Diagnóstico y optimización del biofiltro con Cyperus papyrus para tratar la *Escherichia coli (E. coli)* presente en el lago de los flamencos del parque Jaime Duque del municipio de Tocancipá

María Camila León Nieves

Juan David Zuluaga Castro

Universidad de La Salle

Facultad de ingeniería

Programa de ingeniería ambiental y sanitaria

Bogotá

2020

Diagnóstico y optimización del biofiltro con cyperus papyrus para tratar la *Escherichia coli (E. coli)* presente en el lago de los flamencos del parque jaime duque del municipio de tocancipá

María Camila León Nieves

Juan David Zuluaga Castro

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Ambiental y Sanitario

Director

Rosalina González Forero

Ing. Químico

Ph.D. En ingeniería civil

Universidad de La Salle

Facultad de ingeniería

Programa de ingeniería ambiental y sanitaria

Bogotá

2020

Nota de Aceptación

_____
_____
_____

_____
Director: Rosalina González Forero

_____
Jurado: Oscar Gerena

_____
Jurado: Patricia Hernández

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Dios por permitirme llegar hasta este punto, a mi mamá, Olga Nieves, por su esfuerzo para sacarme adelante y permitirme cumplir mis sueños, a mi hermana por ser un soporte en mi vida, a la ingeniera Rosalina González por su asesoría y acompañamiento durante el desarrollo del proyecto, al ingeniero Darwin Ortega y al Parque Jaime Duque por darnos el espacio y permitirnos llevar a cabo el proyecto dentro de sus instalaciones.

Finalmente quiero agradecer a mi compañero y amigo Juan David por su apoyo, compañía y dedicación para la culminación de este proyecto.

María Camila León Nieves

Primero y más importante agradecer al Señor, por permitirme terminar este acontecimiento tan importante en mi vida y permitirme estar con las personas que me acompañaron y me brindaron un apoyo importante día tras día. A ti Liliana Castro por permitirme creer, llenarme de fe y levantarme en los momentos difíciles de mi carrera. Por otro lado, un apartado especial al resto de mi familia y amigos que me brindaron un apoyo especial, mil y mil gracias por siempre estar ahí.

Finalmente agradecer a mi compañera de grado María Camila que logró comprenderme y salir adelante en los momentos más críticos de este…nuestro proyecto de grado.

Juan David Zuluaga Castro

TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN 9
2. INTRODUCCIÓN 10
3. OBJETIVOS 12
   3.1 Objetivo general 12
   3.2 Objetivos específicos 12
4. MARCO DE REFERENCIA 13
4.1 Marco conceptual 13
4.2 Antecedentes 17
4.3. Marco Teórico 21
   4.3.1. Descripción municipio de Tocancipá 21
   4.3.2. Parque Jaime Duque 22
   4.3.3. Tipos de plantas y funciones fitorremediadoras 24
   4.3.4 Plantas fitorremediadoras 26
   4.3.5 Plantas hiperacumuladoras 28
   4.3.6 Escherichia coli (*E. coli*) 29
   4.3.7 Uso del agua con fines recreativos 29
   4.3.6. Humedales 29
4.4. Marco Legal 32
5. METODOLOGÍA 34
   5.1. FASE DIAGNÓSTICA 34
   5.1.1. ETAPA I 35
   5.1.2. ETAPA II 36
   5.1.3 ETAPA III 37
   5.2. FASE DE ANÁLISIS 38
   5.2.1 ETAPA IV 38
   5.2.2. ETAPA V 40

5.3 FASE DE OPTIMIZACIÓN **40**
5.3.1 ETAPA VI **41**
6. RESULTADOS **42**
7. ANÁLISIS **59**
Cálculo de la eficiencia del sistema actual de biofiltro **60**
Análisis de Escherichia coli (*E. coli*) y Coliformes Totales primera muestra **61**
Cálculo de la eficiencia de las plantas piloto **62**
8. CONCLUSIONES **66**
9. RECOMENDACIONES **67**
10. BIBLIOGRAFÍA **69**

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas y desventajas de la fitorremediación 27
Tabla 2. Tipos de humedales 31
Tabla 3. Marco legal 32
Tabla 4. Caracterización inicial in situ 43
Tabla 5. Caracterización fisicoquímica Punto 1 y Punto 3 43
Tabla 7. Evaluación de especies 48
Tabla 8. Caracterización inicial plantas piloto 51
Tabla 9. Caracterización in situ plantas piloto 51
Tabla 10. Caracterización fisicoquímica plantas piloto 51
Tabla 11. Comparación caracterizaciones fisicoquímicas y normativa. 52
Tabla 12. Resumen eficiencias plantas piloto. 56
Tabla 4. Caracterización inicial in situ 59
Tabla 5. Caracterización fisicoquímica Punto 1 y Punto 3 60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 . Diagrama climático Tocancipá 22
Figura 2. Lago los flamencos 23
Figura 3. Biofiltro de Lago de los flamencos 24

Figura 4. Biofiltro Cyperus papyrus 25
Figura 5. Lago de los flamencos.....35
Figura 6. Lago tren de troncos 35
Figura 7. Lago kayaks.....37
Figura 8. Medición con elemento graduado 37
Figura 9. Extracción de Buchón 39
Figura 10. Extracción de Enea.....39
Figura 11. Extracción de Junco 39
Figura 12. Monitoreo de plantas piloto 40
Figura 13. Adaptación de plantas piloto.....41
Figura 14. Plantas piloto a las 8 semanas. 41
Figura 15. Biofiltro Cyperus papyrus.....43
Figura 16. Medición parámetros in situ. 43
Figura 17. Entrada 2 lago de los kayaks.....46
Figura 18. Batimetría.....46
Figura 19. Aireador Force 7 57
Figura 20. Medición coliformes totales.....62
Figura 21. Medición de Escherichia coli (E. coli).....62

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Eficiencia del sistema 37
Ecuación 2. Eficiencia inicial DQO.....44
Ecuación 3. Eficiencia inicial DBO.....44
Ecuación 4. Eficiencia inicial SAAM.....44
Ecuación 5. Eficiencia inicial SST 44
Ecuación 6. Eficiencia inicial SS.....45
Ecuación 7. Eficiencia inicial P_2 total.....45
Ecuación 8. Eficiencia inicial Escherichia coli (E. coli).....45
Ecuación 9. Eficiencia inicial Coliformes Totales 45
Ecuación 10. Eficiencia Enea DQO 53
Ecuación 11. Eficiencia Enea DBO.....53
Ecuación 12. Eficiencia Enea SAAM.....53
Ecuación 13. Eficiencia Enea SST 53

Ecuación 14. Eficiencia Enea P_2 total 53
Ecuación 15. Eficiencia Enea Escherichia coli (E. coli) 54
Ecuación 16. Eficiencia Enea Coliformes Totales 54
Ecuación 17. Eficiencia Junco DQO 54
Ecuación 18. Eficiencia Junco DBO 54
Ecuación 19. Eficiencia Junco SAAM 54
Ecuación 20. Eficiencia Junco SST 54
Ecuación 21. Eficiencia Junco P_2 total 54
Ecuación 22. Eficiencia Junco Escherichia coli (*E. coli*) 55
Ecuación 23. Eficiencia Junco Coliformes Totales 55
Ecuación 24. Eficiencia Buchón DQO 55
Ecuación 25. Eficiencia Buchón DBO 55
Ecuación 26. Eficiencia Buchón SAAM 55
Ecuación 27. Eficiencia Buchón SST 55
Ecuación 28. Eficiencia Buchón P_2 total 55
Ecuación 29. Eficiencia Buchón Escherichia coli (*E. coli*) 56
Ecuación 30. Eficiencia Buchón Coliformes Totales 56

1. RESUMEN

El presente proyecto determina la capacidad de remoción de diferentes contaminantes existentes en el lago de los flamencos del Parque Jaime Duque, esto por medio del uso de plantas fitorremediadoras presentes en el humedal artificial ubicado en las instalaciones del ecoparque. A partir de una caracterización inicial, se lograron evidenciar contaminantes en el cuerpo hídrico, de esta manera se realizó una evaluación para la selección de las especies de plantas óptimas para el desarrollo del proyecto, plantas tales como Buchón (*Eichhornia crassipes*), Enea (*Typha latifolia*) y Junco (*Juncus effusus*), las cuales son eficientes en la remoción de los contaminantes estudiados. Al seleccionar las diferentes especies de plantas, fue posible simular el cuerpo de agua a escala de laboratorio por medio de la instalación de prototipos piloto, mediante las cuales se estudió la eficiencia de remoción de cada una de las especies vegetales durante ocho semanas.

Durante el seguimiento de las plantas piloto, se evidenció el comportamiento de cada uno de los contaminantes, donde los resultados obtenidos en la caracterización final permitieron establecer que la especie óptima para el tratamiento del cuerpo hídrico del lago Los Flamencos corresponde a la Enea (*Typha latifolia*), evidenciando la efectividad de las técnicas de fitorremediación, las cuales son una alternativa para el tratamiento de cuerpos hídricos. De igual forma, este proyecto buscó proporcionar al parque Jaime Duque una propuesta de optimización del biofiltro *Cyperus papyrus*, a partir de la evaluación de las distintas especies vegetales por medio del prototipo desarrollado. En esta propuesta se establecieron los cambios necesarios que se deben implementar en el sistema de biofiltro

actual y en el lago de los flamencos y kayaks del Parque Jaime Duque, con el fin de mejorar la calidad del cuerpo hídrico destinado a fines recreativos.

2. INTRODUCCIÓN

Los cuerpos de agua para uso recreativo son aguas superficiales, las cuales pueden clasificarse como artificiales y naturales; como consecuencia de alteraciones físicas producidas por la actividad humana, dichos cuerpos han experimentado un cambio sustancial en su naturaleza, por ende, en ocasiones son utilizadas para actividades con fines recreativos de contacto primario tales como la natación, baños termales, buceos y contacto secundario como los deportes náuticos y la pesca.

La naturaleza y las características de los cuerpos superficiales para uso recreativo los hace un medio muy confortable para la recreación de los seres humanos. En términos generales, las aguas recreativas (AR) se clasifican en aguas dulces (lagos, ríos, piscinas, entre otros) y aguas saladas (mares, playas y esteros). Además, los cuerpos de agua para uso recreativo se pueden dividir en aguas a temperatura ambiente y termales mayores a 30°C. (Grupo nación, 2010).

Por otra parte, el uso de los recursos hídricos para fines recreativos plantea problemas, teniendo en cuenta que es precisamente en los asentamientos de máxima concentración poblacional e industrial, donde surgen los mayores requerimientos de medios de esparcimiento por parte de una población en constante crecimiento. Investigadores han acordado que la calidad bacteriológica del agua para bañarse no necesita ser tan alta como para beberla, pero que debería ser mantenida razonablemente libre de bacterias patógenas. Al mismo tiempo, el agua para fines recreativos debería estar libre de contaminantes químicos que presenten toxicidad. (López Sardi., 2017).

De igual forma, realizar seguimientos detallados a los diferentes cuerpos de agua que entran en contacto directo con el ser humano es de vital importancia para evitar proliferación de enfermedades y patógenos potencialmente perjudiciales en la salud humana.

En el municipio de Tocancipá, Cundinamarca, el Parque Jaime Duque cuenta con gran variedad de cuerpos hídricos interconectados en los cuales se evidenció por medio de las caracterizaciones fisicoquímicas realizadas al cuerpo de agua, "Lago Los Flamencos", presencia de la bacteria *Escherichia coli (E. coli)* y materia orgánica.

En consecuencia, el presente proyecto tiene como finalidad buscar la remoción efectiva con diferentes plantas acuáticas de *Escherichia Coli* (*E. Coli*), bacteria que causa diarrea hemorrágica y en ocasiones puede provocar insuficiencia renal, incluso la muerte. Asimismo, el proyecto pretende buscar una propuesta de optimización del biofiltro de *Cyperus papyrus* acondicionado en la entrada del lago "Los Flamencos" por medio de análisis de remoción de tres tipos de plantas acuáticas, las cuales serán estudiadas en plantas piloto dentro de las instalaciones del parque Jaime Duque en la zona del invernadero, para así determinar que planta es óptima para la remoción de *Escherichia coli (E. coli)* y otros contaminantes presentes en el cuerpo hídrico, con el objetivo principal de cumplir con la normatividad ambiental vigente para los cuerpos de agua recreativos y así ofrecer estrategias de control adecuadas en la remoción de los contaminantes principalmente *Escherichia coli (E. coli),* en los distintos cuerpos de agua interconectados dentro del Parque Jaime Duque.

La tesis "Diagnóstico y optimización del biofiltro con *Cyperus papyrus* para tratar la *Escherichia coli (E. coli)* presente en el lago de los flamencos del parque Jaime Duque del municipio de Tocancipá" se compone de siete capítulos, los cuales se dividen en Marco de Referencia, Planteamiento del Problema, Objetivos, Metodología, Resultados y Análisis, finalizando con las Conclusiones y Recomendaciones.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Formular una propuesta de optimización del biofiltro de *Cyperus papyrus* para reducir la *Escherichia coli (E. coli)* presente en el lago de los flamencos en el parque Jaime Duque municipio de Tocancipá.

3.2 Objetivos específicos

- Realizar un diagnóstico del sistema biofiltro actual del lago de los flamencos y de sus fuentes de contaminación.
- Comparar las condiciones de diseño de los biofiltros de este tipo con las encontradas en el diagnóstico para establecer las diferentes opciones de optimización.
- Seleccionar entre las opciones de optimización las más adecuadas para el biofiltro en el lago de los flamencos según los intereses del Parque.

