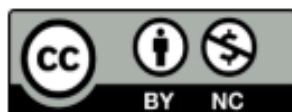


EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE HUMEDALES ARTIFICIALES PILOTO,
IMPLEMENTADOS CON LA ESPECIE *Heliconia psittacorum*, EN LA REMEDIACIÓN
DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DE BAJO CAUDAL PARA ZONAS
RURALES DEL PIEDEMONTES LLANERO.



SARA DANIELA RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ
YUDEIMY VARGAS NIÑO



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2019

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE HUMEDALES ARTIFICIALES PILOTO,
IMPLEMENTADOS CON LA ESPECIE *Heliconia psittacorum*, EN LA REMEDIACIÓN
DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DE BAJO CAUDAL PARA ZONAS
RURALES DEL PIEDEMONTE LLANERO.

SARA DANIELA RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ
YUDEIMY VARGAS NIÑO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniera Ambiental

Asesor
HENRY CONTRERAS LEÓN
Ingeniero Ambiental y de saneamiento
Especialista en Química Ambiental

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2019

Autoridades Académicas

P. JUAN UBALDO LÓPEZ SALAMANCA, O. P.
Rector General

P. MAURICIO ANTONIO CORTÉS GALLEGO
Vicerrector Académico General

P. JOSÉ ARTURO RESTREPO RESTREPO, O. P.
Rector Sede Villavicencio

P. RODRIGO GARCÍA JARA, O.P
Vicerrector Académico Sede Villavicencio

JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN
Secretaria de División Sede Villavicencio

Ing. YÉSICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN
Decana Facultad de Ingeniería Ambiental

Nota De Aceptación

YÉSICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN

Decano de Facultad

HENRY CONTRERAS LEÓN

Director Trabajo de Grado

YÉSICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN

jurado

VERÓNICA DUQUE PARDO

jurado

Dedicatoria

A Dios por llenarme de sabiduría, inteligencia y paciencia desde el primer día de universidad, hasta el día de hoy; por hacer de mí una persona íntegra, y por mantenerme de pie ante cualquier circunstancia.

A mi madre Nohora Rodríguez por su apoyo y amor incondicional en cada una de las etapas de mi vida, por darme la mano cuando más lo necesité, para ella será este y todos los logros que consiga en mi vida.

A mi hermano Wilnor Rodríguez por confiar en mí y por su gran esfuerzo en pro de mi futuro, por él y para él este logro; y a mi hermana Sindy Rodríguez por sus consejos y por ser mi soporte en momentos difíciles.

A mi amado compañero de vida Andrés Vargas, por su cariño, apoyo, y amor sin límites, siendo un gran ejemplo para mi vida de perseguir mis sueños sin excusas, y por estar conmigo sin importar la circunstancia

Y por último a mis sobrinos, Diego, Annie, Santiago y Sofía, los amo con todo mi corazón

Sara Daniela Rodríguez Rodríguez

A Dios por haberme dado la vida y permitirme llegar a este punto tan importante para mi vida.

A mis padres: Jorge Vargas y Rosalba Niño, quienes con su amor y esfuerzo me han apoyado para cumplir uno de mis sueños más importantes, y ser los principales promotores de mis metas, por creer en mí y enseñarme los valores y principios necesarios para ser cada día mejor persona.

A mi novio por sus palabras de ánimo en los momentos que más lo necesité.

Y a aquellas personas que de una u otra manera aportaron su granito de arena para ayudarme a llegar hasta donde me encuentro hoy.

Yudeimy Vargas Niño

Agradecimientos

Agradecemos principalmente a Dios por habernos permitido llegar a este punto de nuestras vidas, por habernos puesto en esta ciudad, en esta universidad, en esta hermosa carrera, y habernos permitido coincidir como compañeras, desde la primera semana de universidad hasta el día de hoy, donde fuimos cómplices, amigas y ahora, hermanas.

A nuestras familias, quienes estuvieron en todo momento para nosotras, sin ellos nada de esto hubiese sido posible, les agradecemos por haber confiado en nosotras, por apoyarnos moral y económicamente, fueron y siempre serán nuestro motor para trazar y cumplir todos nuestros objetivos.

A nuestra alma mater, la Universidad Santo Tomás de Villavencio, por habernos brindado todas las herramientas de alta calidad para aprender de forma teórica y práctica los temas necesarios para afrontar nuestra vida personal y profesional de manera íntegra.

A nuestro director, el ingeniero Henry Contreras León, quien confió en nosotras y nos apoyó, su inteligencia y veracidad ha sido clave para no hacer un simple proyecto de grado, sino dejar huella con este trabajo, siempre pensando en pro del medio ambiente y de nuestra región.

Y en general a todos los profesores que contribuyeron con sus conocimientos, para ejecutar una idea que no sólo fue un medio para graduarnos, sino también nos cambió la forma de ver muchas cosas, y estamos seguras que no fue en vano cada esfuerzo.

Contenido

RESUMEN.....	11
INTRODUCCIÓN	13
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
1.1 FORMULACIÓN EN TORNO AL PROBLEMA.....	16
2. OBJETIVOS.....	18
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
3. JUSTIFICACIÓN.....	19
4. ALCANCE.....	21
5. ANTECEDENTES Y MARCO REFERENCIAL.....	23
5.1 ANTECEDENTES.....	23
5.2 MARCO TEÓRICO.....	25
5.3 MARCO CONCEPTUAL	26
5.3.1 Tipo de humedales artificiales	26
5.3.2 Componentes de un humedal artificial	29
5.3.3 Parámetros de interés para el tratamiento por humedales artificiales	31
5.4 MARCO LEGAL	33
6. METODOLOGÍA.....	35
6.1 FASE I: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES.....	35
6.1.1 Dimensiones.....	36
6.1.2 Volumen	37
6.1.3 Cultivo y desarrollo de la especie <i>H. psittacorum</i>	37
6.2 FASE II: DESARROLLO EXPERIMENTAL	38
6.2.1 Variables manipuladas	38
6.2.2 Diseño experimental	39
6.2.3 Procedimiento metodológico	41
6.3 FASE III: TABULACIÓN Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS	43
6.3.1 Tabulación y análisis inicial.....	43
6.3.2 Análisis estadístico ANOVA en IBM SPSS.....	43
6.3.3 Análisis de regresión y coeficiente de determinación PEARSON.....	44

6.4	FASE IV: PROPUESTA DE RECOMENDACIONES TÉCNICAS PARA EL USO DE ESTE SISTEMA EN EL PIEDEMONTE LLANERO	44
7.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	45
7.1	RENDIMIENTOS OBTENIDOS EN TÉRMINOS DE PORCENTAJES DE REMOCIÓN	45
7.1.1	<i>Características iniciales del agua residual doméstica sintética.....</i>	<i>45</i>
7.1.2	<i>Porcentajes de remoción para los tres parámetros DBO, DQO, y SST</i>	<i>48</i>
7.1.3	<i>Remoción de DBO₅</i>	<i>50</i>
7.1.4	<i>Remoción de DQO</i>	<i>52</i>
7.1.5	<i>Remoción SST</i>	<i>54</i>
7.1.6	<i>Porcentaje de remoción teniendo en cuenta el tipo de humedal y los tratamientos</i>	<i>55</i>
7.1.7	<i>Análisis estadístico de los datos y confirmación de hipótesis experimental.....</i>	<i>57</i>
7.2	EFFECTIVIDAD DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES IMPLEMENTADOS CON LA ESPECIE <i>H. PSITTACORUM</i>	64
7.3	RECOMENDACIONES TÉCNICAS PARA EL USO DE HUMEDALES ARTIFICIALES CON LA ESPECIE <i>HELICONIA PSITTACORUM</i>	66
7.3.1	<i>Características del piedemonte llanero</i>	<i>66</i>
7.3.2	<i>Recomendaciones técnicas para el piedemonte llanero</i>	<i>67</i>
	CONCLUSIONES.....	70
	RECOMENDACIONES.....	72
	BIBLIOGRAFÍA.....	74

Lista de tablas

Tabla 1. Normatividad vigente aplicable al proyecto	33
Tabla 2. Tiempos de retención y caudales	38
Tabla 3. Diseño metodológico	39
Tabla 4. Descripción del desarrollo experimental	41
Tabla 5. Condiciones del ARDS iniciales para cada tratamiento	45
Tabla 6. Datos de porcentaje de cobertura vegetal, altura y densidad de la especie H. psittacorum.....	47
Tabla 7. Porcentaje de remoción de cada humedal artificial en los tres parámetros	49
Tabla 8. Porcentajes de remoción de los humedales, con la especie H. psittacorum y el humedal blanco.	56
Tabla 9. Media y desviación estándar para cada tratamiento	58
Tabla 10. Resultados de la prueba de esfericidad Mauchly.....	60
Tabla 11. Prueba de efectos intra-sujetos	61
Tabla 12. Relación de los porcentajes de remoción para los parámetros DBO, DQO y SST, con los antecedentes.....	64
Tabla 13. Datos de temperatura y precipitación en el tiempo de la investigación.....	61
Tabla 14. Área superficial necesaria para diferentes núcleos	68

Lista de Figuras

Figura 1. Ubicación de los humedales artificiales a escala piloto.	21
Figura 2. Humedal artificial de flujo superficial.....	27
Figura 3. Sección transversal de un sistema de flujo subsuperficial horizontal.	28
Figura 4. Sección transversal de un sistema de flujo subsuperficial vertical.....	29
Figura 5. Humedales artificiales construidos por autoras.....	35
Figura 6. Porcentajes de remoción de los humedales réplica y el humedal blanco (DBO5). ..	50
Figura 7. Porcentajes de remoción de los humedales réplica y el humedal blanco (DQO).....	52
Figura 8. Porcentajes de remoción de los humedales réplica y el humedal blanco (SST).	54
Figura 9. Gráfica de dispersión de los % de remoción, respecto a los tratamientos, teniendo en cuenta el tipo de humedal.	63

Resumen

El presente trabajo de grado, evaluó la capacidad de remediación, de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal con la especie vegetal *Heliconia psittacorum*, a escala piloto y con tres réplicas, en el tratamiento de aguas residuales domésticas de bajo caudal generadas por pequeños cascos urbanos, con el fin de recomendar este sistema depurador para zonas apartadas del piedemonte llanero. Se usó la metodología de diseño factorial mixto 3X2, donde se manipuló las variables de Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) y la concentración inicial de carga orgánica definida en Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), con el fin de determinar el porcentaje de remoción de contaminantes en los parámetros DBO, Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Sólidos Suspendidos Totales (SST) para cada uno de los 6 tratamientos o experimentos generados por el diseño, cuyos resultados fueron expuestos a un tratamiento y análisis estadístico con las herramientas IBM SPSS statistics y Microsoft Excel.

Los resultados permitieron confirmar que este sistema no convencional efectivamente elimina la contaminación de manera considerable del líquido afectado, obteniendo resultados de remoción para DBO de 86,5%, para DQO de 76,1% y de 76,4% para SST, en promedio de los seis tratamientos. Asimismo, los TRH en los cuales se obtuvieron mejores resultados fueron 2 días para 170 mg/l y 8 días para 340 mg/l. Además, se determinó una eficiencia mayor de cerca del 14% en remoción para DBO, frente a otras investigaciones similares. Por consiguiente, se recomendó que para el uso de este tipo de técnica en tratamiento de aguas residuales domésticas en otras zonas del piedemonte llanero, en total 20 municipios, utilizar un tiempo de retención hidráulico de 2 días para una concentración máxima de 170 mg/l y de 8 días para 340 mg/l. Por otra parte, se evaluaron las tres hipótesis del diseño experimental, donde los análisis estadísticos permitieron aprobar la hipótesis tres, la cual especifica la influencia dominante de la interacción TRH-DBO inicial, en el desempeño de los humedales artificiales.

Palabras claves: Humedales artificiales, tratamiento de agua residual, retención hidráulica, carga orgánica, piedemonte llanero.

Abstract

The present work of degree, evaluated the capacity of remediation, of artificial wetlands of horizontal subsurface flow with the vegetal species *Heliconia psittacorum*, at pilot scale and with three replicas, in the treatment of domestic wastewater of low flow generated by small urban centers, in order to recommend this scrubber system for remote areas of the foothills of the plains. The mixed factorial design methodology 3X2 was used, where the variables of Hydraulic Retention Time (HRT) and the initial concentration of organic load defined in Biological Oxygen Demand (BOD) were manipulated, in order to determine the percentage of removal of contaminants in the parameters BOD, Chemical Oxygen Demand (COD) and Total Suspended Solids (TSS) for each of the 6 treatments or experiments generated by the design, whose results were exposed to a treatment and statistical analysis with IBM SPSS statistics tools and Microsoft Excel.

The results confirmed that this unconventional system effectively eliminates the contamination of the affected liquid considerably, obtaining removal results for BOD of 86.5%, for COD of 76.1% and of 76.4% for TSS, on average of the six treatments. Likewise, the HRT in which better results were obtained were 2 days for 170 mg / l and 8 days for 340 mg / l. In addition, a greater efficiency of about 14% in removal for BOD was determined, compared to other similar investigations. Therefore, it was recommended that for the use of this type of technique in domestic wastewater treatment in other areas of the foothills, in total 20 municipalities, use a hydraulic retention time of 2 days for a maximum concentration of 170 mg / l of 8 days for 340 mg / l. On the other hand, the three hypotheses of the experimental design were evaluated, where the statistical analyzes allowed to approve the hypothesis three, which specifies the dominant influence of the initial TRH-BOD interaction, in the performance of the constructed wetlands.

Key words: Constructed wetlands, pilot scale, treatment, retention, organic load, piedmont.

Introducción

El recurso agua, es vital para el óptimo desarrollo del ser humano y todos los seres vivos, sin embargo, su calidad está siendo afectada, tanto así que se ha convertido en una situación que preocupa tanto a países desarrollados como subdesarrollados, debido a la repercusión que tiene en la salud de la población y del medio ambiente. Según la UNESCO, si el consumo per cápita de este recurso sigue creciendo al ritmo actual, dentro de 25 años el hombre podría llegar a utilizar más del 90% del agua dulce disponible, dejando sólo un 10% para el resto de especies que habitan el planeta (Torres, Magno, Pineda, & Cruz, 2017), esta problemática en parte se ve reflejada por el alto consumo del recurso y se estima que la demanda mundial de agua es de alrededor de 4.600 km³/año, se prevé que esta cifra aumente entre un 20% y un 30% para el 2050 (UNESCO, 2018).

Según datos del IDEAM (2018), en Colombia las corrientes hídricas superficiales para el año 2016 presentaron estimaciones de vertimientos en cuenta a: DBO de 1'174.362 t/año, DQO de 2'906.555 t/año y SST de 1'364.660 t/año, estas cifras incluyen tres sectores económicos: el industrial, el doméstico y el cafetero, donde el sector doméstico contribuyó en un 45%, 35% y 80% del total de t/años para cada uno de los parámetros, respectivamente. De esta manera, se evidencia parte de la problemática que afronta el país en cuanto a la contaminación de materia orgánica, inorgánica y sólidos generados por uso del agua para fines domésticos.

