

ANÁLISIS DE LA EFECTIVIDAD DE SISTEMAS DE HUMEDALES ARTIFICIALES
CONSTRUIDOS COMO TECNOLOGÍA APROPIADA EN LA ORINOQUIA
COLOMBIANA PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES CASO DE
ESTUDIO:
“LA TOPOCHERA LLANERA”



VANESSA BUITRAGO FERNÁNDEZ
ALEJANDRO FIGUEREDO RINCÓN



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
VILLAVICENCIO

2024

ANÁLISIS DE LA EFECTIVIDAD DE SISTEMAS DE HUMEDALES ARTIFICIALES
CONSTRUIDOS COMO TECNOLOGÍA APROPIADA EN LA ORINOQUIA
COLOMBIANA PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES CASO DE
ESTUDIO:
“LA TOPOCHERA LLANERA”

VANESSA BUITRAGO FERNÁNDEZ
ALEJANDRO FIGUEREDO RINCÓN

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título Ingeniero civil

Asesor
Mg. ÁNGEL ARTURO RINCÓN SUÁREZ
Magíster en Gestión Ambiental

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
VILLAVICENCIO

2024

Autoridades Académicas

P. Álvaro José ARANGO RESTREPO, O. P.

Rector General

P. Mauricio Antonio CORTÉS GALLEGO, O. P.

Vicerrector Académico General

P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O. P.

Rector Seccional Villavicencio

P. Adrián Mauricio GARCÍA PEÑARANDA, O. P.

Vicerrector Académico Seccional Villavicencio

Mg. Julieth Andrea SIERRA TOBÓN

Secretaria de División Seccional Villavicencio

Mg. LUIS FERNANDO DIAZ CRUZ, Mg

Decano de la Facultad de Ingeniería civil

Dedicatoria

Este proyecto va dedicado a nuestras familias, por su amor y apoyo incondicional en cada etapa de este viaje académico, gracias por creer en nosotros y por motivarnos a alcanzar nuestras metas. A nuestros profesores y mentores, cuya guía y conocimiento han sido fundamentales en nuestra formación como ingenieros civiles, su compromiso con nuestra formación ha dejado una huella indeleble en nuestras vidas y carreras. A todos los profesionales del campo de la ingeniería que trabajan sin descanso para mejorar la infraestructura y el medio ambiente que, a través de su trabajo, nos han inspirado para buscar soluciones innovadoras y sostenibles en el tratamiento de aguas residuales. Esta tesis es un homenaje a su arduo trabajo y a la esperanza de un mundo mejor a través de la ingeniería.

Contenido

	Pág.
Resumen	10
Abstract.....	12
Glosario	14
Introducción.....	15
1. Formulación del problema.....	16
2. Objetivos	18
2.1. Objetivo general.....	18
2.2. Objetivos específicos	18
3. Justificación.....	19
4. Alcance.....	21
5. Estado de arte y marco teórico	22
5.1. Estado de arte.....	22
5.2. Marco teórico	25
5.2.1 Mecanismos de remoción de los principales contaminantes en humedales artificiales.....	26
5.2.2 Contaminantes importantes de interés en el tratamiento de aguas residuales	27
5.2.3 Parámetros químicos y físicos en el tratamiento de aguas residuales.....	28
5.3. Marco conceptual.....	30
5.3.1 Tipos de humedales.....	30
5.4. Marco legal	36
6. Metodología.....	38
6.1. Etapa preliminar: Revisión bibliográfica	39
6.2. Etapa 1: Localización de la zona de estudio	39
6.3. Etapa 2: Selección de especies de la región que se adapten al prototipo.....	40
6.4. Etapa 3: Definición del prototipo.....	45
6.4.1 Materiales.....	45
6.4.1.1 Diseño del humedal.....	46
6.4.2 Medio filtrante	46

6.4.3	Volumen total de agua en la celda	48
6.5.	Etapa 4: Construcción del prototipo de humedal artificial	49
6.5.1	Creación del vivero	49
6.5.2	Construcción del prototipo del humedal	51
6.6.	Etapa 5: Funcionamiento u operación del humedal construido	54
6.7.	Etapa 6: Toma de muestras en la entrada y salida del agua del humedal	55
7.	Resultados y análisis de resultados	58
7.1.	Adaptación y crecimiento de las plantas.....	58
7.2.	Cálculo de la carga contaminante (CC)	59
7.3.	Influencia del pH.....	61
7.4.	Comparación de porcentajes de remoción de Demanda Bioquímica de (Oxígeno DBO5).....	62
7.4.1	Cálculo del porcentaje de remoción DBO5	62
7.4.2	Según la Reglamentación Técnica del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS).....	63
7.4.3	Según el decreto 1076 de 2015 Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.....	64
7.4.4	Comparación ilustrativa con la resolución 699 de 2021 - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	65
7.5.	Comparación de porcentajes de remoción de Demanda Química de Oxígeno (DQO)	65
7.5.1	Cálculo del porcentaje de remoción DBO5	66
7.5.2	Comparación ilustrativa con la resolución 699 de 2021 - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	67
7.5.3	Según la Reglamentación Técnica del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS).....	68
7.6.	Fosforo total	68
7.6.1	Cálculo del porcentaje de remoción de fosforo total	69
7.6.2	Comparación ilustrativa con la resolución 699 de 2021 - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	70
7.6.3	Según la Reglamentación Técnica del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS).....	71
7.7.	Grasas y aceites.....	71

7.7.1	Cálculo del porcentaje de remoción grasas y aceites.....	72
7.7.2	Comparación ilustrativa con la resolución 699 de 2021 - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	73
7.8.	Nitrógeno Total Kjeldhal (NTK)	74
7.8.1	Cálculo del porcentaje de remoción de Nitrógeno Total Kjeldhal.	74
7.8.2	Comparación ilustrativa con la resolución 699 de 2021 - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	76
7.9.	Sólidos Suspendidos Totales (SST).....	76
7.9.1	Cálculo del porcentaje de remoción de Suspendidos Totales (SST)	77
7.9.2	Comparación ilustrativa con la resolución 699 de 2021 - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	78
7.10.	Surfactantes (Tensoactivos – detergentes).....	79
7.10.1	Comparación ilustrativa con la resolución 699 de 2021 - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.....	79
7.11.	Coliformes Totales.....	80
7.12.	Escherichia Coli	82
8.	Conclusiones	83
9.	Recomendaciones.....	85
10.	Referencias bibliográficas.....	86

Lista de tablas

Tabla 1. Cargas contaminantes (kg/d)	10
Tabla 2. Polluting loads (kg/d).....	12
Tabla 3. Estado del arte.....	22
Tabla 4. Normatividad	36
Tabla 5. Materiales y cantidades que se utilizaron	45
Tabla 6. Parámetros a analizar de las muestras.....	56
Tabla 7. Cargas contaminantes (Kg/d).....	60
Tabla 8. Resultados obtenidos de pH.....	61
Tabla 9. Resultados de DBO5 en la entrada y salida de humedales	62
Tabla 10. Comparación de resultados con la normatividad para vertimientos a cuerpos de agua	64
Tabla 11. Comparación de resultados DBO5 con la resolución 699 de 2021	65
Tabla 12. Resultados DQO en la entrada y salida de los humedales.....	66
Tabla 13. Comparación de resultados DQO con la resolución 699 de 2021.	68
Tabla 14. Resultados de fosforo total en la entrada y salida de los humedales	69
Tabla 15. Comparación de resultados fosforo total con la resolución 699 de 2021	71
Tabla 16. Resultados de grasas y aceites en la entrada y salida de los humedales	72
Tabla 17. Comparación de resultados de remoción grasas y aceites con la resolución 699 de 2021	73
Tabla 18. Resultados de fosforo total en la entrada y salida de los humedales	74
Tabla 19. Comparación de resultados de nitrogeno total kjeldhal con la resolución 699 de 2021	76
Tabla 20. Resultados de SST en la entrada y salida de los humedales	77
Tabla 21. Comparación de resultados SST con la resolución 699 de 2021	78
Tabla 22. Resultados de surfactantes en la entrada y salida de los humedales.....	79
Tabla 23. Comparación de resultados surfactantes con la resolución 699 de 2021.....	80
Tabla 24. Resultados de Coliformes Totales en la entrada y salida de los humedales	80
Tabla 25. Resultados de Escherichia Coli en la entrada y salida de los humedales	82

Lista de figuras

Figura 1. Árbol de problemas	16
Figura 2. Mecanismos de remoción de los principales contaminantes en humedales artificiales.	26
Figura 3. Humedal artificial de flujo superficial.....	31
Figura 4. Humedal artificial de flujo subsuperficial	31
Figura 5. Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal, vista corte a sección.....	32
Figura 6. Humedal artificial de flujo subsuperficial vertical, vista corte a sección.....	35
Figura 7. Etapas del proyecto.....	38
Figura 8. Ubicación del área donde se implementó el prototipo	40
Figura 9. Bore (Colocasia Esculenta)	42
Figura 10. Topocho (Musa paradisiaca)	43
Figura 11. Heliconia (Heliconia psittacorum)	44
Figura 12. Planos prototipo humedal artificial de flujo subsupereficial horizontal.....	49
Figura 13. Traspaso de plantas a bolsas de polietileno	50
Figura 14. Vivero de Heliconia psittacorum.....	51
Figura 15. Dimensiones del humedal artificial	51
Figura 16. Dimensiones del humedal artificial	52
Figura 17. Instalación de la tubería, sistemas de distribución y recogida.....	54
Figura 18. Humedal Colmatado.....	55
Figura 19. Toma de muestras.....	57
Figura 20. Crecimiento de las plantas.....	59
Figura 21. Grafica de comparación de porcentajes de remoción DBO5 en los tratamientos	63
Figura 22. Grafica de comparación de porcentajes de remoción DQO en los tratamientos	67
Figura 23. Grafica de comparación de porcentajes de remoción DBO5 en los tratamientos	70
Figura 24. Grafica de comparación de porcentajes de remoción grasas y aceites en los tratamientos	72
Figura 25. Grafica de comparación de porcentajes de remoción Nitrógeno Total Kjeldhal en los tratamientos.....	75
Figura 26. Grafica de comparación de porcentajes de remoción SST en los tratamientos.....	77
Figura 27. Grafica de comparación de porcentajes de coliformes Totales en los tratamientos....	81
Figura 28. Grafica de comparación de porcentajes de Escherichia Coli en los tratamientos.	82

Resumen

La presente tesis aborda el análisis de la efectividad de un sistema de humedal artificial construido como una tecnología apropiada para la depuración de aguas residuales en la región de la Orinoquía colombiana, centrada en el caso de estudio de “La Topochera Llanera”. Desde esa perspectiva, tres especies vegetales fueron evaluadas de acuerdo con su capacidad de eliminación de contaminantes clave, incluidos la materia orgánica, los nutrientes y los patógenos. En este sentido, los resultados demostraron que la construcción de humedales artificiales es una solución efectiva y sostenible para el tratamiento de aguas residuales en la región, donde las condiciones ambientales y socioeconómicas exigen tecnologías de bajo costo. Sin embargo, al mismo tiempo, la selección y combinación eficientes de plantas específicas deben implementarse y monitorearse a largo plazo para lograr el cumplimiento del tratamiento según los estándares de calidad del agua. En este contexto, la metodología de este proyecto consistió en una investigación de campo experimental que no solo contribuye al conocimiento de los humedales artificiales en la región de la Orinoquía, sino que también proporciona recomendaciones prácticas para la implementación y mejora de tales sistemas en un contexto similar.

Los resultados obtenidos mostraron que los humedales lograron eliminar contaminantes de manera efectiva, se observa una reducción drástica en todas las categorías, dando como resultados los siguientes porcentajes:

Tabla 1. Cargas contaminantes (kg/d)

	TOPOCHO		HELICONIA		COLOCASIA	
	CARGA (Kg/Día)					
	ENTRADA	SALIDA	ENTRADA	SALIDA	ENTRADA	SALIDA
D.B.O-5	25,71	0,38	24,33	0,28	19,2	0,83
DQO	37,54	0,95	46,87	0,53	71,53	1,53
GRASAS Y ACEITES	51,82	0,01	18,02	0,01	20,76	0,03
SÓLIDOS SUSPENDIDOS (Carga – Kg/ día)	33,19	0,10	22,64	0,06	26,69	0,15

Los resultados obtenidos de los humedales artificiales son significativos, lo que los posiciona como una opción viable para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Esto sugiere su posible implementación futura como un sistema complementario.

Palabras Clave: humedales artificiales, remoción de contaminantes, efectividad, depuración de aguas residuales, calidad del agua, fitorremediación, fitodegradación.

Abstract

The present thesis addresses the analysis of the effectiveness of an artificial wetland system built as an appropriate technology for wastewater treatment in the Orinoquía region of Colombia, focused on the case study of "La Topochera Llanera." From that perspective, three plant species were evaluated according to their ability to remove key contaminants, including organic matter, nutrients, and pathogens. In this regard, the results demonstrated that the construction of artificial wetlands is an effective and sustainable solution for wastewater treatment in the region, where environmental and socioeconomic conditions demand low-cost technologies and high resource availability. However, at the same time, the efficient selection and combination of specific plants must be implemented and monitored in the long term to achieve compliance with treatment according to water quality standards. In this context, the methodology of this project consisted of an experimental field investigation that not only contributes to the knowledge of artificial wetlands in the Orinoquía region but also provides practical recommendations for the implementation and improvement of such systems in a similar context. The results obtained showed that the wetlands were able to effectively remove contaminants, with a drastic reduction observed in all categories, yielding the following percentages:

Tabla 2. Polluting loads (kg/d)

	MUSA X PARADISIACA		HELICONIA		COLOCASIA	
	BURDEN (Kg/Day)					
	ENTRANCE	EXIT	ENTRANCE	EXIT	ENTRANCE	EXIT
D.B.O-5	25,71	0,38	24,33	0,28	19,2	0,83
DQO	37,54	0,95	46,87	0,53	71,53	1,53
FATS AND OILS	51,82	0,01	18,02	0,01	20,76	0,03
SUSPENDED SOLIDS (Burden – Kg/ day)	33,19	0,10	22,64	0,06	26,69	0,15

Fuente propia

The results obtained from artificial wetlands are significant, positioning them as a viable option for the treatment of domestic wastewater. This suggests its possible future implementation as a complementary system.

Key Word- T artificial wetlands, contaminant removal, effectiveness, wastewater treatment, water quality, phytoremediation, phytodegradation.

Glosario

Humedales artificiales: Ecosistemas creados, diseñados y contruidos por el ser humano para replicar las funciones de un humedal natural, con el fin de depurar las aguas residuales. *Adaptado de (Bolaños, 2017)*

Fitorremediación: Proceso biológico que utiliza plantas para eliminar, degradar o contener contaminantes en el suelo y el agua. Es una técnica sostenible y de bajo costo para la rehabilitación de ecosistemas contaminados. *Adaptado de (Nadeem Iqbal, 2019)*

Depuración de aguas residuales: Es el proceso de eliminación de contaminantes y sustancias indeseadas en aguas residuales y se hacen aptas para su reutilización o vertido puro. *Adaptado de (A. Niño Iván Darío, 2018)*

Filtración natural: Es el proceso físico y biológico en el que son removidos los contaminantes en el agua a través de la acción de microorganismos con materiales naturales como el lecho filtrante y las plantas. *Adaptado de (Barceló Quintal Icela Dagmar, 2019)*

Topochera llanera: Se refiere a un ecosistema particular que se forma por la acumulación de especies de plantas que se adaptan a condiciones húmedas como el opocho (*Musa x paradisiaca*), heliconias (*Heliconia psittacorum*.) y bore (*Colocasia esculenta*) en un humedal natural. Este conjunto de vegetación no solo contribuye a la biodiversidad del área, sino que también desempeña un papel crucial en la regulación del agua, la filtración de contaminantes y la provisión de hábitat para diversas especies. La interacción entre estas plantas favorece un entorno resiliente y dinámico, donde sus raíces ayudan a estabilizar el suelo y a mejorar la calidad del agua, creando un micro ecosistema que promueve la salud ambiental en la región de la Orinoquía.

Biodiversidad: Diversidad de especies en un ecosistema, que contribuye al funcionamiento de los humedales. *Adaptado de (Irama Núñez, 2003)*

Parámetros de calidad de agua: Indicadores de medición del agua, como pH, turbidez, concentración de nutrientes y patógenos. *Adaptado de (Maria del Carmen Zuñiga, 2009)*

Impacto ambiental: Efecto negativo o positivo que una actividad o proyecto puede tener sobre el medio ambiente. *Adaptado de (espinoza, 2001)*

Aguas grises: Aguas residuales provenientes de actividades domésticas (como lavado y duchas) que pueden ser tratadas en humedales artificiales.

Introducción

En países en desarrollo como Colombia, a razón del crecimiento demográfico, los sistemas de producción están en constante crecimiento afectando el ámbito ambiental, por motivo de que no se toman las medidas de mitigación de los residuos generados en estas actividades y la falta de una institucionalidad que controle el cumplimiento de las normas, que garantice el adecuado tratamiento de aguas servidas a todas las comunidades, limita el aprovechamiento hídrico y genera degradación de los diversos ecosistemas, provocando afectaciones a la salud.

Los humedales artificiales desempeñan un papel fundamental en la conservación de la biodiversidad, el ciclo del agua y la mitigación de los efectos del cambio climático. En el contexto de las vastas llanuras, donde la disponibilidad de agua y la biodiversidad de humedales naturales han disminuido considerablemente debido a la expansión agrícola y el desarrollo urbano, la implementación de humedales artificiales con especies de plantas nativas emerge como una estrategia esencial para restablecer y conservar estos ecosistemas críticos.

Los humedales artificiales han demostrado ser eficientes en la remediación de ARDs, los cuales remueven principalmente la DBO, sólidos suspendidos totales (SST), compuestos nitrogenados y fosfatados, a través de los diferentes procesos de fitorremediación. (Beascochea, 2009).

En esta investigación analizaremos el comportamiento de un prototipo frente a la eficiencia de remoción de carga contaminante en aguas residuales domésticas, mediante la fitorremediación ejercida por las diferentes especies vegetales asociada a la actividad de microorganismos, que tienen la capacidad de remover algunos minerales, material orgánico y nutrientes, además, se analizarán los desafíos y las barreras para la implementación exitosa de estos humedales, y se propondrán recomendaciones para su gestión y mantenimiento a largo plazo.

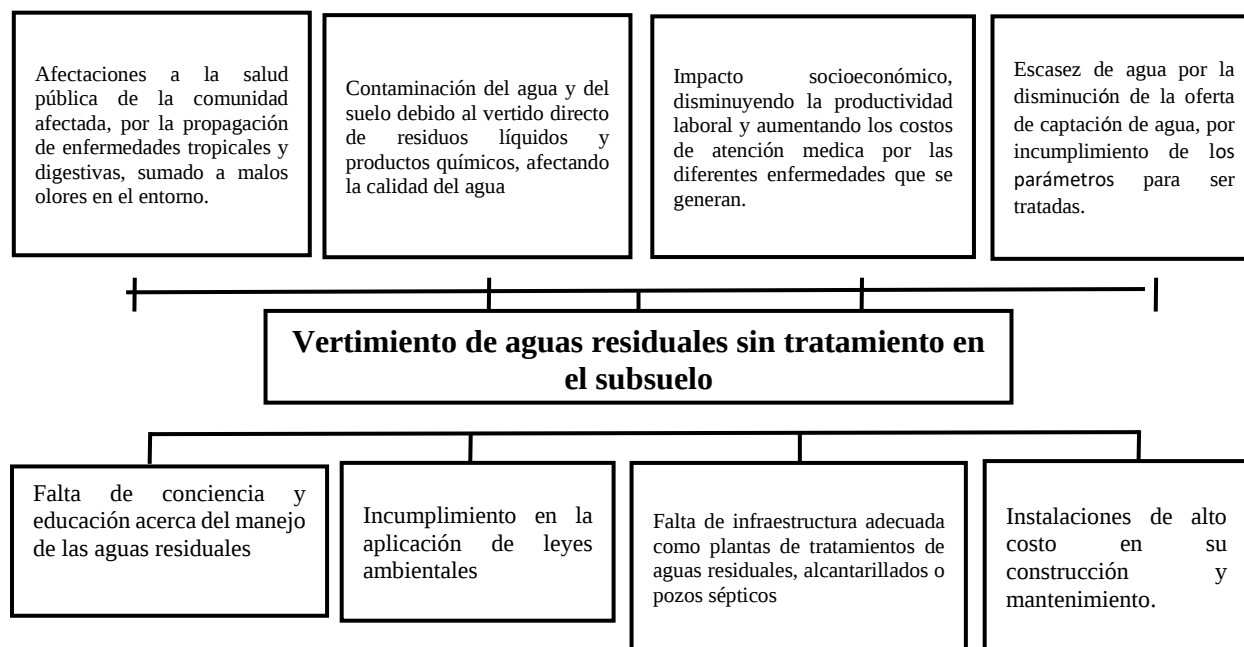
1. Formulación del problema

El vertimiento de aguas residuales tiene su origen en comunidades apartadas, donde el acceso a servicios públicos, como el saneamiento básico, se ve restringido. Esta problemática afecta a sectores de la economía, la sociedad y el medio ambiente, los cuales tienen en común un factor: la salud pública.

Las muestras que serán objeto de estudio están compuestas por aguas provenientes de lavamanos, ducha y lavadero. Por lo tanto, la presencia de restos orgánicos de comida, residuos vegetales, animales, grasas, aceites, entre otros.

¿A través de la instalación de un prototipo de humedales artificiales con especies vegetales típicas de la Orinoquia colombiana se logra reducir la carga contaminante de los vertimientos de aguas residuales domésticas en el subsuelo?