4. MARCO DE REFERENCIA

4.1 Marco conceptual

- **Agua superficial:** Se define como todo el conjunto de agua que se encuentra en la parte superficial de la hidrosfera terrestre. Esta se encuentra en distintas formaciones naturales denominados cuerpos de agua, tales como ríos, mares, océanos, ciénagas, humedales, lagos, canales, golfos, quebradas etc. (IDEAM, 2014)

- **Agua para uso recreativo:** Aquella en la que su utilización se produce en contacto primario, como en la natación, buceo y baños medicinales o contacto secundario, como en los deportes náuticos y la pesca. (MinAmbiente, 2010)

- **Análisis fisicoquímico de agua:** Son aquellos procedimientos de laboratorio que se efectúan a una muestra de agua para evaluar sus características físicas, químicas o ambas. (MinAmbiente, Resolución 2115 de 2007, 2007)

- **Análisis microbiológico del agua:** Son los procedimientos de laboratorio que se efectúan a una muestra de agua para consumo humano para evaluar la presencia o ausencia, tipo y cantidad de microorganismos. (MinAmbiente, Resolución 2115 de 2007, 2007)

- **Bioindicador:** Es un organismo o comunidad de estos que por medio de su presencia indican el nivel de preservación o el estado de un hábitat. Miden los efectos de la contaminación en el ambiente y en los seres vivos, ofreciendo información sobre los riesgos para otros organismos, el ecosistema y el ser humano. Pueden vivir bajo condiciones ambientales particulares. (Salinas, 2011)

- **Coliformes totales:** Bacterias gram negativas, no esporoformadoras, oxidasa negativa, con capacidad de crecimiento aeróbico y facultativamente anaeróbico en presencia de sales biliares que a temperatura de 35ºC causan fermentación de lactosa con producción de gas. (IDEAM, 2007)

- **Compuestos orgánicos, nutrientes y patógenos:** Este conjunto de compuestos comprende todas aquellas sustancias y microorganismos que debido a sus características propias pueden causas graves afectaciones si se tienen en las concentraciones declaradas como peligrosas. La presencia de concentraciones altas en compuestos orgánicos derivados de actividades de aprovechamiento o plantas beneficiadoras de animales como heces, sangre y restos de animales, generan directamente una alta Demanda Biológica de Oxigeno (DBO), fósforo y nitrógeno entre otros, además pueden producir eutrofización de los cuerpos de agua. En cuanto a agentes patógenos forman la principal fuente de trasmisión de enfermedades para los seres vivos que la consumen y tienen contacto con el agua que los contiene, algunos ejemplos de estos organismos son coliformes fecales y otras bacterias o virus (Sánchez Mercado, 2010-1).

- **Condiciones anóxicas:** Es cuando hay ausencia de oxígeno disuelto, sin embargo, se encuentran concentraciones de nitratos o sulfatos. (Ramos Ramos, 2017)

- **Contaminantes del agua superficial:** Debido a la ubicación del agua superficial en la hidrósfera, esta se ve contaminada frecuentemente por materia orgánica y por distintos

compuestos pertenecientes a la litosfera terrestre. Debe tenerse en cuenta también los miles de microorganismos que viven en el agua. (IDEAM, 2014).

- **Cuerpo de agua:** Sistema de origen natural o artificial localizado, sobre la superficie terrestre, conformado por elementos físicos-bióticos y masas o volúmenes de agua, contenidas o en movimiento. (MinAmbiente, 2010)

- **Ecosistema:** Conjunto de especies de un área determinada que interactúan entre ellas y con su ambiente abiótico, mediante procesos como la depredación, el parasitismo, la competencia y la simbiosis, y con su ambiente al desintegrarse y volver a ser parte del ciclo de energía y nutrientes. Las especies de un ecosistema, incluyendo bacterias, hongos, plantas y animales dependen unas de otras. (March Mifsut, 2009)

- ***Escherichia coli*:** Bacilo gram negativo, capaz de desarrollarse en presencia de sales biliares u otros agentes (tensoactivos) que tengan propiedades similares e inhibitorias de crecimiento y que son capaces de fermentar la lactosa a temperatura de 35ºC, con producción de ácido, gas y aldehído en un lapso de 18 a 48 horas. (IDEAM, 2007)

- **Eutrofización:** Enriquecimiento de nutrientes limitantes para el fitoplancton, principalmente fósforo y nitrógeno, promoviendo el crecimiento excesivo de algas y su acumulación, las cuales se descomponen por la intervención de organismos aerobios presentes en el sistema, agotando el oxígeno disponible, provocando la turbidez, condiciones anóxicas, muerte y descomposición de fauna y flora. (Lozano García, 2016)

- **Fitorremediación:** Es una ecotecnología basada en la capacidad de algunas plantas para tolerar, absorber, acumular y degradar compuestos contaminantes. Presenta un menor costo económico y es una tecnología social, estética y ambientalmente más aceptada. (Carlos Garbisu, 2008)

- **Hábitat:** Espacio que reúne las condiciones y características físicas y biológicas necesarias para la supervivencia y reproducción de una especie, es decir, para que una especie pueda perpetuar su presencia. (Delfin Alfonso, 2009)

- **Humedal:** Ecosistema de gran valor natural y cultural, constituido por un cuerpo de agua permanente o estacional. Es fundamental en el equilibrio ecológico y ambiental global, ya que son el hábitat de muchas especies de fauna y flora (JBN, 2019)

- **Humedal artificial:** Zonas construidas por el hombre en las que se reproducen, de manera controlada, los procesos físicos, químicos y biológicos de eliminación de contaminantes que ocurren normalmente en los humedales naturales. (Ramsar, 2014)

- **Macrófitas:** Estas plantas tienen ciertas características que las hacen ser buenas bioindicadoras debido a que son de fácil identificación, se encuentran presentes en hábitats acuáticos, responden rápidamente a variaciones del medio en donde se encuentra, son sensibles a la presencia de contaminantes y pueden acumular sustancias tóxicas en su interior (García Murillo, 2010).

  Las macrófitas tienen distintos modos de vida, algunas pueden crecer enraizadas a los sustratos como el lodo de las orillas de ríos y lagos, otras pueden flotar libremente sobre el agua y otras permanecen completamente sumergidas (Alvarado Valero, 2006). Las macrófitas pueden proveer de bienes y servicios, así como ayudan a la oxigenación de las aguas, fijación CO2 atmosférico, reciclaje y absorción de nutrientes (Martínez Linares, 2012). Además, regulan los efectos de la temperatura, luz y transporte de sedimentos, a partir de la construcción de protección contra la erosión de algunas corrientes de agua, son hábitat de varias especies del humedal e incrementan la heterogeneidad de los ecosistemas acuáticos (García Murillo et al, 2010).

- **Muestra puntual de agua:** Es la muestra de agua tomada en un lugar representativo y en un determinado momento. (IDEAM, 2014)

- **Muestra compuesta de agua:** Es la mezcla de varias muestras puntuales de una misma fuente, tomadas a intervalos programados y por periodos determinados, las cuales pueden tener volúmenes iguales o ser proporcionales al caudal durante el periodo de muestras. (MinAmbiente, 2003)

- **Recurso hídrico:** Aguas superficiales, subterráneas, meteóricas y marinas. (MinAmbiente, 2010)

- **Sistema de tratamiento acuático:** Es aquel que es aplicado en terrenos húmedos naturales o artificiales con el propósito de remover contaminantes. La mayoría parte de los sistemas lenticos y de poca profundidad están constituidos por marjales, pantanos, ciénagas. En donde allí, de forma natural las diferentes especies acuáticas (plantas tolerantes al agua como la espadaña, enea, junco, primavera, jacinto de agua, entre otras) crecen y se desarrollan. La vegetación acuática puede mejorar la calidad del agua y servir para estabilizar riberas de ríos y así mismo, tienen la función de proveer alimento, estructura, cobertura y albergue para diferentes especies de animales terrestre y acuáticas. (Rojas Romero, 2016).

4.2 Antecedentes

La búsqueda se enfocó en avances relacionados con la depuración de la bacteria *Escherichia coli (E. coli)* en los cuerpos de agua superficiales, tales como los humedales y aguas residuales con plantas acuáticas potencialmente remediadoras. La investigación corresponde a estudios nacionales e internacionales, como se cita a continuación.

- **BIOPROSPECCIÓN DE PLANTAS NATIVAS PARA SU USO EN PROCESOS DE BIORREMEDIACIÓN: CASO HELICONIA PSITTACORUM (HELICONIACEA).**

Se estudió el empleo de especies nativas como el caso de las Heliconias, cuyo uso es de ornamentación. Asimismo, se realizaron estudios con *Heliconia psittacorum* para evaluar el

potencial fitorremediador, se logró demostrar que la especie presenta características adecuadas a las condiciones de los humedales artificiales empleados para el tratamiento de aguas residuales a partir de su capacidad de remoción de DBO5, DQO y SST por encima del 70% de remoción, sin tener en cuenta sus condiciones fisiológicas. Los resultados que se presentaron en este estudio plantean la necesidad de ampliar la evaluación del desempeño de especies nativas frente su capacidad de tolerancia para el manejo de contaminantes. (Peña Salamanca , Madera Parra, Sanchez, & Medina Vasquez, Diciembre 2013).

- **PRUEBA PILOTO PARA LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LAS PLANTAS FITORREMEDIADORAS DEL HUMEDAL LAS TINGUAS, EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS**

En relación con la implementación de plantas acuáticas para la remoción de contaminantes en el agua, se llevó a cabo una prueba piloto para la evaluación de la eficiencia de las plantas fitorremediadoras del humedal "Las Tinguas" en el tratamiento de aguas residuales domésticas. (Hernandez Puerta & Galvis, 2016).

- **APLICACIÓN TECNOLÓGICAS DE LAS MACRÓFITAS A LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES CON LA AYUDA DE MICROORGANISMOS**

Se realizó una revisión documental para confirmar la viabilidad de usar plantas macrófitas en el tratamiento de aguas residuales, ya que al emplearlas presentan ventajas frente a los puntos de vista ambiental y económicos. Además, se destaca que son sistemas sencillos de construir, de operar, es decir, que para su funcionamiento no se requiere grandes insumos energéticos y de personal. Estas especies de plantas se pueden encontrar en todo el trópico y pueden resistir altas concentraciones de contaminantes. (Valero Alvarado, 2006)

- **EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL UTILIZANDO Stipa ichu PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS**

Se propusieron humedales artificiales de flujo subsuperficial con la planta Stipa ichu. Es así como, se evaluaron dieciocho humedales artificiales, seis de ellos sin plantas, doce con plantas y, de estos últimos, seis inoculados con hongo solubilizador de fósforo del género Penicillium (HSF). Durante un período de estudio de diez semanas se estableció la eficiencia de remoción de contaminantes de aguas residuales domésticas, se observó una remoción del fósforo total hasta concentraciones inferiores a 0.7 ppm. (Bedoya Perez, Ardila Arias, & Reyes Calle, 2014)

- **SISTEMA PILOTO DE HUMEDALES SUPERFICIALES EN CIUDAD DE MÉXICO**

En el Centro de investigación en biotecnología en México, se llevó a cabo la investigación titulada: *"Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica*", proyecto que principalmente evalúa el porcentaje de remoción de la carga orgánica de aguas residuales en un sistema de tratamiento por humedales artificiales de flujo horizontal y con dos especies vegetales. El sistema fue diseñado con tres módulos instalados de manera secuencial, en el primero se integraron organismos de la especie *Phragmites australis* (Cav.) Trin. Ex Steudel, en el segundo, organismos de la especie *Typha dominguensis* (Pers.) *Steudel* y en el tercero las dos especies. (Aguilar Romero, Colin Cruz, Sanchez Salina, & Ortiz Hernandez, 2009)

- **ENSAYO DE EFICIENCIA CON MACRÓFITAS CON PARA LA REMOSIÓN DE CARGA CONTAMINANTE EN AGUAS RESIDUALES DE LOS HATOS LECHEROS PARA UN SUBSECTOR DE LA LAGUNA DE FÚQUENE**

El proyecto de investigación se desarrolló con una caracterización de las aguas residuales de dos hatos lecheros ubicados en el municipio de Susa (Cundinamarca), subsector de la laguna de Fúquene. El hato lechero "Las delicias" se determinó como el vertimiento más crítico, usando sus residuos líquidos orgánicos para alimentar el sistema de humedales artificiales implementado en la segunda fase, en la cual se evaluaron en escala piloto los porcentajes de remoción de materia orgánica y nutriente tales como DBO_5, DQO, NO_3, PO_4 y Sólidos totales. Como base del ensayo, fueron empleadas las especies macrófitas *Eichhornia crassipes* (Buchón). *Limnobium laevigaturn* (Hoja flotante) y *Typha domingensis* (Enea),

extraídas de la laguna de Fúquene. Los resultados obtenidos a partir del análisis estadístico, empleando un diseño experimental de bloques simples al azar, indican que *Eichhornia crassipesreportó* mayor eficiencia en la remoción de carga orgánica (65%) para este tipo de residuos líquidos. (Rodríguez R., Ortiz Muñoz, Navarro Chaparro, Espinosa García, & Hernandez Montaña, 2006)

- **EVALUACIÓN DEL EFECTO CON TRATAMIENTO CON PLANTAS ACUÁTICAS (E. CRASSIPES, LEMNA SP. Y LAEVIGATUM) EN LA REMOSIÓN DE INDICADORES DE CONTAMINANTE FECAL EN AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS**

Se evaluó a escala de laboratorio el efecto de tres tratamientos con macrófitas acuáticas -*Eichhornia crassipes, Lemna sp.* y *Limnobium laevigatum*- y de un tratamiento con microalgas en la remoción de indicadores de contaminación fecal (Coliformes fecales, *Escherichia coli* y Colifagos somáticos) en aguas residuales domésticas. Se evaluó la posible relación entre los tratamientos, las variables fisicoquímicas asociadas a cada uno de ellos y la remoción de los indicadores fecales.

Los cuatro tratamientos con macrófitas removieron hasta 99% de Coliformes fecales y *Escherichia coli (E. coli)* en 6 días, y no hubo diferencias significativas entre las macrófitas entre sí ni con las microalgas ($p<0.05$) en cuanto a la eficiencia de remoción. La correlación entre amonio, fósforo y DQO con la remoción de indicadores bacterianos fue mayor del 50% en todos los tratamientos, pero la remoción no se pudo asociar a ningún tratamiento en particular. *E. crassipes* fue la especie más eficiente en la remoción de fagos (91%, a diferencia de 75% en los otros tratamientos) y esta remoción estuvo asociada a las mismas variables fisicoquímicas anteriores (60-90% de correlación).

Las macrófitas removieron en menor tiempo los indicadores bacterianos y *E. crassipes* fue la más eficiente en la remoción de fagos. (Valderrama, Campos, & Velandia, 2009).