Teniendo en cuenta las preocupantes cifras de disponibilidad del recurso hídrico, se hace necesario realizar tratamientos efectivos a las aguas residuales de tipo domésticas, a las cuales en la mayoría de los casos no se les realiza ningún tipo de tratamiento, siendo la principal causa de contaminación de las masas de agua, tanto superficiales como subterráneas (Bocardo, 2010), este proceso, es necesario para reducir los índices de contaminación del agua, los cuales se cuantifican principalmente en las variables DBO, DQO y SST.

Por ende, surge la propuesta de aplicar tecnologías tanto convencionales como no convencionales, que sean viables técnica, ambiental y económicamente. Un ejemplo de las tecnologías no convencionales son los humedales artificiales, los cuales se buscan implementar con el fin de satisfacer las necesidades básicas de agua potable y saneamiento para las zonas rurales (RAS Título J, 2010), en este caso, del piedemonte llanero que comprende los departamentos de Arauca, Casanare y Meta, que en su recorrido por la cordillera Oriental,

abarca en total 27 municipios de los 3 departamentos ya mencionados (Gobernacion de Casanare, 2010), estas zonas se caracterizan por ser de baja densidad poblacional, porque en promedio albergan de 15 a 30 Hab/km² y 4 Hab/vivienda, de acuerdo a estas cifras y según los litros por habitante que determina el RAS (2010), se estarían generando alrededor de 510 L/día de aguas residuales por vivienda lo que corresponde un nivel bajo de caudal.

En el presente estudio se implementaron humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal a escala piloto, sembrados con la especie *Heliconia psittacorum*, para el tratamiento de aguas residuales domésticas de bajo caudal en zonas rurales del piedemonte llanero. De esta manera, se pretende determinar el porcentaje de remoción de carga contaminante, cuantificada en DBO, DQO y SST, con el fin de evaluar la eficiencia del sistema a la salida del recurso, teniendo en cuenta las dos variables manipuladas: tiempo de retención y cargas de entrada de DBO.

1. Planteamiento del problema

Las aguas residuales domésticas (ARD) son el producto de desempeñar actividades en una vivienda que involucran contacto con agua cruda o potable, generando una modificación en la naturaleza del líquido, es decir, produciendo un nivel de contaminación que afecta de manera negativa la salud pública y ambiental, especialmente con contaminantes orgánicos y sólidos sedimentables (Arriols, 2018). A nivel mundial, la cantidad de agua residual doméstica generada presenta valores aproximadamente de 131 y 486 litros/habitante/día, cantidades que en su mayoría son vertidas sin ningún tipo de tratamiento a ríos, arroyos, lagos o directamente al mar (Palta & Morales, 2013).

Para el tratamiento de aguas residuales domésticas, se crean sistemas que, bajo procesos físicos, químicos y biológicos, pretenden minimizar la contaminación en los cuerpos de agua receptores de estos vertimientos. Sin embargo, los sistemas de tratamiento son implementados generalmente en las principales ciudades del país, sin tener en cuenta de manera considerable los territorios rurales y pequeños cascos urbanos como corregimientos, veredas y localidades (Villegas & Vidal, 2009), sitios que también aportan contaminación a los cuerpos de agua del país y en los que para el año 2018 vivían aproximadamente 24'500.000 personas en vivienda rural dispersa (DANE, 2018)

De acuerdo a lo anterior, el tratamiento de las aguas residuales domésticas tanto en municipios como en pequeños cascos urbanos y zonas apartadas de Colombia, presenta un panorama poco alentador, pues cerca del 60% de aguas residuales municipales son vertidas sin ningún tipo de tratamiento (Ministerio de Vivienda, 2017), y tan sólo el 2,4% de localidades rurales del país tienen cobertura en el tratamiento de sus ARD (RAS Título J, 2010). Escenario que se refleja de manera imponente en la región Orinoquia, especialmente en el piedemonte llanero, pues de los 27 municipios que hacen parte del piedemonte, sólo 9 municipios realizan un tratamiento a sus ARD (Peña & Rey, 2008), reflejándose en la generación de más de 27.000 ton/año de DBO, 52.517 ton/año de DQO, y más de 57.000 ton/año de SST en los cuerpos hídricos de la región, contaminando considerablemente los ríos afluentes de las cuencas Meta, Casanare, Vichada, Arauca y Orinoco, posicionando a esta última como la segunda cuenca más contaminada del país (IDEAM, 2015).

Es importante resaltar, que no es frecuente la implementación de técnicas de tratamiento de aguas residuales para zonas rurales, debido a que el diseño y construcción de tecnologías convencionales (plantas de tratamiento de aguas residuales) no son factibles técnicamente por la dispersión de las viviendas, ni económicamente por la capacidad de pago de pequeñas poblaciones rurales. Esta situación conlleva a buscar soluciones efectivas para el tratamiento de aguas residuales domésticas de bajo caudal, teniendo en cuenta principalmente las tecnologías no convencionales (ej.: humedales artificiales), donde de igual manera es poco común la investigación y puesta en marcha de este tipo de sistemas en los asentamientos urbanos de baja densidad poblacional del país (RAS Título J, 2010).

En Colombia, a pesar que se han desarrollado distintas investigaciones para la implementación de humedales artificiales en la remediación de aguas residuales domésticas, a la vez existe un desconocimiento de la aplicación de este tipo de tratamiento en condiciones locales, por ejemplo para el piedemonte llanero, ignorando la capacidad de remoción en contextos específicos, y teniendo en cuenta variables climatológicas y técnicas de la zona; haciendo especial referencia al tipo de humedal, las especies vegetal a usar, los tiempos de retención aptos y las características del agua residual a remediar (Granados, 2018)

Dicho esto, resulta necesario investigar sistemas no convencionales en Villavicencio que al ser parte de la subregión piedemonte llanero, permite su posterior implementación en distintos municipios pertenecientes a dicha zona, aprovechando los beneficios que ofrece la naturaleza para potencializar el rendimiento en el tratamiento de aguas residuales domésticas. Se hace referencia específicamente, al uso de plantas vegetales autóctonas o dominantes de la región en humedales artificiales, que por sus características tienen potencial en fitorremediación, como es el caso de la especie *Heliconia psittacorum* que ya ha sido utilizada para fitorremediación en varias regiones del país, pero que en la región Orinoquia, en especial en el piedemonte llanero, no se encuentra información considerable acerca de su uso en este tipo de sistemas.

1.1 Formulación en torno al problema.

La problemática expuesta anteriormente, genera la idea de proponer el uso de humedales artificiales implementados con la especie *Heliconia psittacorum*, para remover contaminantes de las ARD, provenientes ya sea de viviendas unifamiliares dispersas, o de centros poblados de baja densidad poblacional ubicados en el piedemonte llanero.

De esta manera, se plantea la afirmación que; efectivamente el tratamiento de aguas residuales domésticas de bajo caudal por medio de humedales artificiales que contienen la especie *Heliconia psittacorum*, son una solución para disminuir la contaminación de los cuerpos hídricos, resaltando además que este proceso se ve influido por el TRH y DBO, interviniendo en el rendimiento de los humedales.

Es por esto que, la presente investigación pretende responder la siguiente formulación: ¿Cuál es el alcance en remoción de humedales artificiales a escala piloto, implementados con la especie *Heliconia psittacorum*, teniendo en cuenta el soporte máximo de carga contaminante y el tiempo de retención hidráulico en el que actúa de manera efectiva los humedales, ubicados en la universidad Santo Tomás sede Aguas Claras en la ciudad de Villavicencio?

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar la capacidad de remediación de humedales artificiales (flujo subsuperficial horizontal) a escala piloto plantados con la especie *Heliconia psittacorum*, en aguas residuales domésticas, teniendo en cuenta distintos tiempos de retención y diferentes cargas orgánicas iniciales, con el fin de proponer el uso de esta tecnología en el sector rural del piedemonte llanero.

2.2 Objetivos específicos

- Definir el porcentaje de remoción de carga orgánica, inorgánica y sólidos, cuantificados con las variables DBO, DQO y SST a través de los humedales artificiales piloto, usando la especie *Heliconia psittacorum*, y bajo la metodología diseño factorial mixto 3X2.
- Determinar la eficiencia de los humedales artificiales en la remoción de los indicadores DBO, DQO y SST, realizando un análisis comparativo entre los resultados del modelo experimental y los antecedentes de la especie *Heliconia psittacorum*.
- Generar recomendaciones técnicas de los tiempos de retención y soporte de cargas contaminantes de los humedales artificiales con la especie *Heliconia psittacorum*, para su implementación en zonas rurales del piedemonte llanero.

3. Justificación

Entre las diferentes tecnologías no convencionales creadas para el tratamiento de aguas residuales, están los humedales artificiales. Este sistema, ha sido recomendado en Colombia y en distintos lugares del mundo, como lo son el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial de Colombia, bajo el Reglamento del Sector de Agua Potable y Saneamiento-RAS, (RAS Título J, 2010), el cual propone los humedales artificiales como una solución descentralizada para el tratamiento de ARD y excretas humanas en zona rural. También el Instituto Tecnológico de Canarias, en su libro guía para el tratamiento de aguas residuales urbanas en pequeños núcleos de población, recomienda los humedales artificiales como una tecnología no convencional viable por su efectividad y sencillez operativa (Martín, y otros, 2006), y por último el Gobierno de España en la Guía práctica para la depuración de aguas residuales en pequeñas poblaciones, plantean el uso de humedales artificiales como tratamiento secundario extensivo (Huertas & Marcos, 2013).

Esta tecnología, es considerada como un sistema cuyo proceso garantiza la sostenibilidad ambiental, puesto que, al simular las condiciones propias de los humedales naturales, no requiere infraestructura compleja, presenta un bajo costo de instalación como de mantenimiento, y, además, se integra al paisaje natural. Sumado a esto, permite que el agua efluente del tratamiento sea de mejor calidad, condiciones que facilita su re uso de manera inmediata en zonas de riego principalmente, descarga de olores o lavado (Carvajal, Zapattini, & Quintero, 2018).

Además de disminuir la contaminación de los cuerpos de agua y reducir los gastos en el proceso de potabilización del recurso, la implementación de humedales artificiales en zonas rurales con viviendas dispersas, apunta directa e indirectamente a 9 de los 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS). En primer lugar, de manera directa se asocia al objetivo 6. Agua limpia y saneamiento, cuyo propósito es garantizar el acceso universal al recurso agua de manera segura, apoyando tecnologías de tratamiento en los países en desarrollo (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2016). Por otra parte, de manera indirecta se relaciona con los objetivos: 3. Salud y bienestar, 8. Trabajo decente y crecimiento económico, 9. Industria, innovación e infraestructura, 10. Reducción de las desigualdades, 11. Ciudades y comunidades sostenibles, 12. Producción y consumo responsables, 13. Acción por el clima y 15. Vida de ecosistemas terrestres (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2016).

Tienen relación indirecta puesto que, al ser ésta tecnología no convencional una forma innovadora de remediar aguas contaminadas y de tener un principio de saneamiento, garantiza que no se propaguen más enfermedades por este medio, que se genere empleo a los habitantes de las zonas rurales para su construcción y mantenimiento, a que se tenga en cuenta también las zonas más apartadas de las regiones y no sólo las principales cabeceras municipales, reduciendo las brechas de desigualdad. Además, implementando este sistema de tratamiento 100% natural, genera que las comunidades aprovechen los recursos naturales para implementar soluciones sostenibles en sus territorios, a reutilizar el agua efluente y por último se garantiza el cuidado y el aprovechamiento de los ecosistemas terrestres llaneros (Martín, y otros, 2006) con el uso de una especie dominante de la región como lo es la especie *Heliconia psittacorum* (Rangel, 2015).

De esta manera, el piedemonte llanero al ser una de las subregiones de la región Orinoquía, donde inicia el recorrido de la mayoría de cuerpos hídricos que desembocan en la cuenca del Orinoco, el cual representa el 20% del territorio nacional (Fundación horizonte verde, 2012), es una zona estratégica para la implementación de los humedales artificiales, donde además, beneficiaría a los cerca de 2 millones de habitantes para el año 2020 en la región Orinoquia (DANE, 2005), (cifras susceptibles a cambio por los datos oficiales del censo hecho por el DANE en 2018) y a la fauna y flora que tiene contacto con el recurso hídrico de este territorio. Además de esto, la zona del piedemonte llanero es propicia a cumplir con los criterios de diseño de los humedales artificiales, en cuanto a requerimientos de área (0,5-3 m²/PE), rangos de temperatura recomendados (>20°C), vegetación autóctona o dominante con características fitoremediadoras, entre otras (Hoffman & Platzer, 2011).

Por lo tanto, teniendo en cuenta el contexto para la implementación de los humedales artificiales, se escogen los de flujo horizontal pues al caracterizarse por poseer un lecho de arena y grava, este proporciona la superficie para el crecimiento microbiano, y funciona como soporte para la adsorción y los procesos de filtración, son efectos que aumentan la efectividad del tratamiento, frente a los humedales de flujo vertical que no contienen sustrato. Además de no necesitar bomba para la distribución del líquido en el sistema, como sí lo requieren los humedales de flujo vertical (Hoffman & Platzer, 2011), teniendo en cuenta que son para zonas rurales donde es limitado el uso de energía eléctrica, al mismo tiempo, queriendo evitar el consumo de la misma, sino que por el contrario que sea un sistema autosustentable.

4. Alcance

El presente proyecto consta de la implementación de 3 humedales artificiales a escala piloto sembrados con la especie *Heliconia psittacorum* y 1 humedal blanco sin la especie como se describe en la fase I de la metodología, se estima que el área total ocupada por el montaje es de aproximadamente 5 m². Los 4 humedales artificiales se ubicaron en las instalaciones de la Universidad Santo Tomás, campus Aguas Claras (Figura 1), la cual se encuentra ubicada en la ciudad de Villavicencio – Meta, en el piedemonte llanero (Alcaldía de Villavicencio, 2016).



Figura 1. Ubicación de los humedales artificiales a escala piloto, por Google Earth, 2018.

El tiempo estimado en cuál se desarrolló el proyecto fue de 6 meses, durante este tiempo se realizaron 6 tratamientos para la medición de los parámetros DBO, DQO, SST, pH, conductividad y temperatura en agua residual doméstica sintética a 2 diferentes concentraciones y 3 tiempos de retención, el proyecto se realiza con el fin de reducir parte de la contaminación con materia orgánica presente en el recurso hídrico.

De esta manera, la población objetivo que se pretende sea beneficiada extrapolando los datos a escala real serán los 1'194.795 de habitantes (Ver apéndice 1 y 2) de las zonas rurales del piedemonte llanero según las proyecciones para el 2020 (cifras susceptibles a cambios con el censo del año 2018) (DANE,2005), que comprende los departamentos: Meta abarcando los municipios de Acacías, Barranca de Upía, Castilla la Nueva, Cubarral, Cumaral, El Calvario,

Guamal, Restrepo, San Carlos de Guaroa, San Juanito, San Martín y Villavicencio; Casanare con los municipios: Yopal, Aguazul, Hato Corozal, La Salina, Monterrey, Nunchía, Sabanalarga, Sácamá, Támara, Tauramena y Villanueva; y Arauca con los municipios: Arauquita, Fortul, Saravena y Tame, es decir, en total 27 municipios. Cabe resaltar la posibilidad que no todos los municipios anteriormente nombrados se verán beneficiados en su totalidad, porque al realizar el montaje a escala real puede presentarse diferencias considerables como: precipitaciones que se alejen respecto a la media es decir de los 3255 mm/año, así mismo con la temperatura el cual es 24,5°C.