Figura 1. Árbol de problemas



La falta de tratamiento adecuado de aguas residuales domésticas es un problema crítico en muchas regiones, incluyendo la Orinoquía colombiana. Este déficit de tratamiento no solo contribuye a la contaminación de los ecosistemas locales, sino que también genera serias afectaciones a la salud humana. (Nariño, 2024)

Las aguas residuales contienen contaminantes orgánicos e inorgánicos que, al ser vertidos sin tratamiento, afectan la calidad del agua de ríos y cuerpos de agua cercanos. Esto puede llevar a:

- Eutrofización: El exceso de nutrientes, como nitrógeno y fósforo, promueve el crecimiento descontrolado de algas, lo que reduce el oxígeno en el agua y afecta a la fauna acuática.
- Pérdida de biodiversidad: La contaminación puede eliminar especies sensibles y alterar las dinámicas ecológicas, afectando la flora y fauna local.

Alteración del ciclo del agua: La introducción de contaminantes puede alterar la composición química del agua, afectando su potabilidad y los ecosistemas asociados.

(Orellana, 2005)

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Analizar el comportamiento de un prototipo DE HUMEDAL CONSTRUIDO frente a la eficiencia de remoción de carga contaminante en aguas residuales domésticas con diferentes especies vegetales típicas de la Orinoquía, que son las que se encuentran en la “TOPOCHERA LLANERA”.

2.2. Objetivos específicos

- Identificar y determinar la capacidad de remoción de contaminación de cada una de las especies seleccionadas y comparar entre ellas.
- Implementar el prototipo de humedal artificial que permita la remoción de agentes contaminantes, de acuerdo con los parámetros DBO, DQO y sus fracciones nitrógeno y fosforo.
- analizar los resultados y determinar si la toposchera llanera representa una posibilidad efectiva de tratamiento de aguas residuales domesticas para la región de la Orinoquia.

3. Justificación

Los humedales artificiales que también se conocen como sistemas de tratamiento de humedales o sistemas de humedales contruidos, son estructuras creadas para copiar las funciones de los humedales naturales en el tratamiento y purificación del agua, con estos sistemas se pueden tratar aguas residuales, aguas pluviales, o cualquier otro tipo de agua contaminada, siendo esta una solución de bajo costo. *Adaptado de* (hidropluviales, 2021)

Determinar los ecoeficientes de remoción de carga contaminante en humedales artificiales con especies como Heliconia, Colocasia y Musa x paradisiaca es crucial para evaluar la efectividad de estas plantas en el tratamiento de aguas residuales. Además, proporciona datos que facilitan la selección de las especies más adecuadas según el tipo de contaminantes presentes, contribuyendo a la optimización de los sistemas de tratamiento. De este modo, se puede demostrar cómo estos humedales artificiales no solo mejoran la calidad del agua, sino que también representan una solución ecológica, económica y de bajo impacto para enfrentar la contaminación del agua en diversas regiones. (Irma Zitácuaro-Contreras¹, 2022)

Un humedal artificial consta de una secuencia de componentes que reproducen los procesos naturales de filtración y depuración del agua. En el momento que el agua fluye a través del sistema, se produce una serie de reacciones y procesos biológicos, como la adsorción, la sedimentación, la eliminación de materia orgánica y la actividad microbiana, el cual ayuda a eliminar los contaminantes presentes en el agua, como nutrientes, sedimentos, metales pesados y compuestos orgánicos. Para producir estas reacciones y procesos biológicos se desarrolla un diseño hidráulico y biológico en el que se incluyen diferentes especies de plantas que absorben estas partículas contaminantes (bravo, 2021).

En Colombia en la región de la Orinoquia abundan varias especies de plantas aptas para la remoción de carga contaminante orgánica, una de ellas es la Heliconia psittacorum también conocida como ave del paraíso está presente generalmente en el trópico brindándoles la abundancia de agua que determinan su frescura, la mayoría son nativas de zonas húmedas de altitud media que oscila entre los 500 a 1000m de las regiones intertropicales de américa, se cultivan en áreas con altas temperaturas, abundantes precipitaciones y en lugares donde exista buena humedad edáfica. El clima ideal para el cultivo de esta especie de planta es donde exista bastante precipitación a lo largo del año y que la temperatura oscile entre 18°C y 34°C (Jerez, 2007). Estudios han revelado

efectos positivos de esta especie en el proceso de biorremediación para la depuración de aguas residuales y a su vez el buen comportamiento de la misma en los humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales gracias a que presenta características de aclimatación adecuadas en la región, entre estas características hablamos de la capacidad de eliminación de DBO, DQO Y SST, de su capacidad para acumular metales pesados y de su rápido crecimiento y desarrollo, razones por las que se convierte en una especie atractiva para su uso en los humedales artificiales (Peña-Salamanca Enrique J, 2013).

Otra especie que abunda en la región es la *Colocasia Esculenta* llamada comúnmente Bore, es una planta herbácea, sus hojas son grandes en forma de ovalo, corazón o flecha y su tallo se encuentra en la parte subterránea, es una planta de muy rápido crecimiento que puede alcanzar una altura hasta de 1.5 m, tolera altas temperaturas entre 20°C a 35°C, también tolera bajas temperaturas, condiciones de sequía y de salinidad parcial, esta se adapta mejor a lugares tropicales con precipitaciones anuales de 1500 – 2000 mm, pero también tiene capacidad para adaptarse a variedades de suelos, lo que la hace una planta muy resistente, razón por la que se desarrolla bien en los humedales naturales (Acevedo, 2013). Existen otras especies como la *musa paradisiaca* conocida normalmente como topocho, *Alpinia Purpurata*, *Heliconia bihai* y muchas más, que son aptas para la remoción de carga contaminante y se adaptan bien en el uso de humedales artificiales.

Villanueva, Casanare tiene condiciones meteorológicas aptas para el desarrollo adecuado de las especies de plantas mencionadas anteriormente en humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal, gracias a que cuenta con una temperatura promedio entre 20°C a 32°C. Es de gran importancia utilizar estas especies ornamentales en humedales artificiales ya que no solo se beneficia la comunidad evitando malos olores, reduciendo los riesgos de contaminación de alimentos y cuidando las aguas circundantes, sino que también contribuye a la mejora del paisaje, a la polinización de las plantas cuidando la biodiversidad del sector.

4. Alcance

El alcance de este estudio se centra en la evaluación del comportamiento de un prototipo de humedales artificiales con diferentes especies vegetales en la depuración de aguas residuales domésticas en la vereda Leche Miel del municipio de Villanueva, Casanare. Se buscará determinar la eficiencia de remoción de carga contaminante, centrándose en parámetros clave como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO), así como en las fracciones de nitrógeno y fósforo. El estudio incluirá la identificación de especies vegetales autóctonas de la región de la Orinoquia con capacidad de adaptación a las condiciones tropicales y su posterior implementación en el prototipo de humedales artificiales. Se compararán los porcentajes de remoción de agentes contaminantes entre las diferentes especies vegetales seleccionadas. Además, se analizará el impacto de factores como el tiempo de retención hidráulico y la disponibilidad de nutrientes en el sustrato en el rendimiento del prototipo.

El alcance del estudio también contempla la evaluación de posibles limitaciones y desafíos asociados con la construcción y operación de los humedales artificiales, así como la propuesta de recomendaciones para su optimización y aplicación práctica en la región.

5. Estado de arte y marco teórico

5.1. Estado de arte

Tabla 3. Estado del arte

Año	Autor	Título	Proyecto	Objetivo	Conclusión
2003	Carlos A. Arias I., Hans Brix	Humedales Artificiales para el tratamiento de aguas residuales	Artículo	Estudio específico sobre la eficacia, beneficios y las aplicaciones de los humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales.	Se puede afirmar que los humedales artificiales son una solución razonable para el tratamiento de aguas residuales, deben ajustarse a las condiciones locales, usar material vegetal autóctono y se construyan de acuerdo con las recomendaciones multidisciplinarias.
2006	Yocum D.	Manual de diseño: Humedal construido para el Tratamiento de las aguas grises por Biofiltración	Artículo	Diseño para la implementación de humedales artificiales	Obstrucción de la entrada y salida del humedal. Importante no introducir especies de plantas que son comparadas para los humedales construidos en viveros en humedales naturales. Derrames durante una tormenta pueden causar rebosamiento de los sólidos asentados hacia la superficie.
2008	Mena-Sanz J.	Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: Ventajas de los sistemas hídricos.	Artículo	Demostrar las ventajas de los humedales artificiales frente a la problemática de las aguas residuales.	Las cargas orgánicas aplicadas se encuentran entre 0.8 a 23 g DBO5 m-2 d-1 y 22.8 a 29.8 g DBO5 m-2 d-1 para humedales artificiales subsuperficiales de flujo horizontal y vertical respectivamente; obteniéndose rendimientos de eliminación entre 80-95

Tabla 3. Continuación

					%, 70-95 % para la DBO5 y SST y valores medios de 52 %, 40 % y 43 % para el nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal y fósforo total, respectivamente.
2009	Dennis Konnerup, Thammarat Koottated, Hans Brix	Tratamiento de aguas residuales domésticas en humedales artificiales tropicales de flujo subterráneo plantados con Canna y Heliconia	Artículo	El objetivo es la eliminación de todos los contaminantes, como patógenos, nutrientes, productos químicos orgánicos e inorgánicos y la protección de la salud pública mediante el control de patógenos para prevenir la transmisión de enfermedades transmitidas por el agua	Las especies ornamentales tropicales Canna y Heliconia crecen bien en sistemas CW de flujo subterráneo horizontal a base de grava alimentados con aguas residuales domésticas y, por lo tanto, pueden usarse potencialmente para mejorar la apariencia estética y, por lo tanto, la aceptación pública de los sistemas de tratamiento de aguas residuales.
2016	Molina G	Implementación de un cultivo de plátano hartón (Musa paradisiaca) en altas densidades como sistema de producción sostenible en el municipio de Cúcuta, Norte de Santander.	Tesis	Contribuir con una producción sostenible para el agro colombiano, con la implementación del cultivo de plátano hartón (Musa paradisiaca) en altas densidades	El municipio de Cúcuta corregimiento de Aguaclara cuenta con las condiciones edafoclimáticas optimas para el desarrollo y crecimiento de sistemas productivos de plátano hartón.
2018	Arce C. P. A.	Humedales artificiales: Una alternativa para tratamiento de aguas de producción.	Monografía	Definir las ventajas del uso de humedales artificiales como alternativa para el tratamiento de las aguas de producción en la industria petrolera.	En Colombia se han utilizado humedales artificiales, pero solo para tratar aguas residuales, no se ha tomado como alternativa para tratar aguas de producción.
2019	Vítor Cano, Daniele V. Vich, Diederik P.L. Rousseau, Piet N. L. Lente, Marcelo A. Nolasco	Influencia de la recirculación sobre las remociones de DQO y N-NH ₄ de los lixiviados de vertederos por humedales de tratamiento	Artículo	El objetivo de este estudio fue, por lo tanto, evaluar el desempeño de un humedal artificial de flujo horizontal subsuperficial (HF-CTW) que opera en un régimen de recirculación para	El sistema presenta una importante capacidad de remoción de contaminantes y una operación simple, bajo costo y potencial estético. Sin embargo, se necesitan estudios adicionales para identificar formas de

Tabla 3. Continuación

		construido de flujo horizontal.		la eliminación de materia orgánica (es decir, demanda química de oxígeno - DQO) y nitrógeno (como NH_4^+ -N y nitrógeno total) en lixiviados de vertederos.	aumentar la biodegradabilidad de la materia orgánica, la transferencia de oxígeno y la optimización operativa para este tipo de aguas residuales en el CTW para un mayor rendimiento del tratamiento.
2020	Ana Maria Gonzalez Omar Andres Hernandez	Evaluación de remoción de contaminantes en aguas residuales domesticas por plantas ornamentales mediante humedales flotantes en el cantón militar de Apiay, Villavicencio.	Tesis	Evaluar la capacidad de remoción de carga contaminante organica a partir de dos plantas ornamentales, para tratar aguas residuales domesticas provenientes de la comunidad del Canton Militar de Apiay, mediante humedales flotantes a escala piloto.	La especie Heliconia psittacorum demostró mejor adaptación al ARD con pretratamiento, a comparación de la especie Alpinia purpurata, ya que esta última demostró indicios, aunque mínimos, de amarillamiento en las hojas y tallos.
2022	<u>Henny, C.</u> , <u>Rohaningsih, D.</u> , <u>Susanti, E.</u> , <u>Sumi, F.</u> , <u>Waluyo, A.</u>	<u>Evaluación de Heliconia psittacorum en un Sistema de Humedales Artificiales de Flujo Horizontal (HFCW) para el Tratamiento de Aguas Residuales Textiles</u>	Articulo	Este estudio preliminar tiene como objetivo evaluar el desempeño de Heliconia psittacorum en un sistema de humedales artificiales de flujo subterráneo horizontal (HFCW) para la remediación de aguas residuales textiles.	La observación preliminar indicó que Heliconia psittacorum en el sistema HFCW mostró competencia en el tratamiento de aguas residuales textiles. La calidad del agua de las aguas residuales de color negro intenso dentro de las 11 semanas de observación mejoró sustancialmente después de ser tratada con Heliconia psittacorum en el sistema HFCW, lo que resultó en un efluente mucho más claro y limpio. El efluente contenía OD y pH más altos. Se observó una alta disminución en las concentraciones de amoníaco y TN en el efluente del sistema HFCW estudiado con eficiencia de remoción (RE) fluctuada.

Tabla 3. Continuación

2023	Muliyadi Muliyadi, Purwanto Purwanto, Sri Sumiyati, Mussadun Mussadun.	Bioacumulación de metales pesados utilizando plantas acuáticas en aguas residuales	Artículo	Conocer los hallazgos de la bioacumulación de metales pesados en plantas acuáticas al reducir los contaminantes en los desechos líquidos es el principal objetivo de este estudio.	Hallazgos interesantes muestran que hay seis tipos de plantas que pueden usarse como bioacumuladores de metales pesados en aguas residuales: Limnobium laevigatum, Salvinia auriculata, Lemna minor, Colocasia esculenta, T. latifolia y T. palustris. También se encontró que la mayoría de las investigaciones se están realizando actualmente utilizando desechos líquidos artificiales y aguas residuales naturales de plantas de tratamiento de aguas residuales y también de alcantarillado urbano. la acumulación en estas plantas fue de Zn, Pb, Cr, Ni, Cu, Fe, Mn y Cd.
------	--	---	----------	--	--

5.2. Marco teórico

En la literatura especializada, se ha observado un desplazamiento de los tratamientos convencionales hacia enfoques más ecológicos, económicos, técnicos y socialmente viables para el tratamiento de aguas residuales. Entre las alternativas más destacadas se encuentra la técnica de humedales artificiales, la cual se ha destacado por su capacidad de utilizar procesos naturales sin requerir un personal operativo constante. Estos humedales pueden clasificarse en dos tipos: de flujo superficial y de flujo subsuperficial. Los principales mecanismos involucrados en este proceso incluyen la bioconversión por bacterias facultativas y anaeróbicas presentes en todo el humedal, así como las bacterias asociadas a las raíces de las plantas, la asimilación vegetal y la adsorción en las raíces. Además, los organismos patógenos son eliminados mediante procesos de depredación, decaimiento natural y excreción de antibióticos por las raíces de las plantas (Marin-Muñoz, 2016)

Los humedales artificiales son estructuras que tienen el propósito de replicar varias de las funciones de los humedales naturales, efectuando y optimizando los procesos particulares de

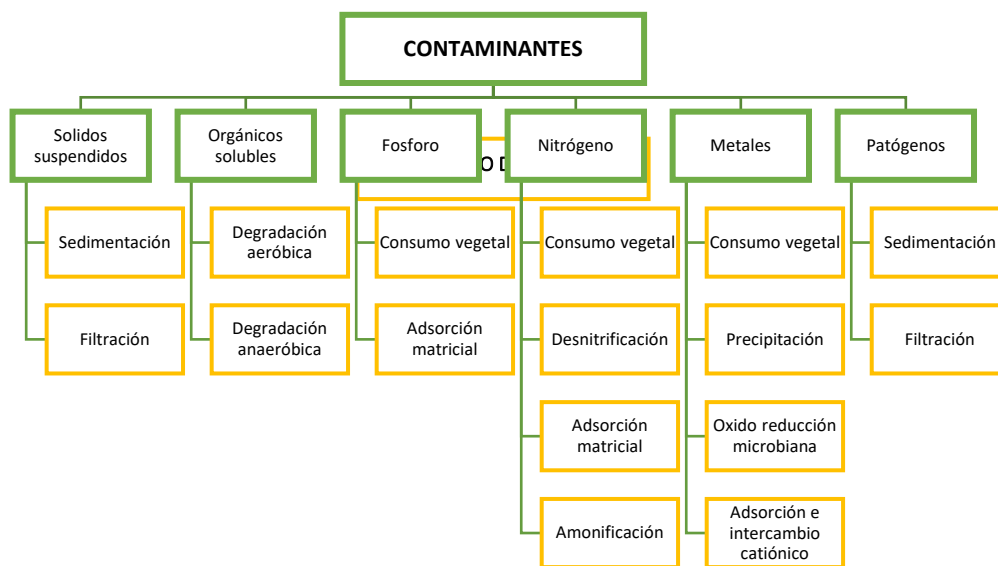
depuración de aguas que se realizan en estos cuerpos de agua. Dichas estructuras han permitido establecer formas alternativas y complementarias de tratamiento de aguas en medios controlados, donde se realizan procesos tales como: sedimentación, filtración, descomposición bacteriana y aprovechamiento de nutrientes por organismos vegetales. (EPA, 1998)

El sistema consiste en el desarrollo de un cultivo de macrófitas enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado. La acción de las macrófitas hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual afluyente es depurada progresiva y lentamente. El tratamiento de aguas residuales para depuración se lo realiza mediante sistemas que tienen tres partes principales: recogida, tratamiento y evacuación al lugar de restitución. (Gonzalez, 2004)

Además de la depuración de aguas residuales, los humedales ofrecen beneficios ambientales agregados como son: mejora de la calidad ambiental, crean y restauran nichos ecológicos, generan mejoramientos paisajísticos, contribuyen en la generación de zonas de amortiguamiento de crecidas de ríos y avenidas, son fuente de agua en procesos de reutilización de aguas residuales para riego y aportan ventajas en otras actividades de carácter lúdico y económico. (Arias)

5.2.1 Mecanismos de remoción de los principales contaminantes en humedales artificiales.

Figura 2. Mecanismos de remoción de los principales contaminantes en humedales artificiales.



Nota. Adaptado de (Joan Garcia Serrano A. C., 2008)

El funcionamiento típico de un humedal artificial inicia con el acceso del agua residual a través de diferentes mecanismos que distribuyen el volumen a tratar sobre este, para que fluya superficial o subsuperficialmente. Durante el tiempo de permanencia del agua residual en el humedal, esta experimentará filtrado, eliminación de sólidos por sedimentación, descomposición de contaminantes por acción bacteriana y de varios otros procesos de remoción (Diagrama 1) que llevarán a la degradación de materia orgánica, de nitrógeno, de fósforo, de metales pesados, patógenos, etc., hasta un nivel que permita realizar su vertido sobre otros cuerpos de agua o que el agua pueda ser reutilizada. (Joan García Serrano, 2008)

5.2.2 Contaminantes importantes de interés en el tratamiento de aguas residuales

- ✓ **Sólidos suspendidos:** Los sólidos suspendidos pueden llevar al desarrollo de depósitos de lodo y condiciones anaerobias, cuando los residuos no tratados son lanzados al ambiente acuático (Oscar Delgadillo A. C., 2010).
- ✓ **Materia orgánica biodegradable:** Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos y grasas, por lo general se mide en términos DBO Y DQO. Si es descargada sin tratamiento al medio ambiente, su estabilización biológica puede llevar al consumo de las fuentes de oxígeno natural y al desarrollo de condiciones sépticas (Oscar Delgadillo A. C., 2010).
- ✓ **Microorganismos patógenos:** Los organismos patógenos existentes en las aguas residuales pueden transmitir enfermedades (Oscar Delgadillo A. C., 2010).
- ✓ **Nutrientes:** Cuando son lanzados en el ambiente acuático, pueden llevar al crecimiento de vida acuática indeseable. Cuando son aplicados al suelo en cantidades excesivas, pueden contaminar también el agua subterránea (Oscar Delgadillo A. C., 2010).
- ✓ **Compuestos tóxicos:** Compuestos orgánicos e inorgánicos seleccionados en función de su conocimiento o sospecha de carcinogenicidad, mutanogenicidad, teratogenicidad o elevada toxicidad. Muchos de esos compuestos se encuentran en las aguas residuales (Oscar Delgadillo A. C., 2010).
- ✓ **Materia orgánica refractaria:** Esta materia orgánica tiende a resistir los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales. Ejemplos típicos incluyen detergentes, fenoles y pesticidas agrícolas (Oscar Delgadillo A. C., 2010).

- ✓ **Metales pesados:** Los metales pesados son normalmente adicionados mediante actividades humanas. Tienen una alta persistencia en el ambiente, lo que incrementa su posibilidad de acumulación y toxicidad (Oscar Delgadillo A. C., 2010).
- ✓ **Sólidos inorgánicos disueltos:** Componentes inorgánicos, como calcio, sodio y sulfato, deben ser removidos si se va a usar nuevamente el agua residual. por ser potenciales degradadores del suelo (Oscar Delgadillo A. C., 2010).

5.2.3 *Parámetros químicos y físicos en el tratamiento de aguas residuales*

- ✓ **Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)**

Cantidad de oxígeno usado en la estabilización de la materia orgánica carbonácea y nitrogenada por acción de los microorganismos en condiciones de tiempo y temperatura especificados (generalmente cinco días y 20 °C). Mide indirectamente el contenido de materia orgánica biodegradable (RAS, 2000).

- ✓ **Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

Medida de la cantidad de oxígeno requerido para oxidación química de la materia orgánica del agua residual, usando como oxidantes sales inorgánicas de permanganato o dicromato en un ambiente ácido y a altas temperaturas (RAS, 2000).