- **LA LENTEJA DE AGUA (*Lemna minor L.*): UNA PLANTA ACUÁTICA PROMISORIA**

Se describen las principales características morfológicas y ecológicas de la planta acuática *Lemna minor L.,* al igual que la utilización que tiene como complemento alimenticio para animales domésticos y en labores de fitorremediación, por su capacidad de absorber nutrientes y contaminantes de los ecosistemas acuáticos. Asimismo, se discute su potencial como una especie adecuada para realizar ensayos de fitotoxicidad. (Arroyave García, 2004)

4.3. Marco Teórico

4.3.1. Descripción municipio de Tocancipá

Tocancipá es un municipio del departamento de Cundinamarca (Colombia), que se encuentra ubicado en la Provincia de Sabana Centro a 22 km de Bogotá, saliendo por la Autopista Norte. El municipio es reconocido por el Parque Jaime Duque y el Autódromo, donde se realizan diferentes competencias de automovilismo y motociclismo. (Alcaldía de Tocancipá, 2018).

- **Características climatológicas de Tocancipá**

El clima en Tocancipá se clasifica como cálido y templado. Hay precipitaciones durante todo el año, incluso el mes más seco. La temperatura media anual es de 14,1 ºC. La precipitación media es 857 mm. La menos cantidad de lluvia ocurre en enero, con un promedio de 30 mm, y la caída media ocurre en abril siendo el mes de mayores precipitaciones. Las temperaturas más altas en marzo alcanzando 14,7 ºC y el mes más frio es julio con una temperatura de 13,6 ºC. Las temperaturas medias varían durante el año en un 1,1 ºC. (Climate Data, s.f.). A continuación, se presenta el diagrama climático desarrollado por la página web "Climate Data" (Figura 1), donde se evidencia la variación del clima del municipio de Tocancipá a lo largo del año.

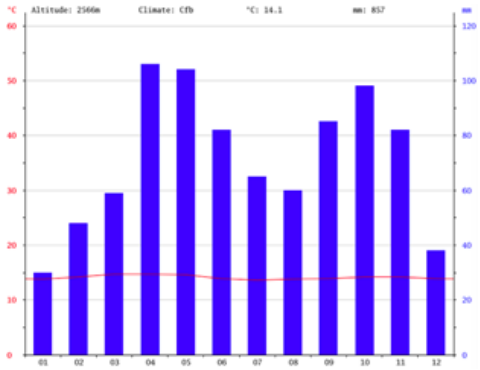

Figura 1 . Diagrama climático Tocancipá
Fuente: (Climate Data, s.f.)

4.3.2. Parque Jaime Duque

El parque Jaime Duque es un complejo cultural, ambiental y social regentado por dos instituciones sin ánimo de lucro, que brinda un espacio de cultura, desarrollo y recreación dedicado a la familia y estudiantes de Colombia. Abrió sus puertas el 27 de febrero de 1983, y es considerado como uno de los cinco mejores parques en Latinoamérica por el canal Discovery Travel & Living. Está ubicado en el municipio de Tocancipá, kilómetro 34 autopista norte. Es un lugar único, cuenta con más de 40 atracciones culturales, recreativas y de experiencias con la naturaleza rodeadas de lagos y hermosos jardines.

Cuenta con atracciones en agua superficial como lo son las bicicletas acuáticas y los kayaks, lagos que son abastecidos por agua lluvia, generando concentraciones de materia orgánica, esta información se encuentra reflejada en la pagina web oficial del Parque Jaime Duque.

- **Bioparque Wakatá**

El parque Jaime Duque esta avanzando en la construcción del bioparque Wakatá, este es una zona de reserva ecológica con una extensión de 700.000 $m^{2,}$ enfocada en mantener especies colombianas, en el cual los visitantes pueden tener un reencuentro con la naturaleza, aprendiendo sobre las diferentes especies y conocer así las diferentes problemáticas a las que se enfrenta actualmente, en el se encuentran 450 animales de 100 especies diferentes entre aves, reptiles y mamíferos.

Así mismo el parque Jaime Duque apoya programas de conservación de especies en peligro de extinción como el oso de anteojos, titi cabeza de algodón y el Cóndor de los Andes. A lo

largo de su extensión se puede observar cuerpos de agua superficial, brindando un atractivo visual a los visitantes y siendo hábitat de las distintas especies que se encuentran allí.

- **Ubicación del lugar de estudio**

El lago de los flamencos está ubicado en el Parque Jaime Duque del municipio de Tocancipá, en las coordenadas latitud y longitud 4º 57´1.32”N y 73º 57´48.04”O (Figura 2). Este cuerpo de agua se conecta con el lago de tren de troncos y el lago de los kayaks, cuerpos hídricos en donde se realizaron las investigaciones objeto de estudio, con el fin de determinar los contaminantes presentes que afectan la calidad del agua.

Este cuerpo de agua lentico artificial, se encuentran especies como flamencos, ibis y chavarríes. Este lago conecta el lago de tren de troncos con el lago de los kayaks, pasando antes por un biofiltro de *Cyperus papyrus,* hecho apreciable en la figura 3, con el cual se pretende retener la materia orgánica presente en el cuerpo hídrico. De igual forma, el lago los flamencos es de gran importancia para el desarrollo del presente proyecto, pues es allí donde se llevaron a cabo los distintos estudios, con el fin de mejorar la calidad del cuerpo hídrico; cabe resaltar que los diferentes cuerpos de agua superficial ubicados dentro del parque Jaime Duque se abastecen únicamente por agua lluvia o escorrentía.

Asimismo, debido a la presencia de las distintas especies de animales que se encuentran a lo largo del recorrido del cuerpo de agua, se generan altas concentración de materia orgánica, *Escherichia coli (E. coli),* entre otros contaminantes.

Figura 2. Lago los flamencos
Fuente: Autores,2019.

Figura 3. Biofiltro de Lago de los flamencos
Fuente: Autores,2018.

4.3.3. Tipos de plantas y funciones fitorremediadoras

La eficiencia de remoción de contaminantes durante el proceso de fitorremediación dependerá principalmente de la especie de planta utilizada, el estado de crecimiento de las plantas, su estacionalidad y el tipo de metal a remover. Por lo anterior, para lograr buenos resultados, las plantas a utilizar deben tener las siguientes características:

- Ser tolerantes a altas concentraciones de *Escherichia coli (E. coli)* y SST.
- Ser acumuladoras de *Escherichia coli (E. coli).*
- Tener una rápida tasa de crecimiento y alta productividad.
- Ser especies locales, representativas de la comunidad natural.
- Ser fácilmente cosechables (López Núñez R. A., 2004)

En la mayoría de los casos para la remoción de contaminantes en los cuerpos de agua es muy común utilizar técnicas de fitorremediación, ya que llevar a cabo la ejecución de estas técnicas reduce costos y requiere de poco espacio para su desarrollo; de igual forma, esta práctica tiene como principal objetivo aprovechar la funcionalidad de las plantas acuáticas en términos de sedimentación, filtración, adsorción, volatilización entre otros para limpiar o restaurar ambientes como agua suelo o incluso aire. El biofiltro ubicado en el parque Jaime Duque (Figura 4), tiene como objetivo depurar concentraciones de *Escherichia coli (E. coli)* y SST por medio de un sistema de tratamiento de plantas acuáticas que se caracterizan por ser estanques semiconstruidos, donde se mantienen plantas flotantes en un espacio o área

determinada. Es importante conocer los criterios y las funcionalidades adecuadas para identificar el tipo de planta adecuada en el sistema hídrico, así como las distintas limitaciones que se deben tener en cuenta para un apropiado desarrollo de la planta, como lo son las condiciones climáticas, los sustratos del suelo, acondicionamiento del área, entre otros. (Lafuente, 2008)

Figura 4. Biofiltro Cyperus papyrus
Fuente: Autores,2018.

En general, los mecanismos involucrados en la remoción de contaminantes de aguas residuales son de tres tipos: físicos (sedimentación, filtración, adsorción, volatilización), químicos (precipitación, hidrólisis, reacciones de óxido-reducción o fotoquímicas) y biológicos (resultado del metabolismo microbiano, del metabolismo de plantas, de procesos de bioadsorción). Uno de los principales procesos que ocurren en el tratamiento de aguas residuales, es la degradación de la materia orgánica que llevan a cabo los microorganismos que viven sobre y alrededor de las raíces de las plantas. Los productos de degradación son absorbidos por las plantas junto con nitrógeno, fósforo y otros minerales, a su vez, los microorganismos usan como fuente alimenticia parte de los metabolitos desechados por las plantas a través de su raíz. Además, las plantas tienen la capacidad de transferir oxígeno desde sus partes superiores hasta su raíz, produciendo una zona aeróbica; las raíces de las plantas sirven como sustrato para el crecimiento bacteriano, medio de filtración y adsorción de sólidos y acumulación de contaminantes, así como los tallos u hojas emergentes atenúan la luz del sol evitando el crecimiento de algas suspendidas, reducen los efectos del viento sobre el agua y reducen la transferencia de gases y calor entre la atmósfera y el agua. (López Núñez R. A., 2004)

4.3.4 Plantas fitorremediadoras

Existen plantas con capacidad de limpiar ambientes contaminados, las cuales pueden acumular o transformar sustancias tóxicas que aparecen en suelo o agua ya sea por accidente, por actividad del hombre o por cuestiones geológicas. Las plantas ayudan a impedir que, por acción del viento, la lluvia y aguas subterráneas, la contaminación de la zona sea propagada a diferentes lugares. De igual forma, toman el contaminante por las raíces, dependiendo del medio en el que se encuentre y de la sustancia contaminante, y podrán almacenarlo en las raíces, tallos y hojas o transformarlo en unas sustancias menos dañinas para el medio, así como en algunas ocasiones puede liberar el contaminante al aire. La técnica de implementación de estas plantas se conoce como, fitorremediación (ArgenBio, 2007).

La fitorremediación aprovecha la capacidad de ciertas plantas para absorber, acumular, metabolizar, volatilizar o estabilizar contaminantes presentes en el suelo, aire, agua o sedimentos como metales pesados, metales radioactivos, compuestos orgánicos y compuestos derivados del petróleo. (Delgadillo López, González Ramírez, Prieto García, Villagómez Ibarra, & Acevedo Sandoval, 2011)

La fitoremediación está limitada por las condiciones que impiden un crecimiento normal de las plantas como son: el clima (climas extremos), la topografía (escarpes y grandes pendientes), los procesos de erosión, y concentraciones de contaminante que exceda del nivel de tolerancia de las plantas, así como limita la utilización de esta técnica el tiempo que haya para la descontaminación (la fitorremediación es lenta), y la distancia del contaminante a zonas sensibles: ríos, lagos, lagunas y aguas subterráneas. (Lopez Lafuente, 2008)

A continuación, la Tabla 1 muestra las principales ventajas que ofrece la fitorremediación; en comparación con otras tecnologías convencionales, la fitorremediación acuática tiene la ventaja de que se pueden remover diferentes tipos de metales que se hallen con bajas concentraciones en grandes volúmenes de agua, de igual forma, su rápida proliferación puede dificultar la navegación y amenazar el balance de la biota en los ecosistemas acuáticos. (López Núñez R. A., 2004)

Tabla 1. Ventajas y desventajas de la fitorremediación

Ventajas	Desventajas
• Es una tecnología sustentable. • es eficiente para tratar diversos tipos de contaminantes in situ. • Es aplicable a ambientes con concentraciones bajas a moderadas de contaminantes. • Es de bajo costo, no requiere personal especializado para su manejo ni consumo de energía. • Es poco perjudicial para el ambiente. • No produce contaminantes secundarios y por lo mismo no hay necesidad de lugares de desecho. • Tiene una alta probabilidad de ser aceptada por el público, ya que tiene una buena inclusión visual. • Evita la excavación y el tráfico pesado. • Tiene una versatilidad potencial para tratar una gama diversa de materiales peligrosos. • Se puede reciclar recursos tales como agua, biomasa y metales.	• Es un proceso relativamente lento cuando las especies son de vida larga, como árboles y arbustos. • Es dependiente de las estaciones. • El crecimiento de la vegetación puede estar limitados por extremos de la toxicidad ambiental. • Los contaminantes acumulados en las hojas pueden ser liberados nuevamente al ambiente durante otoño (especies perennes). • Los contaminantes pueden acumularse en maderas para la combustión. • No todas las plantas son tolerantes o acumuladoras. • La solubilidad de algunos contaminantes puede incrementarse, resultando en un mayor daño ambiental o migración de contaminantes. • Se requieren áreas relativamente grandes • Puede favorecer el desarrollo de mosquitos en sistemas acuáticos.

Fuente: Adaptado de (López Núñez R. A., 2004)

Existen 4 tipos de fitorremediación acuática:

- Humedales construidos: Se definen como un complejo de sustratos saturaos, vegetación emergente y subemergente, animales y agua que simula humedales naturales, diseñado y hecho por el hombre para su beneficio.
- Sistema de tratamiento con plantas acuáticas flotantes: pueden ser estanques semiconstruidos o naturales, donde se mantienen plantas flotantes para tratar aguas residuales.
- Sistema de tratamiento integral: Es una combinación de los dos sistemas anteriores.
- Sistema de rizofiltración: Se basa en hacer crecer en cultivos hidropónicos, raíces de plantas terrestres con alta tasa de crecimiento y área superficial para absorber, concentrar y precipitar metales pesados. Estos sistemas pueden remover eficientemente fosfatos, nitratos, fenoles, pesticidas, elementos radioactivos, fluoruros, bacterias y virus. (López Núñez R. A., 2004)

4.3.5 Plantas hiperacumuladoras

Las plantas hiperacumuladoras tienen la capacidad de acumular y transformar una variedad de compuestos tóxicos, en especial metales (Mirza et al., 2011, Peña-Salamanca et al., 2004). Su capacidad fitorremediadora se mide a partir de sus tasas de crecimiento y de acumulación, para obtener un valor de extracción (en gramos o kilogramos de metal por hectárea y año) (Peña-Salamanca, Madera-Parra, Sánchez , & Medina-Vásquez, 2013), además deben presentar un alto rango de tolerancia a condiciones tóxicas. Este tipo de plantas se definen como aquellas que contienen más de 0,1% de su peso seco de Co (Cobalto), Cu (Cobre), Cr (Cromo), Pb (Plomo) o Ni (Níquel), o 1% de su peso seco de Mn (Manganeso) o Zn (Zinc), no obstante, existen especies naturales o mejoradas que pueden acumular concentraciones. de 2-4% de su peso seco (Broort3|ks, 1998).

Por otro lado, las plantas macrófitas tienen ciertas características que las hacen ser buenas bioindicadoras debido a que son de fácil identificación, se encuentran presentes en hábitats acuáticos, responden rápidamente a variaciones del medio en donde se encuentra, son sensibles a la presencia de contaminantes y pueden acumular sustancias tóxicas en su interior (Garcia Murillo et al, 2010).