Las personas que se abastecen de las fuentes hídricas para consumo diario, generan aguas residuales de tipo doméstico las cuales no se les realiza ningún tipo de tratamiento y se vierten directamente a los cuerpos de agua (Bocardo, 2010). De esta manera, la investigación busca beneficiar a las personas afectadas, reduciendo los niveles de contaminación del agua mediante la implementación de los humedales artificiales en conjunto con la especie *Heliconia psittacorum*, obteniendo datos técnicos de los porcentajes de remoción de las cargas contaminantes y los tiempos de retención que es capaz de tolerar la especie, bajo dichas condiciones, en los municipios del piedemonte llanero donde es apta la especie para efectuar la remediación.

5. Antecedentes y marco referencial

5.1 Antecedentes

La contaminación de los cuerpos de agua ocasiona afectación a nivel: bacteriológico, orgánico y químico del agua de consumo y en general, a los ecosistemas. Esta problemática se relaciona con vertimientos de aguas residuales más específicamente de origen doméstico; la cual genera residuos que son nocivos debido a los altos porcentajes de materia orgánica y microorganismos que contienen y que terminan en los ríos, quebradas y costas marinas sin ningún tipo de tratamiento (Hidalgo & Mejía, 2010). Por ende, es necesario exponer propuestas que contribuyan a dar solución a dicha problemática, como es el caso de este proyecto que se enfoca en el tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales plantados con la especie *Heliconia psittacorum*.

En el estudio “Análisis del desempeño y operación de humedales construidos de flujo subsuperficial vertical para tratamiento de agua residual doméstica en países tropicales”, tuvo como fin analizar el desempeño y operación de humedales construidos de flujo subsuperficial para el tratamiento de agua residual domésticas en países tropicales, en dicho estudio se menciona la problemática actual sobre la falta de información en tratamientos de agua residual doméstica, para ello el investigador realizó una revisión de investigaciones relacionadas al tema en bases de datos y bibliografía, organizando dicha información mediante fichas bibliográfica, el cual concluye la pertinencia de la implementación de humedales artificiales para zonas tropicales y el papel que desempeñan la *Heliconia* en los procesos de remoción de contaminantes presentes en aguas residuales de tipo domésticas (Suaza, 2016). Tomando como base la anterior investigación, se realizó un proceso similar para la obtención de las referencias que soporten la investigación, de tal manera se realiza una revisión bibliográfica de artículos de revistas y trabajos de grado, donde se evidencia que en la Región Orinoquia, hay un bajo nivel de investigación respecto a la temática de humedales artificiales en conjunto con la especie *Heliconia psittacorum*, pues de 6 estudios encontrados solo 1 de ellos fue desarrollado en la región más específicamente en el piedemonte llanero. A continuación, se muestran estudios similares a esta investigación:

La investigación titulada “El estudio comparativo de la remoción de materia orgánica en humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial usando tres especies de macrófitas”,

surge a partir de las falencias que se presentan en las plantas de tratamiento convencionales las cuales operan por períodos limitados (y otras son abandonadas), debido a diferentes razones, entre ellas a elevados costos de operación y mantenimiento, situación que ocurre en este estudio, la investigación la desarrollaron bajo las condiciones de: un TRH: 7 días, un caudal de 7 mL m^{-1} , seis humedales a escala piloto en fibra de vidrio de 1,0 m de largo, 0,6 m de alto y 0,6 m de ancho y las especies *Canna limbata*, *Heliconia psittacorum* y *Phragmites sp*, *Heliconia psittacorum*, para lo cual la especie *Heliconia* obtuvo remociones medias de DQO 94,49 % y 93,50 % y para DBO₅ de 99,09 % y 97,49 (Montoya, Ceballos, Casas, & Morató, 2010), agrandes rasgos se observa que supera lo porcentajes de remoción, esto puede corresponder a que no se manejaron las mismas condiciones de operación.

Bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediación: caso *Heliconia psittacorum*. Se realizaron mediciones para evaluar el potencial fitorremediador de la especie, se logró demostrar que la especie presenta características adecuadas a las condiciones de los humedales artificiales empleados para el tratamiento de aguas residuales, a partir de su capacidad de remoción de DBO₅, DQO y SST, por encima del 70% de remoción sin tener en cuenta sus condiciones fisiológicas. Los resultados que se presentaron en este estudio plantean la necesidad de ampliar la evaluación del desempeño de especies nativas frente a la capacidad de tolerancia de las mismas para el manejo de contaminantes. Esta información es importante para lograr identificar los problemas del tratamiento por fitorremediación de aguas residuales en zonas tropicales. Adicionalmente en este estudio a comparación del anterior expone la importancia del uso de las especies nativas como el caso de las Heliconias, en la ornamentación, lo cual es un característica relevante para quien utilice este tipo de tecnologías (Peña, Madera, Sánchez, & Medina, 2013).

La investigación “Evaluación preliminar del funcionamiento de un sistema prototipo de humedales artificiales empleando *Heliconia psittacorum* y *Cyperus papyrus* para el tratamiento de aguas residuales”, evaluó un sistema de tratamiento prototipo de tres humedales artificiales en serie, en donde en el primer tratamiento durante el paso del agua residual por cada una de sus unidades, partiendo de una DBO₅ en el efluente de 600 mg/l arrojó un porcentaje de remoción del 31% de DBO₅, por lo cual los autores recomiendan realizar más corridas del agua residual a través del sistema piloto para poder establecer cuál es el porcentaje de remoción máximo que se puede alcanzar la *Heliconia psittacorum*, respecto a la DQO reportaron un

porcentaje de remoción general del 93%, presentándose el mayor porcentaje de remoción en el humedal sembrado con *Heliconia psittacorum* (89%) (Aragón, Parra, & Peña, 2015).

Por otra parte, la propuesta del tratamiento de agua residual doméstica con humedales de tipo subsuperficial empleado con la *Bambusa sp* y la *Heliconia psittacorum*, arrojó que la especie *Heliconia psittacorum*, presenta un mejor porcentaje de remoción que la *Bambusa sp*. Según los resultados obtenidos en los diferentes análisis se concluye que la eficacia de la *Bambusa sp* en el tratamiento de aguas residuales domésticas es de un 73% frente a un 79% de la *Heliconia psittacorum*, siendo esta última más eficiente (Carvajal, Ortiz, & Vega, 2017) esta propuesta es importante para el proyecto porque se realizó en el municipio de Tauramena, Casanare el cual pertenece al piedemonte llanero, lo que permite soportar la viabilidad de este estudio.

Por último, el diseño y evaluación de un sistema piloto a partir de plantas hiperacumuladoras para la depuración de los lixiviados generados en el parque tecnológico ambiental “las bateas” del municipio de Aguachica Cesar. La especie *Heliconia psittacorum* obtuvo una alta eficiencia de remoción para la DBO₅ con un 71,23%, 48,23% para DQO y 84,61% para SST, en esta investigación se evidencia que la especie *H. psittacorum* removió significativamente materia orgánica y sólidos, pero respecto al parámetro indicador de materia inorgánica (DQO), no presentó un valor considerable, esto puede deberse al tipo de metodología utilizada o las condiciones de entrada del agua residual (Chinchilla, 2017).

5.2 Marco teórico

Los humedales artificiales se fundamentan en tres principios básicos, según Torres & Marín Sanabria (2012) la actividad bioquímica de microorganismos, el aporte de oxígeno a través de los vegetales y el apoyo físico de un lecho inerte que sirve como soporte para los vegetales, además de servir como material filtrante.

Son sistemas biológicos que sirven como medio para el desarrollo de plantas macrófitas, estos surgen a partir de la simulación de los mecanismos propios de los humedales naturales para la depuración de las aguas, donde se combinan procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren al interactuar las aguas residuales, las plantas, los microorganismos, el sustrato y la atmósfera, dando lugar a la aparición de procesos de sedimentación, filtración, adsorción, degradación biológica, fotosíntesis y toma de nutrientes por parte de la vegetación (Mena, Rodríguez, Núñez, & Villaseñor, 2009)

El funcionamiento de los humedales artificiales se basa en un lecho de raíces que aportan una vía hidráulica por donde fluye el agua a tratar, esta zona, llamada rizosfera, es el espacio entre los rizomas, las raíces y el sustrato. Las macrófitas aportan oxígeno a la rizosfera a través de: las hojas, los tallos y los rizomas de los vegetales, con el fin de realizar el proceso de remoción (Torres & Marín Sanabria, 2012).

Los humedales artificiales son prometedores para sistemas rurales, sin alcantarillado, ya que estos generen efluentes de tipo orgánico y de elevada biodegradabilidad, de acuerdo a esta necesidad se motiva al creciente interés por esta tecnología la cual proporciona un tratamiento eficaz, eliminando de las aguas residuales un amplio espectro de contaminantes como: materia orgánica, nutrientes, microorganismos patógenos, metales pesados, etc. Por otra parte, los costos de inversión, operación y mantenimiento son menores que los sistemas convencionales, no generan lodos como otros sistemas, soporta fluctuaciones de caudal, se integran positivamente dentro del paisaje, contribuyen al desarrollo de vida salvaje y tienen la posibilidad de ser utilizados para la concienciación y educación medioambiental (Mena et al., 2009).

Al igual que cualquier otro sistema también presenta falencias: los humedales requieren grandes extensiones de terreno para alcanzar resultados satisfactorios (esta desventaja no aplica para esta investigación porque la ubicación donde es apto el proyecto cuenta con grandes extensiones de tierras), no pueden ser alimentados directamente con aguas residuales de altas cargas orgánicas o de sólidos suspendido para estos casos se deben realizar pretratamientos para eliminar el exceso de sólidos suspendidos que podría provocar la obstrucción del lecho en poco tiempo.

5.3 Marco conceptual

5.3.1 Tipo de humedales artificiales.

Según el régimen hídrico, pueden distinguirse dos tipos de sistemas de humedales artificiales desarrollados para el tratamiento de aguas residuales:

- Humedal artificial de flujo superficial (FS)
- Humedal artificial de flujo subsuperficial (FSS)

5.3.1.1 Sistemas de flujo libre o superficial (FS).

Consisten en canales de poca profundidad (0,1 a 0,6 m) construidas sobre el terreno con algún tipo de barrera que confine el sistema y evite filtraciones, contienen un lecho de grava o arena

para soportar las raíces de la vegetación emergente y a través de los cuales circula agua residual (ver figura 2). La superficie de agua está expuesta a la atmósfera y la trayectoria del flujo es horizontal. Son utilizados principalmente para tratamientos terciarios y, en algunos casos, para secundarios.

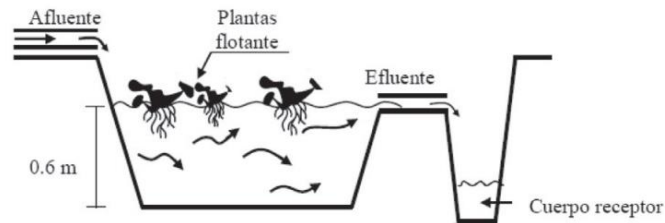


Figura 2. Humedal artificial de flujo superficial, por Arias, Betancur, Gómez, Salazar, & Hernandez (2010)

Ejemplo de estos sistemas son las lagunas o zanjas vegetadas, lagunas en balsa y pantanos artificiales, existiendo siempre una superficie de agua libre. A los sistemas FS normalmente se les alimenta agua residual pretratada, con algún tipo de tratamiento físico, de forma continua. En este tipo de humedales, pueden alcanzar rendimientos por encima del 70% para los sólidos suspendidos, materia orgánica y patógena. En cambio, los rendimientos para otros parámetros como: N oscilan entre 40-50% y para el P entre el 40-90% (Oliver, 2017).

5.3.1.2 Sistemas de flujo subsuperficial (FSS).

Los sistemas de flujo subsuperficial se caracterizan por la circulación del agua a través de un medio granular. La vegetación se planta en este medio granular y el agua está en contacto con los rizomas y raíces de las plantas.

El agua a través del suelo o material de soporte parece ser siempre más efectiva que la circulación de superficie para muchos de los mecanismos de degradación de los contaminantes presentes en las aguas residuales. Durante el paso del agua residual a través del lecho poroso, se produce un contacto con zonas aerobias y anaerobias. La zona aerobia se encuentra en las zonas muy cercanas a la superficie y alrededor de las raíces y rizomas de las plantas. Los microorganismos que degradan la materia orgánica se encuentran formando una biopelícula alrededor de la grava y de las raíces de las plantas. Por lo tanto, cuanto mayor sea la superficie susceptible de ser ocupada por la biopelícula, mayor será la densidad de microorganismos y mayor el rendimiento del sistema.

Los humedales de flujo subsuperficial pueden ser de dos tipos, en función de la forma de aplicación de agua al sistema (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010):

- Humedales de flujo subsuperficial horizontal y
- Humedales de flujo subsuperficial vertical.

Se llaman flujo horizontal debido a que el agua residual del cual se alimenta el humedal fluye lentamente a través del medio poroso bajo la superficie del lecho de una forma horizontal hasta que llega a la zona del control de nivel en la salida como se observa en la (ver figura 3) (Caballero & Osorio, 2016). La profundidad de agua es de entre 0,3 y 0,9 m (Chinchilla, 2017).

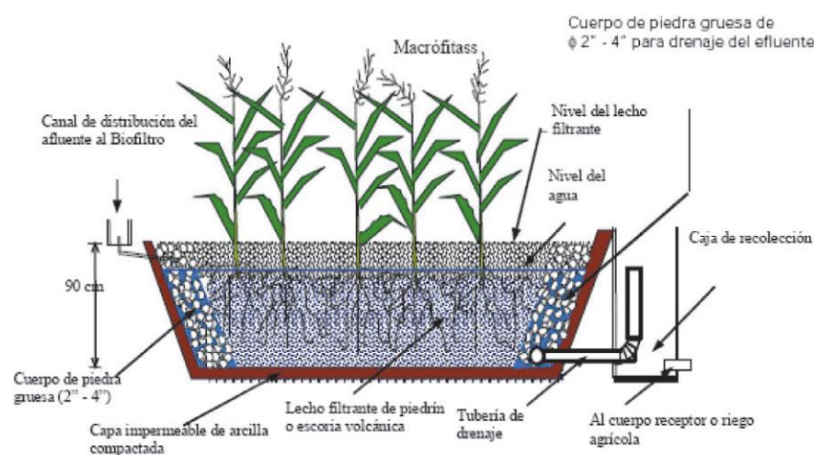


Figura 3. Sección transversal de un sistema de flujo subsuperficial horizontal, por Arias et al., (2010)

Los humedales de FSS vertical son sistemas que tienen profundidades muchos mayores a las de humedales de flujo subsuperficial horizontal, y disponen de una conexión que transporta el agua que ya se ha filtrado mediante el lecho o fondo a un drenaje (ver figura 4). La profundidad efectiva del medio filtrante es de alrededor de 1 m y preferiblemente se debe hacer un pre -tratamiento ya sea en un sedimentador primario o un tanque séptico (Caballero & Osorio, 2016).