- ✓ **Sólidos Suspendidos Totales (SST)**

Estos sólidos son material orgánico particulado que proviene de material coloidal que se mantiene en suspensión en una cierta cantidad de agua y a su vez causan turbidez; son medidos gravimétricamente después de la filtración y secado a 105 °C. Los SST que ingresan a los humedales artificiales, son degradados biológicamente mediante la actividad microbiana asociada al sustrato y a la vegetación (ORJUELA, 2020).

- ✓ **Fosfatos (P- [PO] _4)**

La presencia de los fosfatos dentro de los ecosistemas acuáticos, son calificados como contaminantes debido a que contribuyen a la proliferación de algas y plantas acuáticas, que a su vez aportan a la eutrofización y a la degradación microbiana, aumentando la DBO, afectando nocivamente la fauna y al cuerpo de agua (López & Echeverri, 2020). Los fosfatos son la formación de sales que componen el ácido fosfórico y se pueden encontrar como ortofosfatos, polifosfatos y fosfatos orgánicos; la presencia de los anteriores de deben al uso de detergentes,

residuos de alimentos, por escorrentía proveniente de jardines con abonos minerales, y por descomposición de pesticidas a base de fósforo. La ausencia de estos compuestos limita el crecimiento de la vegetación (ORJUELA, 2020).

✓ **Nitrógeno Total Kjeldahl SM (NTK)**

Es un indicador que determina la sumatoria de las concentraciones de nitrógeno orgánico (aminoácidos, aminos y proteínas) y nitrógeno amoniacal, dentro de una muestra de agua residual. El NTK se determina por medio de una digestión con ebullición dentro de un medio ácido y un catalizador, y mide el nitrógeno capaz de ser nitrificado a nitrógeno inorgánico (nitritos, nitratos y nitrógeno gaseoso) (IDEAM, 2007), puede ser cuantificado por métodos de colorimetría, espectrofotometría, electrometría. El estudio de este parámetro es importante para indicar el grado de eutrofización en cuerpos hídricos (ORJUELA, 2020).

✓ **pH**

Es la medida de concentración del ión de hidrógeno en el agua, determina el grado de acidez o alcalinidad de una sustancia. Este parámetro tiene un rango entre 0 a 14, un valor 7 es un pH neutral, los valores inferiores a este presentan acidez y los superiores alcalinidad. El pH adecuado para la existencia de la mayoría de la vida biológica se da en rangos entre 6,5 a 8,5.

✓ **Grasas y aceites**

El análisis de grasas y aceites en agua residual puede ayudar a identificar las fuentes específicas de contaminación. Esto se debe a que cada tipo de grasa y aceite tiene una huella química única que puede utilizarse para identificar su origen. Por ejemplo, el análisis de ácidos grasos puede ayudar a identificar si las grasas y aceites provienen de fuentes animales o vegetales. (Guerra, 2023)

✓ **Surfactantes**

Los surfactantes son compuestos orgánicos presentes en casi todos los detergentes y utilizados en muchos procesos industriales. Debido a su amplio uso, a menudo entran en los sistemas de agua. Algunos tensoactivos son tóxicos para humanos, animales y ecosistemas. Otros son contaminantes ambientales graves. Por ende, muchos países han establecido límites para los tensoactivos y exigen un control y tratamiento regulares de las aguas residuales (Merck, s.f.).

✓ **Coliformes totales**

Bacterias gram negativas de forma alargada capaces de fermentar lactosa con producción de gas a la temperatura de 35 o 37°C (coliformes totales). Aquellas que tienen las mismas

propiedades a la temperatura de 44 o 44.5°C se denominan coliformes fecales. Se utilizan como indicadores de contaminación biológica. (RAS, 2000).

✓ **Escherichia Coli**

Escherichia coli (E. coli) son bacterias gram-negativo y son un tipo de bacterias coliformes fecales que se encuentran comúnmente en los intestinos de los animales y los seres humanos. (E. coli) son tan pequeños que no se pueden ver sin un microscopio, sin embargo, su crecimiento puede verse como colonias en medios de agar (como gelatina) en condiciones especiales. La mayoría de las bacterias E. coli no causan enfermedad, pero si una persona se enferma de E. coli, el sitio primario de infección es el tracto gastrointestinal y los síntomas pueden incluir náusea, vómito, diarrea y fiebre (rivera, 2014). Cada parámetro fue analizado siguiendo los métodos estándar establecidos por la normativa ambiental vigente. Los análisis fueron realizados en un laboratorio certificado, utilizando equipos y técnicas adecuadas para garantizar la precisión y confiabilidad de los resultados.

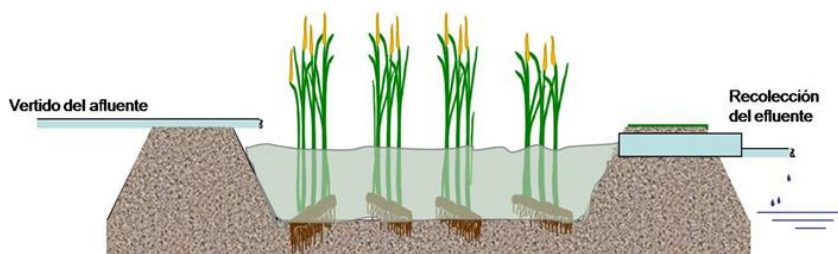
5.3. Marco conceptual

5.3.1 Tipos de humedales

Atendiendo el tipo de circulación del agua, los humedales construidos se clasifican en flujo superficial o en flujo subsuperficial

Humedales artificiales de flujo superficial: En los sistemas de flujo superficial el agua está expuesta directamente a la atmósfera y circula preferentemente a través de los tallos y hojas de las plantas. Estos tipos de humedales se pueden entender como una modificación del lagunaje natural con una profundidad de la lámina de agua entre 0,3 y 0,4 m, y con plantas. Se suelen aplicar para mejorar la calidad de efluentes que ya han sido previamente tratados en una depuradora. (Joan García Serrano, 2008)

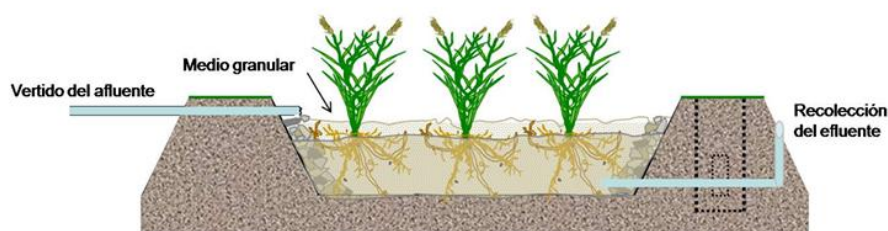
Figura 3. Humedal artificial de flujo superficial.



Nota. Adaptado de Joan García Serrano, 2008

Humedales artificiales de flujo subsuperficial: En los humedales de flujo subsuperficial la circulación del agua es de tipo subterráneo a través de un medio granular y en contacto con las raíces y rizomas de las plantas. La profundidad de la lámina de agua suele ser de entre 0,3 y 0,9 m. La biopelícula que crece adherida al medio granular y a las raíces y rizomas de las plantas tiene un papel fundamental en los procesos de descontaminación del agua. La terminología utilizada para designar a los sistemas de flujo subsuperficial es particularmente confusa. Frecuentemente se utilizan indistintamente términos como filtros de plantas, filtros verdes, biofiltros, lechos de plantas y lechos de juncos, entre otros. Puesto que estos términos también se utilizan para otros tipos de tratamientos, se recomienda al lector reconocer a estos sistemas como humedales contruidos de flujo subsuperficial. (Joan García Serrano, 2008)

Figura 4. Humedal artificial de flujo subsuperficial



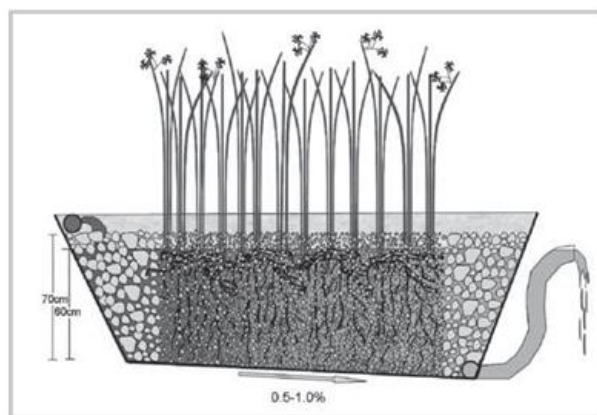
Nota. Joan García Serrano, 2008

Los humedales de flujo superficial y subsuperficial se diferencian principalmente en el movimiento y exposición del agua: en los de flujo superficial, el agua fluye sobre el sustrato y está en contacto directo con la atmósfera, favoreciendo procesos aeróbicos y volátiles, mientras que en los de flujo subsuperficial, el agua circula a través de un medio poroso debajo de la superficie,

promoviendo condiciones anaeróbicas y una mayor eliminación de patógenos. Los de flujo superficial suelen requerir más espacio y mantenimiento para la gestión de la vegetación y el agua visible, siendo ideales para áreas recreativas, mientras que los subsuperficiales ocupan menos espacio y tienen un mantenimiento más sencillo, adecuados para aplicaciones donde el espacio es limitado y se necesita una mayor eficiencia en la eliminación de contaminantes específicos.

Humedales subsuperficiales de flujo horizontal: En este tipo de sistemas el agua circula horizontalmente a través del medio granular y los rizomas y raíces de las plantas. La profundidad del agua es de entre 0,3 y 0,9 m. Se caracterizan por funcionar permanentemente inundados (el agua se encuentra entre 0,05 y 0,1 m por debajo de la superficie) y con cargas de alrededor de 6 g DBO/m²·día. Los humedales horizontales están compuestos por los siguientes elementos: estructuras de entrada del afluente, impermeabilización del fondo y laterales ya sea con láminas sintéticas o arcilla compactada, medio granular, vegetación emergente típica de zonas húmedas, y estructuras de salida regulables para controlar el nivel del agua como se muestra en la imagen 3 (Joan Garcia Serrano A. C., 2008).

Figura 5. Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal, vista corte a sección



Nota. Adaptado de: (Oscar Delgadillo A. C., 2010)

Impermeabilización: Es necesario disponer de una barrera impermeable para confinar al sistema y prevenir la contaminación de las aguas subterráneas. Dependiendo de las condiciones locales puede ser suficiente una adecuada compactación del terreno. En otros casos será necesario realizar aportaciones de arcilla o utilizar láminas sintéticas (Joan Garcia Serrano A. C., 2008).

Estructuras de entrada y salida: Los humedales son sistemas que requieren una buena repartición y recogida de las aguas para alcanzar los rendimientos estimados, es por ello que las estructuras de entrada y salida deben estar muy bien diseñadas y construidas. El agua residual procedente de los tratamientos previos se hace llegar hasta una arqueta donde el caudal se divide equitativamente y mediante diversas tuberías se vierte al lecho. Alternativamente se puede hacer llegar el agua hasta un canal con vertedero que la distribuye de forma homogénea en todo el ancho del sistema. La recogida del agua efluente se realiza con una tubería perforada asentada sobre el fondo del humedal. Esta tubería conecta con otra en forma de “L” invertida y cuya altura es regulable. Dicha estructura permite modificar el nivel de agua y a su vez drenar el humedal durante operaciones de mantenimiento (Joan Garcia Serrano A. C., 2008)

Medio granular: En las zonas de entrada y salida se colocan piedras que permiten diferenciar estas zonas de lo que es el medio granular principal. El conjunto medio granular/biopelícula/plantas debe ser considerado como el principal constituyente de los humedales. En el medio granular ocurren múltiples procesos como la retención y sedimentación de la materia en suspensión, la degradación de la materia orgánica, la transformación y asimilación de los nutrientes, y la inactivación de los microorganismos patógenos. El medio granular debe ser limpio (exento de finos), homogéneo, duro, durable y capaz de mantener su forma a largo plazo. Además, debe permitir un buen desarrollo de las plantas y de la biopelícula. Diámetros medios de alrededor de 5-8 mm ofrecen muy buenos resultados. Una característica muy importante del medio granular es su conductividad hidráulica, ya que de esta propiedad depende la cantidad de flujo de agua que puede circular a través de él. Durante el diseño debe tenerse en cuenta que la conductividad hidráulica disminuirá con el paso del tiempo (Joan Garcia Serrano A. C., 2008).

Vegetación: Las especies que se deben utilizar son macrófitos emergentes típicos de las zonas húmedas, presentan adaptaciones especiales para vivir en ambientes permanentemente anegados. Sus tejidos internos disponen de espacios vacíos que permiten el flujo de gases desde las partes aéreas hasta las subterráneas. Sus rizomas tienen una gran capacidad colonizadora. Los efectos de la vegetación sobre el funcionamiento de los humedales son:

✓ **Las raíces y rizomas proporcionan una superficie adecuada para el crecimiento de la biopelícula.** La biopelícula crece adherida a las partes subterráneas de las plantas y sobre el medio granular. Alrededor de las raíces se crean microambientes aeróbicos donde tienen lugar procesos

microbianos que usan el oxígeno, como la degradación aeróbica de la materia orgánica y la nitrificación.

✓ **Amortiguamiento de las variaciones ambientales.** Cuando las plantas están desarrolladas reducen la intensidad de la luz incidente sobre el medio granular evitándose así grandes gradientes de temperatura en profundidad que pueden afectar el proceso de depuración. En climas fríos la vegetación protege de la congelación.

✓ **Las plantas asimilan nutrientes.** Su contribución a la eliminación de nutrientes es modesta cuando se tratan aguas residuales urbanas de tipo medio (eliminan entre un 10% del N y un 20% del P). En aguas residuales diluidas su contribución es mayor (más del 50%). (Joan Garcia Serrano A. C., 2008)

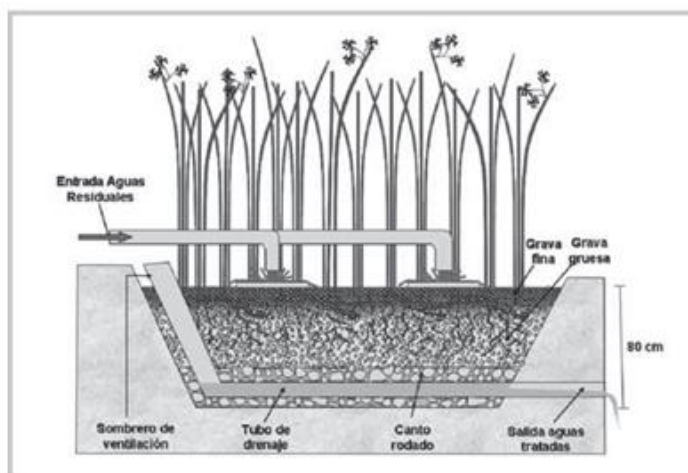
La selección de la vegetación que se va a usar en un sistema de humedales debe tener en cuenta las características de la región donde se realizará el proyecto, así como las siguientes recomendaciones:

1. Las especies deben ser colonizadoras activas, con eficaz extensión del sistema de rizomas.
2. Deben ser especies que alcancen una biomasa considerable por unidad de superficie para conseguir la máxima asimilación de nutrientes.
3. La biomasa subterránea debe poseer una gran superficie específica para potenciar el crecimiento de la biopelícula.
4. Deben disponer de un sistema eficaz de transporte de oxígeno hacia las partes subterráneas para promover la degradación aeróbica y la nitrificación.
5. Se debe tratar de especies que puedan crecer fácilmente en las condiciones ambientales del sistema proyectado.
6. Debe tratarse de especies con una elevada productividad.
7. Las especies deben tolerar los contaminantes presentes en las aguas residuales.
8. Se deben utilizar especies propias de la flora local. (Joan García Serrano A. C., 2008).

Humedales subsuperficiales de flujo vertical: Esta tipología de humedales fue desarrollada en Europa como alternativa a los humedales horizontales para producir efluentes nitrificados. En general los sistemas verticales se combinan con horizontales para que se sucedan de forma progresiva los procesos de nitrificación y desnitrificación y se consiga así eliminar nitrógeno. La circulación del agua es de tipo vertical y tiene lugar a pulsos, de manera que el medio granular no está permanentemente inundado. La profundidad del medio granular es de entre

0,5 y 0,8 m. Operan con cargas de alrededor de 20 g DBO/m²·día. Los sistemas verticales tienen una mayor capacidad de tratamiento que los horizontales (requieren de menor superficie para tratar una determinada carga orgánica). Por otra parte, son más susceptibles a la colmatación. De forma similar a los humedales horizontales, los verticales están constituidos por los siguientes elementos: estructuras de entrada del afluente, impermeabilización, medio granular, vegetación y estructuras de salida. Adicionalmente suelen incluir tuberías de aireación. Los aspectos relacionados con la impermeabilización y la vegetación son idénticos a los descritos para los sistemas horizontales en el apartado anterior (Joan Garcia Serrano A. C., 2008).

Figura 6. Humedal artificial de flujo subsuperficial vertical, vista corte a sección



Nota. Adaptado de (Oscar Delgadillo A. C., 2010)

✓ **Estructuras de entrada y salida**

Es muy importante lograr una distribución y recogida del agua uniforme en toda el área del sistema. Para la distribución se utilizan redes de tuberías dispuestas sobre la superficie, ya sea en forma radial o a lo largo del lecho. Debido al flujo discontinuo, en climas fríos se suelen colocar enterradas en el lecho entre 0,05 y 0,1 m por debajo de la superficie con el fin de evitar la congelación. La recogida del agua se realiza mediante redes de tuberías perforadas situadas sobre el fondo del lecho y a lo largo del mismo (Joan Garcia Serrano A. C., 2008).

✓ **Medio granular**

Igual que en los sistemas horizontales, el medio granular debe ser limpio, duro, durable y capaz de mantener su forma a largo plazo. En los humedales verticales el medio granular es de tipo heterogéneo ya que se disponen tres capas horizontales con distinta granulometría, la cual

aumenta con la profundidad del lecho. La capa más superficial es de arena gruesa, la intermedia de grava y la del fondo de grava gruesa. Esta disposición se adopta para que el paso del agua por el lecho no sea excesivamente rápido o lento. Tuberías de Aireación Estos elementos sirven para airear el lecho en profundidad y mejorar y favorecer así los procesos de degradación aeróbica y la nitrificación. En general, se recomienda la instalación de 1 tubería por cada 4 m² (Joan Garcia Serrano A. C., 2008).

5.4. Marco legal

Tabla 4. Normatividad

Normatividad	Descripción
Constitución Política de Colombia 1991 (Constituyente, 1991)	Artículo 8: Es obligación del Estado y de las personas proteger las riquezas culturales y naturales de la Nación. Derechos colectivos y del Ambiente. Artículo 79: Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines. Artículo 80: El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución.
Norma Técnica Colombiana ISO 5667-3 (ICONTEC, 2004)	Esta norma nos habla de los pasos fundamentales sobre las precauciones que se deben tomar para preservar y transportar muestras de agua ya sea compuesta o puntual, que por condiciones no se puede analizar en el sitio y tiene que ser transportada para analizarla en el laboratorio.
Resolución 330 de 2017 (Ministerio de Vivienda, 2017)	La Resolución reglamenta los requisitos técnicos que se deben cumplir en las etapas de diseño - construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura relacionada con los servicios públicos de acueductos, alcantarillados y de aseo. Artículo 180: Sección 3, se describen las características de humedales artificiales que deberán tener en cuenta aspectos tales como: caudal, características del afluente, tipo de vegetación que se va a emplear y evapotranspiración. El TRH generalmente está en 5 días, las profundidades para sistemas de flujo superficial de 0,30 a 0,60 m y 0,1 a 0,45 m para flujo sumergido. Se deberá realizar impermeabilización del suelo mediante una capa de arcilla o empleando geomembranas.

Tabla 4. Continuación

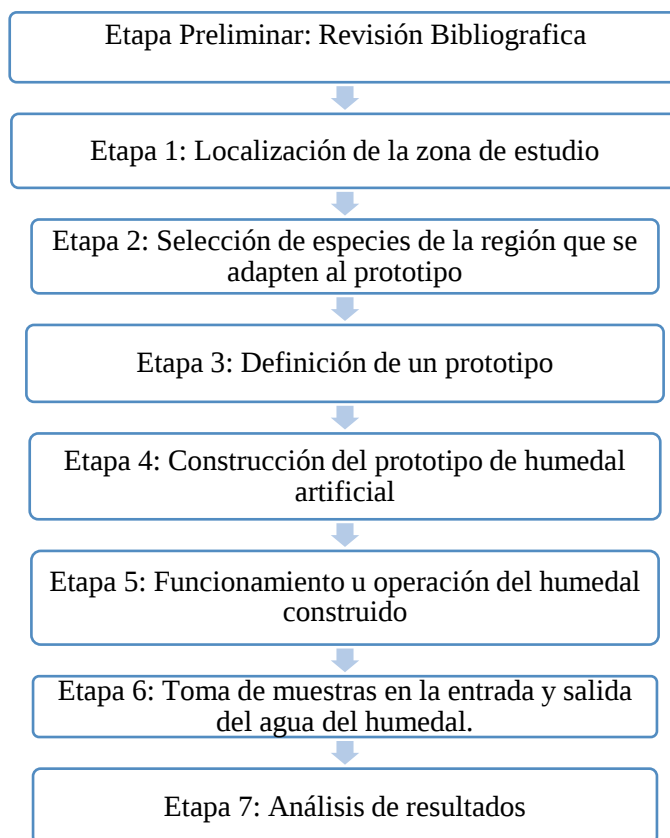
Resolución 330 de 2017 (Ministerio de Vivienda, 2017)	Artículo 180: Sección 3, se describen las características de humedales artificiales que deberán tener en cuenta aspectos tales como: caudal, características del afluente y tipo de vegetación que se va a emplear. El TRH generalmente está mínimo en 5 días, las profundidades para sistemas de flujo superficial de 0,30 a 0.60 m y 0,1 a 0,45 m para flujo sumergido. Se deberá realizar impermeabilización del suelo mediante una capa de arcilla o empleando geomembranas.
TITULO E - TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (RAS, 2000)	E.3.5.3.2 Localización: Los humedales deben localizarse aguas abajo de un tanque séptico. Para esto, debe hacerse una evaluación de las características del suelo, localización de cuerpos de agua, topografía, localización geográfica, líneas de propiedad y vegetación existente para localizar adecuadamente el humedal. E.3.5.3.2 Parámetros de diseño: El diseñador debe seleccionar una metodología de diseño que garantice el correcto funcionamiento del sistema teniendo en cuenta los siguientes criterios: • Conductividad hidráulica. • Granulometría. • Flujo sumergido para todas las condiciones de caudales
Título J. Alternativas Tecnológicas en Agua y Saneamiento para el Sector Rural del – RAS (Ministerio de Ambiente, 2010)	Propone distintas alternativas para el tratamiento de ARDs provenientes de viviendas dispersas o nucleadas, en los que se fijan los criterios básicos y las buenas prácticas de ingeniería que deben reunir los diferentes procesos involucrados en la conceptualización, diseño, implementación, construcción, supervisión, operación, mantenimiento, entre otros, con el fin de aplicarlos en tecnologías costo efectivas y sostenibles, en los que se consideran los humedales artificiales como alternativas para el tratamiento de ARDs a bajo costo.