Las macrófitas tienen distintos modos de vida: algunas pueden crecer enraizadas a los sustratos como el lodo de las orillas de ríos y lagos, otras pueden flotar libremente sobre el agua y otras permanecen completamente sumergidas (Alvarado Valero, 2006). Asimismo, ayudan a la oxigenación de las aguas, fijación CO2 atmosférico, reciclaje y absorción de nutrientes (Martínez Linares, 2012). Además, regulan los efectos de la temperatura, luz y transporte de sedimentos, a partir de la construcción de protección contra la erosión de algunas corrientes de agua, y son hábitat de varias especies del humedal e incrementan la heterogeneidad de los ecosistemas acuáticos (García Murillo et al, 2010).

4.3.6 Escherichia coli (E. coli).

Son microorganismos excretados en heces de animales diseminados en el ambiente, pudiéndose encontrar en agua usualmente contaminada. Su elevada capacidad de supervivencia en el medio externo hace que puedan vivir en condiciones adecuadas por largos periodos de tiempo en el estiércol y heces fecales (Salmonella entérica), por años en el suelo, por meses en el agua y por más de 20 semanas en los sedimentos (barro, lodo, fango) de canales y estanques, así como tienen la facultad de infectar animales que pueden permanecer como portadores durante largo tiempo. De igual forma, los huevos y ovoproductos, la carne de pollo y pavo, la carne de vaca, la carne de cerdo, la leche y los helados, son los alimentos que con mayor frecuencia se ven asociados en brotes de salmonelosis humana. (Bustos Velazco & Segura M., 2005)

4.3.7 Uso del agua con fines recreativos

Se entiende por uso de agua para fines recreativos su utilización, cuando se produce contacto primario (natación, buceo y baños medicinales) y contacto secundario (deportes náuticos y la pesca). En estos cuerpos hídricos no se admiten vertimientos y se debe tener en cuenta la normativa vigente, con el fin de garantizar el cumplimiento de la calidad de este recurso. (MinAmbiente, 2010)

4.3.6. Humedales

Los humedales son ecosistemas de gran valor natural y cultural, los cuales están constituidos por un cuerpo de agua permanente o estacional (con una profundidad no mayor a 6 metros en tiempo seco), cuentan con una franja a su alrededor que puede cubrirse por inundaciones periódicas conocida como ronda hidráulica y una franja de terreno no inundable, llamada zona de manejo y preservación ambiental. Son fundamentales en el equilibrio ecológico y ambiental global, ya que son hábitat de muchas especies de fauna y flora, y elementos vitales en la estructura ecosistémica, sociocultural y económica de las naciones y del mundo. También se desarrollan procesos físicos y químicos capaces de depurar el agua ya que eliminan grandes cantidades de materia orgánica, sólidos en suspensión, nitrógeno, fósforo e incluso productos tóxicos. (JBN, 2019)

La importancia de los humedales consiste en siete puntos específicos:

- Contribuyen al mejoramiento de la calidad del agua y el aíre de la ciudad
- Regulan los ciclos hidrológicos.
- Permiten el intercambio de aguas superficiales y subterráneas.
- Mitigan las inundaciones y los efectos del cambio climático.
- Son el hábitat de una gran diversidad de especies endémicas, resistentes y migratorias.
- Tienen un alto valor social y cultural, llegando incluso a ser considerados como zonas de interés arqueológico.
- Su belleza paisajística y riqueza socioambiental los convierte en áreas de esparcimiento, aprendizaje y desarrollo científico. (JBN, 2019)

Los humedales son ecosistemas de transición que comprenden frecuentemente áreas inundadas, saturadas de aguas superficiales o subterráneas, las cuales han presentado un gran impacto antrópico en las últimas décadas; estos ecosistemas han recibido una gran atención ya que se han constituido en amortiguador hidrológico, químico y en un hábitat muy importante para la biodiversidad. Este tipo de ambientes acuáticos son típicamente complejos y envuelven muchos fenómenos físicos, químicos y biológicos en una intrincada dinámica espacial y temporal en la que las comunidades de macrófitas acuáticas juegan un papel crucial por proveer hábitats complejos para protección y reproducción de la biota. (Rivera Usme, 2011)

- Sustrato o material granular: soporte de la vegetación y fijación de la biopelícula bacteriana para la eliminación de contaminantes presentes.
- Vegetación: macrófitas emergentes que contribuyen a la oxigenación del sustrato, eliminación de nutrientes y desarrollo de la biopelícula.
- Influente: circula a través del sustrato y la vegetación (Ramsar, 2014)

Igualmente, los mecanismos por los que un humedal es capaz de tratar un cuerpo hídrico se basan en los siguientes principios:

- La eliminación de los sólidos en suspensión por medio de fenómenos de filtración que tienen lugar entre el sustrato y las raíces.
- Eliminación de materia orgánica por la acción de microorganismos, estos pueden ser aerobios o anaerobios.
- Eliminación de nitrógeno por procesos de nitrificación o desnitrificación.
- Eliminación de fósforo debido a los fenómenos de adsorción sobre los componentes del sustrato.
- Eliminación de patógenos mediante la adsorción sobre partículas del sustrato, la toxicidad producida por las raíces de las plantas. (Carolina Miguel, 2012).

Además, es necesario conocer el tipo de humedal, debido a que el comportamiento del agua cambia y el tratamiento a implementar es diferente para cada caso. Tal como se observa en la tabla No. 2, existen diversos tipos de humedales con distintas características, los humedales se clasifican, en primer lugar, según el tipo de agua de la que están compuestos, existiendo así humedales de agua dulce y humedales salados o salubres: a su vez, los humedales pueden ser naturales o bien artificiales.

Tabla 2. Tipos de humedales

Humedales artificiales de flujo libre o superficial	**Humedal artificial de flujo subsuperficial**	**Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal**	**Humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical**

El agua circula por encima del sustrato continuamente. Se favorecen las condiciones aerobias al estar el agua expuesta a la atmósfera. se emplean para tratar efluentes procedentes de tratamientos secundarios y para crear y restaurar ecosistemas acuáticos.	El agua circula a través del sustrato. Tratamiento de aguas residuales generadas en núcleos de población de menos de 2000 habitantes.	El agua circula horizontalmente a través del sustrato de manera continua. Se favorecen las condiciones anaerobias al mantenerse el nivel del agua por debajo del sustrato. Suceden procesos de desnitrificación.	El agua circula verticalmente a través del sustrato de manera intermitente. Se debe contar con sistemas de aireación, favoreciendo así las condiciones aerobias. Se desarrollan procesos de nitrificación.

Fuente: (Ramsar, 2014)

4.4. Marco Legal

Tabla 3. Marco legal.

NORMA	TITULO DE LA NORMA	APLICABILIDAD	INCIDENCIA DENTRO DEL PROYECTO
Decreto 3930 de 2010	Por el cual se reglamenta parcialmente el título I de la Ley 9 de 1979, así como el capítulo II del título VI -Parte III- Libro II del Decreto Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos	Establece los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para fines recreativos, recalcando que se debe tener en cuenta los valores establecidos en el decreto 1594 de 1984.	Este decreto nos permitirá identificar cuáles son los parámetros para medir para determinar la calidad del cuerpo de agua, el cual esta destinado para fines recreativos.

	líquidos y se dictan otras disposiciones.		
Decreto 1594 de 1984 Art. 43	Por el cual se reglamenta parcialmente el título I de la Ley 9 de 1979, así como el capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II y el título III de la Parte III -Libro I- del Decreto Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos.	Se establecen los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para fines recreativos mediante contacto.	Por medio de este decreto se conocerán los valores máximos para cada uno de los parámetros a medir en la identificación de la calidad del cuerpo hídrico.

Fuente. Autores, 2019

Es importante resaltar que a pesar a estar derogado el Decreto 1594 de 1984 y ser el decreto 3930 de 2010 el que lo sustituye, en este se estipula que se debe tener en cuenta el artículo 43 el cual hace referencia a los valores máximos permitidos para cuerpos hídricos para uso recreativo.

5. METODOLOGÍA

El desarrollo del proyecto se llevó a cabo por medio de fases evaluativas, las cuales a su vez se dividieron en diferentes etapas que permitieron cumplir con los objetivos planteados y el alcance del proyecto. De igual forma, se realizaron diferentes actividades, tales como el diagnóstico del sistema de biofiltro actual para el tratamiento del lago de los flamencos, identificación de contaminantes presentes en el cuerpo hídrico, identificación de falencias en la adecuación del biofiltro, eficiencia de remoción y propuesta de optimización del biofiltro, para lo cual fue necesario llevar a cabo muestreos, caracterizaciones fisicoquímicas, una batimetría y elaboración de planos de los cuerpos hídricos.

5.1. FASE DIAGNÓSTICA

En esta fase se buscó realizar el diagnóstico del sistema del biofiltro que se encontraba instalado en el lago de los flamencos (Figura 5) en cuanto a su eficiencia en remoción de *Escherichia coli (E. coli)* y Sólidos Suspendidos. Para ello, se hizo una caracterización inicial, que además permitió conocer los contaminantes presentes en el cuerpo de agua, según los parámetros establecidos para agua de uso recreativo en el decreto 3930 de 2010.

Figura 5. Lago de los flamencos
Fuente: Autore,2018.

5.1.1. ETAPA I

En esta etapa se realizó un análisis en el cuerpo de agua seleccionado, lo cual indicó los parámetros de turbidez, oxígeno disuelto, pH y conductividad en el cuerpo hídrico. Para lograr dicho resultado, se realizaron tres (3) análisis diferentes en cada punto del sector de la figura No. 6, los cuales estuvieron ubicados de la siguiente manera:

- **Punto 1:** Lago de tren de troncos, afluente del lago de los flamencos. (Figura 6)
- **Punto 2**: Lago de los flamencos, antes de pasar por el biofiltro actual de *Cyperus papyrus*.
- **Punto 3**: Lago de kayaks, después de pasar por el biofiltro de *Cyperus papyrus*.

Figura 6. Lago tren de troncos
Fuente: Autores,2019.

Además, en los diferentes puntos seleccionados se establecieron los siguientes parámetros, con el propósito de medirlos en el Centro Tecnológico de Ambiente y Sostenibilidad de la

Universidad de La Salle (CTAS), dichos parámetros están establecidos en el decreto 3930 de 2010 para cuerpos de agua de uso recreativo, y fueron monitoreados durante el desarrollo del proyecto:

- Coliformes totales
- Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)
- *Escherichia coli (E. coli)*
- DBO_5
- Fósforo total
- Nitrógeno total
- Sólidos suspendidos totales
- Sólidos sedimentables

El muestreo permitió determinar la concentración de contaminantes presentes a la entrada del biofiltro de *Cyperus papyrus* y la concentración de contaminantes en el Lago de los Kayaks. Una vez obtenidos los resultados, se determinó la base para el análisis de remoción y resiliencia de las tres (3) plantas piloto ideales en la depuración de contaminantes en el cuerpo de agua para uso recreativo y de *Escherichia coli (E. coli).* Asimismo, a partir de los resultados de las caracterizaciones fisicoquímicas realizadas, se calculó la eficiencia del sistema actual de biofiltro.

5.1.2. ETAPA II

Se identificaron las falencias tanto físicas como químicas del biofiltro ubicado en el lago los flamencos *Cyperus papyrus*, esto por medio de la caracterización inicial realizada en el lugar, estableciendo así la eficiencia de remoción del sistema actual para cada uno de los contaminantes estudiados. El cálculo de la eficiencia se llevó a cabo por medio de la ecuación No. 1.

$$\% e = \frac{valor\ inicial - valor\ final}{valor\ inicial} x\ 100$$

Ecuación 1. Eficiencia del sistema
Fuente: (Rojas, Tratamiento de aguas residuales, 2016)

También se realizó una batimetría tanto del lago de los kayaks (Figura 7), como el lago de los flamencos, donde fue necesario emplear un elemento graduado que ayudó a conocer las profundidades de los cuerpos hídricos, los cuales se encuentran conectados.
La batimetría consistió en la introducción del elemento graduado en tramos a lo largo de todo el lago (Figura 8).

Figura 7. Lago kayaks.
Fuente: Autores,2019

Figura 8. Medición con elemento graduado
Fuente: Autores, 2019.

5.1.3 ETAPA III

Se realizó una evaluación teórica de las posibles especies de plantas acuáticas óptimas para el tratamiento de la remoción de los contaminantes encontrados en la caracterización inicial

realizada en la Etapa I. En esta etapa se tuvieron en cuenta aquellas especies que pudieran adaptarse a las condiciones climáticas de la zona, así como que fueran eficaces en la remoción de los contaminantes presentes en el cuerpo de agua

5.2. FASE DE ANÁLISIS

Partiendo del diagnóstico realizado al biofiltro Papyrus del Parque Jaime Duque, se determinó la importancia de evaluar posibles especies vegetales teórica y experimentalmente, esta última evaluación por medio de plantas pilos.

Las plantas piloto, consistieron en realizar un sistema ecológico integral del humedal, por medio de una simulación del lago de los flamencos del Parque Jaime Duque a escala de laboratorio, evaluando la eficiencia de tres especies de plantas fitorremediadoras constituidas como una alternativa de tratamiento. Este montaje se llevó a cabo en tres (3) peceras de vidrio templado con dimensiones de 50x40x40 cm, las cuales tenía cada una un volumen de 26 litros de agua del lago Los flamencos.

Una vez extraídas las especies, se procedió a ubicar los prototipos en el vivero del parque Jaime Duque, donde se estableció un período de tiempo de remoción de ocho (8) semanas.

5.2.1 ETAPA IV

En esta etapa se seleccionaron tres especies de plantas, las más eficientes encontradas dentro de la evaluación teórica para reducir las concentraciones de los contaminantes presentes en el cuerpo hídrico, además se tuvo en cuenta en el desarrollo del proyecto, sus características generales y capacidad fitorremediadora. Las especies de plantas fueron extraídas del humedal artificial del ecoparque ubicado dentro de las instalaciones del Parque Jaime Duque, garantizando así, la fácil adaptabilidad de las plantas ante las variaciones climáticas de la zona. (Ver Figuras 9, 10, 11).

Figura 9. Extracción de Buchón
Fuente: Autores,2019.

Figura 10. Extracción de Enea
Fuente: Autores,2019.

Figura 11. Extracción de Junco
Fuente: Autores,2019.