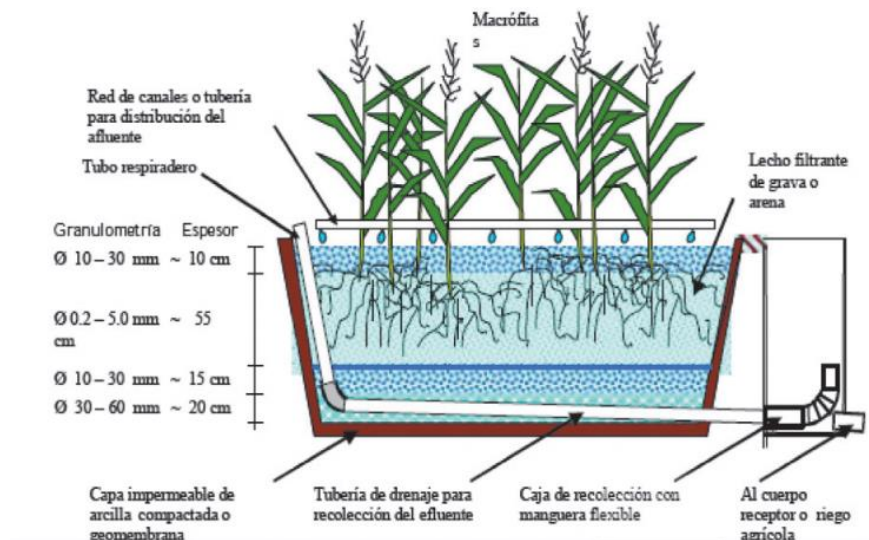


Figura 4. Sección transversal de un sistema de flujo subsuperficial vertical, por Arias et al., (2010)

Los humedales artificiales con flujo subsuperficial son muy eficientes en lo referido a costo, consumo energético y mantenimiento, si los comparamos con sistemas convencionales. Desde el punto de vista de los costes, que un sistema FSS sea competitivo frente a uno FS, para pequeñas comunidades y caudales, es difícil, pero esto siempre dependerá de los costos de la tierra, del tipo de impermeabilización que se requiera y el tipo y disponibilidad del material granular empleado (Peña et al., 2013).

El tipo de humedal más implementado es el subsuperficial de flujo horizontal, porque este permite el paso continuo del agua residual a través del medio poroso y de esta manera se realiza con mayor efectividad la remoción de contaminantes, por ende, es importante tener claro los principales componentes de los humedales como: la vegetación, preferiblemente de tipo emergente, el nivel del agua, el lecho de grava que sirve para el crecimiento de los microorganismos, y del sistema radicular de las plantas permitiendo la descomposición de la materia orgánica biológica, siendo la función principal de humedal en general. De acuerdo a las características anteriormente mencionadas, la ubicación del proyecto y la eficiencia se escoge para el presente trabajo los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal.

5.3.2 Componentes de un humedal artificial.

Los humedales artificiales contienen: agua, relleno sólido y plantas emergentes, adicionalmente están los microorganismos y los invertebrados acuáticos los cuales van apareciendo a medida que es tratada el agua residual.

5.3.2.1 Aguas Residuales Domésticas, (ARD).

Son las procedentes de los hogares, así como las de las instalaciones en las cuales se desarrollan actividades industriales, comerciales o de servicios y que correspondan según la resolución 631 del 2015 a:

- Descargas de los retretes y servicios sanitarios.
- Descargas de los sistemas de aseo personal (duchas y lavamanos), de las áreas de cocinas y cocinetas, de las pocetas de lavado de elementos de aseo y lavado de paredes y pisos y del lavado de ropa (no se incluyen las de los servicios de lavandería industrial).

5.3.2.2 Relleno o medio soporte.

El sustrato es un material granular que actúa como soporte dentro del sistema. Los humedales de flujo libre no cuentan con una gran cantidad de sustrato puesto que en su interior se almacena el agua que está siendo tratada, aun así, algunas de las plantas que allí crecen necesitan sustrato para fijar sus raíces. Por otra parte, para los humedales de flujo subsuperficial el sustrato es vital, ya que es el medio filtrante por el cual circula el agua e interfiere directamente en el tratamiento del agua, puesto que sirve de soporte para la vegetación que allí crece y adicionalmente permite la fijación de una biopelícula bacteriana, que juega un papel fundamental en los procesos de eliminación de contaminantes presentes en el agua a tratar (Ramírez & Rodríguez, 2016). Para humedales artificiales a escala piloto, se recomienda usar grava de $\frac{1}{2}$, gravilla $\frac{3}{4}$, y arena negra (Pérez, Enciso, Del prado, & Castañón, 2017).

5.3.2.3 Vegetación.

Su función es oxigenar el medio a través de sus raíces, llegando a zonas de mayor profundidad. Además, las hojas, tallos sumergidos y los restos que van dejando con el tiempo, son la base fundamental para el desarrollo de los microorganismos, porque estos los mayores responsables de la remoción en el tratamiento (Caballero & Osorio, 2016). También la vegetación contribuye en el humedal a:

- Estabilizar el cauce, influyen en la conductividad hidráulica del terreno, distribuyen y disminuyen la velocidad del agua, lo que favorece la sedimentación de los sólidos suspendidos y aumenta el tiempo de contacto entre el agua y la vegetación.
- Tomar el carbono, nutrientes, y elementos de traza y los incorporan a los tejidos de la planta.

- Minimizar el gradiente de temperatura dentro del relleno, protegiéndolo del frío en invierno y evitando flujos indeseables por diferencias de temperatura.

Se adoptó la especie *Heliconia psittacorum* debido a que sus características permiten el crecimiento en el piedemonte llanero (Rangel, 2015), adicionalmente según los antecedentes en el numeral 5.1, es una especie que tiene trayectoria en el tratamiento de aguas residuales de tipo doméstica, según los estudios presenta porcentajes de remoción superiores al 70% para dicho tratamiento, por ende, se escogió para implementarla en esta investigación.

5.3.2.4 Microorganismos (Biopelícula).

Muchas transformaciones de los nutrientes y del carbono orgánico en humedales son debidas al metabolismo microbiano y están directamente relacionadas con el crecimiento de los microorganismos. Éstos incluyen, principalmente, bacterias, hongos, y protozoarios. Esta biomasa se encuentra formando una biopelícula alrededor de las partículas del lecho (Mena et al., 2009).

La actividad microbiana tiene la función de transformar un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas e insolubles y alterar las condiciones de potencial de reducción y oxidación del sustrato afectando así a la capacidad de proceso del humedal. Asimismo, gracias a la actividad biológica, muchas de las sustancias contaminantes se convierten en gases que son liberados a la atmósfera (Delgadillo et al., 2010).

5.3.3 Parámetros de interés para el tratamiento por humedales artificiales.

5.3.3.1 DBO.

Demanda Biológica de Oxígeno, se considera como la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para descomponer la materia orgánica, especialmente bacterias, hongos y plancton. El rango adecuado para la presencia de DBO₅ es de 7-10 mgO₂/l (Londoño & Marín, 2009).

5.3.3.2 DQO.

Demanda Química de Oxígeno, indica la cantidad de oxígeno requerido para descomponer la materia orgánica en una muestra de agua, a una temperatura y tiempo específico, es una medida de cantidad de oxígeno consumido por la porción de materia orgánica presente en aguas residuales que se necesita para descomponer dicha materia sin intervención de los

microorganismos, es decir sin importar que sea o no biológicamente asimilables (Londoño & Marín, 2009).

5.3.3.3 SST.

Sólidos suspendidos totales, las actividades domésticas, pecuarias, agrícolas e industriales, además de algunos eventos naturales, son fuentes potenciales de aporte de sólidos en suspensión a las aguas residuales (Delgadillo et al., 2010). Los mecanismos de remoción de SST ocurren por vías de sedimentación y filtración, gracias a la alta densidad de vegetación, pero para mantener los rendimientos de remoción es importante escoger bien el lecho filtrante evitar afectaciones a este y mantener la granulometría del medio filtrante entre 10 y 15 mm (Londoño & Marín, 2009).

5.3.3.4 pH.

El potencial de hidrógeno, es el parámetro que mide el grado de acidez o alcalinidad de una solución. Este parámetro es importante porque permite el desarrollo de la planta y es influido por factores bióticos, abióticos, y bioquímicos. El rango del valor óptimo es variable sin embargo el dato oscila entre 5 y 9 (Delgadillo et al., 2010).

5.3.3.5 Conductividad.

Es la habilidad o poder de conducir o transmitir calor, electricidad o sonido que se emplea para medir el contenido de sales y compuestos inorgánicos presentes (cationes y aniones).

5.3.3.6 Temperatura.

Este parámetro es importante en el tratamiento de aguas residuales ya que muchos procesos biológicos dependen de la temperatura. La temperatura del agua residual es mayor que la temperatura de agua para abastecimiento, como consecuencia de la incorporación de agua caliente proveniente del uso doméstico e industrial. El valor va desde 20°C hasta máximo 40°C aproximadamente (Londoño & Marín, 2009).

5.3.3.7 Cobertura vegetal.

Se expresa como el porcentaje de suelo cubierto por cada una de las especies presentes en un determinado ecosistema o sitio y se refiere a la sumatoria de los cm² o m² de proyección foliar de cada uno de los individuos de la especie, dentro de un área determinada. Este parámetro, acompañado de otros tales como la estructura y dimensiones de la planta, densidad

de macollos o ramificaciones y textura del tejido foliar, es una medida directa de la disponibilidad de un forraje por unidad de área (Martín G. , 2010), en este caso las especies y rizomas nacientes en los humedales artificiales para cada réplica.

5.3.3.8 Tiempo de Retención Hidráulico.

TRH es el periodo que permanece agua residual en contacto con el sustrato, las raíces y en conjunto el humedal, durante dicho tiempo los microorganismos realizan el proceso de descomposición. Para humedales se han realizado estudios con tiempos de 2 días hasta 10 días, como los rangos son amplios, se utilizaron para la investigación tiempos de retención de 2, 5 y 8 días.

5.3.3.9 Caudal.

Se define como la cantidad de materia transportada por unidad de tiempo en una cierta dirección, esta variable es importante porque a través de él se cuantifican consumos, se evalúa la disponibilidad del recurso hídrico y se planifica la gestión necesaria (Caballero & Osorio, 2016).

5.4 Marco legal

En la tabla 1 se presenta la normatividad más relevante del proyecto.

Tabla 1. *Normatividad vigente aplicable al proyecto.*

Norma	Artículo	Descripción
Resolución 631 de 2015	8	Establece los parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales Domésticas (ARD), donde; el intervalo de pH es de 6 a 9, DQO de 180 mg/l O ₂ , DBO ₅ de 90 mg/l O ₂ , SST de 90 mg/l y una temperatura máxima de 40°C .
Resolución 70/1 de 2015	-	Aprueba el documento final de la agenda 2030 que establece los objetivos del desarrollo sostenible. El presente proyecto tiene aplicabilidad directa con el objetivo 6, e indirectamente a los objetivos 3, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15.

Tabla 2. (Continuación).

Ras título J- 2010	Apartado 7.4.5. Humedales artificiales de flujo sumergido. El RAS, determina el uso de los humedales artificiales aguas abajo de un tanque séptico, adicionalmente expone los parámetros de diseño, dentro de los cuales la carga orgánica máxima y finalmente la operación y mantenimiento de los humedales.
Sesión II: 10*	

Nota: La sesión II corresponde a las soluciones individuales de agua y saneamiento básico y el capítulo 10* a la solución descentralizada para el tratamiento de aguas residuales domésticas y excreta humana en la Zona rural, por (RAS Título J, 2010).

6. Metodología

6.1 Fase I: Diseño e implementación de los humedales artificiales.

Se construyeron 4 humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal a escala piloto prefabricados en concreto, como se puede observar en la figura 5; el primero de ellos denominado Humedal Blanco (HB) del tratamiento, incluía únicamente el sustrato de 30 cm de alto que se compone de grava de $\frac{1}{2}$, gravilla de $\frac{3}{4}$, y arena negra, valores seleccionados mediante referencias Pérez et al., (2017). Los otros tres, aparte de contener el sustrato anteriormente descrito, también se les implementaron la especie vegetal *Heliconia psittacorum*, y actuaron como Humedal Réplica 1 (HR1), Humedal Réplica 2 (HR2) y Humedal Réplica 3 (HR3) (Ver apéndice 3).



Figura 5. Humedales artificiales contruidos, por Rodríguez & Vargas, 2018.

Para completar el montaje, fue necesario implementar un tanque plástico de 1000 litros, elevado a 1,5 metros de altura, con el fin de garantizar la gravedad necesaria para el movimiento del líquido y teniendo como propósito alimentar cada humedal artificial del Agua Residual Doméstica Sintética (ARDS), además, la tubería necesaria para el movimiento del líquido tanto a la entrada como a la salida de cada uno. A la entrada de cada estructura, se le instalaron válvulas para controlar el caudal de ARDS, igualmente a la salida, complementados con “cuellos de ganso” para llevar un control del nivel de agua en cada uno de los humedales.

6.1.1 Dimensiones.

El modelo general de diseño de los humedales artificiales, se determinó por medio de la ecuación de los reactores de flujo de pistón, utilizada por (Lara, 1999) y que ha sido desarrollada para el dimensionamiento de sistemas con flujo subsuperficial, partiendo de la siguiente ecuación:

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-K_t t} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

C_e = Concentración de DBO en el efluente, mg/l.

C_o = Concentración de DBO en el afluente, mg/l.

K_t = Constante de reacción de primer orden ($1,7532 \text{ d}^{-1}$).

t = tiempo de retención hidráulica, días.

Teniendo en cuenta además la siguiente ecuación:

$$t = \frac{LWyn}{Q} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

t = Tiempo de retención hidráulica, días.

W = Ancho de la celda del humedal, m.

L = Largo de la celda del humedal, m.

y = Profundidad de la celda del humedal, m.

n = Porosidad, porcentaje expresado como decimal.

Q = caudal medio, $\text{m}^3/\text{día}$.

De esta manera, combinando las ecuaciones 1 y 2, se determina la fórmula para definir el área superficial de cada humedal, siendo la ecuación utilizada por la presente investigación:

$$A_s = \frac{Q * \ln \left(\frac{C_o}{C_e} \right)}{(Kt)yn} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

A_s = Área superficial; largo por ancho, m.

Q = caudal medio que atraviesa el humedal, $\text{m}^3/\text{día}$.

C_e = Concentración de DBO en el efluente, mg/l.

C_o = Concentración de DBO en el afluente, mg/l.

