 2005. "Tolerancia de Phragmites y Typha a la contaminación del agua" *Fundación Global Nature* [En línea], 2005, (España), pp. 1-7. [Consulta: 06- 12- 2016]. Disponible en: <https://www.fundacionglobalnature.org/macrophytes/documentacion/Conferencias%20y%20P%3sters/C-23%20Vald%e9s,I.pdf>

VALENCIA, A. 2013. *Diseño de un Sistema para Tratamiento de las Aguas Residuales de la Cabecera Parroquial de San Luis-Provincia de Chimborazo (tesis)* [En línea]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Ingeniería en Biotecnología Ambiental. Riobamaba-Ecuador, 2013. pp. 1-178. [Consulta: 10 Diciembre 2016]. Disponible: <http://dspace.esPOCH.edu.ec>

XAXENI. *Sustratos y sus Características: Cosechando Natural.* [En línea]. México: Grupo Xaxeni, s.f. [Consulta: 13 Diciembre 2016]. Disponible en: <https://www.cosechandonatural.com.mx>

ANEXOS

ANEXO A. Toma del Agua de la Laguna de Colta.



Realizado por: Diana Quintana, 2017.



Realizado por: Diana Quintana, 2017.

ANEXO B. Titora utilizada al inicio de la Investigación



Realizado por: Diana Quintana, 2017.



Realizado por: Diana Quintana, 2017.

ANEXO C. Construcción de los Biofiltros



Realizado por: Diana Quintana, 2017.



Realizado por: Diana Quintana, 2017.



Realizado por: Diana Quintana, 2017.



Realizado por: Diana Quintana, 2017.

ANEXO D. Unidades experimentales propuestas



Realizado por: Diana Quintana, 2017.



Realizado por: Diana Quintana, 2017.



Realizado por: Diana Quintana, 2017.

ANEXO E. Caracterización de las muestras de agua



Realizado por: Diana Quintana, 2017.



Realizado por: Diana Quintana, 2017.



Realizado por: Diana Quintana, 2017.



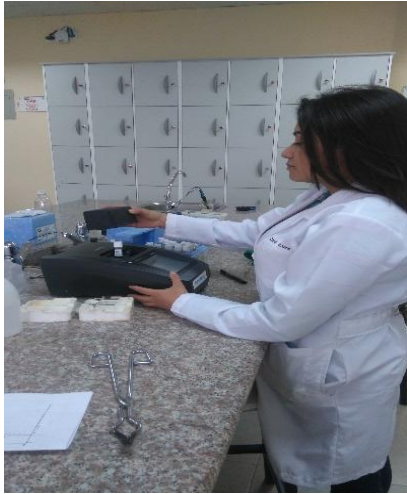
Realizado por: Diana Quintana, 2017.



Realizado por: Diana Quintana, 2017.



Realizado por: Diana Quintana, 2017.



Realizado por: Diana Quintana, 2017.



Realizado por: Diana Quintana, 2017.



Realizado por: Diana Quintana, 2017.



Realizado por: Diana Quintana, 2017.



Realizado por: Diana Quintana, 2017.



Realizado por: Diana Quintana, 2017.

ANEXO F. Color del agua posterior a los 30 días de tratamiento



Realizado por: Diana Quintana, 2017.

ANEXO G. Macrófitas posterior a los 30 días de tratamiento



Realizado por: Diana Quintana, 2017.



Realizado por: Diana Quintana, 2017.



Realizado por: Diana Quintana, 2017.

ANEXO H. Crecimiento de las raíces de la Totora

Biofiltro Utilizado	Tamaño inicial de la raíz (cm)	Tamaño final de la raíz (cm)
Biofiltro 1	5,00	15,00
Biofiltro 1	6,00	20,00
Biofiltro 1	5,00	15,00
Biofiltro 1	6,00	17,00
Biofiltro 1	7,00	17,00
Biofiltro 1	5,00	15,00
Biofiltro 1	6,00	16,00
Biofiltro 1	5,00	20,00
Biofiltro 2	5,00	22,00
Biofiltro 2	6,00	23,00
Biofiltro 2	7,00	24,00
Biofiltro 2	5,00	26,00
Biofiltro 2	5,00	25,00
Biofiltro 2	6,00	22,00
Biofiltro 2	6,00	25,00

Biofiltro 2	5,00	26,00
Biofiltro 3	5,00	25,00
Biofiltro 3	6,00	30,00
Biofiltro 3	7,00	35,00
Biofiltro 3	6,00	37,00
Biofiltro 3	6,00	38,00
Biofiltro 3	6,00	35,00
Biofiltro 3	6,00	34,00
Biofiltro 3	5,00	20,00

Realizado por: Diana Quintana, 2017