5.2.2. ETAPA V

Se llevó a cabo un muestreo puntual de agua del lago de los Flamencos con el fin de realizar la medición de los parámetros establecidos en la Etapa 1 y así establecer la concentración inicial de contaminantes presentes en el agua antes de ser implementadas las plantas piloto. Esta caracterización fue establecida como la inicial para las pruebas piloto y se llevó a cabo en el Centro Tecnológico de Ambiente y Sostenibilidad de la Universidad de La Salle (CTAS).

5.3 FASE DE OPTIMIZACIÓN

Se realizó el seguimiento de las plantas piloto (Figura 12), el cual se basó en un tiempo de ocho (8) semanas, tiempo en el cual semanalmente se observó el comportamiento de las plantas, evidenciándose cambios en las características del agua estudiada (Figura 13 y 14). Se realizó una caracterización fisicoquímica de cada una de las plantas piloto al culminar el tiempo de estudio (8 semanas), para conocer la concentración final de contaminantes.

A partir de los resultados de la caracterización fisicoquímica final se estableció la especie óptima para el tratamiento del lago de los flamencos, para así poder realizar la propuesta de optimización del biofiltro.

Figura 12. Monitoreo de plantas piloto
Fuente: Autores,2019.

Figura 13. Adaptación de plantas piloto
Fuente: Autores,2019.

Figura 14. Plantas piloto a las 8 semanas.
Fuente: Autores,2019.

5.3.1 ETAPA VI

Finalmente se llevó a cabo la realización de la propuesta de optimización del biofiltro al Parque Jaime Duque, dando a conocer los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto, teniendo en cuenta la especie de planta con la mayor eficiencia de remoción de los contaminantes estudiados en la planta piloto. En esta propuesta se presentaron algunas recomendaciones, con el fin de que a futuro puedan ser implementadas mejorando la calidad del cuerpo hídrico, dando cumplimiento con el Decreto 3930 de 2010 y cubrir las necesidades del Parque Jaime Duque.

6. RESULTADOS

Para realizar el diagnóstico del biofiltro con *Cyperus papyrus* (Figura 15), en cuanto a su eficiencia en remoción de los contaminantes presentes, se realizó la medición de parámetros in situ (Figura 16), teniendo en cuenta los tres (3) puntos en estudio, y la caracterización fisicoquímica para los puntos uno (1) y tres (3), con el fin de calcular la eficiencia del biofiltro actual. En la tabla No. 4 se pueden observar los valores de los parámetros in situ. En la tabla

No. 5 están relacionados los parámetros fisicoquímicos para cada uno de los puntos y su comparación frente a la normativa vigente.

Figura 15. Biofiltro Cyperus papyrus.
Fuente: Autores,2019.

Tabla 4. Caracterización inicial in situ

PARÁMETRO	PUNTO 1	PUNTO2	PUNTO3	Decreto 3930 de 2010
pH	9,19	9,28	9,30	5 - 9
Temperatura	22,8 ºC	23,8ºC	25,3ºC	-
Turbidez	111 NTU	175 NTU	93 NTU	-
Oxígeno disuelto	12,61 mg/L	14,60 mg/L	11,45 mg/L	70%
Conductividad eléctrica	274 µs/cm	269 µs/cm	221 µs/cm	-

Fuente: Autores, 2019

Figura 16. Medición parámetros in situ.
Fuente: Autores,2019.

Tabla 5. Caracterización fisicoquímica Punto 1 y Punto 3

PARÁMETRO	Punto 1	Punto 3	Dec. 3930 de 2010
DQO	69 mg/L	67 mg/L	-
DBO	21,2 mg/L	19,4 mg/L	-
SAAM	0,8 mg/L	0,8 mg/L	0,5 mg/L
SST	286 mg/L	286 mg/L	-
SS	0,5 mg/L	0,5 mg/L	-
Nitrógeno total	<5 mg/L	<5 mg/L	-
Fósforo total	0,43 mg/L	0,42 mg/L	-
Escherichia coli (E. coli)	14 UFC/100mL	9 UFC/100mL	-
Coliformes totales	112UFC/100mL	98UFC/100mL	5000

Fuente: Autores

Con las concentraciones encontradas en el Punto uno (1) y Punto tres (3) se cálculó la eficiencia del sistema actual para la remoción de cada uno de los contaminantes, utilizando la ecuación 1.

$$\%e\ DQO = \frac{69 - 67}{69} x\ 100 = \mathbf{2,89}\ \%$$

Ecuación 2. Eficiencia inicial DQO
Fuente: (Rojas, Tratamiento de aguas residuales, 2016)

$$\%e\ DBO = \frac{21,2 - 19,4}{21,2} x\ 100 = \mathbf{8,49}\ \%$$

Ecuación 3. Eficiencia inicial DBO
Fuente: *Fuente:* (Rojas, Tratamiento de aguas residuales, 2016)

$$\%e\ SAAM = \frac{0,8 - 0,8}{0,8} x\ 100 = \mathbf{0}\ \%$$

Ecuación 4. Eficiencia inicial SAAM
Fuente: (Rojas, Tratamiento de aguas residuales, 2016)

$$\%e\ SST = \frac{286 - 286}{286} x\ 100 = \mathbf{0}\ \%$$

Ecuación 5. Eficiencia inicial SST
Fuente: (Rojas, Tratamiento de aguas residuales, 2016)

$$\%e\ SS = \frac{0{,}5 - 0{,}5}{0{,}5} x\ 100 = \mathbf{0}\ \%$$

Ecuación 6. Eficiencia inicial SS
Fuente: (Rojas, Tratamiento de aguas residuales, 2016)

$$\%e\ P2\ Total = \frac{0{,}43 - 0{,}42}{0{,}43} x\ 100 = \mathbf{2,32}\ \%$$

Ecuación 7. Eficiencia inicial P_2 total
Fuente: (Rojas, Tratamiento de aguas residuales, 2016)

$$\%e\ E.coli = \frac{7 - 7}{7} x\ 100 = \mathbf{0}\ \%$$

Ecuación 8. Eficiencia inicial Escherichia coli (E. coli)
Fuente: (Rojas, Tratamiento de aguas residuales, 2016)

$$\%e\ Coliformes\ Totales = \frac{112 - 98}{112} x\ 100 = \mathbf{12.5}\ \%$$

Ecuación 9. Eficiencia inicial Coliformes Totales
Fuente: (Rojas, Tratamiento de aguas residuales, 2016)

A partir de la eficiencia en remoción de los contaminantes y las observaciones hechas en campo se establecieron las falencias, las cuales hacen referencia al proceso de adecuación del sistema de biofiltro.

Debido a que al momento de ser adecuado e instalado el biofiltro se pensó como un atractivo visual y no como un tipo de tratamiento para remoción de los contaminantes, se evidenció que el sistema actual no entraba en contacto directo con el cuerpo de agua, sino se trataba de una porción de tierra que contenía al *Cyperus papyrus*, razón por la cual no se estaba llevando a cabo ningún tratamiento fitorremediador y además, se estaba generando incumplimiento con la normativa correspondiente al Decreto 3930 de 2010.

Con el paso del tiempo y la proyección del Parque, se realizó la construcción de nuevas atracciones en las que se hizo necesario desarrollar algún tipo de tratamiento en este cuerpo de agua. De igual forma, se encontraron dos entradas de agua al lago de los kayaks, una por la cual el agua pasaba por el sistema actual de biofiltro de *Cyperus papyrus*, denominado como entrada No. 1, y otra por la que no pasa este sistema, establecido como entrada No.2

(Figura 17). En la entrada No. 2 se implementó Buchón con el fin de dar algún tipo de tratamiento al cuerpo hídrico.

Figura 17. Entrada 2 lago de los kayaks.
Fuente: Autores,2019.

Posteriormente, se realizó una batimetría con el fin de conocer la estimación aproximada de las profundidades del lago y establecer la propuesta de optimización a diseño escalado con base en los resultados obtenidos durante el desarrollo de la prueba piloto. En la Figura No. 18 se puede observar la batimetría correspondiente al cuerpo hídrico.

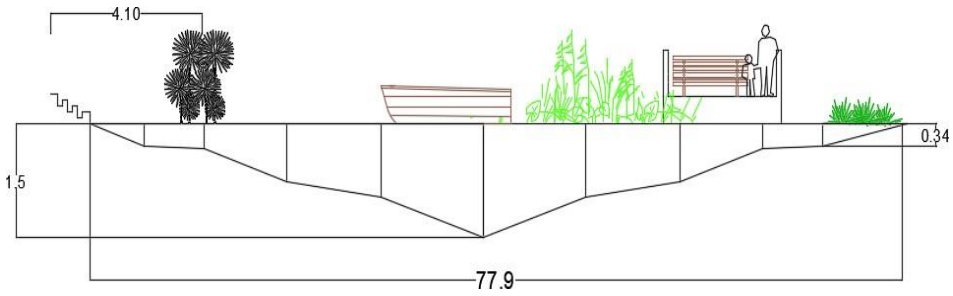

Figura 18. Batimetría
Fuente: Autores.

Teniendo conocimiento de la concentración de los contaminantes presentes en el lago, se estudiaron las posibles especies de plantas para ser usadas en la prueba piloto; dicha evaluación teórica puede ser observada en la Tabla No. 7, en donde se observó su eficiencia en remoción de contaminantes (capacidad de fitorremediación), su hábitat, principalmente su

adaptación a las condiciones climáticas de la zona y sus características generales. De las siete (7) especies estudiadas se seleccionaron tres (3) -Enea, Buchón y Junco-, ya que estas pueden interactuar en ambientes como lagunas, humedales o aguas lenticas, que favorecen a la captación de sus raíces y rizomas de contaminantes y la disminución de sólidos suspendidos, metales pesados, DQO, DBO y contaminantes orgánicos, así como adaptarse a las condiciones climáticas de la zona.

Tabla 7. Evaluación de especies

Nombre común	Nombre científico	Hábitat	Capacidad fitorremediadora	Características generales
ENEA	*Typha latifolia*	Orilla de cursos de agua lentos. 15°C y los 25°C	Es capaz de remover DBO5, DQO, NO3, PO4 y Sólidos Suspendidos totales en un porcentaje de 63,47%, 18,07%, 27,27%, 3,25% y 25,61% respectivamente	Se puede identificar ya que su tallo es de forma cilíndrica y tiene sus hojas en forma de cinta larga las cuales llegan a medir aproximadamente 2 metros de altura, son de un color verde azulado. Las hojas son de forma semicilíndrica de aproximadamente 1 cm. De anchura, color verde y situación casi exclusivamente basal. Florece de julio a noviembre y sus flores son poco vistosas individualmente, pero se agrupan en inflorescencias de forma cilíndrica y color marrón en la parte terminal de los tallos y de ellas deriva del nombre de "Puros". (Rodríguez R. L. F., 2006)
JUNCO	*Juncus effusus*	Suelos inundados o zonas litorales de sistemas lenticos. 20ºC -24ºC	En la descontaminación de metales pesados (Diario Popular, 2012). Adicionalmente, puede actuar como agente fitorremediador para remociones de DQO y bacterias coliformes totales y fecales (Alvarado, 2006).	Tienen un rizoma o tallo subterráneo muy robusto con el que se anclan firmemente al suelo blando del pantano y desarrollan allí una red de la que brotan los largos tallos aéreos. En el extremo de los tallos producen una pequeña espiga de color café con granos que sirven de alimento a varias especies de pájaros, entre ellos el toche de laguna o monjita. (Rodríguez R. L. F., 2006)

BUCHÓN	*Eichhornia crassipes*	En cuerpos de agua lentos. 10°C- 25°C	Se usa como agente fitorremediador, ya que puede remover 97% de materia orgánica, reflejado en la DBO 5 y DQO; Además de los sólidos suspendidos, el 99% de Nitrógeno y entre el 60 -65% de Fósforo, también organismos patógenos, sustancias tóxicas y metales pesados (Alvarado, 2006)	Esta planta es flotante, tiene una forma de roseta, sus hojas son un poco carnosas, las cuales están unidad entre sí por un pequeño tallo, sus hojas pueden medir de 2 a 5cm. Generalmente en la parte superior de la hoja presenta una superficie acunada, en la parte inferior de la hoja se encuentra provista de una serie de celdillas que dan una textura esponjosa y favorecen la flotabilidad de la planta. Su utilidad radica en que vitaliza las aguas en donde ella crece. (Acqua&co, 2019)
HELECHO DE AGUA	*Azolla caroliniana*	Humedales y cursos lentos de agua. 32°C -35°C	Acumula plomo, cobre, cadmio y hierro	La especie se reproduce, normalmente, en las áreas donde invade. La reproducción sexual es escasa y comporta la formación de prótalos sobre esporas flotantes. Su crecimiento está limitado por la concentración de fósforo en el agua (Rojas, Potabilización del agua, 1999)
JACINTO DE AGUA	*Eichhornia crassipes*	Pantanos, humedales y cuerpos de agua con bajo nivel de agua. 15 °C - 30°C. Por debajo de los 10 ºC las plantas mueren.	Gracias a su extenso sistema de raíces tiene excelente poder de filtración y capacidad de absorber impurezas y contaminantes como el Níquel, cadmio, plomo, mercurio, cromo plata, cobre y fenoles. (Rojas, Tratamiento de aguas residuales, 2016)	Tiene gran habilidad de crecimiento y adaptación que le permite sobrevivir y extenderse en muchos sitios. Generalmente crece a temperaturas de agua mayores a 10°C. Durante la estación normal de ocho meses la planta es capaz de producir 70.000 plantas hijas. (Rojas, Tratamiento de aguas residuales, 2016)

SAUCO	*Sambucus nigra*	Presente en bordes de quebradas cuerpos de agua lenticos. 15 ºC - 30ºC	Absorbe de forma efectiva las concentraciones de níquel, y metales, además de DQO y sólidos suspendidos totales	Es una especie perenne, útil para la restauración de nacimientos de agua, zonas de recarga de acuíferos y márgenes de quebrada y ríos. Se usa como cerca viva. (Catálogo de biodiversidad Colombia, 2009)
PAPIRO	*Cyperus papyrus*	Humedales y cursos lentos de agua. 20ºC - 33°C	El Papiro tiene la capacidad de remover un 91% DBO, 78.7% DQO y remoción de metales pesado como el Hierro, Magnesio, Zinc, Nitrógeno y Fosforo.	Crece en las orillas de los ríos, es una planta originaria de las cuencas del mediterráneo. Las hojas son de color verde jade, largas delgadas y firmes son por lo general de 10 a 30 cm de longitud. El papiro se multiplica principalmente a través de sus rizomas de los que brotan nuevos troncos, los cuales producen semillas que son transportadas por los vientos. (Rojas, Tratamiento de aguas residuales, 2016)

Fuente: Autor, 2019.