K_t = Constante de reacción de primer orden ($1,7532 \text{ d}^{-1}$).

y = Profundidad de la celda del humedal, m.

n = Porosidad, porcentaje expresado como decimal.

Reemplazando:

$$A_s = \frac{(0.120) * \ln\left(\frac{360}{140}\right)}{(1,7532)(0,40)(0,35)} = 0,46 \text{ m}^2$$

Q = 120 l/día es el caudal medio per cápita generado en la zona rural (Santana, Bonilla, & Castillo, 2015)

C_e = 360 mg/l es la concentración de DBO máxima esperada a la entrada

C_o = 140 mg/l es la concentración de DBO máxima esperada a la salida

K_t = Constante de reacción de primer orden ($1,7532 \text{ d}^{-1}$).

y = 0,40 m es la profundidad adecuada para la adaptación de la especie *H. psittacorum* en el sustrato (ICA, 2012)

n = 0,35 es la porosidad para el tipo de sustrato utilizado (Quintero, 2014)

Por lo tanto, teniendo un valor de $0,46 \text{ m}^2$, se propone usar 85 cm de largo y 55 cm de ancho, para una relación 1:0.65, con el fin que cada una de las 6 especies vegetales a cultivar tengan un diámetro aproximadamente de 28 cm para su apropiado desarrollo (ICA, 2012).

6.1.2 Volumen.

El volumen para cada humedal fue de 187 litros, valor resultante de multiplicar el largo (0,85 m) ancho (0,55 m) y la profundidad (0,40 m), sin embargo, debido al espacio que ocupa el sustrato y las plantas, el volumen se redujo de manera considerable a un volumen neto de: HB en 36 litros y en los HR1, HR2 y HR3 en promedio a 40 litros, una disminución de 19% y 21% respectivamente. Estos datos se determinaron por la capacidad de retención de cada humedal y el grado de saturación en el momento de adición de agua.

6.1.3 Cultivo y desarrollo de la especie *H. psittacorum*.

La especie vegetal *H. psittacorum*, es escogida en primer lugar por ser una de las especies dominantes de la región Orinoquia (Rangel, 2015), además de tener antecedentes como especie usada en fitorremediación (ver numeral 5.1) y finalmente, por poseer una flor que permite mejorar el paisaje, de tal forma que los humedales artificiales presenten una panorámica de jardín interesante.

El cultivo de esta especie se hizo por medio de rizomas, donde se trasplantaron 6 de estos en cada humedal, pues este es el valor para su eficiente desarrollo en un área aproximada entre 0,5 y 1 m² para un procedimiento experimental (Montoya et al., 2010). Cada uno de los rizomas medía entre 25 y 35 cm de alto y ya tenían su respectiva flor.

Se les aplicó fertilizante triple 15, aproximadamente 120 gramos por cada rizoma en la semana 1 y semana 8 después de su trasplantación de acuerdo a la guía del cultivo de Heliconias (ICA, 2012). Por otra parte, se esperó cerca de 13 semanas para dar inicio con la fase experimental, después de observar un desarrollo físico, y reproductivo (Ver apéndice 4).

6.2 Fase II: Desarrollo experimental

6.2.1 Variables manipuladas.

Las variables manipuladas fueron: tiempo de retención hidráulica en días, y la concentración inicial de DBO en mg/l, con el fin de establecer su grado de influencia en el tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales que contengan la especie *H. psittacorum*, asimismo, los valores aceptables por la presente investigación, para su posterior recomendación en diferentes zonas del piedemonte llanero.

6.2.1.1 Tiempo de retención hidráulica.

Se estableció 2, 5 y 8 días de retención, de tal manera que se establecieran 3 días de diferencia entre cada día escogido para facilitar el análisis de los resultados, además de estar dentro del rango establecido en los parámetros de funcionamiento de este tipo de tratamientos, el cual recomienda valores entre 2 y 10 días de retención (Morales, López, Vera, & Vidal, 2013).

El TRH se manipuló por medio del caudal de entrada del agua residual sintética y teniendo en cuenta el volumen neto en promedio de cada humedal, como se puede evidenciar en la tabla 2.

Un ejemplo del procedimiento llevado a cabo es el siguiente:

36 litros de capacidad para el humedal blanco, en 2 días de retención = $36 \text{ l} \div 2 \text{ días} = 18 \text{ l/día}$; este valor es el caudal de entrada para el humedal blanco en un TRH de 2 días.

Tabla 3. *Tiempos de retención y caudales*

Humedal blanco (36 l)		HR1, HR2 Y HR3 (40 l)	
TRH (días)	Caudal (l/día)	TRH (días)	Caudal (l/día)
2	18	2	20
5	7,2	5	8

Tabla 4. (Continuación).

8	4,5	8	5
---	-----	---	---

Nota: Manipulación de caudales, por Rodríguez & Vargas, 2018

6.2.1.2 Concentración inicial de DBO.

La concentración inicial de carga orgánica definida bajo el parámetro DBO₅, se manipuló en laboratorio de acuerdo a la cantidad de componentes que conforman el agua residual sintética, hallando su valor de DBO por medio del método Oxitop, dichos componentes y sus respectivas cantidades, se encuentran definidos en el apéndice 5.

Estos compuestos, definen las características bioquímicas del agua, con dichas cantidades se determinó un valor de DBO aproximadamente de 170 mg/l, por lo tanto, se decidió duplicar la cantidad de gramos en 1 litro, con el fin de obtener 340 mg/l de DBO y de esta manera, se escogieron estos dos valores para iniciar el tratamiento. Es de resaltar que ninguno de los dos datos de DBO, cumplen con lo establecido para vertimientos de ARD (Resolución 631, 2015).

Teniendo concentraciones de 170 y 340 mg/l de DBO para llevar a cabo la fase experimental, se establece entonces un grado de contaminación media y medianamente alta, respectivamente para el agua residual sintética, (Cisterna & Peña, 2012), por lo tanto, estaría entrando al sistema cerca de 7 g DBO/día máximo, teniendo en cuenta que ingresan máximo 340 mg/l, es decir, 0.34 g/l, multiplicados en 20 l/día, caudal de entrada máximo.

6.2.2 Diseño experimental.

Fue necesario para el desarrollo de la investigación, escoger un diseño metodológico donde se involucrarán las dos variables manipuladas; es por eso que, se escogió el diseño factorial mixto 3x2, en el cual se estudia la interacción de las variables de una manera sistemática (Ver tabla 3) donde básicamente el procedimiento se dividió en dos ciclos, en el que se estudian los tres distintos tiempos de retención con las dos concentraciones iniciales de DBO.

Tabla 5. *Diseño metodológico*

Tratamiento	Variables	Valores (Días-mg/l)
1	TRH1-C1	2-170
2	TRH2-C1	5-170
3	TRH3-C1	8-170
4	TRH1-C2	2-340
5	TRH2-C2	5-340

Tabla 6. (Continuación).

6	TRH3-C2	8-340
---	---------	-------

Nota: Tratamientos experimentales, por Rodríguez & Vargas, 2018

En cada uno de estos tratamientos se tomaron muestras puntuales tanto recién preparada el agua residual sintética (1000 ml en total), como después del tratamiento en los respectivos días de retención (1000 ml por cada humedal), para así determinar las características del líquido por medio de los siguientes parámetros: DBO, DQO, SST, pH, conductividad y temperatura a la entrada del recurso y DBO, DQO y SST a la salida del recurso (Ver apéndice 6, 7 y 8).

Por otro lado, se tomaron datos de cobertura vegetal y densidad vegetal de los HR1, HR2, y HR3, antes de iniciar los tratamientos y a mitad del proceso, es decir antes de iniciar el tratamiento uno y cuatro, con el fin de llevar un seguimiento de las características de la especie *H. psittacorum*.

Cabe resaltar que son el humedal blanco y 3 réplicas del sistema, pues cada humedal que contiene la especie *H. psittacorum* es una réplica, y por otra parte, se tomaban 2 datos por parámetro, es decir duplicado de resultados, teniendo como fin fortalecer los resultados de la investigación, para un total de 306 datos tomados en un periodo aproximado de 9 semanas.

6.2.2.1 Hipótesis del diseño experimental.

El modelo estadístico e hipótesis de interés de la presente investigación se basa en el diseño factorial mixto 3X2, donde se determina el efecto de dos variables independientes (Gutierrez & De la Vara, 2012) (TRH 2, 5, 8 días y concentración inicial de carga orgánica determinada por el parámetro DBO 170 y 340 mg/l) con 3 réplicas, en el potencial de remediación de humedales artificiales implementados con la especie *Heliconia psittacorum*, en aguas residuales domésticas.

De esta manera, el modelo estadístico de efecto para este diseño está dado por:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde Y_{ijk} , es la observación del tratamiento i , en el nivel j del factor fila, y en el nivel k del factor columna; μ , es la media general; α_i , es el efecto del tiempo de retención i ; β_j , es el efecto de la concentración inicial de DBO j ; $\alpha\beta$, es la interacción tiempo de retención hidráulico-concentración de DBO, y ϵ_{ijk} , es el error aleatorio.

Las hipótesis para los tres efectos del modelo anterior son:

6.2.2.1.1 Hipótesis nula.

H_{01} = Efecto del tiempo de retención hidráulico (α) = 0 → Es decir que el TRH no incide en el comportamiento del humedal artificial.

H_{02} = Efecto de la concentración inicial de DBO (β) = 0 → Es decir que la concentración inicial (DBO) no incide en el comportamiento del humedal artificial.

H_{03} = Efecto de la interacción entre TRH y DBO ($\alpha\beta$) = 0 → La combinación entre TRH y DBO no incide en el comportamiento del humedal artificial.

6.2.2.1.2 Hipótesis alternativa.

H_{a1} = Efecto del tiempo de retención hidráulico (α) $\neq$ 0 → Es decir que el TRH sí incide en el comportamiento del humedal artificial.

H_{a2} = Efecto de la concentración inicial de DBO (β) $\neq$ 0 → Es decir que la concentración inicial (DBO) sí incide en el comportamiento del humedal artificial.

H_{a3} = Efecto de la interacción entre TRH y DBO ($\alpha\beta$) $\neq$ 0 → La combinación entre TRH y DBO sí incide en el comportamiento del humedal artificial.

6.2.3 Procedimiento metodológico.

Tabla 7. Descripción del desarrollo experimental

Parámetro	Método	Procedimiento
DBO (mg/l)	OxiTop	Se tomaba una muestra del agua residual de 164 ml, pues de acuerdo a las instrucciones, este valor es el necesario para un rango esperado para DQO de 0-400 mg/l. Se introducía la muestra de 164 ml en cada recipiente, se le aplicaba 3 gotas de inhibidor de nitrificación, se le añadían 2 tabletas de hidróxido de sodio y se rotulaban. Se llevaba el set del OxiTop a la incubadora y se dejaba allí por 5 días. Después de 5 días se evidenciaba el dato expuesto en el cabezote del recipiente, este valor se multiplicaba por el factor 10, para así obtener el resultado final de DBO en mg/l que tenía la muestra. Este mismo procedimiento se hacía de forma duplicada para cada tratamiento.



Tabla 8. (Continuación).

DQO (mg/l)	Métodos normalizados 5220-D y la guía del IDEAM TP0086	En tubos de digestión de 16 x 100 mm se agregaban 2,5 ml de la muestra del agua residual, 1,5 ml de la solución de digestión de dicromato de potasio, y 3,5 ml del reactivo $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{AgSO}_4$. Se rotulaba cada muestra y se colocaban los tubos de digestión en el termo reactor, donde se dejaban digerir a 148°C por 2 horas, después de estas dos horas, se dejaba enfriar otra hora y por último se llevaban los tubos al espectrofotómetro y se medía la absorbancia a 500 nm. Multiplicar ese dato por -810,15 (valor determinado previamente en la construcción de la curva patrón con el acompañamiento de dos docentes), el resultado es el valor de DQO de la muestra. De igual manera, se le realizaba un duplicado a cada muestra.
		
SST (mg/l)	Bomba de vacío	Después de realizarle un lavado y secado a las cápsulas con el papel filtro en el horno a 150°C por 20 minutos, se rotulaban, se pesaban y esos valores eran los pesos iniciales. Seguido a esto, en los Erlenmeyer conectados a la bomba de vacío, se les ponía el papel filtro y se introducían 200 ml de la muestra de agua residual, después, se encendía la bomba de vacío y se esperaba que precipitara todo el líquido. Por último, se volvían a poner el papel filtro en su respectiva cápsula y se volvían a llevar al horno a 150°C por 1 hora, se pesaban y estos eran los pesos finales. Los SST se hallaban dividiendo la resta del peso final menos el peso inicial sobre el volumen utilizado.
		
Temperatura (°C) Conductividad hidráulica (cm/s) pH	Multiparámetro	Las dos sondas del multiparámetro, se introducían en un vaso precipitado con 500 ml de la muestra, se esperaba cerca de 1 minuto y se tomaba el valor que se evidenciaba en el medidor. Sin embargo, no siempre se usaron las dos sondas en las mediciones realizadas, lo que puede que infiera en la variación de los respectivos resultados.
Cobertura y densidad vegetal		Con un recuadro de madera, de medidas 20 cm X 50 cm, y pintado de rojo y negro para facilitar el cálculo, se colocaban en cada humedal al azar, y se determinaba bajo criterio propio el porcentaje de cobertura de acuerdo al color, 25, 50 o 75% de cobertura estimada, y se hallaba el valor final a través de un índice predeterminado (Ver apéndice 9). Este procedimiento se hacía tres veces por humedal para sacar un promedio. Por otra parte, para hallar la densidad vegetal se contaban el número de rizomas que había en cada humedal (Martín G. , 2010).
	Método Daubenmire	

Tabla 9. (Continuación).

Altura de la
planta (cm)



De acuerdo al referente, se escogían al azar 5 unidades/m², de acuerdo al referente, de la especie vegetal *Heliconia psittacorum*, y se les tomaba la altura desde la superficie del lecho hasta la punta de la planta, se promediaban y se generaba un solo dato.

Nota: Paso a paso en cada para cada toma de muestras, por Rodríguez & Vargas, 2018.

La mayor parte de la fase experimental se llevó a cabo en el laboratorio de aguas, ubicado en campus Aguas Claras de la universidad Santo Tomás, la otra parte se realizó en las mismas instalaciones de la universidad, esta vez en campo, donde fueron tomadas las muestras de agua y los valores de cobertura vegetal y densidad vegetal en los tres humedales réplicas. Los diferentes procedimientos se detallan en la tabla 4, así como el método escogido para cada parámetro. Para divisar la sensibilidad de cada instrumento ver apéndice 10.

6.3 Fase III: Tabulación y análisis estadístico de los datos

6.3.1 Tabulación y análisis inicial.

La tabulación inicial se realizó por medio de plantillas de cálculo en Microsoft Excel, con ayuda de los datos recolectados en el desarrollo experimental tanto de entrada como de salida, con el fin de determinar los porcentajes de remoción de carga contaminante en cada uno de los tratamientos y poder generar gráficas ilustrativas de los resultados conseguidos. Los porcentajes de remoción se obtuvieron para cada parámetro y en cada uno de los cuatro humedales, con el fin de determinar promedios y realizar su respectivo análisis.