Nota. Adaptado de (ORJUELA, 2020).

6. Metodología

En cuanto al enfoque de esta investigación se puede decir que este trabajo pretende basarse en un enfoque mixto o integrado de los enfoques cuantitativo y cualitativo, puesto que consta de una parte de investigación aplicada (cuantitativa) y otra de investigación educativa (cualitativa). Si bien el enfoque del proyecto es principalmente cualitativo, no se refiere a la definición de los parámetros fisicoquímicos del agua, sino a la identificación de las especies vegetales a analizar. En este sentido, se consideraron aquellas especies que, culturalmente, se emplean en la topochera de las fincas llaneras, así como las que, según la revisión bibliográfica, se han reportado como los mejores indicadores de remoción de contaminantes. Además, en la selección del sitio para la construcción del humedal, si bien se evaluaron diferentes opciones, estas estuvieron limitadas por las posibilidades logísticas de los autores del estudio.

Figura 7. Etapas del proyecto



6.1. Etapa preliminar: Revisión bibliográfica

En esta etapa de revisión bibliográfica de diferentes experiencias sobre el prototipo de humedales artificiales se llevó a cabo mediante una exhaustiva búsqueda y análisis de literatura relevante en bases de datos académicas como Google Scholar, Scopus y ScienceDirect y otros medios. Se seleccionaron estudios, artículos científicos, libros, manuales, tesis previas y normativas relacionadas con humedales artificiales, su diseño, funciones y aplicaciones. Los criterios de selección incluyeron la relevancia y calidad de las publicaciones, con un enfoque particular en la remoción de materia orgánica y el uso de especies vegetales específicas, como el topocho (*Musa x paradisiaca*). Esta revisión permitió identificar tanto el estado actual del conocimiento como las lagunas existentes, fundamentando así el diseño y la implementación del prototipo y destacando la necesidad de más investigaciones sobre el uso del topocho en humedales artificiales.

6.2. Etapa 1: Localización de la zona de estudio

La primera etapa del proyecto consistió en seleccionar un área adecuada dentro de los Llanos que presentara condiciones óptimas para la instalación del humedal artificial. Se consideraron factores como la disponibilidad de agua y la proximidad a fuentes de contaminación que pudieran beneficiarse del tratamiento. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el agua se considera contaminada cuando su composición o estado natural cambia hasta el punto de que ya no es apta para el fin previsto. Esto puede ocurrir debido a la presencia de químicos, materiales biológicos o condiciones físicas que cambian las propiedades originales del agua. Los contaminantes pueden provenir de diversas fuentes, como desechos industriales, aguas residuales rurales, pesticidas y fertilizantes agrícolas y patógenos. Los efectos de la contaminación del agua pueden perjudicar la salud humana, los ecosistemas y el medio ambiente. La OMS establece normas y directrices para mantener la calidad del agua y garantizar su seguridad para usos humanos, agrícolas, industriales y otros usos importantes. Proteger las fuentes de agua y tratar adecuadamente las aguas residuales son medidas importantes para prevenir la contaminación y proteger la salud pública. (Rodríguez, 2010).

Los humedales se deben situar en zonas llanas o con muy poca pendiente y que permitan a ser posible la circulación del agua por gravedad en todos los elementos de la depuradora. Las

llanuras próximas a los ríos aun cuando cumplen esta condición no son siempre adecuadas ya que pueden necesitar de diques de protección contra las inundaciones. (Serrano, 2008)

Teniendo en cuenta lo anterior, el proyecto se desarrolla en la zona rural del municipio de Villanueva, Casanare en la vereda Leche miel, en las coordenadas geográficas WGS84 N: 4°35'32" y W: 72°53'45" en una finca pesquera, la cual desempeña un papel multifuncional que incluye actividades de cocina para aproximadamente 10 personas diarias, además de la cría y venta de pollos, Estas actividades generan una cantidad significativa de aguas grises, que son las que provienen de lavabos, duchas, y actividades de cocina, y que requieren un tratamiento adecuado antes de su vertido o reutilización.

Figura 8. Ubicación del área donde se implementó el prototipo



6.3. Etapa 2: Selección de especies de la región que se adapten al prototipo

Esta etapa consiste en identificar y enumerar las especies de plantas autóctonas de la Región Orinoquia que tienen la capacidad de adaptarse a las características del trópico y a los ecosistemas inundables. La investigación se centra en la búsqueda de plantas que puedan ser

utilizadas en humedales artificiales para la remoción de contaminantes en aguas residuales domésticas.

Este objetivo es fundamental para seleccionar las especies más adecuadas que contribuyan a la eficiencia del prototipo de humedal artificial en la depuración de aguas residuales en la región. La identificación de estas especies proporcionará información valiosa para el diseño y la implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales más efectivos y sostenibles en la Región Orinoquia.

La Región Orinoquia de Colombia cuenta con una diversidad de especies vegetales autóctonas que se adaptan a las características del trópico y a los ecosistemas inundables (Vera, 2018). Algunas de las especies son:

- ✓ **Heliconia psittacorum:** También conocida como "ave del paraíso", es una planta que se encuentra comúnmente en zonas tropicales y húmedas. Tiene un desarrollo precoz y se adapta bien a lugares con altas temperaturas y abundantes precipitaciones.
- ✓ **Colocasia esculenta:** Conocida como "bore", es una planta herbácea con grandes hojas en forma de óvalo, corazón o flecha. Tiene un rápido crecimiento y tolera altas temperaturas, sequías parciales y variedades de suelos.
- ✓ **Musa x paradisiaca:** Comúnmente conocida como "topocho", es otra planta que se adapta bien a las condiciones tropicales. Tiene capacidad para la remoción de carga contaminante y se desarrolla bien en humedales artificiales.
- ✓ **Alpinia purpurata:** También llamada "flor de jengibre rojo", es una planta ornamental que se adapta a climas tropicales y puede ser útil en humedales artificiales para mejorar la calidad del agua.
- ✓ **Eichhornia crassipes:** Conocida como "camalote" o "aguape", es una planta acuática flotante que se encuentra comúnmente en aguas dulces. Tiene una alta capacidad de crecimiento y reproducción, lo que la hace útil para la fitorremediación en humedales artificiales.
- ✓ **Pontederia sagittata:** También llamada "cola de zorro", es una planta acuática que crece en aguas poco profundas. Tiene hojas en forma de flecha y produce flores de color púrpura.
- ✓ **Cyperus esculentus:** Conocida como "chufa", es una planta herbácea que crece en zonas húmedas y pantanosas. Sus tubérculos son comestibles y se pueden utilizar en la alimentación humana y animal.

✓ **Typha spp.:** También conocidas como "espadañas", son plantas acuáticas que crecen en bordes de lagos, estanques y humedales. Tienen una alta capacidad para purificar el agua al absorber contaminantes.

✓ **Nymphaea spp:** Conocidas como "nenúfares", son plantas acuáticas con flores flotantes que crecen en aguas tranquilas. Tienen un papel importante en la oxigenación del agua y en la eliminación de nutrientes.

Las anteriores son algunas de las especies de plantas autóctonas de la Región Orinoquia que podrían ser adecuadas para utilizar en humedales artificiales. En el presente proyecto se seleccionaron las plantas Bore, Topocho y Heliconia para el desarrollo de la depuración de aguas residuales domésticas a través de un prototipo de humedales artificiales en Villanueva, Casanare se justifica por sus características y propiedades que las hacen adecuadas para este fin:

✓ **Bore (Colocasia Esculenta):** Esta planta es ideal debido a su capacidad para adaptarse a una variedad de suelos y condiciones ambientales. Su rápido crecimiento y resistencia a condiciones adversas como la sequía y la salinidad parcial la convierten en una opción robusta para el tratamiento de aguas residuales. Además, la Bore tiene la capacidad de acumular metales pesados, lo que es beneficioso para la remoción de contaminantes de las aguas residuales.

✓

Figura 9. Bore (*Colocasia Esculenta*)



✓ **Topocho (Musa paradisiaca):** El Topocho es conocido por su capacidad para adaptarse a diferentes condiciones climáticas y de suelo. Su capacidad de eliminar la materia orgánica, así como su resistencia a condiciones adversas, la hacen útil en el tratamiento de aguas residuales.

Además, el Topocho es conocido por su rápido crecimiento, lo que permite una rápida implementación y resultados efectivos en el tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, a lo largo de nuestra investigación, encontramos que casi no existen documentos, artículos científicos o estudios que aborden específicamente la capacidad del topocho para remover materia orgánica en condiciones de humedales artificiales, desconocemos completamente los mecanismos y la eficiencia del topocho, lo que representa un reto significativo para su implementación efectiva.

Figura 10. Topocho (*Musa paradisiaca*)



✓ **Heliconia (*Heliconia psittacorum*):** La Heliconia es una planta nativa de zonas húmedas y tropicales, lo que la hace ideal para el entorno de la región de la Orinoquia. Esta planta tiene la capacidad de eliminar contaminantes como DBO, DQO y SST, lo que la convierte en una opción efectiva para el tratamiento de aguas residuales. Además, la Heliconia presenta un rápido crecimiento y desarrollo, lo que garantiza resultados rápidos en el proceso de depuración de aguas residuales.

Figura 11. *Heliconia* (*Heliconia psittacorum*)



Las plantas Bore (*Colocasia esculenta*), Topocho (*Musa x paradisiaca*) y *Heliconia* (*Heliconia psittacorum*) son fundamentales en la flora característica de los humedales y sabanas de la región llanera, destacando por su adaptabilidad y resistencia en ambientes acuáticos y semiacuáticos. Estas especies, comunes en la topochera llanera, no solo han demostrado su eficacia en la remoción de contaminantes en estudios sobre fitorremediación, sino que también son una parte integral del ecosistema de los Llanos, un área de clima tropical donde las condiciones de alta humedad y suelos encharcados favorecen su crecimiento. (Prajapati, Kalariya, Umbarkar, Parmar, & Sheth, 2011)

La topochera llanera ha sido utilizada por generaciones en las fincas llaneras, donde sirve como un espacio para el cultivo de una variedad de especies vegetales adaptadas a las condiciones particulares del ecosistema llanero, tales como las variaciones en el régimen de lluvias y las fluctuaciones de los niveles de agua en la región. Las especies vegetales que se acostumbran en las topocheras son, en su mayoría, plantas que no solo cumplen una función productiva, sino también ecológica y cultural, desempeñando un papel importante en la regulación de la calidad del agua y en el control de la erosión. Entre ellas se encuentran diversas variedades de plantas acuáticas y semiacuáticas, como las seleccionadas para este proyecto y algunas otras especies de gramíneas y helechos, que se integran en prácticas de conservación y manejo del agua. Estas especies son seleccionadas no solo por su capacidad de adaptarse al ambiente, sino también por su valor cultural en las comunidades llaneras, que las han utilizado históricamente en la construcción de cercas vivas, en la protección de cuerpos de agua, y como parte integral de la agricultura sostenible. Por lo tanto, en el proyecto se consideró la importancia de estas especies vegetales, tanto desde el punto

de vista ecológico como cultural, para la remoción de contaminantes y la mejora de la calidad del agua en los humedales.

6.4. Etapa 3: Definición del prototipo

El prototipo de humedal que se implementa es de flujo subsuperficial horizontal, debido a su capacidad para remover contaminantes a través de procesos físicos, químicos y biológicos. Se va dividir en 3 celdas, en cada celda se siembra una especie de planta de las mencionadas anteriormente. Se utilizaron tres celdas con el fin de poder determinar los coeficientes de remoción de las especies vegetales mas comúnmente utilizadas en la topochera llanera, ya que nos permite comparar de manera mas precisa la eficiencia de las distintas especies en la remoción de contaminantes. Además, al funcionar en paralelo con la misma agua residual, nos aseguramos que las condiciones de entrada sean consistentes en todas las celdas, lo que facilita una comparación directa.

6.4.1 Materiales

Tabla 5. Materiales y cantidades que se utilizaron

Item	Rubro	Unidad	Cantidad
1	Excavación	m^3	12
2	Plástico negro de fondo y laterales	m^2	112
3	Sustrato (grava 2" y 1")	m^3	4
4	Tierra negra	Bulto	2
5	Tubería 4 pulg	m	6
6	Tubo sanitario 1 ½"	m	12
7	Codo 1 ½"	Unid	9
8	Tee 1 ½"	Unid	9
9	Adaptador hembra 1 ½"	Unid	3
10	Adaptador macho 1 ½"	Unid	3
11	Pegante	Unid	1
12	Cemento	Kg	1
13	Plantula Musa paradisiaca	Unid	6
14	Plantula Colocasia Esculenta	Unid	10
15	Heliconia psittacorum	Unid	8
16	Caneca (17gal)	Unid	1

6.4.1. *Diseño del humedal*

El diseño del prototipo se basó en modelos existentes de humedales artificiales, ajustados para adaptarse a las condiciones específicas de la región.

Se ha analizado el caudal de agua utilizado por los habitantes de la finca Güerere de la vereda Leche Miel, considerando sus actividades diarias y agropecuarias. Este análisis es fundamental para diseñar sistemas de tratamiento de aguas residuales mediante humedales construidos, asegurando un tiempo de retención adecuado según las recomendaciones de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA).

Determinación del caudal: A partir de un trabajo de campo de dos semanas, se evidenció que los habitantes de la finca consumen 1.5 tanques de agua por día, con un volumen de 0.53 m³ por tanque. Por lo tanto, el caudal utilizado es:

$$Q_{total} = \frac{1.5 \text{ tanque}}{1 \text{ día}} * \frac{0.53 m^3}{\text{tanque}} = 0.795 m^3/\text{día}$$

Este caudal se distribuye en 3 celdas, por lo tanto, el caudal para cada celda es:

$$Q_{celda} = \frac{0.795 m^3/\text{día}}{3} = 0.265 m^3/\text{día}$$

6.4.2 *Medio filtrante*

- ✓ **Material:** Grava
- ✓ **Tamaño:** Grava gruesa de 2" y grava fina de 1"
- ✓ **Porosidad:** La porosidad del medio es crucial ya que determina la capacidad de retención de agua y la velocidad del flujo, en este caso es del 33%

Estructura del tanque: Las celdas fueron creadas mediante una excavación en el terreno existente y se impermeabilizó para evitar la filtración del agua no tratada al suelo circundante.

Dimensiones del sistema: Para asegurar la eficiencia y efectividad del sistema de tratamiento, el dimensionamiento de las celdas se realizó siguiendo la relación 2:1 comúnmente mencionada en la literatura técnica sobre diseño de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales, uno de los documentos clave que recomienda esta proporción es el "Manual de Humedales Construidos para el Tratamiento de Aguas Residuales" de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, 1998). Esta relación se refiere a la proporción entre la longitud y el ancho del humedal, en este caso maximizando el uso eficiente del espacio disponible se determinó que tendría un ancho de 1.5m y una longitud de 3m, así se optimiza el flujo hidráulico a través del humedal, asegurando un tiempo de residencia suficiente para el tratamiento del agua. Esto permite que el agua fluya de manera uniforme y evite la formación de zonas estancadas.

La profundidad en cada celda del humedal artificial fue de 0.8 m con un borde libre de 0.1m, Aunque la EPA recomienda profundidades entre 0.3 y 0.6 metros, la decisión de utilizar 0.8 metros se basó en las condiciones específicas del sitio, como la calidad del agua residual, y la topografía del terreno. Esta profundidad nos permite un mayor tiempo de residencia del agua en el humedal, asegurando que el agua tenga suficiente tiempo para interactuar con el medio filtrante y las raíces de las plantas, lo que mejora la remoción de contaminantes.

Pendiente. La (EPA, 1998) recomienda que la pendiente de los humedales subsuperficiales horizontales sea bastante baja, típicamente en el rango de 1% a 2% (1 a 2 cm de caída por cada metro de longitud). Esto asegura que el agua se distribuya uniformemente a lo largo del lecho filtrante. En este caso es del 1% garantizando que el sistema se adapte adecuadamente al entorno local.

Cálculo del tiempo de retención: Se debe garantizar un tiempo de retención hidráulico adecuado del agua por cada una de las celdas, con el fin de satisfacer la recomendación de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), en donde "el tiempo de retención hidráulico en los humedales construidos típicamente varía de 5 a 14 días, dependiendo del diseño y el propósito del sistema". (EPA, 1998). Para ello se utiliza ecuación de continuidad de fluidos:

$$Q = \frac{Vol}{t}$$

6.4.3 Volumen total de agua en la celda

$V_{totaldeagua}$ = Volumen real de agua en la celda

V_{celda} = Volumen total de la celda

V_{grava} = Volumen de grava en la celda

P = Porosidad del medio (grava fina 33%).

$$V_{totaldeagua} = V_{celda} + V_{grava} * P - V_{grava}$$

Según los resultados obtenidos, se determina que:

$$V_{totaldeagua} = \frac{(1 + 1.5) * 0.7 * 3}{2} + \frac{(1 + 1.359) * 0.5 * 3 * 35\%}{2} - \frac{(1 + 1.359) * 0.5 * 3}{2}$$

$$V_{totaldeagua} = 1.476 \text{ m}^3$$

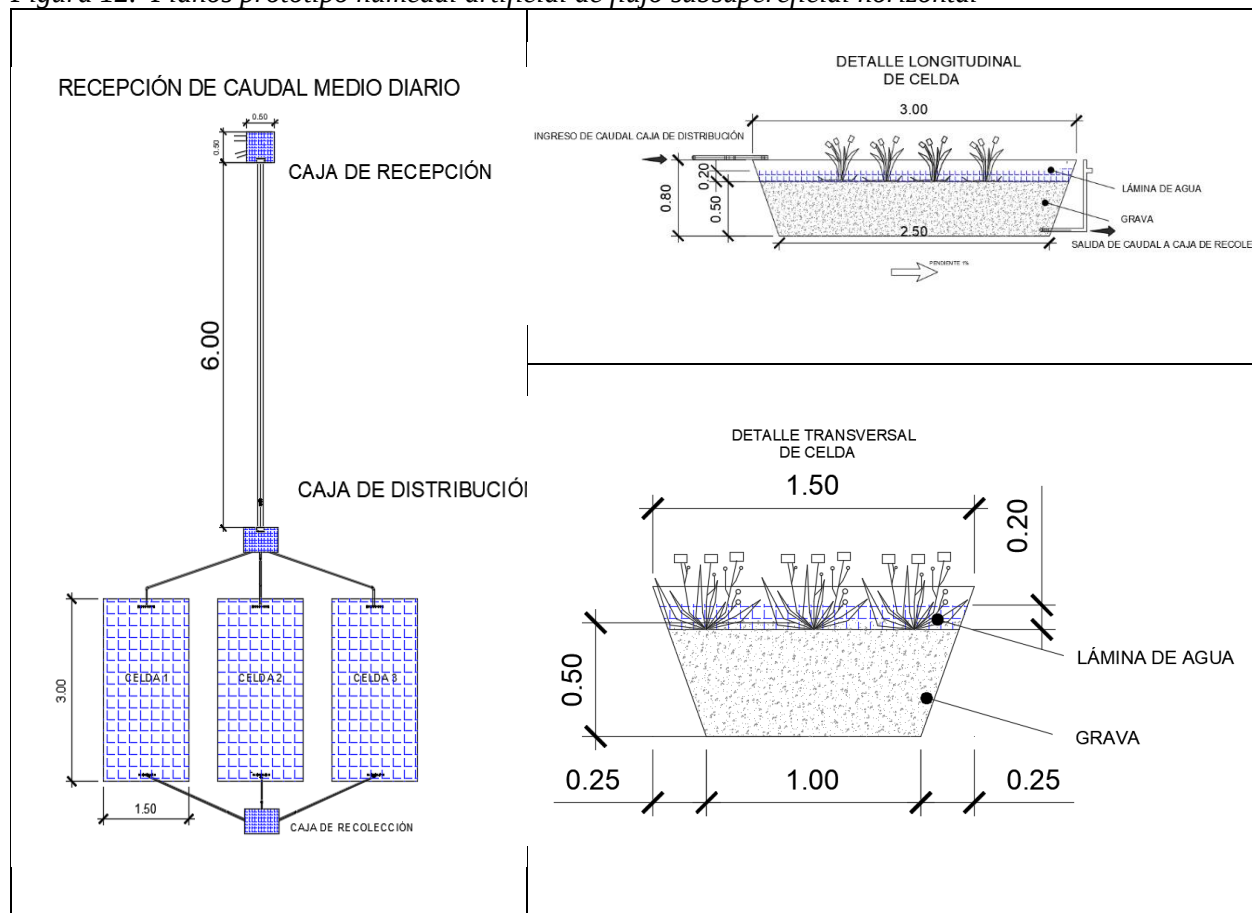
Ahora, con la ecuación de continuidad y el caudal por cada una de las celdas, se tiene que:

$$Q = \frac{Vol}{t} \Rightarrow t = \frac{Vol}{Q}$$

$$t = \frac{1,476 \text{ m}^3}{0,265 \text{ m}^3/\text{día}}$$

$$t = 5.569 \text{ días}$$

Figura 12. Planos prototipo humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal



6.5. Etapa 4: Construcción del prototipo de humedal artificial

La implementación del prototipo de humedal artificial con especies vegetales autóctonas de los Llanos ha sido un proceso meticuloso que busca replicar y optimizar las condiciones naturales para el tratamiento de aguas residuales. Este proyecto no solo tiene la finalidad de mejorar la calidad del agua, sino también de conservar la biodiversidad y promover la sostenibilidad ambiental en la región.