En la Tabla No. 8 se presenta la caracterización fisicoquímica inicial utilizada en las plantas piloto.

Tabla 8. Caracterización inicial plantas piloto

PARÁMETRO	VALOR
DQO	69 mg/L
DBO	21,2 mg/L
SAAM	0,8 mg/L
SST	286 mg/L
SS	0,5 mg/L
Nitrógeno total	<5 mg/L
Fósforo total	0,43 mg/L
Escherichia coli (E. coli)	14 UFC/100ml
Coliformes totales	112 UFC/100ml

Fuente: Autores

Al cabo de ocho (8) semanas se realizó la medición de los parámetros in situ, tal como muestra la Tabla No. 9 y la caracterización fisicoquímica presentada en la Tabla No. 10, de cada una de las tres plantas piloto. A continuación se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 9. Caracterización in situ plantas piloto

PARÁMETRO	Enea	Junco	Buchón
pH	7,85	7,68	7,82
Temperatura	16,9 ºC	19 ºC	19,1 ºC
Turbidez	4,65 NTU	117 NTU	5,84 NTU
Oxígeno disuelto	6,88 mg/L	6,48 mg/L	8,09 mg/L
Conductividad eléctrica	429 µs/cm	203,3 µs/cm	751 µs/cm

Fuente: Autores

Tabla 10. Caracterización fisicoquímica plantas piloto

PARÁMETRO	ENEA	JUNCO	BUCHÓN
DQO	74 mg/L	53 mg/L	40 mg/L
DBO	1 mg/L	8,2 mg/L	8,7 mg/L
SAAM	<0,05	<0,05	<0,05 mg/L

SST	34 mg/L	74 mg/L	40 mg/L
SS	0,5 mg/L	0,5 mg/L	0,5 mg/L
Nitrógeno total	<5 mg/L	<5 mg/L	<5 mg/L
Fósforo total	0,03	0,03	1,34 mg/L
Escherichia coli (E. coli)	6 UFC/100ml	8 UFC/100ml	12 UFC/100ml
Coliformes totales	3 UFC/100ml	32 UFC/100ml	28 UFC/100ml

Fuente: Autores

Se estableció una comparación entre la caracterización fisicoquímica inicial, de la obtenida en cada planta piloto y el Decreto 3930 de 2010. Esta comparación se puede observar en la Tabla 11.

Tabla 11. Comparación caracterizaciones fisicoquímicas y normativa.

PARÁMETRO	Caracterización inicial	ENEA	JUNCO	BUCHÓN	Dec. 3930 de 2010
DQO	69 mg/L	74 mg/L	53 mg/L	40 mg/L	-
DBO	21,2 mg/L	1 mg/L	8,2 mg/L	8,7 mg/L	-
SAAM	0,8 mg/L	<0,05	<0,05	<0,05 mg/L	0,5 mg/L
SST	286 mg/L	34 mg/L	74 mg/L	40 mg/L	-
SS	0,5 mg/L	0,5 mg/L	0,5 mg/L	0,5 mg/L	-
Nitrógeno total	<5 mg/L	<5 mg/L	<5 mg/L	<5 mg/L	-
Fósforo total	0,43 mg/L	0,03	0,03	1,34 mg/L	-
Escherichia coli (E. coli)	14 UFC/100ml	6 UFC/100ml	8 UFC/100ml	12 UFC/100ml	-
Coliformes totales	112 UFC/100ml	3 UFC/100ml	32 UFC/100ml	28 UFC/100ml	5000

Fuente: Autores

Para determinar la especie óptima para el tratamiento fitorremediador, se realizó el cálculo de la eficiencia de cada una de las plantas piloto, cuyo cálculo se presenta a continuación. En la Tabla No. 12 se muestra la relación de las eficiencias de cada una de las plantas piloto.

- **Eficiencia de la planta piloto con Enea:**

$$\%e\ DQO = \frac{69 - 74}{69} x\ 100 = \mathbf{0}\%$$

Ecuación 10. Eficiencia Enea DQO
Fuente: (Rojas, Tratamiento de aguas residuales, 2016)

$$\%e\ DBO = \frac{21{,}2 - 1}{21{,}2} x\ 100 = \mathbf{95,2}\%$$

Ecuación 11. Eficiencia Enea DBO
Fuente: *Fuente:* (Rojas, Tratamiento de aguas residuales, 2016)

$$\%e\ SAAM = \frac{0{,}8 - 0{,}05}{0{,}8} x\ 100 = \mathbf{93,75}\%$$

Ecuación 12. Eficiencia Enea SAAM
Fuente: (Rojas, Tratamiento de aguas residuales, 2016)

$$\%e\ SST = \frac{286 - 34}{286} x\ 100 = \mathbf{88,11}\%$$

Ecuación 13. Eficiencia Enea SST
Fuente: (Rojas, Tratamiento de aguas residuales, 2016)

$$\%e\ P2\ Total = \frac{0{,}43 - 0{,}03}{0{,}43} x\ 100 = \mathbf{93,02}\%$$

Ecuación 14. Eficiencia Enea P_2 total
Fuente: (Rojas, Tratamiento de aguas residuales, 2016)

$$\%e\ E.coli = \frac{7 - 6}{7} x\ 100 = \mathbf{14,28}\%$$

Ecuación 15. Eficiencia Enea Escherichia coli (E. coli)
Fuente: (Rojas, Tratamiento de aguas residuales, 2016)

$$\%e\ Coliformes\ Totales = \frac{112 - 3}{112} x\ 100 = \mathbf{97,32}\%$$

Ecuación 16. Eficiencia Enea Coliformes Totales
Fuente: (Rojas, Tratamiento de aguas residuales, 2016)

- **Eficiencia de la planta piloto con Junco:**

$$\%e\ DQO = \frac{69 - 53}{69} x\ 100 = \mathbf{23,18}\%$$

Ecuación 17. Eficiencia Junco DQO
Fuente: (Rojas, Tratamiento de aguas residuales, 2016)

$$\%e\ DBO = \frac{21{,}2 - 8{,}2}{21{,}2} x\ 100 = \mathbf{61,32}\%$$

Ecuación 18. Eficiencia Junco DBO
Fuente: *Fuente:* (Rojas, Tratamiento de aguas residuales, 2016)

$$\%e\ SAAM = \frac{0{,}8 - 0{,}05}{0{,}8} x\ 100 = \mathbf{93,75}\%$$

Ecuación 19. Eficiencia Junco SAAM
Fuente: (Rojas, Tratamiento de aguas residuales, 2016)

$$\%e\ SST = \frac{286 - 74}{286} x\ 100 = \mathbf{74,12}\%$$

Ecuación 20. Eficiencia Junco SST
Fuente: (Rojas, Tratamiento de aguas residuales, 2016)

$$\%e\ P2\ Total = \frac{0{,}43 - 0{,}03}{0{,}43} x\ 100 = \mathbf{93,02}\%$$

Ecuación 21. Eficiencia Junco P_2 total
Fuente: (Rojas, Tratamiento de aguas residuales, 2016)

$$\%e\ E.coli = \frac{14-8}{14} x\ 100 = \mathbf{42,85}\%$$

Ecuación 22. Eficiencia Junco Escherichia coli (E. coli)
Fuente: (Rojas, Tratamiento de aguas residuales, 2016)

$$\%e\ Coliformes\ Totales = \frac{112-32}{112} x\ 100 = \mathbf{71,42}\%$$

Ecuación 23. Eficiencia Junco Coliformes Totales
Fuente: (Rojas, Tratamiento de aguas residuales, 2016)

- **Eficiencia de la planta piloto con Buchón:**

$$\%e\ DQO = \frac{69-40}{69} x\ 100 = \mathbf{42,02}\%$$

Ecuación 24. Eficiencia Buchón DQO
Fuente: (Rojas, Tratamiento de aguas residuales, 2016)

$$\%e\ DBO = \frac{21{,}2-8{,}7}{21{,}2} x\ 100 = \mathbf{58,96}\%$$

Ecuación 25. Eficiencia Buchón DBO
Fuente: (Rojas, Tratamiento de aguas residuales, 2016)

$$\%e\ SAAM = \frac{0{,}8-0{,}05}{0{,}8} x\ 100 = \mathbf{93,75}\%$$

Ecuación 26. Eficiencia Buchón SAAM
Fuente: (Rojas, Tratamiento de aguas residuales, 2016)

$$\%e\ SST = \frac{286-40}{286} x\ 100 = \mathbf{86,01}\%$$

Ecuación 27. Eficiencia Buchón SST
Fuente: (Rojas, Tratamiento de aguas residuales, 2016)

$$\%e\ P2\ Total = \frac{0{,}43-1{,}34}{0{,}43} x\ 100 = \mathbf{0}\%$$

Ecuación 28. Eficiencia Buchón P_2 total
Fuente: (Rojas, Tratamiento de aguas residuales, 2016)

$$\%e\ E.\ coli = \frac{14 - 12}{14} x\ 100 = \mathbf{14,28}\%$$

Ecuación 29. Eficiencia Buchón Escherichia coli (E. coli)
Fuente: (Rojas, Tratamiento de aguas residuales, 2016)

$$\%e\ Coliformes\ Totales = \frac{112 - 28}{112} x\ 100 = \mathbf{75}\%$$

Ecuación 30. Eficiencia Buchón Coliformes Totales
Fuente: (Rojas, Tratamiento de aguas residuales, 2016)

Tabla 12. Resumen eficiencias plantas piloto.

La tabla a continuación, establece los resultados obtenidos de las ecuaciones de eficiencia de cada una de las plantas seleccionadas.

Parámetro	Eficiencia Buchón	Eficiencia Enea	Eficiencia Junco
DQO	42,02%	0%	23,18%
DBO	58,96%	95,2%	61,32%
SAAM	93,75%	93,75%	93,75%
SST	86,01%	88,11%	74,12%
P_2 total	0%	93,02%	93,02%
Escherichia coli (E. coli)	14,28%	14,28%	42,85%
Coliformes Totales	75%	97,32%	71,42%

Fuente: Autores.

Teniendo en cuenta la eficiencia de cada especie, sus características generales y adaptabilidad a la zona, se estableció como especie óptima para el tratamiento a la *Typha latifolia* (Enea).

- **Propuesta de optimización**

Con el fin de llevar a cabo un tratamiento fitorremediador eficiente en el cuerpo hídrico del lago de los flamencos, y cumplir con la normativa vigente correspondiente al decreto 3930 de 2010 acorde con las necesidades del parque, además de garantizar el bienestar de los visitantes, es necesario realizar algunas modificaciones y adaptaciones:

El *Cyperus papyrus* debe ser reemplazado por la *Typha latifolia*, debido a que en la evaluación teórica de especies se encontró que el *Cyperus papyrus* no tenía gran porcentaje

de eficiencia en remoción de los contaminantes presentes en el lago, mientras que la *Typha latifolia* cuenta con altos porcentajes, los cuales pudieron evidenciarse durante el desarrollo del proyecto. Además, actualmente el *Cyperus papyrus* no está desarrollando ningún tipo de tratamiento, ya que no entra en contacto directo con el cuerpo de agua.

Teniendo en cuenta lo anterior, se debe implementar un sistema de aireación en el lago con el fin de garantizar las condiciones de supervivencia de la especie (*Typha latifolia*) y las técnicas de fitorremediación, evitando así aumento en la concentración de DQO, fósforo y *Escherichia coli (E. coli)* y Coliformes Totales. Teniendo en cuenta que se trata de un cuerpo de agua léntico, el sistema de aireación ayudara a evitar presencia de puntos muertos generando estancamiento del agua, ocasionando de esta mamera la eutrofización.

El aireador óptimo para el cuerpo de agua según sus características, corresponde a un Aireador Force 7 (Figura 19), ya que alcanza profundidades entre 0,5 – 2 metros, encontrándose en la batimetría una profundidad de 1,50 metros. Asimismo, la velocidad de la hélice de este aireador crea una caída de presión que recupera aire desde la superficie a través de un tubo de aspiración. (Acqua&co, 2019).

El aireador Force 7, es un equipo de alto rendimiento que inyecta un gran volumen de aire y oxígeno puro en el agua en forma de burbujas micronizadas, provocando un efecto fraccionador de espuma que elimina pequeñas partículas mejorando la calidad del agua. De igual forma, actúa como circulador al crear una corriente de agua que desestatifica la masa de agua, equilibrando la temperatura y oxígeno sin causar erosión o aumento de turbidez (Innovaqua, 2019)

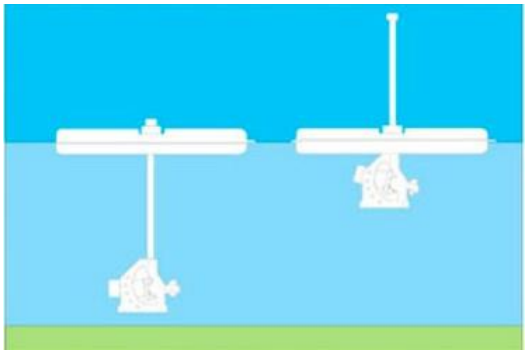

Figura 19. Aireador Force 7
Fuente: (Innovaqua, 2019)

El sistema de aireación debe ser instalado en el lago de los kayaks con el fin de eliminar los puntos muertos que generan estancamiento del agua y la eutrofización, así como debe contar con un funcionamiento de cuatro (4) a cinco (5) horas diarias, garantizado las concentraciones de oxígeno para la supervivencia de la especie (*Typha latifolia*) y poder llevar a cabo el tratamiento fitorremediador.

La *Typha latifolia* debe ser inspeccionada con el propósito de garantizar un tratamiento eficiente, evitando que sus raíces se colmaten y se genere aumento en las concentraciones de los contaminantes. De igual forma, se debe garantizar que todas la vegetación presente se encuentre viva y cuando se observe acumulación de sólidos entre ellas, deben ser podadas o cambiadas garantizando continuación del tratamiento fitorremediador.

Los cajones de ingreso al lago de los kayaks ubicados en la entrada uno (1) y dos (2), deben ser modificados por resaltos hidráulicos, los cuales favorecerán la aireación del cuerpo hídrico evitando estancamiento en la entrada del lago de los kayaks, punto donde se evidenció eutrofización.