6.3.2 Análisis estadístico ANOVA en IBM SPSS.

Para determinar el comportamiento de los humedales artificiales, y así mismo poder definir el resultado de la hipótesis planteada tanto del proyecto como del diseño experimental, se utilizó un análisis de varianza (ANOVA) por medio del software IBM SPSS statistics, cuyos resultados más relevantes y que intervienen en la prueba de hipótesis, fueron: la media y desviación estándar, la prueba de esfericidad de Mauchly y por último la prueba de efectos intra sujetos. Los datos utilizados para el presente análisis, fueron los resultados de porcentaje de remoción por tratamiento obtenidos en la tabulación inicial (Ver tabla 8).

La media y desviación estándar permitieron definir cuál fue el tratamiento experimental con mejores resultados, así como los efectos en cuanto a porcentajes de remoción de los demás

tratamientos, además con la desviación estándar se consiguió concretar el grado de dispersión de los resultados y su grado de confiabilidad. Por otra parte, la prueba de Mauchly permitió establecer que los resultados efectivamente cumplen la prueba de esfericidad ($P > 0,05$), lo que indicó que se puede establecer la hipótesis con la herramienta de efectos intra sujetos, sin ningún tipo de corrección estadística y así rechazar o aprobar la hipótesis nula planteada en el apartado 6.2.2.1.

6.3.3 Análisis de regresión y coeficiente de determinación PEARSON.

Con el método de regresión se logró confirmar el grado de dispersión de los datos, correlacionando las variables dependientes e independientes del presente experimento, en este caso los porcentajes de remoción obtenidos con los seis tratamientos del diseño, esta observación se llevó a cabo por medio de las diferentes gráficas generadas por la herramienta estadística Excel, la cual permitió observar la línea tendencial, que facilita observar la agrupación de los datos. De igual manera, mediante estos resultados, se pudo establecer el valor del coeficiente de Pearson R^2 , cuyos valores oscilan entre cero a uno, siendo los valores más cercanos, o iguales a uno, los más confiables para su respectivo análisis.

Cabe resaltar que los datos usados en el análisis de regresión son los porcentajes de remoción obtenidos en cada tratamiento, incluido los resultados para cada uno de los tres parámetros, valores que se pueden observar en la tabla 8.

6.4 Fase IV: Propuesta de recomendaciones técnicas para el uso de este sistema en el piedemonte llanero

Las recomendaciones técnicas se hicieron posterior a la observación comparativa, donde se tuvo en cuenta diferentes características que influyen en el desempeño de los humedales artificiales, como lo son las condiciones climáticas y de vegetación para los 27 municipios pertenecientes al piedemonte llanero, verificando teóricamente con fuentes como el IDEAM que efectivamente presentan similitudes entre municipios. Seguido de esto, y con ayuda de los análisis de resultados, se prosiguió a recomendar el TRH el cuál es posible el mejor rendimiento de los humedales y la concentración inicial de carga orgánica soportable para las especificaciones de este tratamiento. Además, se recomendó las dimensiones para el uso de esta tecnología, en una vivienda unifamiliar, en un condominio y en una vereda.

7. Resultados y análisis

7.1 Rendimientos obtenidos en términos de porcentajes de remoción

7.1.1 Características iniciales del agua residual doméstica sintética.

Es necesario antes de determinar el porcentaje de remoción en los parámetros DBO, DQO y SST, establecer las condiciones iniciales con las cuales se llevó a cabo cada uno de los seis tratamientos, para así, definir el valor removido en cada parámetro y poder realizar el respectivo análisis.

Tabla 10. *Condiciones del ARDS iniciales para cada tratamiento*

Parámetros	Tratamiento 1: TRH 2 días	Tratamiento 2: TRH 5 días	Tratamiento 3: TRH 8 días	Tratamiento 4: TRH 2 días	Tratamiento 5: TRH 5 días	Tratamiento 6: TRH 8 días
DBO ₅ (mg/l)		170			340	
DQO (mg/l)		199,7			368,21	
SST (mg/l)		210			110	
Temperatura (°C)		22,15			28	
pH		5,75			5,845	
Conductividad (μS/cm)		192,85			237	

Nota: Datos fijos en la entrada de cada tratamiento, por Rodríguez & Vargas, 2018.

Como se puede observar la tabla 5, el sistema operó con dos entradas de ARDS consecuentes de manipular las concentraciones iniciales de DBO₅, en los primeros tres tratamientos se trabajó con una DBO₅ inicial de 170 mg/l, partiendo de esta DBO₅, se obtuvieron los valores de los demás parámetros (DQO, SST, T, pH y conductividad). Así mismo, en los siguientes tres tratamientos al establecer una DBO₅ de 340 mg/l, los valores de los diferentes parámetros fueron alterados. Los datos de cada corrida fueron tomados en la hoja de campo utilizada en el procedimiento metodológico (ver apéndice 11).

Por lo tanto, la relación DBO₅/DQO para la entrada uno y dos de DBO₅ del ARDS fue de 0,85 y 0,92 respectivamente. Estos datos indican que para el posterior tratamiento de dicha agua residual doméstica, es posible utilizar un tratamiento biológico como lo son los humedales artificiales, puesto que la mayoría de las sustancias presentes allí son biodegradables (Kenbi, 2018). Por otra parte, los valores de sólidos indican que del total de sólidos presentes en el ARDS, el 58% para la entrada uno y 85% para la entrada dos, representan los sólidos disueltos

cuyo resultado se puede argumentar en los componentes del ARDS, que en su mayoría son solubles en agua (López, 2013).

7.1.1.1 Influencia de las variables pH, temperatura, conductividad y características vegetales.

Los valores de pH del agua residual para las dos concentraciones de entrada, no variaron significativamente, se mantuvieron entre 5,75 y 5,845 a pesar que los resultados tienden a arrojar valores que según la escala de pH son ácidos, aun así se encuentran entre el rango 5 y 9, el cual es adecuado para el tratamiento de aguas residuales, porque permite el óptimo desarrollo de los microorganismos, aumentando las opciones de reproducción y desarrollo, para llevar a cabo el proceso de remoción (Castrillón, Bedoya, & Montoya, 2006).

Por otra parte, se puede apreciar en la tabla 6, que el ARDS 1 que corresponde a la concentración uno de DBO presentó un valor de temperatura de 22°C aproximadamente y la segunda concentración fue de 28°C, a pesar que hubo un aumento de 6°C, los dos resultados, se encuentran en el rango óptimo para el desarrollo de la actividad bacteriana el cual oscila entre 20°C y 35 °C (Delgadillo et al., 2010). Adicionalmente, cabe resaltar que el incremento de la temperatura, se pudo ver influenciada por las condiciones cálidas ya que el montaje piloto se encontraba a la intemperie, u otro factor que pudo influir fueron los equipos utilizados, porque en ocasiones se tomaron los datos de temperatura con el pHmetro y en otras con el conductímetro, esto por la baja disponibilidad de equipos debido a la cantidad masiva de tesis en laboratorio.

Para el parámetro de conductividad los valores varían desde 50 hasta 1.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para agua residuales domésticas (Smart, 2017). Para el caso de los datos obtenidos en el presente proyecto arrojaron valores de 192 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para la entrada uno y 237 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para la entrada dos, dichos valores se encuentran en el rango mencionado, lo que significa que no afectan la calidad del agua o de la biota acuática, incluyendo los microorganismos y la vegetación (Delgadillo et al., 2010), sin embargo, hubo un incremento de la conductividad, porque; primero se duplicaron los componentes del agua residual sintética, por ende se presentó una mayor presencia de sólidos y segundo por la relación directamente proporcional entre la temperatura y la conductividad, ya que por cada grado que aumenta la temperatura se incrementa aproximadamente 2% la conductividad partiendo de una temperatura de 25°C (Smart, 2017).

En definitiva, los datos de pH, conductividad y temperatura obtenidos a la entrada de las dos concentraciones son adecuados tanto para las condiciones de operación de los humedales en conjunto con la especie *Heliconia psittacorum* como para los microorganismos encargados de la descomposición de la materia orgánica presente el agua residual que se ingresó al humedal para remover contaminantes.

No obstante, también se tuvo en cuenta características vegetales de los humedales réplica, para tener un seguimiento de evolución vegetal en ellos, y poder relacionar estas particularidades con los resultados obtenidos después de la remoción de contaminantes.

Tabla 11. Datos de porcentaje de cobertura vegetal, altura y densidad de la especie *H. psittacorum*

	<u>Cobertura vegetal (%)</u>		<u>Altura de la planta (cm)</u>		<u>Densidad vegetal (Unidad)</u>	
	Entrada 1	Entrada 2	Entrada 1	Entrada 2	Entrada 1	Entrada 2
HR1	45,83	60,3	25	27	19	25
HR2	54,16	83,04	23,44	25,7	15	23
HR3	37,5	58,59	25,82	26,9	16	25
Promedio	45,83	67,31	24,75	26,53	17	24

Nota. Entrada 1 corresponde a la DBO₅ de la concentración 1 y Entrada 2 corresponde a la concentración 2, por Rodríguez & Vargas, 2018.

Diferencia de porcentaje de cobertura vegetal

$$\text{Diferencia} = \text{Entrada 2} - \text{Entrada 1} \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$\text{Diferencia} = 67,31\% - 45,83\%$$

$$\text{Diferencia} = 21,48\%$$

En la tabla 6, se observa el porcentaje de cobertura vegetal para las concentración de DBO₅ uno y dos, donde se puede apreciar que hubo una deferencia del 21% aproximadamente de la concentración 2 respecto a la concentración 1, teniendo en cuenta el promedio de las tres réplicas de los humedales, dicho incremento se puede relacionar con el nacimiento de rizomas, ya que en un principio se sembraron 6 individuos por humedal y cuando se realizó la corrida 1 de la primera concentración (170 mg/l) ya habían brotado en promedio 11 rizomas más, mientras que para la concentración dos (340 mg/l), nacieron en promedio 18 rizomas, es decir,

para el tratamiento 4, lo que indica que se presentó un incremento de la cantidad de plantas desde el momento que se construyeron los montajes piloto hasta cuando se da inicio con los tratamientos.

Respecto a la altura de las plantas, los individuos no presentaron un crecimiento considerable, pues basándose en el promedio, los resultados obtenidos no variaron en gran medida, por tanto que para la entrada 1 los valores oscilaron entre 23,44 cm y 25,82 cm y para la entrada 2 los valores fluctuaron entre 25,7 cm y 27 cm, es decir, que hubo una diferencia en el crecimiento de aproximadamente 2 cm, esto se debe a que se tomaron las medidas de la altura de los rizomas nacientes como de los antiguos, entonces, al compararlos con los rizomas principales, predominan por cantidad de individuos que están en proceso de crecimiento.

También cabe aclarar que los rizomas se sembraron aproximadamente un mes antes de iniciar el desarrollo experimental y medían entre 25 y 35 cm, pero la mayoría de los tallos de estos rizomas murieron para dar vida a los nuevos brotes, de tal manera al tomar la medida de las alturas probablemente gran parte de los individuos escogidos al azar eran nuevos rizomas, por esta razón en la tabla anterior no se evidencian valores que superen los 35 cm.

7.1.2 Porcentajes de remoción para los tres parámetros DBO, DQO, y SST.

La tabla 7, expone los porcentajes de remoción teniendo en cuenta el tiempo de retención hidráulico (TRH), las dos concentraciones de entrada, y los tres humedales réplica. En general los porcentajes de remoción obtenidos en los diferentes tratamientos y montajes de humedales artificiales, presenta valores entre 41% hasta el 93%, más de la mitad de los valores obtenidos supera el 80% de remoción teniendo en cuenta los tres parámetros a la vez.

En la Apéndice 12 se puede apreciar una tabla con las concentraciones de salida de cada humedal tanto las réplicas como el blanco por parámetro, teniendo en cuenta los TRH, concentraciones iniciales. A continuación, se observa un ejemplo de cómo se hallaron los respectivos porcentajes de remoción;

Para el ejemplo se usó el TRH: 2 días y Concentración inicial 1: 170 mg/l y el HR1

$$\% \text{ Remoción} = \frac{C_{eDBO} - C_{sDBO}}{C_{eDBO}} * 100 \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$\% \text{ Remoción} = \frac{170 \text{ mg/l} - 10 \text{ mg/l}}{170 \text{ mg/l}} * 100$$

$$\% \text{ Remoción} = 94,11 \sim 94 \text{ (Ver apéndice 10.)}$$

Luego se promediaron los % de remoción de los HR1 para las variables DBO, DQO y SST.

$$\text{Promedio} = \frac{94\% + 92\% + 88\%}{3}$$

$$\text{Promedio} = 91,33\% \sim 91\%$$

De igual manera se realizó el procedimiento con los demás resultados, por lo cual se obtuvo los siguientes resultados (ver apéndice 13 para los resultados por parámetro):

Tabla 12. Porcentaje de remoción de cada humedal artificial en los tres parámetros

TRH	Humedales	Concentraciones iniciales	
		170 mg/l	340 mg/l
2 días	HR1	91%	83%
	HR2	88%	85%
	HR3	86%	83%
	Promedio réplicas	88,33%	83,66%
	HB	50%	86%
5 días	HR1	73%	84%
	HR2	85%	52%
	HR3	79%	85%
	Promedio réplicas	79%	73,66%
	HB	59%	77%
8 días	HR1	59%	84%
	HR2	75%	91%
	HR3	64%	85%
	Promedio réplicas	66%	86,66%
	HB	41%	93%

Nota: Entiéndase HR1; como humedal réplica 1, HR2; humedal réplica 2, HR3; humedal réplica 3 y HB; como humedal blanco. Tto 1 (TRH 2 d, DBO 170 mg/l); Tto 2 (TRH 5 d, DBO 170 mg/l); Tto 3 (TRH 8 d, DBO 170 mg/l); Tto 4 (TRH 2 d, DBO 340 mg/l); Tto 5 (TRH 5 d; DBO 340 mg/l); Tto 6 (TRH 8 d, DBO 340 mg/l), por Rodríguez & Vargas, 2018.

Se evidencia que la concentración 2, presentó el mayor porcentaje de remoción, en el TRH: 8 días teniendo en cuenta los humedales réplica, esto puede deberse a una mejor relación de microorganismos en el humedal y la concentración de entrada, así como, las características vegetales que fueron definidas anteriormente, pues para la puesta en marcha de la segunda concentración, las plántulas presentaron un desarrollo vegetativo mayor, evidenciando en su reproducción nuevos brotes que permitían un mayor conteo de rizomas, además que físicamente habían mejorado su aspecto. Mientras que la concentración 1, arrojó el mejor porcentaje de remoción en el TRH: 2 días, de esta manera se puede atribuir que para una concentración de 170 mg/l de DBO₅ se remueve una mayor concentración en un TRH: 2 días

y que para una concentración de 340 mg/l DBO_5 se requiere un TRH: 8 días, con el fin de obtener una remoción superior al 80%.