6.5.1 Creación del vivero

La creación de un vivero para la preparación de las plantas antes de su plantación en los humedales artificiales es un paso esencial, ya que nos garantiza que las plantas estén bien preparadas y adaptadas para prosperar en su nuevo entorno.

En esta actividad se traspasaron las plantas a unas bolsas de polietileno con sustrato adecuado para cada especie de planta, *Colocasia Esculenta* y *Heliconia psittacorum*, se adquirieron entre 8 y 10 plantas. La *Musa x paradisiaca* se trasplanta directamente sin pasar por el vivero debido a que se propaga a través de colinos, que son brotes o retoños que crecen alrededor de la planta, estos crecen con mayor facilidad cuando se trasplantan directamente.

Para la ubicación del vivero, se seleccionó un sitio con buena exposición solar y acceso abundante de agua, se observó su adaptación y comportamiento, una vez que las plantas demostraron su adaptación y crecimiento adecuado en las bolsas se evaluaron para determinar su preparación para el traspaso al humedal.

Figura 13. Traspaso de plantas a bolsas de polietileno

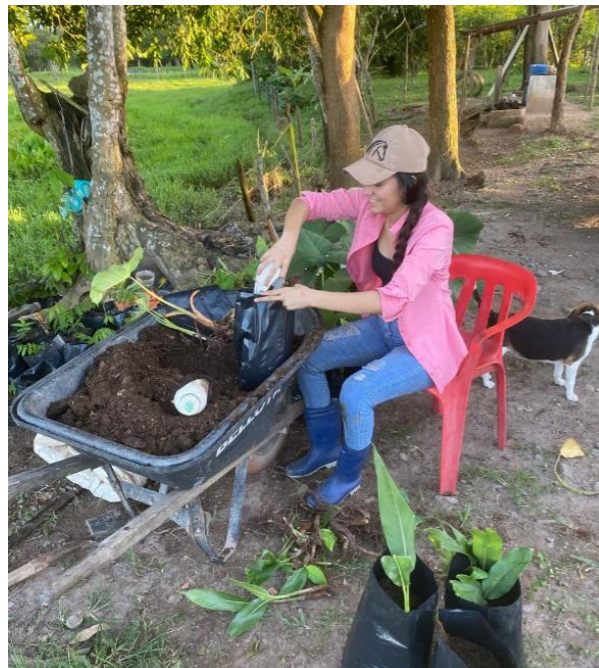


Figura 14. Vivero de *Heliconia psittacorum*

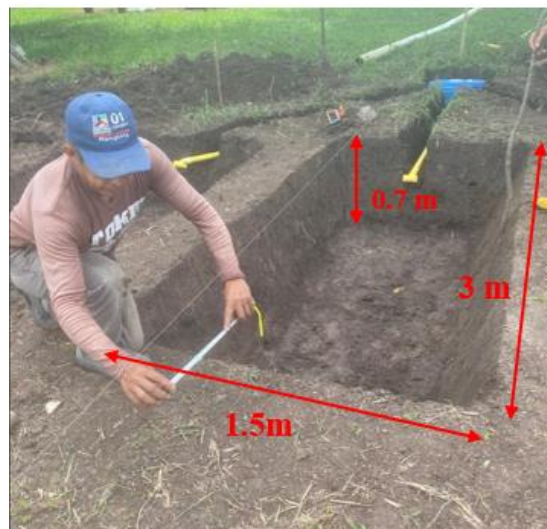


6.5.2 Construcción del prototipo del humedal

Una vez se haya determinado el largo y el ancho de las celdas de cada humedal, de manera que su relación no supere la razón 4:1, se procede a la construcción del prototipo, en este caso se construyeron 3 celdas de humedal artificial subsuperficial horizontal.

Excavación. De forma manual, se realizó la excavación para cada una de las celdas de 1.5 m de ancho, 3 m de largo y 0.7 m de profundidad con un volumen de 2000 L para cada celda, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 15. Dimensiones del humedal artificial



Adaptación al humedal: Se adquirieron aproximadamente entre 8 y 10 plantas de *Heliconia psittacorum* y *Colocasia Esculenta* con una edad aproximada de 4 meses que es cuando tienen más resistencia a diversas condiciones, con una altura entre 25 a 30 cm, sembrados uno seguido del otro. Inicialmente se sembraron 5 colinos de topocho (*Musa x paradisiaca*) a una distancia aproximada de 0.8m entre cada planta asegurando el espacio necesario para que crecer de manera eficiente.

Impermeabilización y vaciado del sustrato: Con el fin de evitar la infiltración ARD en el suelo, se realizó el recubrimiento con geotextil de calibre 8mm en cada una de las celdas del humedal.

Después se agregó el sustrato, con un espesor de 50cm que actúa como medio filtrante para retener los sólidos suspendidos que se depositan en la superficie del sustrato, para luego ser degradados por los microorganismos, estuvo compuesto por grava de 1 ½” en las entradas y salidas, grava de 1” en el centro y un poco de material orgánico en las partes donde se va a sembrar las plantas.

Figura 16. Dimensiones del humedal artificial



Instalación de la tubería, sistemas de distribución y recogida. Es importante tener una buena distribución y recogida de agua en las tres celdas del humedal, esto para evitar riesgos de colmatación en la zona donde se vierta mayor agua, el caudal debe repartirse de forma equitativa en el ancho de cada celda.

En la finca se han identificado dos zonas principales de generación de aguas residuales: la zona de cocina y la zona de lavado. Cada una de estas zonas está equipada con su propia tubería de desagüe individual. Estas tuberías tienen la función de recoger y conducir las aguas residuales generadas en cada una de las áreas. Ambas tuberías se dirigen hacia una caja de registro común. Esta caja actúa como un punto de convergencia donde se mezclan las aguas residuales provenientes de la cocina y del área de lavado. Desde esta caja de registro, una tubería de 4 pulgadas de diámetro transporta las aguas residuales hacia una arqueta de distribución.

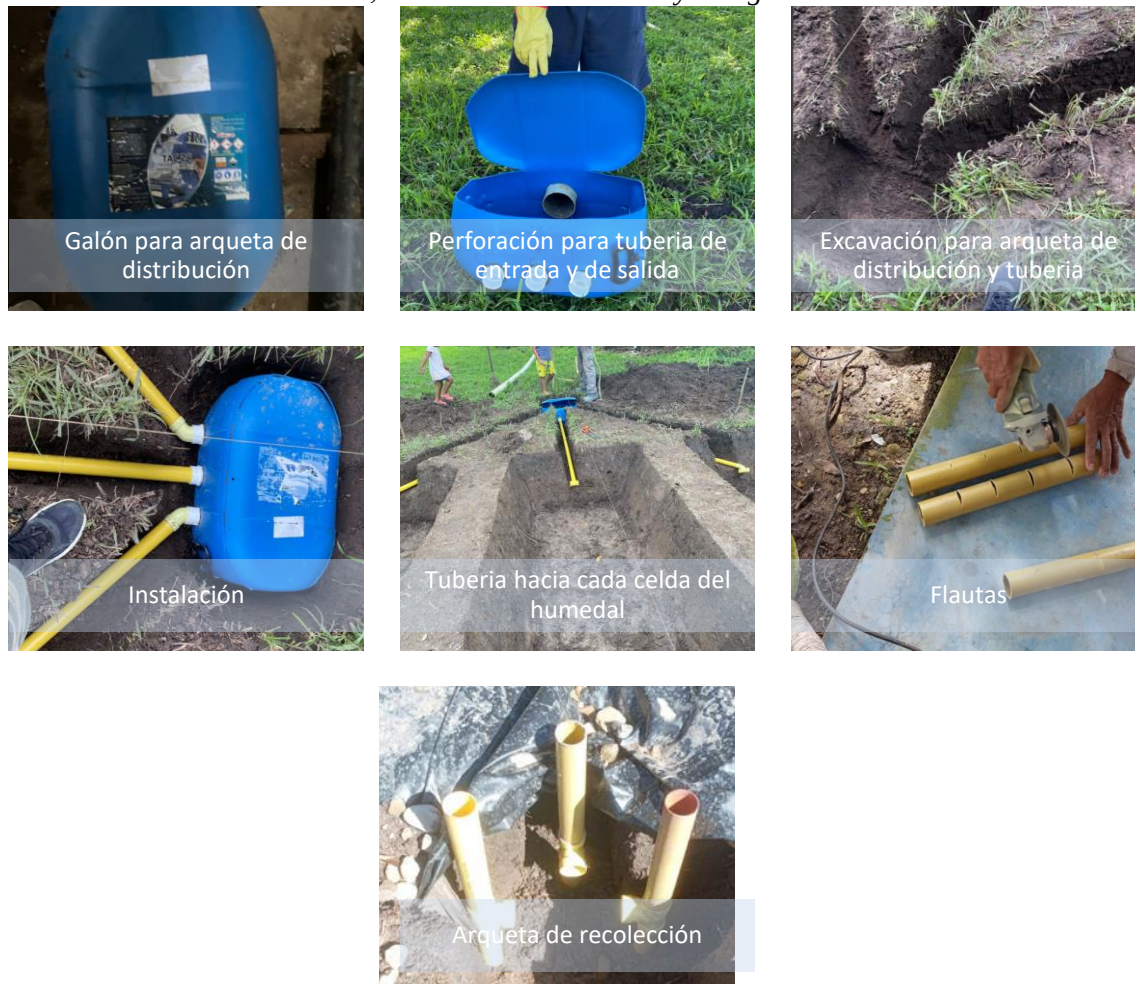
La arqueta de distribución fue construida utilizando una caneca de 17 galones. Para adaptarla a su función, se realizaron perforaciones específicas. Se perforó un orificio para la tubería de entrada que es la que transporta las aguas residuales desde la caja de registro y se perforaron orificios para las tuberías de salida de 1" que conectan con las tres celdas del humedal conectadas firmemente a la caneca, asegurando que no haya fugas y que el flujo de aguas residuales sea continuo y controlado. Al final de cada tubería de salida en la entrada de cada celda, se colocó una flauta. Las flautas son dispositivos que distribuyen el flujo de agua de manera uniforme a lo largo de toda la celda del humedal. Esta instalación es crucial para asegurar la homogeneidad del caudal en cada celda, permitiendo un tratamiento eficiente y equitativo de las aguas residuales en todo el sistema del humedal.

El sistema de afluente del humedal artificial está diseñado para asegurar la retención adecuada y el tratamiento eficiente de las aguas residuales antes de su liberación al medio ambiente. La tubería de salida de 1" está ubicada en la parte baja de cada celda del humedal, aproximadamente a 10 cm del fondo, esta ubicación permite la recolección del agua tratada desde el fondo de las celdas, donde ha pasado por el proceso de filtración y tratamiento biológico. Todas las tuberías de salida de las celdas del humedal se conectan a una única arqueta de recolección, esto facilita el monitoreo y control de la calidad del agua antes de su descarga final.

Esta arqueta juega un papel crucial en el control del tiempo de retención del agua tratada, pues asegura que el agua no salga del sistema hasta que el nivel de agua en los humedales alcance el mismo nivel que la tubería de recolección, sólo cuando los niveles de agua en las celdas del

humedal igualan el nivel de la tubería de recolección, el agua tratada se libera, asegurando así un tiempo de retención adecuado para el tratamiento biológico y físico de las aguas residuales.

Figura 17. Instalación de la tubería, sistemas de distribución y recogida.



6.6. Etapa 5: Funcionamiento u operación del humedal construido

Una vez en funcionamiento, el humedal demostró su capacidad para tratar las aguas residuales de manera eficiente, aunque, como es común en este tipo de sistemas, se presentó una fase en la que se colmató debido a la acumulación de sólidos provenientes del lavadero. Este problema fue identificado rápidamente y se implementaron medidas correctivas para controlar la entrada de sólidos en exceso. Para ello, se realizó un ajuste en el sistema de pretratamiento del lavadero. Se cambió la rejilla existente por una con huecos más pequeños, lo que permitió filtrar

de manera más eficiente los sólidos grandes, como restos de alimentos, impidiendo que llegaran al sistema de humedal. Esta intervención permitió restaurar la funcionalidad del humedal sin afectar su rendimiento. Además, durante todo el proceso de tratamiento, se observó que no se generaron olores desagradables, lo que se atribuyó a la correcta oxigenación del sistema y la diversidad de especies vegetales que contribuyeron a mantener la calidad del agua y a evitar la descomposición anaeróbica. De igual manera, no se evidenció la presencia de zancudos ni otros vectores típicos de ambientes húmedos estancados, lo cual se debe a la constante circulación de agua y a la rápida absorción de los nutrientes y materia orgánica por parte de las plantas, lo que limitó la formación de hábitats propicios para estos insectos.

Figura 18. Humedal Colmatado



6.7. Etapa 6: Toma de muestras en la entrada y salida del agua del humedal

Durante el período de funcionamiento del humedal, que duró un total de 10 meses, se realizó un muestreo puntual en tres puntos clave del sistema:

✓ Muestra puntual

Muestra de agua residual tomada al azar en un momento determinado para su análisis.

Algunos parámetros deben determinarse in situ y otros en el laboratorio (RAS, 2000).

Entrada del Humedal (Arqueta de distribución): Se tomaron tres muestras en este punto para evaluar la calidad del agua antes de ingresar al sistema de tratamiento.

Salida del Humedal: Se tomaron tres muestras en la salida del humedal para evaluar la calidad del agua tratada antes de ser vertida.

Las muestras recolectadas fueron sometidas a análisis de los siguientes parámetros para determinar la eficiencia del tratamiento:

Tabla 6. Parámetros a analizar de las muestras

PARAMETRO	UNIDAD
CAUDAL PARA VERTIMIENTO (+)	L/s
DBO ₅ (+)	mg O ₂ /L
DQO (+)	mg O ₂ /L
FOSFORO TOTAL (+)	mg P/L
GRASAS Y ACEITES (+)	mg/L
NITROGENO TOTAL KJELDAHL (+)	mg N/L
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (+)	mg/L
SURFACTANTES: Aniónicos como SAAM. (TENSOACTIVOS-DETERGENTES) (+)	mg/L
Coliformes totales (+)	NMP/100mL
Escherichia Coli (+)	NMP/100mL

Los resultados obtenidos de los análisis permitieron evaluar la eficiencia del humedal artificial en la reducción de contaminantes presentes en las aguas residuales. La comparación de las concentraciones de cada planta y de los parámetros en la entrada y salida del humedal proporcionó una visión clara de la efectividad del sistema.

Figura 19. Toma de muestras.



Arqueta de distribución



Recolección de muestras antes de pasar por el humedal (Arqueta de distribución)



Recolección de muestras antes de pasar por el humedal (Arqueta de distribución)



Recolección de muestras en la salida (Arqueta de recolección)



Parametro Ph

7. Resultados y análisis de resultados

7.1. Adaptación y crecimiento de las plantas

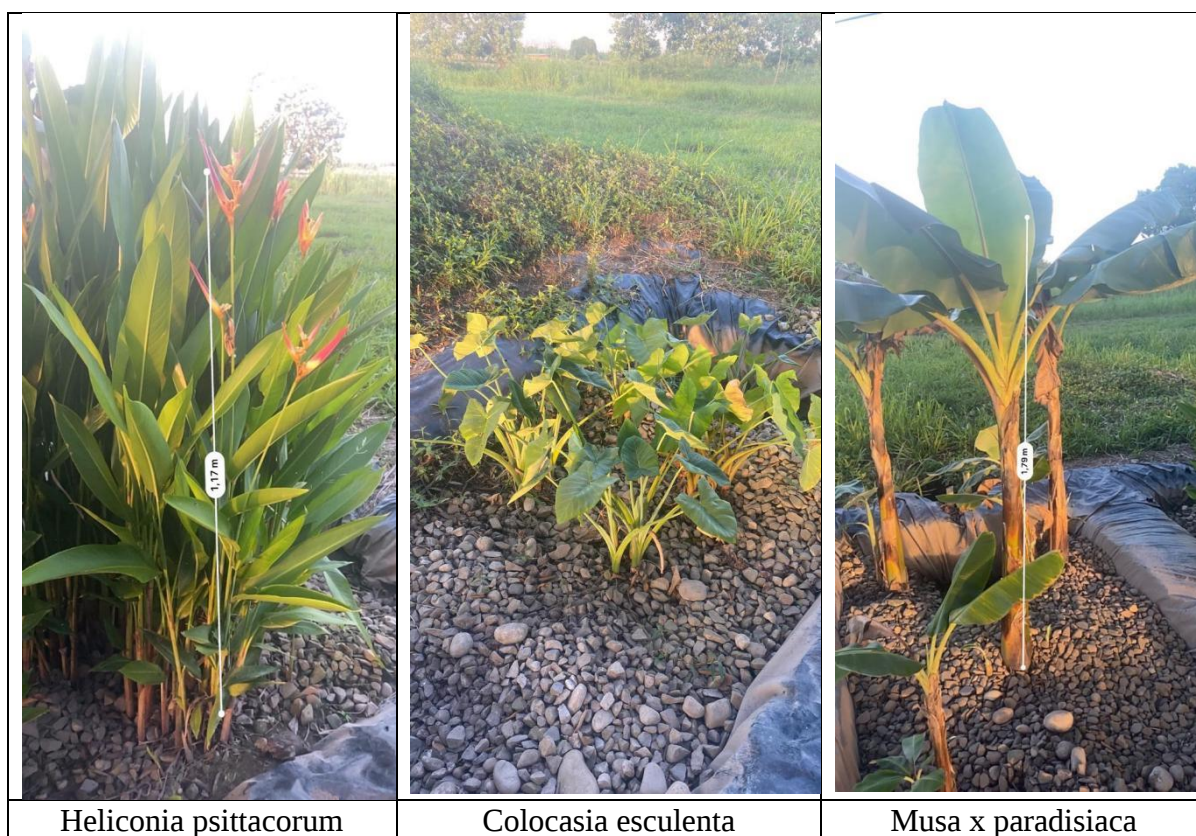
En el humedal subsuperficial horizontal diseñado para el tratamiento de aguas residuales en la finca güerere, se realizó un registro fotográfico del crecimiento y adaptación de las plantas implementadas en el sistema, esto permitió documentar visualmente los cambios y el desarrollo de las plantas a lo largo del tiempo. Durante el primer mes, se observaron signos de adaptación positiva, como el crecimiento de nuevas hojas y raíces, y una buena cobertura del lecho del humedal. La *Heliconia psittacorum* creció y se multiplico significativamente, ya que inicialmente se plantaron de 8 a 10 plantas, con una altura entre 25 a 30 cm, finalizaron con una altura de 1.0 a 1.34m, finalizando con una buena cobertura del lecho del humedal y una alta tasa de supervivencia, mostrando una excelente adaptación.

La colocasia esculenta a pesar de su adaptación a las aguas residuales, mostró muy poco crecimiento y no se extendió tanto como se esperaba. Sin embargo, ninguna planta murió y todas se adaptaron bien, sin presentar enfermedades.

La *musa x paradisiaca* durante el período inicial de establecimiento, la *Musa x paradisiaca* mostró algunas dificultades de adaptación, De las 5 plantas sembradas inicialmente, una murió, lo que indicó un desafío en la fase de adaptación temprana, se realizaron intervenciones de mantenimiento como la eliminación de esta planta muerta. Sin embargo, las 4 plantas restantes se adaptaron bien, comenzaron a producir colinos y su crecimiento fue de 1.79 a 2.0m, lo que indica un crecimiento saludable y una expansión efectiva dentro del humedal. Cabe resaltar que esta planta presentó un desafío significativo debido a la falta de documentación y estudios previos sobre su capacidad para sobrevivir en ambientes con abundante agua, como los humedales artificiales.

A pesar de los desafíos iniciales y la pérdida de una planta, los otros cuatro colinos demostraron una buena capacidad de adaptación a las condiciones de humedal, mostrando buena capacidad de enraizamiento.

Figura 20. Crecimiento de las plantas.



7.2. Cálculo de la carga contaminante (CC)

Con base en estas concentraciones y el valor del caudal promedio se obtiene el cálculo de la carga contaminante (Kg/día) para los puntos de muestreo, de acuerdo con los lineamientos establecidos en el artículo 3º del Decreto 2667 de 2012 (2667, 2012)

$$B = Q \times (CV) \times 0,0036 \times t$$

B : Carga en el vertimiento (Kg. /día).

Q : Caudal promedio del vertimiento (l /s) .

CV : Concentración en el vertimiento (mg/ l) .