Con el fin de evitar que las concentraciones de los contaminantes presentes en el lago aumenten, las zonas donde se cuenta con la presencia de Buchón deben ser controladas para evitar disminución de oxígeno, aumento de fósforo, *Escherichia coli (E. coli)* y Coliformes Totales**,** causando eutrofización en el lago de los kayaks.

El control se debe llevar a cabo cada mes, teniendo en cuenta que se trata de una especie invasora de rápido crecimiento y con alta tasa de supervivencia, la cual tiende a agotar los nutrientes de las otras especies presentes en el cuerpo hídrico.

7. ANÁLISIS

Teniendo en cuenta la tabla No. 4, se puede evidenciar el incumplimiento frente al decreto 3910, toda vez que las concentraciones superan lo reglamentado. Además, se presentan valores altos correspondientes a la turbidez, lo que indica presencia de materia suspendida y coloidal, tal como materia orgánica e inorgánica y microorganismos en los tres (3) cuerpos de agua analizados.

Tabla 4. Caracterización inicial in situ

PARÁMETRO	PUNTO 1 Tren de Troncos	PUNTO2 Lago Flamencos	PUNTO 3 Lago Kayaks	Decreto 3930 de 2010
pH	9,19	9,28	9,30	5 - 9
Temperatura	22,8 ºC	23,8ºC	25,3ºC	-
Turbidez	111 NTU	175 NTU	93 NTU	-
Oxígeno disuelto	12,61 mg/L	14,60 mg/L	11,45 mg/L	70%
Conductividad eléctrica	274 µs/cm	269 µs/cm	221 µs/cm	-

Fuente: Autores, 2019

Cabe resaltar que, teniendo valores por encima de 80 NTU como se evidencia en los puntos 1,2 y 3 resultan ser un valor alto de turbidez, indicando afectación en la fotosíntesis, respiración y reproducción de la vida acuática, contribuyendo en la disminución de oxígeno presente en el cuerpo hídrico. (Toro, 2011)

De igual forma, al observar los datos asociados a la conductividad eléctrica 274, 269 y 221 µs/cm, en los puntos 1, 2 y 3 respectivamente, se evidencia la presencia de contaminantes principalmente inorgánicos, haciendo referencia a que, a mayor conductividad eléctrica en un cuerpo hídrico más impurezas contiene, influyendo en la biota acuática. (IDEAM, 2006) A partir del muestreo realizado en los cuerpos hídricos de tren de troncos y lago de los flamencos, se llevó a cabo una caracterización fisicoquímica inicial, realizada en el Centro del lago de los kayaks. De acuerdo con la tabla No. 5, se evidencia que la concentración de los contaminantes entre los dos (2) puntos son constantes, lo que permitió observar que el sistema del biofiltro no estaba siendo eficiente en cuanto al tratamiento fitorremediador, y que el cuerpo hídrico no estaba cumpliendo con los valores establecidos en la normativa establecida para cuerpos de agua de uso recreativo correspondiente al decreto 3930 del 2010, para ninguno de los parámetros estudiados.

Tabla 5. Caracterización fisicoquímica Punto 1 y Punto 3

PARÁMETRO	Punto 1	Punto 3	Dec. 3930 de 2010
DQO	69 mg/L	67 mg/L	-
DBO	21,2 mg/L	19,4 mg/L	-
SAAM	0,8 mg/L	0,8 mg/L	0,5 mg/L
SST	286 mg/L	286 mg/L	-
SS	0,5 mg/L	0,5 mg/L	-
Nitrógeno total	<5 mg/L	<5 mg/L	-
Fósforo total	0,43 mg/L	0,42 mg/L	-
Escherichia coli (E. coli)	14 UFC/100ml	9 UFC/100ml	-
Coliformes totales	112UFC/100ml	98UFC/100ml	5000

Fuente: Autores

Cálculo de la eficiencia del sistema actual de biofiltro

Se calculó la eficiencia de remoción de cada uno de los contaminantes por medio de la ecuación No. 1, en donde se tuvo en cuenta la concentración inicial del contaminante, valor que corresponde al encontrado en el lago de tren de troncos en el punto uno (1) y la concentración final correspondiente al lago de los kayaks del punto (3).

Según la eficiencia determinada para cada uno de los contaminantes estudiados, se estableció que el biofiltro no estaba realizando ningún tipo de tratamiento fitorremediador dado sus porcentajes de eficiencia eran demasiado bajos, siendo esta la razón por la cual estaba incumpliendo la normativa.

Se evidencia que la concentración de SAAM para los dos (2) cuerpos hídricos excede el valor de la norma; sin embargo, es necesario realizar un tratamiento alterno, debido a que la presencia de SAAM en cuerpos hídricos está relacionada con la concentración de Fósforo presente y por ende un potencial de eutrofización de los lagos.

Así también, se determinó la tasa de eficiencia, los resultados obtenidos mostraron 14 UFC/100ml *Escherichia coli (E. coli)* y 112 UFC/ 100ml Coliformes Totales, 286 mg/L de SST y una baja concentración de Fosforo y Nitrógeno total siendo menores a 5mg/L.

Lo anterior, permite inferir que los distintos actores (plantas, aves, peces y microorganismos), tienen gran potencial para adaptarse en este tipo de ambientes y muy baja concentración de metales pesados en el respectivo cuerpo de agua. De igual forma, se encontró un balance importante en el medio acuático, lo cual permite que las plantas en estudio cumplan con una capacidad potencial de remover no solo bacterias como la *Escherichia coli (E. coli),* sino también metales pesados y concentraciones DQO y DBO.

Análisis de *Escherichia coli (E. coli)* y Coliformes Totales primera muestra.

Una vez realizado el cultivo inicial de Coliformes Totales y *Escherichia coli (E. coli)* en Agar MacConkey y EMB respectivamente, por medio del proceso de tren de filtración se logró hacer un recuento de UFC (Unidades formadoras de colonias). En la Figura No. 20 se evidencia la siembra de los coliformes totales, dado que se llevó a cabo un reconteo de 112 UFC/100ml.

Por otro lado, en la Figura No. 21 se muestra la presencia de *Escherichia coli (E. coli)* en la cantidad de 14 UFC/100 ml proveniente de las heces de los flamencos y otros animales presentes a lo largo del cuerpo hídrico, el cual termina su curso en el lago de los kayaks.

Cuando la *Escherichia coli (E. coli)* está presente en un gran número, se deduce que ha tenido lugar una polución fuerte y/o reciente por desechos animales o humanos. Asimismo, si el número de *Escherichia coli (E. coli)* es pequeño, indica que la polución del mismo tipo es

menos reciente. De igual forma, “si se detectan coliformes, esto señala que la polución es reciente, pero de origen no fecal o de origen fecal pero lejana, de modo que los coliformes intestinales no han sobrevivido” (Gray, N. F. & Sons, 1.994). Por lo anterior, la distancia entre la zona actividad de los Pelicanos y el biofiltro del Lago de Kayaks, no resulta ser suficiente para depurar Coliformes totales y *Escherichia coli (E. coli)*.

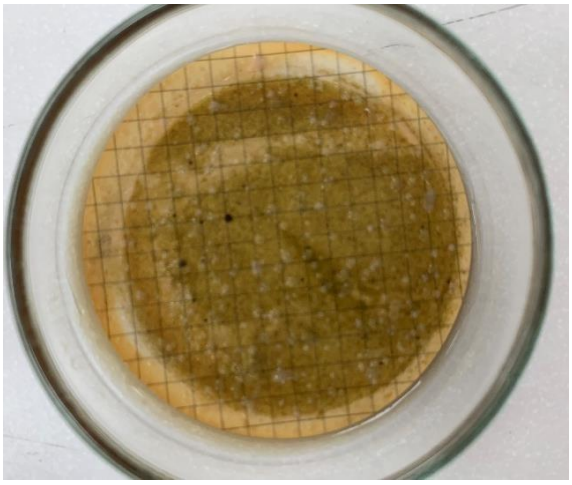

Figura 20. Medición coliformes totales
Fuente: Autores,2019.

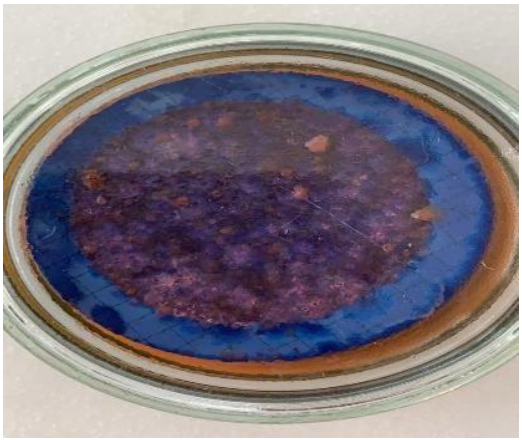

Figura 21. Medición de Escherichia coli (E. coli)
Fuente: Autores,2019.

Cálculo de la eficiencia de las plantas piloto

El IDEAM define al fosforo como *"Un elemento esencial en el crecimiento de plantas y animales. Es uno de los nutrientes que controlan el crecimiento de algas, se encuentra en aguas naturales y residuales como fosfatos, clasificándose en ortofosfatos, fosfatos condensados y orgánicos."* (IDEAM, 2004). Teniendo en cuenta lo anterior, se evidenció una concentración de 0,43 mg/L y 0,42mg/L en el punto 1 y 3 respectivamente, lo cual permitió establecer que la concentración de Fósforo presente en los dos (2) cuerpos de agua es consecuencia del estado trófico, en donde debido a la descomposición de la materia orgánica, se reducen los niveles de Oxígeno aportando a las concentraciones de Fósforo, dando origen a la eutrofización. Además, al permitir la formación de biomasa, se genera un incremento de la concentración de DBO (Demanda biológica de oxígeno).

Debido a que la *Escherichia coli (E. coli)* habita en forma natural en el intestino de los mamíferos, esta posee cepas que no son patógenas y otras causantes de enfermedades gastrointestinales a través de ciertos mecanismos, (Zumaeta, 2004), razón por la cual, es de vital importancia llevar a cabo un tipo de tratamiento eficiente para la remoción de dicho contaminante que se encuentra en los cuerpos hídricos monitoreados los cuales, además, entran en contacto directo con los visitantes del Parque Jaime Duque, ocasionando el desarrollo de algún tipo de enfermedad gastrointestinal.

Las plantas que mostraron una elevada tasa de eliminación tanto de Coliformes Totales como *Escherichia coli (E. coli)* fueron la *Enea y el Buchón,* alcanzando una remoción de 97.32% y 75% respectivamente. Después de haber presentado una primera entrada de 112UFC/100ml, el mecanismo de adsorción también pudo haber intervenido en la disminución de la concentración de coliformes, así como permitió que las bacterias se unan a las raíces y actúan como un filtro natural. Se ha demostrado que los microorganismos como las bacterias, entre ellos los coliformes y otros patógenos, se adhieren al cuerpo radicular de las macrófitas contribuyendo a la eliminación de *Escherichia coli (E. coli)*.(Solano et al., 2004).

Por otro lado, se pudieron involucrar otros factores en la remoción de bacterias, como se demostró con el análisis de correlación fueron el pH, la temperatura, y la sedimentación. Según Solic M. y Krstuloviic N., el pH óptimo para la *E. coli* es de 6 - 7 y valores superiores

provocan un declive en su población (Solic, 1992). De igual forma el cirujano inglés Sir Arthur William Mayo Robson, apoya la teoría que a pH alcalinos mueren las coliformes fecales (Mayo Robson, 2004). En el desarrollo del proyecto, el pH en los controles con las plantas se redujo de 9.30 a 7.82, lo que también explicaría el por qué del decrecimiento de coliformes totales y *Escherichia coli (E. coli)*.

Cabe resaltar que, todas las plantas piloto fueron sometidas a una aireación continua, ya que las especies presentaron con el tiempo deterioro en su tallo y hojas a causa de la falta de oxígeno en el medio de acción. Las concentraciones fluctuaban de 30-60 minutos/día.

Como puede observarse en la tabla No.12, la DQO (Demanda biológica de oxígeno) presente en el Buchón es de 42,02%, lo que probablemente se deba al metabolismo de los macro y microorganismos heterótrofos aerobios y anaerobios utilizando los compuestos orgánicos del agua para la producción de biomasa, aunque en el sistema también se generan reacciones químicas principalmente de oxido–reducción (Kadlec *et al*. 2000), lo que permite una mayor facilidad de captar y depurar gran parte del DQO presente en el agua de muestra del lago de los flamencos, por encima de las otras plantas piloto como el Junco y la Enea.

Asimismo, en relación con el fosforo total, el buchón presentó un crecimiento en la concentración de 0,91 mg/L con referencia a la caracterización inicial, lo que indica que este tipo de macrófita no cuenta con una gran capacidad de remoción de Fosforo total y tiene gran eutrofización en el sistema, disminuyendo de forma acelerada la infiltración de luz y la poca actividad fotosintética.

Por otro lado, las tres (3) plantas piloto demostraron tener una amplia capacidad de remoción de DBO de las muestras, debido a su capacidad de retención de materiales orgánicos. En los tres (3) casos del estudio, se observó una eficiencia de retención superior a 50 % en las ocho (8) semanas de estar en contacto con el agua, siendo la Enea ligeramente más eficiente que el Junco y el Buchón.

De igual forma, en la remoción del sistema probablemente existió una influencia en la superficie de contacto de sus raíces, lo que permitió a los rizomas depurar más rápidamente a los microorganismos existentes en la muestra.

Por último, se observó en los resultados que la planta con más facilidad de adaptarse y remover un gran número de *Escherichia coli (E. coli)* es la planta Enea de 4 a 6 UFC/100ml por encima del Junco y el buchón, creando así una correlación entre la remoción de microorganismos y materia orgánica, lo que implica una relación de la DBO, SS y SST en el sistema.

Teniendo en cuenta lo anterior, así como los porcentajes de remoción de cada una de las especies para los parámetros estudiados, es preciso afirmar que se llevó a cabo un tratamiento de fitorremediación eficiente para cada uno de los casos, encontrándose porcentajes de remoción de hasta el 95% en cada uno de los parámetros.

Aun cuando se presentaron casos en los cuales los contaminantes presentaron un aumento en su concentración con referencia a la caracterización inicial, la fitorremediación sigue siendo un tratamiento óptimo para el cuerpo hídrico, ya que al presentarse una disminución en la concentración de los contaminantes se evita el crecimiento microbiano, debido a que se limitan los nutrientes necesarios para su crecimiento.