Es importante tener en cuenta, que la vegetación en los humedales artificiales es una de las variables más influyentes en la efectividad del tratamiento, porque son las plantas las encargadas de transferir el oxígeno a la zona de la raíz, para que los microorganismos puedan desarrollarse. Además, mejora el tratamiento al estabilizar el medio y canalizar el flujo de agua a través de las raíces y sus tallos, generando bajas velocidades y por ende capturando los materiales suspendidos en los humedales (García & Leal, 2006). Pues a pesar que el humedal blanco presentó un valor superior de remoción este dato no permite que se afirma que sea el mejor, porque la variación de los resultados está influida por la cantidad de datos, pues es más confiable un resultado de tres réplicas en comparación con un único resultado.

7.1.3 Remoción de DBO_5 .

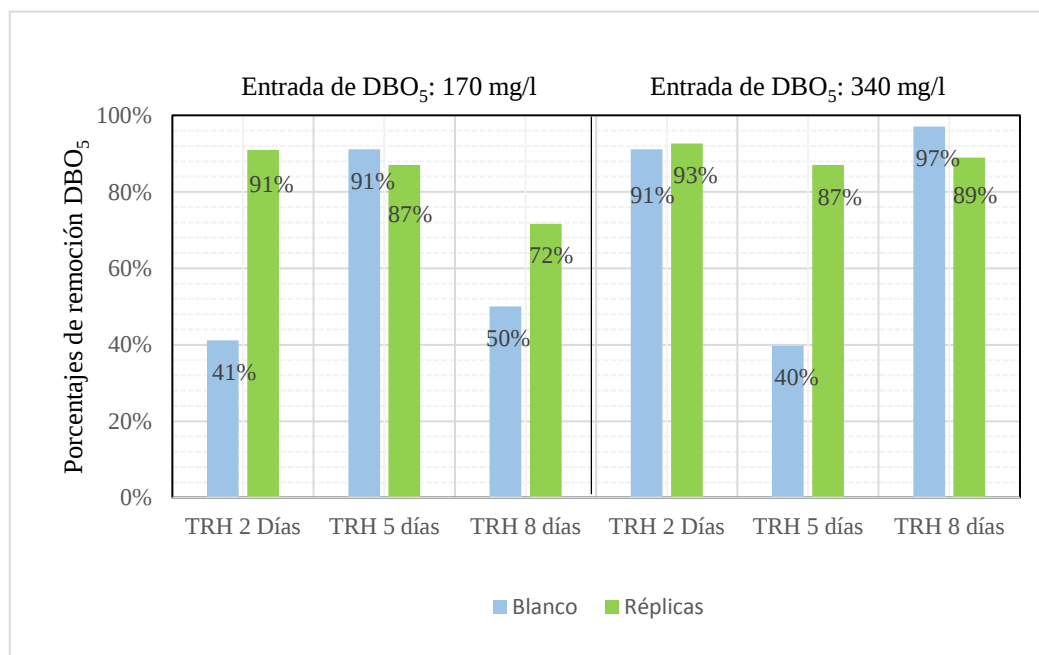


Figura 6. Porcentajes de remoción de los humedales réplica y el humedal blanco (DBO_5), por Rodríguez & Vargas, 2018.

En la figura 6, se observan los porcentajes de remoción de las dos concentraciones de entrada para el parámetro DBO_5 , por parte de los humedales réplica y el blanco. Se aprecia que el humedal blanco presentó el mayor porcentaje de remoción (97%) en el TRH: 8 días para la concentración dos, sin embargo, también presentó el menor valor de remoción (40%) en la concentración 2 para el TRH: 5 días, es decir hubo una diferencia entre el valor superior y el

inferior del 57%, esta variación en los porcentajes de remoción del blanco se justifica mediante la cantidad de datos tomados en campo, ya que hubo un único humedal por lo cual se analizó una muestra.

Respecto a los 6 datos presentados en la figura para el humedal blanco, la mitad son igual o inferior al 50% y la otra mitad supera el 90%, mientras que los humedales réplica a pesar de no tener el mayor porcentaje de remoción la totalidad de los datos supera el 70% de remoción y presentan una diferencia del porcentaje de remoción superior al inferior de 21%, de esta manera se puede plantear que hay un sesgo mayor entre los datos del humedal blanco que los valores de los humedales réplica, esto puede ocurrir porque para el momento de realizar la toma de muestra se estudiaron mayor cantidad de datos para los humedales réplica ya que estos eran tres, mientras que para el blanco tan sólo era uno.

De acuerdo a los resultados presentados anteriormente de los humedales réplica (72% a 93%), se observa que existe una relación entre el afluente y el efluente la cual se ajusta a la remoción de material biodegradable, este proceso es efectuado principalmente por medio de los microorganismos que crecen en la superficie de la grava, raíces y rizomas de las plantas, degradando la materia orgánica de forma aerobia en la superficie de las raíces de las plantas (Lahora, 2003), de esta manera, se resalta el papel que desempeñan los humedales artificiales de flujo subsuperficial- horizontal, los cuales se consideran más efectivos respecto a los otros tipos de humedales, porque estos permiten el paso continuo del agua residual a través del medio poroso y de esta manera se realiza con mayor efectividad la remoción de contaminantes (Delgadillo et al., 2010).

También se puede interpretar que el humedal blanco haya tenido porcentajes de remoción superiores al 90%, se debe en parte a la función que cumple la grava (sustrato) en la degradación de materia orgánica, sin embargo, es importante resaltar que a pesar que el blanco arrojó altos porcentajes de remoción no significa que este sea el mejor, pues en parte se ve reflejada la función de la especie en los humedales réplicas la cual contribuyó, por ejemplo, en que la primera concentración se presentaran mejores resultados de remoción las réplicas en comparación con el humedal blanco, pues la densidad vegetal había aumentado de 6 a 17 individuos por humedal, factor que probablemente influyó para obtener dichos resultados.

Por otra parte, teniendo en cuenta la resolución 631 del 2015, la cual establece un valor máximo permisible de 90 mg/L O₂ de DBO para el vertimiento de aguas residuales domésticas,

de acuerdo con los valores de DBO en el efluente, se evidencia que los tratamientos cumplen con la normatividad ya que, al aplicar el porcentaje de remoción, los valores iniciales de 170 y 340 mg/l en la entrada de los tratamientos se reduce considerable ubicándolos dentro del valor permisible de la norma, se obtiene que la mayor concentración efluente de la entrada DBO 1 (170 mg/l) fue de 55 mg/l y para la entrada DBO 2 (340mg/l) fue de 60 mg/l.

7.1.4 Remoción de DQO.

La Figura 7, presenta los valores de DQO correspondientes a las 2 concentraciones de entrada.

Se observa que al igual que en la DBO₅ la DQO arrojó el mayor porcentaje de remoción en el humedal blanco para la concentración dos y el TRH: 8 días con un valor del 95% y menor en el TRH: 5 días con el 25%. De los 6 porcentajes del humedal blanco 4 de ellos fueron menores a los humedales réplica esto permite que haya mayor confiabilidad en los humedales con la especie, sin embargo, no se descarta los óptimos resultados que ha tenido el humedal blanco. La diferencia que hubo de los humedales réplica del porcentaje mayor respecto al menor fue de 36% y para el humedal blanco fue del 70%.

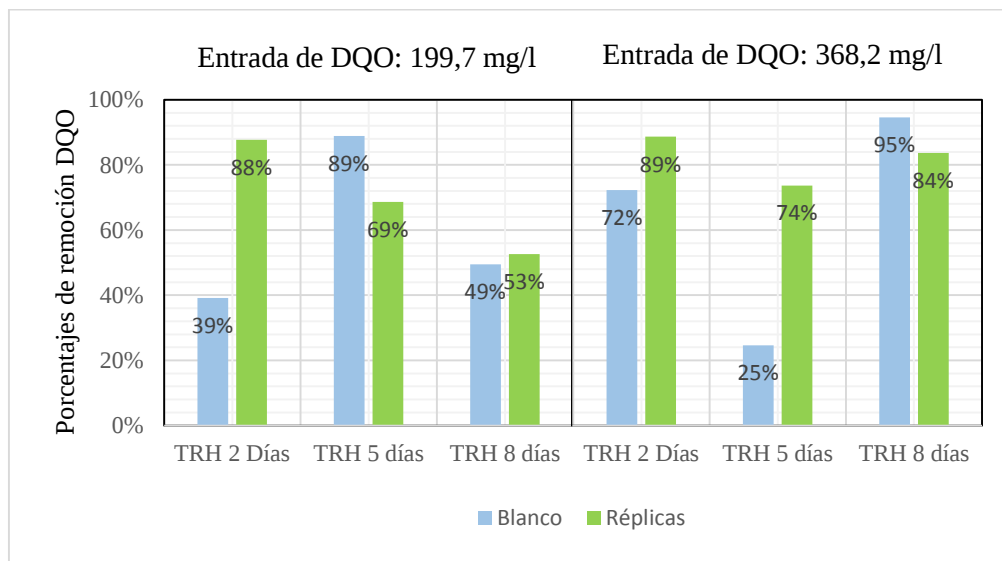


Figura 7. Porcentajes de remoción de los humedales réplica y el humedal blanco (DQO), por Rodríguez & Vargas, 2018.

Se evidencia que hay una tendencia en la primera concentración en donde, los humedales réplica reducen el porcentaje de remoción del TRH: 2 días (88%) al TRH: 8 días (53%), es decir, que para la primera concentración (199,7 mg/l DBO₅) es más adecuado un TRH: 2 días, mientras que en la segunda concentración (368,21 mg/l DBO₅) los humedales réplica en los TRH:2 y 8 días son pertinentes para obtener una remoción superior al 80% y para el humedal

blanco sólo aplica dicho porcentaje para un TRH: 8 días, sin embargo, teniendo en cuenta este comportamiento que presenta la gráfica, se puede deducir que así el TRH: 2 días haya dado dicho resultado, se destaca que el TRH: 8 días tiene un porcentaje efectivo en la eliminación del índice DQO.

La dependencia que se observa en estos dos parámetros es porque la relación DBO_5/DQO dio 0,92 para la segunda concentración, lo que indica que gran parte de las sustancias del agua residual son biodegradables, por ende, se puede deducir que parte de la DQO removida pertenece a la DBO_5 , ya que se utilizó un tratamiento biológico como los humedales réplica, los cuales se encargan de biodegradar la materia orgánica (Hoffman & Platzer, 2011).

Los humedales artificiales con la especie *H. psittacorum* en alguna etapa no presentan reducciones de las concentraciones de la DBO finales, debido al arrastre de raíces o desprendimiento de la biopelícula formada alrededor de los rizomas, esta afirmación puede justificar los menores porcentajes de remoción en el TRH: 5 días para las dos concentraciones, mientras que para el humedal blanco dicha variación se presenta en la concentración 2, en parte esta situación se presenta por los valores atípicos respecto a los otros TRH tanto en la DBO_5 como la DQO.

Los resultados atípicos pueden ser resultado de la influencia climatológica en el desarrollo del tratamiento 5 (TRH 5 d: 340 mg/l DBO), específicamente, el aumento de la temperatura y la disminución considerable de precipitación, pues según Vanguardia (2019), en el mes de noviembre (mes donde se hizo esta corrida), la precipitación disminuyó un 56%, y hubo una temperatura de 27°C, por lo tanto disminuyó la humedad del lecho filtrante, lo que influye tanto en los humedales réplicas, como en el humedal testigo. Pues, la humedad influye en los procesos internos llevados a cabo en el sistema depurativo, especialmente, en los procesos de filtración y conductividad hidráulica (Bocardo, 2010).

Adicionalmente, comparando los resultados con la resolución 631 del 2015, la cual establece un valor permisible para de DQO de 180 mg/L O_2 para el vertimiento de aguas residuales domésticas, según los resultados obtenidos, se presentó un valor atípico en la concentración 2, el TRH: 5 días y el humedal réplica 2 donde el valor de salida fue de 245 mg/l, sin embargo esto no permitió que los valores de los otros humedales réplica se incrementaran a tal punto de no cumplir con el valor establecido por la norma.

7.1.5 Remoción SST.

Según la figura 8, se puede apreciar el porcentaje de remoción de SST para las relaciones de ingreso de materia orgánica expresada como DBO₅ y cada uno de los TRH.

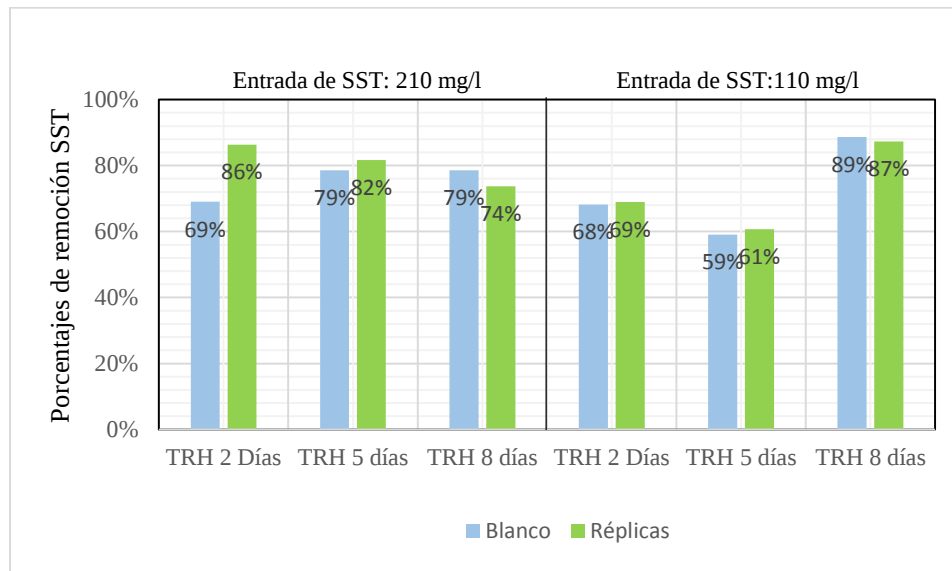


Figura 8. Porcentajes de remoción de los humedales réplica y el humedal blanco (SST), por Rodríguez & Vargas, 2018.

Para este parámetro los sólidos de la entrada uno fue mayor a la entrada dos, esto se puede aducir a que hubo mejor condición de mezclado y dilución de los componentes favorecido por la temperatura, ya que el tratamiento con DBO de 170 mg/l operó con una temperatura de 22°C, en comparación con el tratamiento con DBO de 340 mg/l el cual se trabajó con una temperatura de 28°C. Esta altercación también pudo ocurrir porque cuando se realizó la primera corrida, previamente se habían realizado corridas de pruebas las cuales muy seguramente provocaron que el valor de la entrada 1 se incrementara, aun así, se mantuvo la tendencia como ocurrió con los parámetros DBO₅ y DQO de que el humedal blanco presentara el mayor porcentaje de remoción el TRH: 8 días para la concentración dos y el menor el TRH: 5 día para la misma concentración. Por otra parte, se aprecia que la concentración uno reduce los porcentajes de remoción el TRH: 2 días al TRH: 8 días en los humedales réplica mientras que para el humedal blanco ocurre lo contrario, es decir, entre mayor TRH mayor el porcentaje de remoción.