0,0036 : Factor de conversión (mg/s) a (Kg/h) .

t : Tiempo de vertimiento del usuario, en horas por día (h)

Dado esto obtenemos:

Tabla 7. Cargas contaminantes (Kg/d)

PARÁMETRO	CARGA (Kg/Día)					
	MUSA X PARADISIACA		HELICONIA PSITTACORUM		COLOCASIA ESCULENTA	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
DBO5	25,71	0,38	24,33	0,28	19,02	0,83
DQO	37,54	0,95	46,87	0,53	71,53	1,53
GRASAS Y ACEITES	51,82	0,01	18,02	0,01	20,76	0,03
SÓLIDOS SUSPENDIDOS	33,19	0,1	22,64	0,06	26,69	0,15

El análisis de las cargas contaminantes en términos de DBO5, DQO, grasas y aceites, y sólidos suspendidos para las tres plantas diferentes, Musa x paradisiaca, Heliconia psittacorum, y Colocasia esculenta, revela diferencias significativas entre las entradas y salidas de cada planta. Para Musa x paradisiaca, se observa una reducción drástica en todas las categorías, pasando de 25,71 Kg/Día a 0,38 Kg/Día en DBO5, de 37,54 Kg/Día a 0,95 Kg/Día en DQO, de 51,82 Kg/Día a 0,01 Kg/Día en grasas y aceites, y de 33,19 Kg/Día a 0,1 Kg/Día en sólidos suspendidos. Heliconia psittacorum también muestra reducciones notables, con DBO5 disminuyendo de 24,33 Kg/Día a 0,28 Kg/Día, DQO de 46,87 Kg/Día a 0,53 Kg/Día, grasas y aceites de 18,02 Kg/Día a 0,01 Kg/Día, y sólidos suspendidos de 22,64 Kg/Día a 0,06 Kg/Día. En comparación, Colocasia esculenta tiene la mayor carga de entrada en DQO con 71,53 Kg/Día y la salida más alta de DBO5 con 0,83 Kg/Día y de DQO con 1,53 Kg/Día, aunque aun así se logran reducciones significativas en todos los parámetros.

Comparando entre las plantas, Musa x paradisiaca y Heliconia psittacorum muestran eficiencias similares y altas en la reducción de contaminantes, con Heliconia psittacorum siendo ligeramente más eficiente en la reducción de DBO5 y DQO. Colocasia esculenta, aunque menos eficiente en términos relativos, todavía muestra una capacidad considerable para reducir contaminantes, especialmente considerando sus altos valores de entrada, logran reducir las concentraciones de contaminantes a niveles muy por debajo de los límites establecidos por las normas colombianas (RAS 2000 y Resolución 699 de 2021), indicando que son altamente eficientes para el tratamiento de aguas residuales.

En resumen, todas las plantas son efectivas según las normas colombianas, pero Heliconia psittacorum destaca como la más eficiente, lo que la hace ideal para aplicaciones que requieren

altos niveles de purificación, como el riego agrícola y la descarga segura en cuerpos de agua superficiales.

podría ser utilizada para:

- Reutilización en riego agrícola: Las bajas concentraciones de contaminantes en la salida la hacen adecuada para su uso en la agricultura, cumpliendo con las normas de calidad de agua para riego.
- Descarga en cuerpos de aguas superficiales: La alta eficiencia en la remoción de contaminantes asegura que el efluente tratado no cause impactos negativos significativos en los cuerpos de agua receptores.

7.3. Influencia del pH

Según El informe de la EPA (**EPA, 1998**), los humedales artificiales suelen funcionar mejor dentro de un rango de pH de 6 a 8. Este rango es ideal para la mayoría de los procesos biológicos y químicos que ocurren en estos sistemas. Sin embargo, algunos estudios indican que los humedales pueden tolerar rangos más amplios, generalmente de 5.5 a 9, dependiendo de las especies de plantas y microorganismos presentes.

Los valores de pH obtenidos en la muestra puntual que se realizó fueron.

Tabla 8. Resultados obtenidos de pH

Especie	pH
Heliconia Psittacorum	6,31
Colocasia Esculenta	5,80
Musa x Paradisiaca	6,57

Los valores de pH de 6,57 y 6,31 para la Musa x Paradisiaca y Heliconia Psittacorum, respectivamente, están muy cerca del rango óptimo (6-8). Estos niveles son favorables para la actividad microbiana, la disponibilidad de nutrientes y el crecimiento de las plantas. Sin embargo, el pH de la Colocasia Esculenta fue de 5,80 está ligeramente por debajo del rango óptimo, pero aún dentro del rango permitido. Este nivel de pH puede ser adecuado para ciertas especies de

microorganismos y plantas, pero podría afectar ligeramente la eficiencia de algunos procesos biológicos, como la descomposición de materia orgánica y la eliminación de nutrientes.

Tomando como referencia la normativa colombiana (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000), los resultados obtenidos se encuentran en los rangos óptimos para el desarrollo de los microorganismos, Esto indica que estas aguas tratadas cumplen con los requisitos establecidos, asegurando que no estás vertiendo aguas con un pH fuera de los límites legales y potencialmente dañinas para el medio ambiente.

7.4. Comparación de porcentajes de remoción de Demanda Bioquímica de (Oxígeno DBO_5)

En la siguiente tabla, se aprecia la concentración DBO_5 tanto en la entrada como en la salida del humedal, calculamos los porcentajes de remoción para cada planta y luego interpretamos estos resultados en el contexto de la bibliografía relevante.

Tabla 9. Resultados de DBO_5 en la entrada y salida de humedales

TRH (Días)	Humedal-Especie	Concentración de entrada DBO_5 mg O_2/L	Concentración de salida DBO_5 mg O_2/L
5.569	H1. Heliconia Psittacorum	1437	74
	H2. Musa x Paradisiaca	1518	113
	H3. Colocasia Esculenta	1123	95

7.4.1 Cálculo del porcentaje de remoción DBO_5

La fórmula para calcular el porcentaje de remoción de DBO_5 es:

$$\text{Porcentaje de remoción} = \left(\frac{\text{concentración de entrada} - \text{concentración de salida}}{\text{concentración de entrada}} \right) \times 100$$

- Heliconia Psittacorum

$$\text{Porcentaje de remoción} = \left(\frac{1437 - 74}{1437} \right) \times 100 = 94.85\%$$

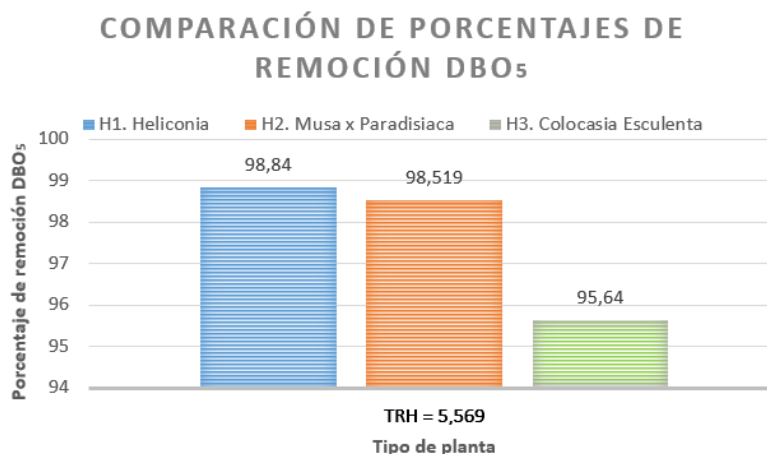
- Musa x aradisiaca

$$\text{Porcentaje de remoción} = \left(\frac{1518 - 113}{1518} \right) \times 100 = 92.56\%$$

- Colocasia Esculenta

$$\text{Porcentaje de remoción} = \left(\frac{1123 - 95}{1123} \right) \times 100 = 91.64\%$$

Figura 21. Grafica de comparación de porcentajes de remoción DBO₅ en los tratamientos



Los porcentajes de remoción observados en el humedal son muy altos y reflejan una eficiencia significativa. Según la literatura, los humedales construidos bien diseñados pueden lograr tasas de remoción de DBO₅ entre el 70% y el 90% en condiciones óptimas. Estos resultados se sitúan en el extremo superior de este rango, lo que indica un rendimiento excelente.

La Heliconia Psittacorum muestra la mayor eficiencia de remoción de DBO y sería la opción preferida si el objetivo principal es maximizar la remoción de DBO, le sigue la Musa x Paradisiaca con una eficiencia de 92.56% y por último la colocasia Esculenta que tiene la menor eficiencia de las tres, con un 91.54%. Esto debido a que la Heliconia tiene una tasa de crecimiento rápida y produce una biomasa densa, lo que proporciona una gran superficie para la colonización de microorganismos que descomponen la materia orgánica. (ROBERT H. KADLEC, 2009)

7.4.2 Según la Reglamentación Técnica del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS)

Esta normativa colombiana establece los requisitos y criterios para asegurar la calidad del agua tratada en sistemas de saneamiento. Según la Resolución 0330 de 2017 y las normativas

asociadas, los humedales artificiales deben cumplir con ciertos estándares de remoción de contaminantes, como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅). Teniendo en cuenta lo anterior, aunque los porcentajes de remoción son altos, los el límite máximo permisible para DBO en vertimientos es de 50 mg/L. En este caso los resultados del humedal (74 mg/L para Heliconia, 113 mg/L para Musa x Paradisiaca y 95 mg/L para Colocasia Esculenta) superan este límite, se deben considerar tratamientos complementarios para reducir aún más las concentraciones de salida y cumplir con la normativa colombiana.

7.4.3 Según el decreto 1076 de 2015 Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible

El Decreto 1076 de 2015 en Colombia establece criterios específicos para la calidad del agua, incluida la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅). Según la normativa, las concentraciones de DBO deben estar dentro de ciertos límites para asegurar que el agua tratada sea apta para su vertimiento o reutilización sin causar daño al medio ambiente (Sostenible, 2015).

Tabla 10. Comparación de resultados con la normatividad para vertimientos a cuerpos de agua

TRH (Días)	Humedal-Especie	entrada DBO ₅ Carga-kg/día	salida DBO ₅ Carga-kg/día	% de remoción	Decreto 1076/15 (ART. 2.2.3.3.9.14)	Cumple
5.569	H1. Heliconia	24,33	0,28	98,84	> 8 0% Remoción	SI
	H2. Musa x Paradisiaca	25,71	0,38	98,519	> 8 0% Remoción	SI
	H3. Colocasia Esculenta	19,02	0,83	95,64	> 8 0% Remoción	SI

Estos resultados muestran una alta eficiencia en la remoción de DBO₅, con Heliconia siendo la más efectiva. Según la normativa colombiana (Sostenible, 2015), estos valores están dentro de los límites permitidos para vertimientos, lo que indica que el tratamiento es adecuado y cumple con los estándares regulatorios para evitar impactos negativos en los cuerpos de agua receptores.

7.4.4 Comparación ilustrativa con la resolución 699 de 2021 - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Según la Resolución 0699 de 2021 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales Domésticas Tratadas al suelo, y se dictan otras disposiciones, los límites permisibles de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas tratadas al suelo son específicos para la categoría 3, que incluye usuarios diferentes a los de vivienda rural dispersa y usuarios equiparables, en el efluente es de 100 mg/L (SOSTENIBLE, 2021). Se compara el efluente del sistema del tratamiento con la norma ambiental para vertimientos puntuales de aguas residuales al suelo y nos da lo siguiente.

Tabla 11. Comparación de resultados DBO5 con la resolución 699 de 2021

TRH (Días)	Humedal-Especie	CATEGORIA III (Velocidad de infiltración: menor a 2,5 mm/h o mayor a 53 mm/h)	Concentración de salida DBO5 mgO ₂ /	Cumple
5.569	H1. Heliconia	90	74	SI
	H2. Musa x Paradisiaca	90	113	NO
	H3. Colocasia Esculenta	90	95	SI

Como resultados la Heliconia y Colocasia Esculenta cumplen con la normativa de la Resolución 0699 de 2021, ya que sus concentraciones de salida son inferiores a 100 mg/L. Sin embargo, la Musa x paradisiaca, con una concentración de salida de 113 mg/L, no cumple con este límite y excede el valor permitido para esta categoría, la tasa de crecimiento y la cantidad de biomasa producida por esta pueden ser inferiores, reduciendo la superficie disponible para la colonización de microorganismos que descomponen la materia orgánica.

7.5. Comparación de porcentajes de remoción de Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La remoción de DQO en humedales artificiales puede variar significativamente dependiendo de la especie vegetal utilizada. La eficiencia de remoción está influenciada por factores como la densidad de la vegetación, la estructura del sistema radicular, y la capacidad de

las plantas para liberar oxígeno y otros compuestos que estimulan la actividad microbiana. Estudios han mostrado que especies con sistemas radiculares extensos y altos niveles de exudación de compuestos orgánicos pueden lograr mayores eficiencias de remoción de contaminantes (ROBERT H. KADLEC, 2009)

En la siguiente tabla se aprecia la concentración DQO

Tabla 12. Resultados DQO en la entrada y salida de los humedales.

TRH (Días)	Humedal-Especie	Concentración de entrada DQO mg O ₂ /L	Concentración de salida DQO mgO ₂ /
5.569	H1. Heliconia Psittacorum	2768	139
	H2. Musa x Paradisiaca	2217	283
	H3. Colocasia Esculenta	4224	175

7.5.1 Cálculo del porcentaje de remoción DBO_5 .

La fórmula para calcular el porcentaje de remoción de **DQO** es:

$$\text{Porcentaje de remoción} = \left(\frac{\text{concentración de entrada} - \text{concentración de salida}}{\text{concentración de entrada}} \right) \times 100$$

- Heliconia Psittacorum

$$\text{Porcentaje de remoción} = \left(\frac{2768 - 139}{2768} \right) \times 100 = 94,98\%$$

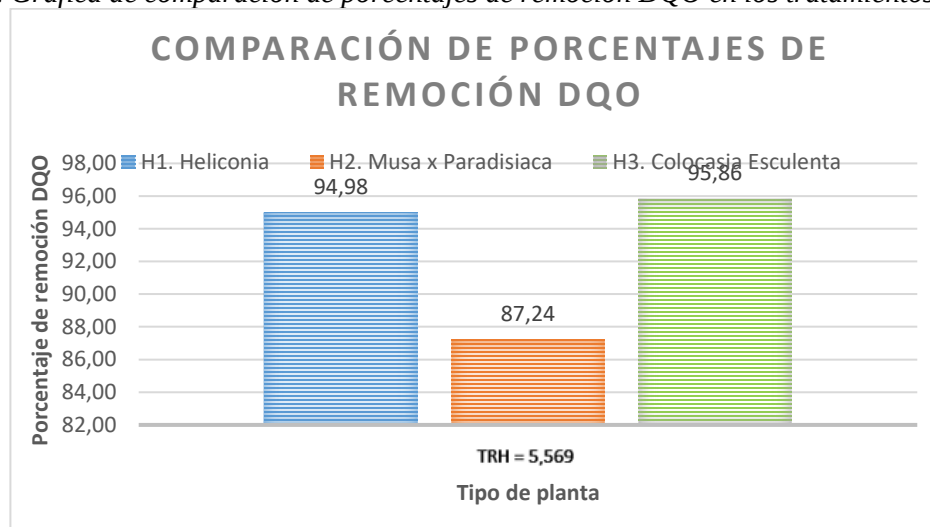
- Musa x Paradisiaca

$$\text{Porcentaje de remoción} = \left(\frac{2217 - 283}{2217} \right) \times 100 = 87,24\%$$

- Colocasia Esculenta

$$\text{Porcentaje de remoción} = \left(\frac{4224 - 175}{4224} \right) \times 100 = 95,86\%$$

Figura 22. Grafica de comparación de porcentajes de remoción DQO en los tratamientos



La Heliconia Psittacorum tiene un porcentaje de remoción de DQO del 94.98%, lo cual es muy alto y sugiere una eficiencia significativa en la degradación de la materia orgánica presente en el agua residual, la Colocasia Esculenta presenta el mayor porcentaje de remoción de DQO con un 95.86%. Esta alta eficiencia puede estar relacionada con una mayor capacidad de exudación de compuestos orgánicos que promueven la actividad microbiana y, por tanto, una mayor degradación de la materia orgánica, al contrario de la Musa x Paradisiaca, que muestra un porcentaje de remoción del 87.24%, inferior al de Heliconia y Colocasia. Este menor porcentaje podría deberse a factores como una menor biomasa o actividad microbiana en comparación con las otras especies.

7.5.2 Comparación ilustrativa con la resolución 699 de 2021 - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Esta resolución fija los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos de aguas residuales tratadas. Para DQO, establece que los límites permisibles deben ser inferiores a 200 mg/L para categorías específicas de vertimientos.

Tabla 13. Comparación de resultados DQO con la resolución 699 de 2021.

TRH (Días)	Humedal-Especie	CATEGORIA III (Velocidad de infiltración: menor a 2,5 mm/h o mayor a 53 mm/h)	salida DQO mgO ₂ /L	Cumple
5.569	H1. Heliconia	200	139	SI
	H2. Musa x Paradisiaca	200	283	NO
	H3. Colocasia Esculenta	200	175	SI

Según la Resolución 699 de 2021 (SOSTENIBLE, 2021), los resultados de DQO para *Heliconia psittacorum* y *Colocasia esculenta* cumplen con los límites permisibles (<200 mg/L), mientras que *Musa x paradisiaca* no cumple con estos límites, ya que su concentración de salida es de 283 mg/L, superando el valor permitido.

La alta eficiencia de remoción de DQO por parte de *Heliconia* y *Colocasia esculenta* puede deberse a sus características morfológicas y fisiológicas que facilitan una mayor actividad microbiana y, por tanto, una mejor degradación de la materia orgánica. En contraste, *Musa x paradisiaca* muestra una menor eficiencia, posiblemente debido a una menor actividad microbiana asociada o diferencias en la capacidad de absorción y metabolización de los compuestos orgánicos presentes en el agua residual.

7.5.3 Según la Reglamentación Técnica del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS)

La RAS 2000 establece criterios técnicos para el diseño y operación de sistemas de tratamiento de aguas residuales. Aunque no especifica directamente los límites permisibles de DQO, sí proporciona directrices para asegurar la eficiencia del tratamiento.

7.6. Fosforo total

El exceso de fósforo en cuerpos de agua puede provocar eutrofización, un proceso que resulta en el crecimiento excesivo de algas y la consecuente disminución de oxígeno, afectando

negativamente a los ecosistemas acuáticos. En la siguiente tabla se evidencian los resultados obtenidos tanto en la entrada del humedal como en la salida de cada tipo de planta.

Tabla 14. Resultados de fósforo total en la entrada y salida de los humedales

TRH (Días)	Humedal-Especie	Concentración de entrada mg P/L	Concentración de salida mg P/L
5.569	H1. Heliconia	10,5	1,2
	H2. Musa x Paradisiaca	10,2	2
	H3. Colocasia Esculenta	7,9	0,8

7.6.1 Cálculo del porcentaje de remoción de fósforo total

La fórmula para calcular el porcentaje de remoción de fósforo total es:

$$\text{Porcentaje de remoción} = \left(\frac{\text{concentración de entrada} - \text{concentración de salida}}{\text{concentración de entrada}} \right) \times 100$$

- Heliconia Psittacorum

$$\text{Porcentaje de remoción} = \left(\frac{10.5 - 1.2}{10.5} \right) \times 100 = 88.57\%$$

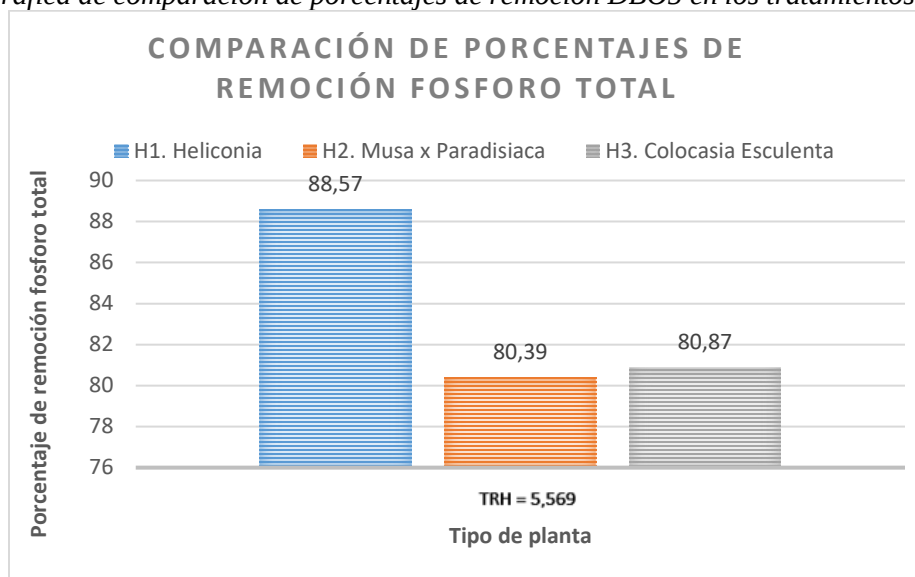
- Musa x aradisiaca

$$\text{Porcentaje de remoción} = \left(\frac{10.2 - 2}{10.2} \right) \times 100 = 80.39\%$$

- Colocasia Esculentax

$$\text{Porcentaje de remoción} = \left(\frac{7.9 - 0.8}{7.9} \right) \times 100 = 80.87\%$$

Figura 23. Grafica de comparación de porcentajes de remoción DBO5 en los tratamientos



El mayor porcentaje de remoción de fósforo total lo tiene la Colocasia Esculenta con un total de 89.87%, seguido de cerca por Heliconia psittacorum con un 88.57% y Musa x paradisiaca tuvo el porcentaje de remoción más bajo, con un 80.39%. La eficiencia superior de Colocasia esculenta y Heliconia psittacorum puede atribuirse a su mayor capacidad de absorción de nutrientes y adaptación a las condiciones del humedal, favoreciendo una mayor retención y remoción de fósforo.

Estos resultados sugieren que Heliconia psittacorum y Colocasia esculenta son más adecuadas para aplicaciones donde se requiere una alta remoción de fósforo, mientras que Musa x paradisiaca, aunque efectiva, podría necesitar apoyo adicional para asegurar el cumplimiento constante de los límites regulatorios.

7.6.2 Comparación ilustrativa con la resolución 699 de 2021 - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Esta resolución fija los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos de aguas residuales tratadas. Para fósforo total, el límite permisible es de 2 mg/L para categorías específicas (SOSTENIBLE, 2021).