Asimismo, con la disminución de fósforo se impide la eutrofización y con la disminución de los otros parámetros se presenta reducción de la materia orgánica, teniendo en cuenta que los visitantes entran en contacto directo con el cuerpo de agua y que se debe cumplir con la normativa correspondiente al decreto 3930 de 2010.

Del mismo modo, se analizó de forma directa cada muestra de las plantas piloto Enea, Junco y Buchón, para comparar los resultados e identificar cual es la planta potencialmente remediadora, teniendo en cuenta la caracterización final obtenida con el desarrollo de las plantas piloto en la Tabla No. 11, por lo que, partir del cálculo de eficiencia de cada una de las plantas piloto de la tabla No. 12, se pudo establecer que la especie óptima y eficiente corresponde a la Enea.

Finalmente, se realizó la propuesta de optimización del biofiltro al parque Jaime Duque con el fin de mejorar las condiciones del cuerpo hídrico, en donde se plantean los cambios necesarios al sistema del biofiltro actual.

8. CONCLUSIONES

- Se formuló la propuesta de optimización del biofiltro de *Cyperus papyrus*, planteando las modificaciones necesarias a realizar al cuerpo hídrico y estableciendo la especie fitorremediadora a implementar, con el propósito de cumplir con el decreto 3930 de 2010. Para lograrlo, se tuvo en cuenta aspectos como aireación requerida, mantenimiento del biofiltro, control de crecimiento y construcción de resaltos hidráulicos.

- Se realizó el diagnóstico del biofiltro de *Cyperus papyrus* a partir de una caracterización inicial, donde se encontraron los problemas actuales del sistema, entre los cuales se encuentra la instalación, el contacto directo con el lago y la especie utilizada, con lo cual se establecieron las concentraciones de los contaminantes presentes en el cuerpo hídrico, además, se realizó la evaluación teórica de las especies fitorremediadoras para la implementación de las plantas piloto, a partir de su eficiencia para remover los contaminantes presentes en el lago (capacidad fitorremediadora), adaptabilidad a la zona y hábitat.

- Se seleccionaron las tres (3) plantas más óptimas para la remoción de los contaminantes presentes en el cuerpo hídrico, las cuales fueron Enea, Buchón y Papiro, además de las

opciones de optimización para las plantas piloto y para el biofiltro del lago. Se llevo a cabo una caracterización final con el fin de establecer la eficiencia fitorremediadora de cada una de las especies estudiadas.

- Se seleccionó a la *Enea (Typha latifolia)* como la especie más adecuada para la remoción de los contaminantes presentes en el cuerpo hídrico, a partir de la caracterización final y de la eficiencia calculada para cada una de las especies estudiadas, además, se tuvo en cuenta los intereses del parque y el cumplimiento con el Decreto 3930 de 2010

9. RECOMENDACIONES

- Es preciso implementar un sistema de aireación que permita el desarrollo y crecimiento de la Enea (*Typha latifolia)* garantizando un tratamiento fitorremediador eficiente, teniendo en cuenta que el sistema de aireación permite reducir los puntos de estancamiento del agua que pueden causar eutrofización.

- Se debe realizar regularmente un cambio a la vegetación correspondiente con la Enea (*Typha latifolia)*, con el propósito de evitar exceder los límites de tolerancia frente a los contaminantes tratados, lo cual puede ocasionar su muerte y posible su acumulación.

- Es necesario realizar un seguimiento periódico al cuerpo hídrico, el cual debe consistir en caracterizaciones fisicoquímicas, con el fin de establecer y controlar el comportamiento de los contaminantes presentes, así como el cumplimiento del decreto 3930 de 2010.

- Es necesario realizar mantenimiento de forma regular en la entrada dos (2) del lago de los kayaks, zona donde están implementando Buchón (*Eichhornia crassipes)* como tipo de tratamiento, ya que al ser una planta flotante esta cubre la superficie del agua impidiendo que la luz atraviese el agua, disminuyendo las concentraciones de oxígeno y las posibilidades de que las especies que allí habitan sobrevivan.

- Teniendo en cuenta que los lagos se conectan entre sí, es necesario realizar un estudio de los posibles puntos donde se pueda presentar escorrentía, ya sea proveniente de los hábitats de los animales o de la limpieza y lavado de las atracciones, aumentando así la concentración de contaminantes.

- Se recomienda modificar los cajones existentes a la entrada del lago de los kayaks, ya que en este punto se genera estancamiento e implementar un resalto hidráulico, el cual ayudaría en la oxigenación del cuerpo hídrico.

- Debido a los datos de calidad de agua previos a los obtenidos en este estudio, se recomienda continuar con el monitoreo del cuerpo hídrico, con el fin de hacer un seguimiento de eficiencia de la Enea (*Typha latifolia)* como biofiltro del lago, para tomar acciones que protejan la salud de los usuarios, además se debe establecer un control de caudal en la entrada uno (1) del lago Kayaks, ya que estudios realizados a cuerpos contaminados por *Escherichia coli (E. coli)* demuestran tener fácil dilución en precipitaciones y caudales altos.

10. BIBLIOGRAFÍA

IDEAM. (2007, Agosto 30). *COLIFORMES TOTALES Y E. COLI POR EL MÉTODO DE FILTRACIÓN POR MEMBRANA EN AGAR CHROMOCULT.* Bogotá. Obtenido de http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Coliformes+totales+y+E.+coli+en+Agua+Filtración+por+Membrana.pdf/5414795c-370e-48ef-9818-ec54a0f01174

Salinas, N. E. (2011). ¿Qué es un bioindicador? Aprendiendo a partir del ciclo de indagación guiada con macroinvertebrados bentónicos. Propuesta metodológica. Leticia, Colombia.

Lozano, M. G. (2016). Eutrofización: una visión general. *Revista de divulgación científica, tecnológica y humanistica*.

Carlos Garbisu, L. E. (2008). Fitorremediación. *Ecologistas en acción*.

Unidos, A. d. (2001). Reservorios. En A. d. Unidos, *Cómo realizar inspecciones sanitarias en pequeños sistemas de agua* (págs. 5.1-5.19).

Villeda, D. A. (2015, Junio 21). ¿De qué manera afecta a la salud y al medio ambiente el uso indiscriminado de los detergentes?

Rodríguez R., L. F. (2006). *Ensayos de eficiencia con macrófitas para la remoción de carga contaminante en aguas residuales de hatos lecheros para un subsector de la Laguna Fúquene.* Bogotá: Medio Ambiente y Recursos Naturales,.

Rojas, J. A. (2016). *Tratamiento de aguas residuales.* Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Toro, C. G. (2011, Octubre). La turbidez . Mayagüez , Puerto Rico.
Peña-Salamanca, E. J., Madera-Parra, C. A., Sánchez , J., & Medina-Vásquez, J. (2013). Bioprospeccion de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediacion: caso Helicona psittacorum (heliconiacea). *Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Fisicas y Naturales(Vol. 37, Issue 145.)*.
IDEAM. (2006, Julio 12). Conductividad eléctrica por el método electrométrico en aguas. Bogotá, Colombia.
IDEAM. (2004, Marzo 13). Fósforo total en agua por digestión ácida, método del ácido ascórbico. Bogotá, Colombia.
Rojas, J. A. (1999). *Potabilización del agua.* Alfaomega.
Zumaeta, M. A. (2004). Aspectos biológicos de la calidad del agua. En M. A. Zumaeta, *Aspectos biológicos de la calidad del agua* (págs. 59-98). Lima.
Rodríguez R., L. F., Ortiz Muñoz, Y. D., Navarro Chaparro, H., Espinosa García, H., & Hernandez Montaña, V. (2006). Ensayos de eficiencia con macrófitas para la remoción de carga contaminante en aguas residuales de hatos lecheros para un subsector de la Laguna de Fúquene. *Universidad Distrital (Medio Ambiente y Recursos Naturales)*, 131-156.
Gray, N. F. , J. W., & Sons, C. (1.994). *Drinking Water Quality Problems and Solutions.*
Yan, Z., Peñuelas, J., & Sardans, J. (2016). El fósforo se acumula más rápido que el nitrógeno a nivel mundial en los ecosistemas de agua dulce bajo impactos antropogénicos. *Ecology letters*, 1-35.
Valderrama, L. T., Campos, C., & Velandia, S. (2009). EVALUACION DEL EFECTO DEL TRATAMIENTO CON PLANTAS ACUATICAS EVALUACION DEL EFECTO DEL TRATAMIENTO CON PLANTAS ACUATICAS (E. Crassipes, Lemna sp. y L. Laevigatum) EN LA REMOCION DE INDICADORES DE CONTAMINACION FECAL EN AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS. *Unidad de Saneamiento y Biotecnología Ambiental, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Javeriana,*.
Acqua&co. (2019, Septiembre 15). *Acquaeco*. Obtenido de https://www.acquaeco.com/prodotti.php?idx=7
Innovaqua. (2019, Septiembre 15). *Innovaqua*. Obtenido de http://www.innovaqua.com/productos/aireacion_sumergida.html
Hernandez Puerta, N., & Galvis, J. S. (2016). *Universidad de La Salle*. Obtenido de Universidad de La Salle: http://repository.lasalle.edu.co/handle/10185/20490
Valero Alvarado, M. (2006). *Academia*. Obtenido de Monografías: https://www.academia.edu/33004953/APLICACIÓN_TECNOLOGICA_DE_LAS_MACROFITAS_A_LA_DEPURACION_DE_AGUAS_RESIDUALES_CON_LA_AYUDA_DE_MICROORGANISMOS
Bedoya Perez, J. C., Ardila Arias, A. N., & Reyes Calle, J. (2014). EVALUACIÓN DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL EN EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES GENERADAS EN LA INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA COLEGIO MAYOR DE ANTIOQUIA, COLOMBIA. *Rev. Int. Contam. Ambie. 30 (3) 275-283*, 275- 283.
Aguilar Romero, M., Colin Cruz, A., Sanchez Salina, E., & Ortiz Hernandez, M. (2009). TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES POR UN SISTEMA PILOTO DE

HUMEDALES ARTIFICIALES: EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE LA CARGA ORGÁNICA. *Rev. Int. Contam. Ambient. 25 (3) 157-167*, 157- 167.

Climate Data. (s.f.). Obtenido de https://es.climate-data.org/america-del-sur/colombia/cundinamarca/tocancipa-45570/

Delgadillo López, A., González Ramírez, C., Prieto García, F., Villagómez Ibarra, J., & Acevedo Sandoval, O. (2011, Enero 10). *Scielo*. Obtenido de Tropical and subtropical agroecosystems: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-04622011000200002

Lopez Lafuente, A. (2008). Bioremediación y fitorremediación en suelos contaminados. *Anales de la Real Academia Nacional de Farmacia*, 79-101. Obtenido de https://www.analesranf.com/index.php/mono/article/viewFile/598/615

Lafuente, A. L. (2008). Bioremediación y fitorremediación en suelos contaminados. *Anales de la Real Academia Nacional de Farmacia* , 70-101.

Bustos Velazco, P., & Segura M., C. (2005). *INCIDENCIA DE SALMONELLA (Salmonella ssp) Y E. COLI EN TRES GRANJAS PORCICOLAS UBICADAS EN LOS MUNICIPIOS DE FÓMEQUE Y SIBATE*. Bogotá: Universidad de La Salle.

Rivera Usme, J. (2011). *Relación entre la composición y biomasa de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos y las variables físicas y químicas en el humedal Jaboque*. Bogotá-Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Ramsar. (2014). *RAMSAR*. Obtenido de RAMSAR: https://www.ramsar.org

Grupo nación. (2010, Abril 16). Aguas recreativas. Obtenido de https://www.nacion.com/archivo/aguas-recreativas/CHP5KPVTWFEJFPY3RYCALA5VHM/story/

Superficiales, W. M.-A. (2016, Agosto 22). *Arcgis*. Obtenido de https://www.arcgis.com/home/item.html?id=337de1a259ad4e1abad811c0d6188c1a

López., S. (2017). *Calidad del agua para usos recreativos desde las perspectivas de la seguridad e higiene laboral y la salud pública. Estudio de caso.* Palermo: Universidad de la Defensa Argentina.

MinAmbiente. (2010, Octubre 25). Decreto 3930 de 2010. Bogotá, Colombia.

MinAmbiente. (2007, Junio 22). Resolución 2115 de 2007. Bogotá, Colombia.

Mercado, V. H. (2010-1). *Construcción y Mejoramiento de la Carretera.* Taratopo, Perú.: Universidad Nacional de San Martín.

Ramos, M. R. (2017). Efecto de la secuencia AOA en la eliminación de materia orgánica, fósforo y nitrógenos en un SBR modificado a escala de laboratorio. *Scielo.*

Mifsut, I. J. (2009, Agosto 11). *Biodiversidad mexicana*. Obtenido de http://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/quees.html

Alfonso, C. A. (2009). El hábitat: definición, dimensiones y escalas de evaluación para la fauna silvestre. En *Fauna silvestre de México: uso, manejo y legislación* (págs. 285-313).

JBN. (2019, Septiembre 5). *Jardín Botánico de Bogotá*. Obtenido de http://www.jbb.gov.co/index.php/generalidades/humedales-en-bogota

MinAmbiente. (2003, Octubre 30). Decreto 3100 de 2003. Bogotá, Colombia.

Peña Salamanca , E., Madera Parra, C. A., Sanchez, J. M., & Medina Vasquez, J. (Diciembre 2013). *Bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de*

biorremediación: caso Helicona psittacorum (heliconiaceae). Cali, Valle del Cauca, Colombia.: Revista academica colombiana de ciencias volumen XXXVII, número 145.

Arroyave García, M. D. (2004). LA LENTEJA DE AGUA (Lemna minor L.): UNA PLANTA ACUÁTICA PROMISORIA. *Revista EIA, ISSN 1794-1237*, p. 33-38.

López Núñez, R. A. (2004, Julio). Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. México.

López Núñez, R. A. (2004). *Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones.*

Carolina Miguel, i. (2012, Noviembre 27). Los humedales artificiales. Pamplona, España.

Solic, M. y. (1992). *Separate and combined effects of solar radiation, temperature, salinity, and pH on the survival of faecal coliforms in seawater.* Marine Pollution Bulletin.

Mayo Robson, A. W. (2004). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C.* Waternet.