Tabla 15. Comparación de resultados fósforo total con la resolución 699 de 2021

TRH (Días)	Humedal-Especie	CATEGORIA III (Velocidad de infiltración: menor a 2,5 mm/h o mayor a 53 mm/h)	salida mg P/L	CUMPLE
5.569	H1. Heliconia	2.0	1.2	SI
	H2. Musa x Paradisiaca	2.0	2.0	SI
	H3. Colocasia Esculenta	2.0	0.8	SI

Todos los resultados de fósforo total para las plantas *Heliconia psittacorum*, *Musa x paradisiaca* y *Colocasia esculenta* cumplen con los límites permisibles establecidos por la Resolución 699 de 2021 (<2 mg/L). La alta eficiencia de remoción observada para *Heliconia* y *Colocasia esculenta* se alinea con estudios previos que han demostrado su capacidad para absorber y retener fósforo de manera efectiva en sistemas de tratamiento de aguas residuales. *Musa x paradisiaca* también cumple, aunque su eficiencia es ligeramente menor, situándose justo en el límite permisible, lo que indica que su capacidad de remoción de fósforo es menos robusta en comparación con las otras dos especies.

7.6.3 Según la Reglamentación Técnica del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS)

La RAS 2000 proporciona directrices técnicas para el diseño y operación de sistemas de tratamiento de aguas residuales, pero no especifica límites exactos para fósforo total. Se enfoca más en asegurar la eficiencia general del tratamiento

7.7. Grasas y aceites

El análisis de grasas y aceites en el efluente de un humedal artificial es crucial para evaluar la eficiencia del tratamiento y su capacidad para reducir contaminantes que pueden causar serios problemas ambientales y operativos. En la siguiente tabla se aprecia la concentración de grasas y aceites antes y después del proceso.

Tabla 16. Resultados de grasas y aceites en la entrada y salida de los humedales

TRH (Días)	Humedal-Especie	Concentración de entrada mg/L	Concentración de salida mg/L
5.569	H1. Heliconia	1064	9
	H2. Musa x Paradisiaca	3060	17
	H3. Colocasia Esculenta	1226	12

7.7.1 Cálculo del porcentaje de remoción grasas y aceites

La fórmula para calcular el porcentaje de remoción de grasas y aceites:

$$\text{Porcentaje de remoción} = \left(\frac{\text{concentración de entrada} - \text{concentración de salida}}{\text{concentración de entrada}} \right) \times 100$$

- Heliconia Psittacorum

$$\text{Porcentaje de remoción} = \left(\frac{1064 - 9}{1064} \right) \times 100 = 99.15\%$$

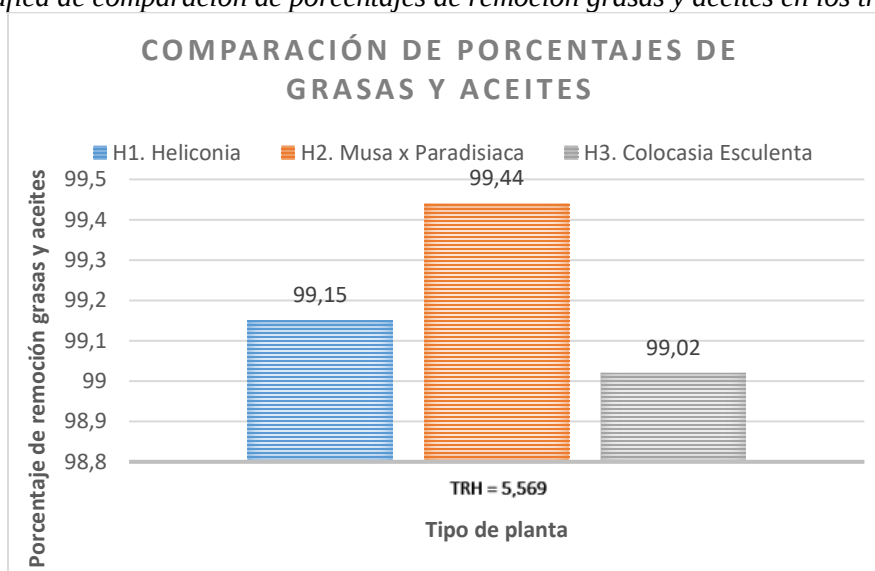
- Musa x aradisiaca

$$\text{Porcentaje de remoción} = \left(\frac{3060 - 17}{3060} \right) \times 100 = 99.44\%$$

- Colocasia Esculenta

$$\text{Porcentaje de remoción} = \left(\frac{1226 - 12}{1226} \right) \times 100 = 99.02\%$$

Figura 24. Grafica de comparación de porcentajes de remoción grasas y aceites en los tratamientos



La Musa x paradisiaca muestra el mayor porcentaje de remoción de grasas y aceites (99.44%), seguido de cerca por Heliconia psittacorum con 99.15%, y Colocasia esculenta con 99.02%.

La alta eficiencia de Musa x paradisiaca puede deberse a su sistema radicular que favorece la adsorción y biodegradación de compuestos grasos. Heliconia y Colocasia también muestran una notable eficiencia, lo que sugiere que todas las plantas son efectivas en la remoción de grasas y aceites.

7.7.2 Comparación ilustrativa con la resolución 699 de 2021 - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Esta resolución fija los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos de aguas residuales tratadas. Para grasas y aceites, el límite permisible es de 20 mg/L (SOSTENIBLE, 2021).

Tabla 17. Comparación de resultados de remoción grasas y aceites con la resolución 699 de 2021

TRH (Días)	Humedal-Especie	CATEGORIA III (Velocidad de infiltración: menor a 2,5 mm/h o mayor a 53 mm/h)	salida mg/L	CUMPLE
5.569	H1. Heliconia	20	9	SI
	H2. Musa x Paradisiaca	20	17	SI
	H3. Colocasia Esculenta	20	12	SI

La concentración de salida de la Heliconia Psittacorum cumple con creces el límite permisible de 20 mg/L según la Resolución 699 de 2021. La remoción eficiente puede atribuirse a la capacidad de esta planta para adsorber y degradar compuestos grasos debido a su estructura radicular y superficie foliar, en la Musa x Paradisiaca, Aunque la concentración de entrada fue significativamente alta (3060 mg/L), la planta logró reducir la concentración de salida a 17 mg/L, cumpliendo con el límite permisible. La alta eficiencia de remoción podría estar relacionada con la capacidad de esta planta para degradar compuestos orgánicos complejos y su sistema radicular extensivo y la concentración de salida de la Colocasia Esculenta también cumple con el límite permisible. La remoción eficiente de grasas y aceites por esta planta puede ser atribuida a su estructura radicular, que favorece la adsorción y biodegradación de estos contaminantes.

Todos los resultados de grasas y aceites para las plantas *Heliconia psittacorum*, *Musa x paradisiaca* y *Colocasia esculenta* cumplen con los límites permisibles establecidos por la Resolución 699 de 2021 (<20 mg/L). La alta eficiencia de remoción observada en todas las plantas sugiere que el humedal artificial es efectivo para el tratamiento de grasas y aceites en aguas residuales, contribuyendo así a la mejora de la calidad del efluente y al cumplimiento de las normativas ambientales colombianas.

7.8. Nitrógeno Total Kjeldhal (NTK)

La nitrificación/desnitrificación es la principal vía para remover nitrógeno. Remociones desde 60 a 86 por ciento. Los humedales artificiales alimentan el proceso de desnitrificación usando fuentes de carbón derivadas de la biomasa producida dentro del humedal. Las remociones de nitrógeno (NKT) que han sido reportadas para tiempos de retención de 5 a 7 días generalmente producen un efluente con NKT menor a 10 mg/L (Z., 2005). En la tabla 16 se encuentra el comportamiento del nitrógeno en cada celda de los humedales.

Tabla 18. Resultados de fósforo total en la entrada y salida de los humedales

TRH (Días)	Humedal-Especie	Concentración de entrada mg N/L	Concentración de salida mg N/L
5.569	H1. <i>Heliconia</i>	24	7
	H2. <i>Musa x Paradisiaca</i>	16	12
	H3. <i>Colocasia Esculenta</i>	44	8

7.8.1 Cálculo del porcentaje de remoción de Nitrógeno Total Kjeldhal.

La fórmula para calcular el porcentaje de remoción de Nitrógeno Total Kjeldhal es:

$$\text{Porcentaje de remoción} = \left(\frac{\text{concentración de entrada} - \text{concentración de salida}}{\text{concentración de entrada}} \right) \times 100$$

- *Heliconia Psittacorum*

$$\text{Porcentaje de remoción} = \left(\frac{24 - 7}{24} \right) \times 100 = 70.83\%$$

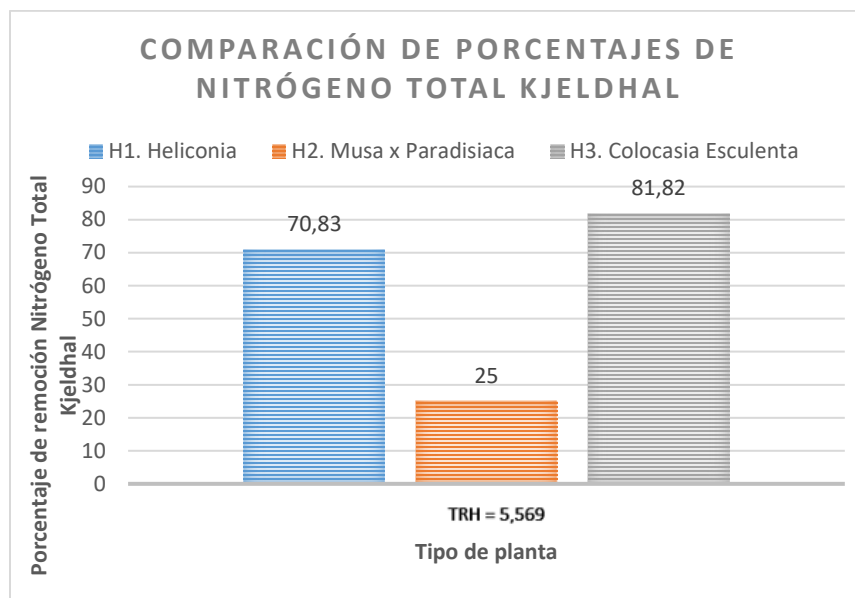
- *Musa x aradisiaca*

$$\text{Porcentaje de remoción} = \left(\frac{16 - 12}{16} \right) \times 100 = 25\%$$

- Colocasia Esculentax

$$\text{Porcentaje de remoción} = \left(\frac{44 - 8}{8} \right) \times 100 = 81.82\%$$

Figura 25. Grafica de comparación de porcentajes de remoción Nitrógeno Total Kjeldhal en los tratamientos.



Colocasia esculenta mostró el mayor porcentaje de remoción de NTK con un 81.82%. Esto sugiere que esta planta es extremadamente eficiente en la eliminación de compuestos nitrogenados, posiblemente debido a su sistema radicular extenso y su capacidad para soportar y facilitar la biodegradación de estos compuestos. Heliconia psittacorum también demostró una alta eficiencia de remoción, con un 70.83%. Aunque no tan alta como Colocasia, sigue siendo una opción efectiva para la remoción de NTK. En cambio la Musa x paradisiaca, aunque tiene un sistema radicular extenso, puede no ser tan efectivo para adsorber y degradar compuestos nitrogenados como las otras dos especies, lo que se refleja en su menor porcentaje de remoción.

La concentración de entrada de NTK para Colocasia esculenta fue significativamente mayor (44 mg/L) en comparación con Heliconia (24 mg/L) y Musa (16 mg/L). A pesar de esta alta carga inicial, Colocasia logró una remoción eficiente, lo que destaca su robustez y efectividad en condiciones de alta contaminación.

7.8.2 Comparación ilustrativa con la resolución 699 de 2021 - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

La Resolución 699 de 2021 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia establece un límite permisible para el NTK en los vertimientos de aguas residuales tratadas, fijado en 20 mg/L. Los resultados obtenidos son los siguientes: (SOSTENIBLE, 2021)

Tabla 19. Comparación de resultados de nitrógeno total kjeldhal con la resolución 699 de 2021

TRH (Días)	Humedal-Especie	CATEGORIA III (Velocidad de infiltración: menor a 2,5 mm/h o mayor a 53 mm/h)	salida mg N/L	CUMPLE
5.569	H1. Heliconia	20	7	SI
	H2. Musa x Paradisiaca	20	12	SI
	H3. Colocasia Esculenta	20	8	SI

Los efluentes tratados con Heliconia y Colocasia Esculenta cumplen con el límite de 20 mg/L para TNK, por lo que pueden ser considerados para reuso en actividades como el riego agrícola o descarga en cuerpos receptores, siempre y cuando se mantenga el cumplimiento de otras normas aplicables. Por el contrario, la Musa x Paradisiaca, Aunque el TNK es menor al límite de 20 mg/L, está cerca del umbral, por lo que puede ser necesario implementar medidas adicionales para asegurar la consistencia del cumplimiento o considerar el tratamiento adicional para cumplir con los estándares.

7.9. Sólidos Suspendidos Totales (SST)

En este sistema la remoción de sólidos se debe a procesos físicos. Debido a que la remoción de SST es rápida en comparación con la de DBO, no se lo considera como un parámetro de diseño (Z., 2005). En la tabla 18 se puede ver el promedio de la carga másica de los sólidos suspendidos totales para cada humedal.

Tabla 20. Resultados de SST en la entrada y salida de los humedales

TRH (Días)	Humedal-Especie	Concentración de entrada mg/L	Concentración de salida mg/L
5.569	H1. Heliconia	1337	16
	H2. Musa x Paradisiaca	1960	30
	H3. Colocasia Esculenta	1576	17

7.9.1 Cálculo del porcentaje de remoción de Suspendidos Totales (SST)

La fórmula para calcular el porcentaje de remoción Suspendidos Totales (SST) es:

$$\text{Porcentaje de remoción} = \left(\frac{\text{concentración de entrada} - \text{concentración de salida}}{\text{concentración de entrada}} \right) \times 100$$

- Heliconia Psittacorum

$$\text{Porcentaje de remoción} = \left(\frac{1337 - 16}{1337} \right) \times 100 = 98.80\%$$

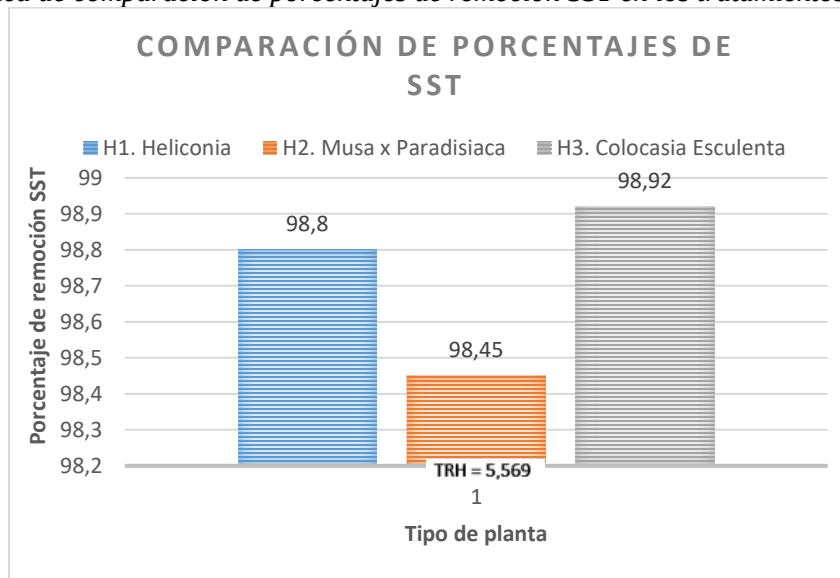
- Musa x aradisiaca

$$\text{Porcentaje de remoción} = \left(\frac{1960 - 30}{1960} \right) \times 100 = 98.45\%$$

- Colocasia Esculentax

$$\text{Porcentaje de remoción} = \left(\frac{1576 - 17}{1576} \right) \times 100 = 98.92\%$$

Figura 26. Grafica de comparación de porcentajes de remoción SST en los tratamientos.



En la evaluación de la eficiencia en la reducción de sólidos suspendidos totales (SST), *Colocasia Esculenta* emerge como la planta más eficiente, logrando una reducción del 98.92%, con una salida de 17 mg/L, que está claramente por debajo del límite normativo de 50 mg/L. Este alto rendimiento en la reducción de SST se traduce en una capacidad superior para clarificar el efluente y garantizar el cumplimiento de las regulaciones ambientales. *Heliconia*, con una reducción del 98.80% y una salida de 16 mg/L, también muestra un excelente desempeño, cumpliendo con los estándares y acercándose a la eficiencia de *Colocasia Esculenta*. Sin embargo, *Musa x Paradisiaca*, aunque es la más baja, es eficaz en la reducción de SST. La comparación indica que *Colocasia Esculenta* no solo es la más eficaz en la reducción de SST, sino que también asegura una mayor conformidad con las normativas ambientales, lo que la convierte en la opción preferida para el tratamiento de efluentes en este contexto.

7.9.2 Comparación ilustrativa con la resolución 699 de 2021 - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Según la Resolución 699 de 2021 y el Decreto 1076 de 2015, el límite permisible de SST para efluentes es de 50 mg/L. Analizando los resultados obtenidos (SOSTENIBLE, 2021).

Tabla 21. Comparación de resultados SST con la resolución 699 de 2021

TRH (Días)	Humedal-Especie	CATEGORIA III (Velocidad de infiltración: menor a 2,5 mm/h o mayor a 53 mm/h)	salida mg N/L	CUMPLE
5.569	H1. <i>Heliconia</i>	50	16	SI
	H2. <i>Musa x Paradisiaca</i>	50	30	SI
	H3. <i>Colocasia Esculenta</i>	50	17	SI

Según la Resolución 699 de 2021, que regula la calidad de los efluentes y clasifica los niveles de tratamiento necesarios según las categorías de contaminación, para la categoría 3, los sólidos suspendidos totales (SST) deben ser menores a 50 mg/L. Esta norma asegura que los efluentes tratados cumplen con los requisitos básicos para su descarga en cuerpos receptores o reuso sin causar impactos negativos significativos en el medio ambiente. Evaluando los resultados obtenidos, *Colocasia Esculenta* y *Heliconia* presentan salidas de SST de 17 mg/L y 16 mg/L, respectivamente, ambas por debajo del umbral de 50 mg/L establecido para la categoría 3,

cumpliendo así con la normativa. Musa x Paradisiaca, con una salida de 30 mg/L, también se encuentra por debajo del límite de 50 mg/L, aunque no alcanza el nivel óptimo de 20 mg/L recomendado para una mayor eficiencia. En conclusión, todas las plantas evaluadas cumplen con los requisitos básicos de la normativa para la categoría 3 en cuanto a SST, pero Colocasia Esculenta y Heliconia ofrecen un desempeño superior al de Musa x Paradisiaca, que, aunque dentro del límite permisible, podría necesitar ajustes para optimizar el tratamiento y asegurar una mayor eficiencia en la reducción de SST.

7.10. Surfactantes (Tensoactivos – detergentes)

A continuación, se muestra una tabla con los resultados obtenidos para la concentración de surfactantes en las muestras de agua tomadas de los diferentes tipos de plantas. Esta tabla incluye las concentraciones de surfactantes en las muestras de entrada (agua cruda) y salida (agua tratada) del humedal. El análisis de estos resultados permitirá evaluar la eficiencia del sistema en la eliminación de surfactantes y determinar si el humedal cumple con los estándares normativos establecidos para la calidad del efluente.

Tabla 22. Resultados de surfactantes en la entrada y salida de los humedales.

TRH (Días)	Humedal-Especie	Concentración de entrada mg MBAS/L	Concentración de salida mg MBAS/L
5.569	H1. Heliconia	15.0	20.7
	H2. Musa x Paradisiaca	22.3	50.9
	H3. Colocasia Esculenta	15.7	1.1

7.10.1 Comparación ilustrativa con la resolución 699 de 2021 - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

La Resolución 699 de 2021, en conjunto con el Decreto 1076 de 2015, establece un límite muy estricto de 0.5 mg/L para la concentración de surfactantes en las aguas tratadas. A continuación, se muestra la tabla con las concentraciones de surfactantes en el agua de entrada y salida para cada tipo de planta en el humedal (SOSTENIBLE, 2021).

Tabla 23. Comparación de resultados surfactantes con la resolución 699 de 2021

TRH (Días)	Humedal-Especie	CATEGORIA III (Velocidad de infiltración: menor a 2,5 mm/h o mayor a 53 mm/h)	salida	CUMPLE
5.569	H1. Heliconia	0.5	20.7	NO
	H2. Musa x Paradisiaca	0.5	50.9	NO
	H3. Colocasia Esculenta	0.5	1.1	NO

Los resultados indican que ninguno de los tipos de plantas evaluadas cumple con el límite de 0.5 mg/L para surfactantes establecido por la Resolución 699 de 2021. Heliconia y Musa x Paradisiaca no solo superan el límite permisible, sino que también muestran un incremento en los niveles de surfactantes, indicando deficiencias significativas en el proceso de tratamiento. Colocasia Esculenta, aunque muestra una reducción en la concentración de surfactantes, no alcanza el límite normativo, reflejando que, a pesar de ser la opción más efectiva entre las evaluadas, aún requiere mejoras para cumplir con los estándares de calidad exigidos por la normativa.

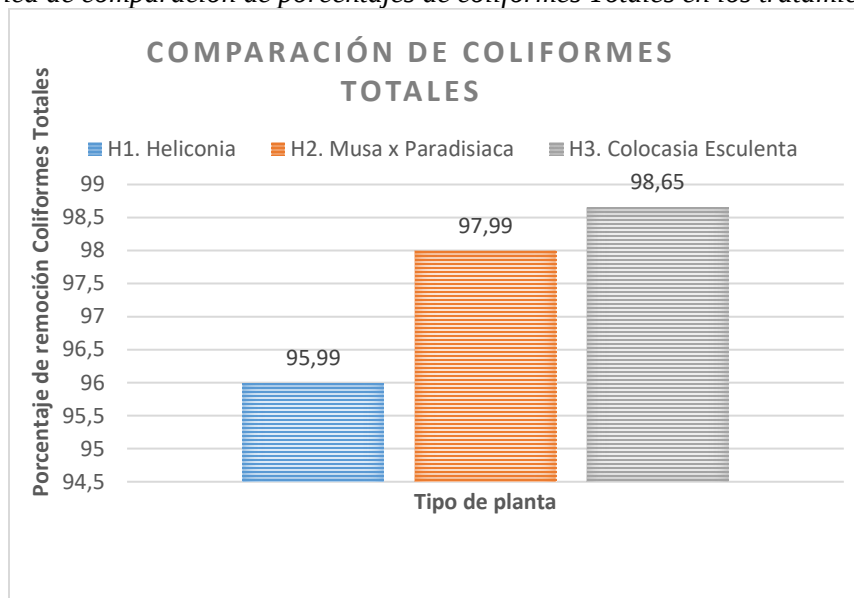
7.11. Coliformes Totales.

Con el objetivo de garantizar que el agua tratada sea segura para su descarga o reutilización. A continuación, se muestra la tabla con las concentraciones de coliformes totales en las muestras de entrada y salida para cada tipo de planta en el humedal:

Tabla 24. Resultados de Coliformes Totales en la entrada y salida de los humedales

TRH (Días)	Humedal-Especie	Concentración de entrada NMP/100mL	Concentración de salida NMP/100mL
5.569	H1. Heliconia	60500000	2419600
	H2. Musa x Paradisiaca	121100000	2419600
	H3. Colocasia Esculenta	178500000	2419600

Figura 27. Grafica de comparación de porcentajes de coliformes Totales en los tratamientos.



Las tres plantas muestran un alto grado de eficiencia en la reducción de coliformes totales, con reducciones superiores al 95%. Sin embargo, Colocasia Esculenta logra la mayor reducción porcentual, seguida de Musa x Paradisiaca y luego Heliconia.

Análisis: Heliconia muestra una reducción significativa en la concentración de coliformes totales, con una disminución del 95.99%. A pesar de esta notable reducción, el nivel de coliformes en el efluente tratado sigue siendo elevado, con 2,419,600 NMP/100 mL. Aunque se logra una reducción considerable, el efluente no cumple con los estándares de calidad más estrictos, que generalmente buscan concentraciones mucho más bajas.

Aunque Colocasia Esculenta es la planta más eficiente en términos de reducción porcentual de coliformes totales, con una disminución del 98.65%, y sigue con Musa x Paradisiaca y Heliconia, los resultados muestran que ninguna de las plantas logra reducir los niveles de coliformes totales a un nivel conforme con los estándares más exigentes. Esto sugiere que, aunque el sistema de humedal artificial tiene una capacidad notable para reducir coliformes, se requiere una optimización adicional en el diseño o en el proceso de tratamiento para cumplir con los estándares de calidad de efluentes más estrictos.

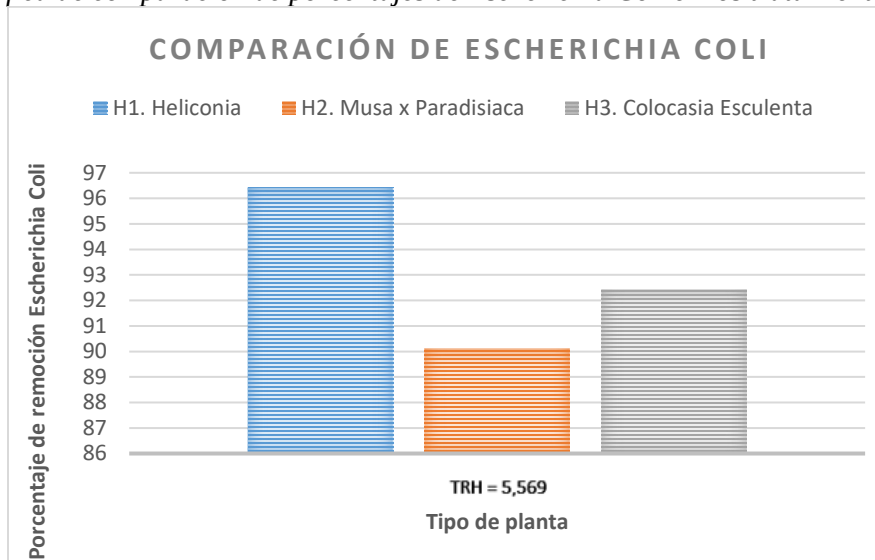
7.12. Escherichia Coli

Escherichia coli es un indicador clave de la calidad del agua, y su presencia en el efluente tratado debe reducirse significativamente para cumplir con los estándares de calidad. A continuación, se muestra la tabla con las concentraciones de *Escherichia coli* en las muestras de entrada y salida para cada tipo de planta en el humedal:

Tabla 25. Resultados de *Escherichia Coli* en la entrada y salida de los humedales

TRH (Días)	Humedal-Especie	Concentración de entrada NMP/100mL	Concentración de salida NMP/100mL
5.569	H1. Heliconia	1000000	35900
	H2. Musa x Paradisiaca	1000000	98800
	H3. Colocasia Esculenta	1000000	75900

Figura 28. Grafica de comparación de porcentajes de *Escherichia Coli* en los tratamientos.



Las tres plantas muestran una alta eficiencia en la reducción de *Escherichia coli*, con reducciones superiores al 90%. Heliconia tiene la mayor eficacia relativa, con una reducción del 96.41%, seguida de Colocasia Esculenta con una reducción del 92.41% y luego Musa x Paradisiaca con una reducción del 90.12%. A pesar de la alta eficiencia en la reducción, las concentraciones finales de *Escherichia coli* siguen siendo elevadas en comparación con los estándares más estrictos para agua tratada. Esto sugiere que, aunque Heliconia es la más eficiente, ninguna de las plantas alcanza el nivel requerido para cumplir con los límites más rigurosos.

8. Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos se pudo concluir lo siguiente:

- Los hallazgos de la evaluación de las plantas en los humedales artificiales indican que *Musa x paradisiaca* alcanzó la mayor disminución de la carga contaminante en parámetros como DBO₅, DQO, grasas y aceites. Esta especie demostró una destacada habilidad para absorber y retener nutrientes y sustancias contaminantes, lo que resultó en un tratamiento más eficiente de las aguas residuales. Por otro lado, la *Heliconia Psittacorum* demostró un desempeño significativo también, aunque fue menor que el de *Musa x paradisiaca*, lo cual insinúa que, a pesar de ser menos eficiente, sigue siendo una alternativa viable para la restauración de las aguas. Este descubrimiento resalta la importancia de elegir especies vegetales adecuadas para optimizar la eficiencia de los humedales artificiales en el tratamiento de los desechos líquidos.
- En resumen y de manera generalizada podemos decir que las tres plantas mostraron diferentes niveles de adaptación al ambiente de aguas residuales (ARD), resaltando el buen desempeño de *Heliconia Psittacorum* en comparación al resto. Este tipo de planta no solo creció notablemente hasta aproximadamente 60 cm más en tamaño, sino que también se reprodujo eficientemente en condiciones de ARD. Mientras que la planta *Musa x paradisiaca* también demostró ser adaptable al entorno al crecer casi 80 cm de altura; sin embargo, se vio afectada por la pérdida temprana de una hoja nueva; lo que pone de manifiesto su vulnerabilidad en las etapas iniciales del crecimiento de la planta.
- En el presente humedal artificial no se implementó la trampa de grasas y aceites, ya que el objetivo principal era evaluar de manera precisa el porcentaje de remoción de estos contaminantes en el sistema. Al omitir la trampa, se pudo observar y cuantificar la efectividad del humedal en la reducción natural de grasas y aceites a través de los procesos biológicos y físicos que ocurren en este tipo de ecosistemas. Esta decisión permite obtener datos más representativos sobre la capacidad del humedal para tratar efluentes, proporcionando información valiosa para futuras investigaciones y mejoras en el diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales. Así, se logró un enfoque integral que favorece la comprensión de la dinámica de remoción de contaminantes en condiciones reales.
- A medida que aumenta el tiempo de retención hidráulica (TRH), la remoción de fosfato (P-PO₄) tiende a ser menos eficiente. Esto se debe a que, con un TRH más largo, el fosfato tiene

más tiempo para sedimentarse en el fondo del sistema, lo que dificulta su remoción. Cuando el fosfato se sedimenta, se reduce la interacción directa entre las plantas y la biopelícula que se forma en las superficies de las raíces de las plantas y otros sustratos del humedal. Cuando el fosfato se encuentra en forma sedimentada, está menos accesible para ser procesado por estos microorganismos y la biopelícula, lo que limita la capacidad del sistema para eliminar eficientemente el nutriente, especialmente durante períodos prolongados de retención.

- Cada planta utilizada en el presente proceso de estudio presenta una característica específica para la remoción de parámetros siendo unos más significativos que otros, lo que podría ser usado como biorremediador de acuerdo al conocimiento de parámetros de las aguas vertidas y el porcentaje de remoción de cada parámetro.
- Los resultados obtenidos de la *Heliconia psittacorum* en fitorremediación demuestran que esta planta tiene un gran potencial tanto en la aclimatación a las condiciones de los humedales artificiales como en la capacidad de eliminación de DBO₅, DQO, y SST ya que el resultado arrojó porcentajes mayores al 70% en su capacidad para acumular metales pesados. Por otro lado, esta planta genera beneficios económicos al comercializarse por su estética y belleza de su inflorescencia.
- Según la normativa colombiana los resultados obtenidos de pH se encuentran en los rangos óptimos para el desarrollo de los microorganismos, por ende, estas aguas tratadas pueden ser vertidas sin problema, no va ocasionar impactos negativos en los cuerpos de agua receptores.
- Según la Resolución 699 de 2021. *Heliconia* y *Musa x Paradisiaca* no solo superan el límite permisible que es de 0,5 mg/L, sino que también muestran un incremento en los niveles de surfactantes, indicando deficiencias significativas en el proceso de tratamiento. *Colocasia Esculenta*, aunque muestra una reducción en la concentración de surfactantes, no alcanza el límite normativo, reflejando que, a pesar de ser la opción más efectiva entre las evaluadas, aún requiere mejoras para cumplir con los estándares de calidad exigidos por la normativa.

9. Recomendaciones

- En base a los resultados obtenidos en tu tesis sobre humedales artificiales, se recomienda implementar un enfoque integral para optimizar el tratamiento de surfactantes. Dado que *Heliconia* y *Musa x Paradisiaca* no solo superan el límite permitido de 0.5 mg/L, sino que también muestran un incremento en los niveles de surfactantes, es crucial considerar la selección de especies vegetales más eficientes o la combinación de diferentes especies para mejorar el proceso de tratamiento. Además, aunque *Colocasia Esculenta* muestra una reducción en la concentración de surfactantes, es evidente que requiere ajustes adicionales en su manejo y en las condiciones del sistema. Se sugiere realizar un análisis más profundo de las condiciones operativas y explorar el uso de aditivos biológicos o técnicas de remediación complementarias que puedan potenciar la capacidad de eliminación de surfactantes en los humedales artificiales. Esto permitirá no solo cumplir con la normativa establecida, sino también mejorar la eficiencia general del tratamiento de aguas residuales.
- Se recomienda la combinación de las especies de plantas evaluadas en tu tesis para maximizar la eficacia del tratamiento en los humedales artificiales. Cada especie mostró un rendimiento destacado en parámetros específicos: *Heliconia* fue la más eficaz en la reducción de DBO₅, DQO y *Escherichia Coli*; *Colocasia esculenta* se destacó en la eliminación de fósforo, coliformes, sólidos suspendidos totales (SST) y nitrógeno; y *Musa x paradisiaca* mostró los mejores resultados en carga contaminante, pH, y grasas y aceites. Al integrar estas especies en un sistema de humedal artificial, se podría aprovechar la capacidad única de cada planta para abordar diversos contaminantes, creando un entorno sinérgico que mejore la calidad del agua tratada. Esta estrategia no solo podría optimizar el rendimiento del sistema, sino también contribuir a un tratamiento más holístico y efectivo de las aguas residuales, alineándose con las metas de sostenibilidad y cumplimiento normativo.

10. Referencias bibliográficas

- Rojas-Sandoval, J y Acevedo-Rodríguez, P. (2013). *Colocasia esculenta (taro)*. Compendio CABI. 17221. <https://doi.org/10.1079/cabicompendium.17221>
- Arias, B. (s.f.). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina. (13). 17-24. <https://biblioteca.cehum.org/bitstream/123456789/1023/1/Arias,%20Brix.%20Humedales%20artificiales%20para%20el%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales.pdf>
- Asamblea Nacional Constituyente. (1991). Constitución Política de Colombia de 1991. http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/constitucion_politica_1991.html
- Barceló Quintal, I. D., & Osorio Benítez, B. (2019). *Remoción de fósforo mediante un humedal de subsuperficial de flujo horizontal*. Universidad Autónoma Metropolitana. <https://zaloamati.azc.uam.mx/server/api/core/bitstreams/731d35bf-3d55-4984-9de9-9cb4ff0a634d/content>
- Beascoechea, E. (2009). Manual de depuración mediante el uso de macrofitas. https://issuu.com/eriborri/docs/manual_depuracion_macrofitas/7
- Bravo, H. V. (2021). Humedales artificiales para tratar el agua. Hidropluviales. <https://hidropluviales.com/2021/01/19/humedales-artificiales-para-tratar-el-agua/>
- Delgadillo, O., & Corzo, A. C. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Revista de Tecnología Ambiental, 8(3), 345-358. <https://core.ac.uk/download/pdf/48017573.pdf>
- Espinoza, G. (2001). Fundamentos de evaluación de impacto ambiental. <https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/sial-sialpuno/archivos/public/docs/323.pdf>
- García Serrano, J., & Corzo, A. (2008). Depuración con humedales construidos. Actas del Congreso Internacional sobre Tratamiento de Aguas, 145-157. https://upcommons.upc.edu/e-prints/bitstream/2117/2474/1/JGarcia_and_ACorzo.pdf
- González, J. F. (2004). Manual de fitodepuración. https://fundacionglobalnature.org/wp-content/uploads/2020/01/manual_fitodepuracion.pdf
- Guerra, A. B. (2023, mayo 30). Análisis fisicoquímico de grasas y aceites. <https://www.ecoquimsa.com.gt/temas-tcnicos/anlisis-fisicoquimico-de-grasas-y-aceites>

- Hanna Instruments. (s.f.). Demanda química de oxígeno. <https://www.hannainst.es/blog/81/demanda-quimica-de-oxigeno#:~:text=La%20Demanda%20Qu%C3%ADmica%20de%20Ox%C3%ADgeno,expresa%20en%20mg%2F1%20O2>
- Hidropluviales, S. (2021, junio). Humedales para tratar el agua. <https://hidropluviales.com/2021/01/19/humedales-artificiales-para-tratar-el-agua/>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec). (2004). Calidad del agua. Muestreo. Parte 3: Directrices para la (2000, 2000) preservación y manejo de las muestras. Icontec.
- Iqbal, N., & Tufail, M. (2019). Phytoremediation of Cd-Contaminated Soil and Water. *Environmental Management*, 24(4), 356-368. https://www.researchgate.net/publication/330341050_Phytoremediation_of_Cd-Contaminated_Soil_and_Water
- Irama Núñez, E. G.-G. (2003). La biodiversidad: Historia y contexto de un concepto. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 37(7), 1-16. https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0378-18442003000700006&script=sci_arttext
- Jerez, E. (2007). Cultivo de las heliconias. *Revista Iberoamericana de Ciencias Ambientales*, 22(6), 85-95. <https://www.redalyc.org/pdf/1932/193215858005.pdf>
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands* (2nd ed.). CRC Press.
- Marin-Muñoz, A. (2016). Remoción de contaminantes de aguas residuales por medio de humedales artificiales establecidos en el municipio de Actopan, Veracruz, México. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 16(3), 553-556. <https://revistas.mx/actas>
- Merck. (s.f.). Parámetros de calidad del agua. Merck Millipore. https://www.merckmillipore.com/CO/es/20131007_162342
- Microlab Industrial. (s.f.). Coliformes totales. Parámetros microbiológicos. <https://www.microlabindustrial.com/parametros/patogenos/183/coliformes-totales>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021, julio 6). Resolución No. 699 de 2021. “Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales Domésticas Tratadas al suelo, y se dictan otras disposiciones <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/resolucion-0699-de-2021.pdf>

- Ministerio de Ambiente y Vivienda. (2010). Título J. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico: Alternativas tecnológicas en agua. https://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/100811_titulo_j_ras%20_.pdf
- Ministerio de Desarrollo Económico. (2000). Reglamento Técnico del Sector Agua Potable y Saneamiento Básico. Recuperado de https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/010710_ras_titulo_e_.pdf
- Ministerio de Desarrollo Económico. (2000). Reglamento Técnico del Sector Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS). (2000). Tratamiento de aguas residuales. Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico. https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/010710_ras_titulo_e_.pdf
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2000). Título e. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico. Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico. https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/010710_ras_titulo_e_.pdf
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). Resolución 0330 de 2017. Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005 y 2320 de 2009. <https://minvivienda.gov.co/normativa/resolucion-0330-2017-0>
- Nariño, U. A. (2024, julio). La encrucijada del agua en Colombia: De los retos urbanos al compromiso rural con el tratamiento de aguas residuales. Universidad Autónoma de Nariño. <https://www.uan.edu.co/component/k2/item/6198-la-encrucijada-del-agua-en-colombia-de-los-retos-urbanos-al-compromiso-rural-con-el-tratamiento-de-aguas-residuales>
- Niño, I. D., & Ávila-Gómez, B. (2018). Fitorremediación en aguas residuales sin tratamiento previo. Caso: Tierra Negra, Boyacá. *Revista Tecnogestión*, 15(2), 12-24. <https://revistas.unbosque.edu.co/index.php/RevTec/article/view/2950/2319>
- Orellana, I. J. (2005). Tratamiento de las aguas. Ingeniería Sanitaria. https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/ing_sanitaria/Ingenieria_Sanitaria_A4_Capitulo_06_Tratamiento_de_Aguas.pdf
- Orjuela, A. M. (2020). Evaluación de remoción de contaminantes en aguas residuales domésticas por plantas ornamentales mediante humedales flotantes en el cantón militar de Apiay,

- Villavicencio (Meta). [Trabajo de grado. Universidad Santo Tomas] Repositorio <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/30317/2020omarhern%c3%a1ndez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Peña-Salamanca Enrique J., Madera-Parra C., Sanchez Jesus M., Medina J. (2013). s Bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediación: Caso: Heliconia Pssitacorum (Heliconiaceae). Revista De La Academia Colombiana De Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales, 37(145), 469–481. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.29>
- Prajapati, R., Kalariya, M., Umbarkar, R., Parmar, S., & Sheth, N. (2011). *Colocasia esculenta*. *International Journal of Nutrition, Pharmacology, Neurological Diseases*, 1(2), 90-96. https://journals.lww.com/ijnp/fulltext/2011/01020/Colocasia_esculenta__A_potent_indigenous_plant.2.aspx
- Presidencia de la República de Colombia. (2015). Decreto 1076 de 2015. Por el cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>
- Presidencia de la República de Colombia. (21, diciembre de 2012). Decreto 2667 de 2012. Tasa retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales, y se toman otras determinaciones. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=51042>
- Rivera, C. R. (2014, marzo). La calidad del agua, E. coli y su salud. Universidad de Arizona. <https://extension.arizona.edu/sites/extension.arizona.edu/files/pubs/az1624s.pdf>
- Rodríguez, J. R. (2018). El cultivo de plátano (*Musa paradisiaca*) como modelo de producción agrícola para el fortalecimiento de la Vereda Monte Adentro, Municipio de Saravena. Revista de Ingeniería Agronómica, 21(3), 112-130. https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1093&context=ingenieria_agronomica
- Rojas Reina, C. J., Mosquera Beltrán, Y. N., Duque Pardo, V., Gómez Ortiz, C. D., Burgos Contento, J. B., Romero Novoa, J. A., Arboleda Montes, L. J., Córdoba Guatavita, A. R., Ariza Marín, L. J., Bolaños Briceño, J. A., Ramírez Martínez, J. E., y Cubides Dussan, O. L. (2020). Ciencia, ambiente y academia: Aportes de la formación en investigación en Ingeniería Ambiental para el desarrollo sostenible 2017-2018. Ediciones USTA

- Serrano, J. G. (2008, noviembre). Depuración con humedales construidos. *Revista de Ciencias Ambientales*, 26(9), 221-234. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/2474>
- Silva, A. & Zamora, H.. (2005). Humedales artificiales. [Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio institucional. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/2736/angelasofiasilvahernandariozamora.2005.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (1998). Design Manual. Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Water TreatmentHydric. https://cdn.prod.website-files.com/64e8a5032684ac360225ee48/657903304f45e234bff5a777_WetlandsDesign_Hydrik.pdf
- Vera, A. (2018). Proyecto de flora y vegetación acuática en áreas de la Orinoquia. [Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio institucional. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/63831/flora%20y%20vegetaci%c3%93n%20acu%c3%81tica%20en%20%c3%81reas%20de%20la%20orinoquia%20colombiana.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Zitácuaro-Contreras, I., & J.-M., M. (2022). Vegetación ornamental utilizada en fitorremediación y sus potencialidades ambientales, económicas y sociales. *Revista de Biología y Ciencias Ambientales*, 17(3), 45-62. <https://revistas.ujat.mx/index.php/jobs/article/view/5353/3931>
- Zúñiga, M. C., & Carrillo, W. C. (2009). Bioindicadores de calidad de agua y caudal ambiental. Universidad del Valle.