Según los porcentajes de remoción de los sólidos se puede observar que la diferencia del valor mayor y el menor no es amplia porque lograron resultados de 30% y 26% tanto para el humedal blanco como para el humedal réplica, respectivamente. Estos resultados se pueden relacionar con la importancia del sustrato en el proceso de remoción, pues su principal función

es realizar los procesos de sedimentación y filtración, en conjunto con la densidad de la vegetación (*H. psittacorum*), permitiendo que se desarrolle la descomposición durante los largos tiempos de retención por bacterias especializadas en el lecho de arena (Carvajal et al., 2017), de acuerdo a esta teoría se puede inferir que por esta razón se evidencia que los humedales replica y el humedal blanco presenten mejores porcentajes de remoción en el TRH: 8 días.

Las concentraciones de salida de los 6 tratamientos de los sólidos suspendidos totales se ubicaron dentro de los valores permitidos por la resolución 631 del 2015 porque el mayor de salida fue 56,5 mg/l y la norma establece para SST un valor de 90 mg/L O₂, para el vertimiento de agua residuales de tipo domésticas.

De acuerdo a los análisis realizados para los tres parámetros DBO₅, DQO y SST, en definitiva, se puede encontrar la estrecha relación entre DBO₅ y DQO, aparte de la pertinencia de la especie *Heliconia psittacorum* junto con el humedal artificial (flujo subsuperficial horizontal), en el proceso de biodegradación de materia orgánica, ya que tiene facilidad de crecimiento, disponibilidad y adaptación a un clima tropical, lo que indica el buen estado de las raíces y rizomas tienen una gran capacidad colonizadora, además proporciona una superficie adecuada para el crecimiento de la biopelícula, aumentando los microorganismos depuradores en la remoción de contaminantes (Carvajal et al., 2017), seguramente si no se hubiera realizado corridas con la especie los resultados no hubieran sido tan significativos, porque a pesar que en ocasiones el humedal blanco presentó valores mayores no supera los datos que arrojaron los humedales réplica, de acuerdo a estos resultados se puede definir que para una concentración de 170 mg/l el TRH apropiado son dos días, mientras que para la concentración de 340 mg/l es mejor operar bajo el TRH de 8 días para que haya una mayor remoción en los tres parámetros.

7.1.6 Porcentaje de remoción teniendo en cuenta el tipo de humedal y los tratamientos.

A continuación, se describen los porcentajes de remoción para los 6 tratamientos, teniendo en cuenta los humedales artificiales sembrados con la especie *H. psittacorum* y el humedal blanco. Antes de presentar la tabla resumen de los tratamientos, se presenta un ejemplo de cómo se halló los porcentajes de remoción para los 6 tratamientos.

Se promedió el porcentaje de remoción que se obtuvieron para la concentración uno (170 mg/l) y el TRH: 2 días, para los tres parámetros en el humedal blanco (Ver tabla 8). Así

sucesivamente se fue hallando los valores, teniendo en cuenta la concentración, con el tiempo de retención.

Ejemplo:

$$\text{Promedio} = \frac{Ce1;TRH\ 2\ \text{días}:DBO5 + Ce1;TRH\ 2\ \text{días}:DQO + Ce1;TRH\ 2\ \text{días}:SST}{3}$$

$$\text{Promedio} = \frac{41\% + 39\% + 69\%}{3} \quad (\text{Ecuación 8})$$

$$\text{Promedio} = 50\%$$

Donde;

Ce1: Concentración de entrada uno: 170 mg/l

TRH: Tiempo de retención hidráulica (2 días)

Tabla 13. *Porcentajes de remoción de los humedales, con la especie H. psittacorum y el humedal blanco.*

Tratamiento	Humedales réplica (con especie)	Humedal blanco (sin especie)
1	88,3%	50% (ej)
2	79%	59%
3	66%	41%
4	83,6%	86%
5	73,6%	77%
6	86,6%	93%

Nota: Datos obtenidos para cada tipo de humedal, por Rodríguez & Vargas, 2018.

La tabla 8 muestra los porcentajes de remoción de los 6 tratamientos para los humedales con la especie y el humedal blanco o testigo. El humedal blanco permite comparar los resultados de los tratamientos propios del experimento (Ribóo, 2010), por ende la pertinencia del mismo.

Según los resultados obtenidos, los tratamientos 1 (C1; TRH 2 días) y 6 (C2; TRH 8 días) de los humedales réplica presentaron los mejores porcentajes removidos con valores de 88,3% y 86,6%, mientras que el humedal blanco arrojó los mejores resultados para los tratamientos 6 (C2; TRH 8 días) y 4 (C2; TRH 2 días) con porcentajes de 93% y 86,33% respectivamente, presentando igualmente resultados efectivos en remoción de contaminantes.

La anterior situación que se presenta en el humedal blanco, es debido a que con el solo hecho de contener sustrato permite que haya remoción, ya que las principales funciones del lecho filtrante son: ceder el paso del agua, resguardar a los organismos que viven en el humedal los

cuales llevan a cabo la actividad de biodegradación y almacenan los contaminantes. Además, en el lecho, los microorganismos forman una capa biológica, la cual es responsable de mejorar las características físico-químicas del agua, por ejemplo, es allí donde el color real se remueve hasta en un 60% y el carbono orgánico biodegradable se remueve hasta en un 50% (Delgadillo et al., 2010).

Sin embargo, la fluctuación en los resultados del blanco (52,3% entre el límite superior e inferior), impide tener una mayor confiabilidad en sus resultados, variaciones que pueden ser resultado que al ser el humedal que no presenta vegetación, permite que sea vulnerable a todos los cambios climatológicos, variables que influyen de manera directa en todos los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en este sistema de tratamiento, por lo cual, los parámetros DBO, DQO y SST, como son eliminados por diferentes mecanismos, presentan una desviación entre sí (Remtavares, 2013), no obstante, es importante tener en cuenta los resultados generados por el humedal blanco, pues haciendo un promedio del total de tratamientos, sólo estuvo un 15% por debajo de los resultados globales de los humedales réplicas.

Por otra parte, es relevante incluir que la vegetación comprendida en los humedales réplica, en este caso la especie *Heliconia psittacorum*, potencializa el desempeño de los humedales artificiales, puesto que la vegetación al estar en contacto con el lecho filtrante por medio de sus raíces, permite la circulación de oxígeno y desencadena los diferentes procesos de oxidación y disminución de los contaminantes biodegradables, lo que significa que al aportar más oxígeno, esto le ofrece estabilidad a los microorganismos, aumentando las posibilidades de remover materia orgánica y de facilitar los distintos procesos que allí se ven involucrados (Hoffman & Platzer, 2011).

7.1.7 Análisis estadístico de los datos y confirmación de hipótesis experimental.

7.1.7.1 Tratamiento estadístico por software IBM SPSS.

El respectivo tratamiento estadístico de los datos se efectuó mediante el software IBM SPSS Statistics, donde se realizó un análisis descriptivo de los resultados, en el que se tuvo en cuenta los tratamientos escogidos en el diseño factorial, y los porcentajes de remoción obtenidos en los tres parámetros DBO, DQO y SST por cada réplica.

7.1.7.1.1 Media y Desviación estándar o típica.

Tabla 14. Media y desviación estándar para cada tratamiento

	Tipo	Media	Desviación típica	N
Tratamiento_1	Blanco	49,67	16,773	3
	Réplicas	88,33	2,517	3
	Total	69,00	23,740	6
Tratamiento_4	Blanco	77,00	12,288	3
	Réplicas	83,67	12,858	3
	Total	80,33	11,827	6
Tratamiento_2	Blanco	86,33	6,429	3
	Réplicas	79,33	9,292	3
	Total	82,83	8,110	6
Tratamiento_5	Blanco	41,33	17,039	3
	Réplicas	74,00	13,000	3
	Total	57,67	22,447	6
Tratamiento_3	Blanco	59,33	17,039	3
	Réplicas	66,33	11,590	3
	Total	62,83	13,586	6
Tratamiento_6	Blanco	93,67	4,163	3
	Réplicas	86,67	2,517	3
	Total	90,17	4,916	6

Nota: Tto 1 (TRH 2 d, DBO 170 mg/l); Tto 2 (TRH 5 d, DBO 170 mg/l); Tto 3 (TRH 8 d, DBO 170 mg/l); Tto 4 (TRH 2 d, DBO 340 mg/l); Tto 5 (TRH 5 d, DBO 340 mg/l); Tto 6 (TRH 8 d, DBO 340 mg/l). Adaptado de software IBM SPSS statistics, por Rodríguez & Vargas, 2018.

En la tabla 9 se expresan los porcentajes de remoción obtenidos los diferentes tratamientos tanto para el humedal blanco, como para las réplicas, y donde se tuvo en cuenta los tres parámetros DBO, DQO, y SST; los cuales tienen una media que oscila desde el 41,33% hasta el 93,67% de remoción de contaminantes, donde el menor valor fue asignado para el tratamiento 5, y el valor más sobresaliente resultó del tratamiento 6, ambos datos del humedal blanco. Por otra parte, la desviación estándar proporcionó su mínimo valor para los tratamientos 1 y 6 con un valor de 2,517 en los humedales réplicas y su máximo valor para los tratamientos 3 y 5 con una desviación de 17,039 para el humedal blanco.

Este análisis resulta significativo, porque permite establecer que el tratamiento 1 (TRH 2 días: 170 mg/l DBO) fue el tratamiento que obtuvo mayor porcentaje de remoción para los humedales réplicas (88,33%), además, presentó el menor valor de desviación estándar (2,517), es decir, que no hubo una dispersión considerable de los datos respecto a la media, aumentando el rango de confianza con dicho resultado. Caso similar sucedió con el segundo mejor tratamiento para los humedales réplicas, el cual fue el tratamiento 6 (TRH 8 días: 340 mg/l

DBO), que obtuvo un valor de 86,67% y una desviación estándar de 2,517. Y, el tercer mejor tratamiento fue el 4 (TRH 2: 340 mg/l), con un porcentaje de remoción de 83,67% y con una desviación estándar de 12,858.

Igualmente, la tabla 9 también permite evidenciar que el tratamiento 6 (TRH 8 días: 340 mg/l DBO) fue el mejor experimento, para el humedal blanco, con un porcentaje de remoción de 93,67% (mejor porcentaje obtenido), y presentó el segundo menor valor de desviación estándar con un puntaje de 4,163. Además, el segundo tratamiento más efectivo para el humedal blanco, fue el 2 (TRH 5 días: 170 mg/l DBO), con un valor de 86,33% y presentó una desviación estándar relativamente baja de 6,429. Por último el tercer tratamiento que más removió fue el 4 (TRH 2: 340 mg/l) 77%, reportando una desviación estándar de 12,288.

Lo anterior genera confianza en los resultados obtenidos, pues los resultados de desviación estándar permite comprender que no hubo dispersión colosal de los datos para los humedales réplicas, teniendo en cuenta que, detrás del valor porcentual de remoción por tratamiento utilizado en este análisis, está el procedimiento estadístico de los datos obtenidos de las tres réplicas y de los tres parámetros, para un total de 18 datos promediados por porcentaje de remoción, al tener una cantidad de datos considerables, esto facilita el análisis estadístico y en relación con los resultados de desviación estándar, aumenta la confiabilidad de los datos.

De manera distinta, los porcentajes de remoción del humedal testigo o blanco, utilizados para el presente análisis, recogen los datos de remoción obtenidos por los tres parámetros en el único humedal testigo, para un total de 6 datos promediados para los porcentajes de remoción en cada uno de los seis tratamientos, una diferencia de 12 datos respecto a los humedales réplicas, lo que permitió evidenciar que de los 6 tratamientos analizados, en 4 tratamientos el humedal blanco tuvo una desviación estándar mayor que las réplicas, específicamente el 66,6% de los casos fue mayor.

Por lo tanto, se resalta que a pesar que el humedal blanco indiscutiblemente tuvo valores altos en porcentajes de remoción, en algunos casos mayores o iguales al de las réplicas, es importante resaltar la diferencia de datos entre el testigo y las réplicas, permitiendo direccionar un grado de confiabilidad superior a los humedales réplica, no dejando a un lado los resultados del blanco y su buen desempeño en la disminución de los índices contaminantes DBO, DQO y SST.

En efecto, basándose en primer lugar en los resultados de los humedales réplica, es consecuente resaltar el porcentaje de remoción obtenido por el tiempo de retención hidráulico 2 días en los humedales réplica y con concentración inicial de DBO de 170 mg/l, pues fue el mejor porcentaje de remoción para este tipo de humedales, contando los tres parámetros DBO, DQO y SST. Asimismo, destacar los 8 días de retención, para la concentración más alta de DBO (340 mg/l), que no sólo obtuvo el segundo mejor porcentaje para los humedales réplica, sino también obtuvo el mejor desempeño en el humedal blanco y con un valor de desviación muy bajo. Lo que permite deducir que para la menor concentración de DBO es removida de manera considerable con 2 días de retención y la mayor concentración de DBO con 8 días de retención.

Estos resultados se apoyan teóricamente, con estudios que afirman que dos días de retención son suficientes para la remoción de carga orgánica, como el de Ramirez & Rodríguez, 2016, donde definen de 2-4 de retención, aptos para el diseño de un humedal artificial de flujo sub-superficial y de 6-10 días para compuestos inorgánicos, sólidos y nutrientes. O, como la investigación de Larriva & González, 2017, en humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal, donde determinar una relación directamente proporcional entre la DBO, y el tiempo de retención hidráulica.

7.1.7.1.2 Prueba de esfericidad de Mauchly.

Tabla 15. Resultados de la prueba de esfericidad Mauchly

Efecto intra-sujetos	W de Mauchly	Chi-cuadrado aprox.	gl	Sig.
TRH	,506	2,042	2	,360
DBO	1,000	,000	0	.
TRH * DBO	,194	4,918	2	,086

Nota: Calculado con alfa 0,05. Adaptado de software IBM SPSS statistics, por Rodríguez & Vargas, 2018.

En la tabla 10, se puede observar el supuesto de esfericidad en la columna *sig* para el TRH y para la combinación de TRH*DBO, sin embargo, para DBO no hubo respuesta individual porque sólo tiene 2 niveles (170 y 340 mg/l), y esta prueba de esfericidad es para 3 niveles en adelante. Los datos utilizados en este análisis son los mismos que en el anterior, es decir, los porcentajes de remoción obtenidos por cada tipo de humedal (blanco, réplicas) y en cada tratamiento (1 al 6) y, como los tratamientos están compuestos por dos variables (DBO, TRH),

es necesario incluir sus niveles para determinar su influencia en los porcentajes de remoción, y continuar con el proceso de aprobación o rechazo de hipótesis.

Los resultados al ser mayores de 0,05 permiten aceptar la hipótesis de esfericidad, lo que indica que los resultados de las varianzas del diseño experimental no presentan diferencias significativas, afirmando que la matriz de los resultados es circular o esférica, y que las varianzas son similares, obteniendo más confianza para el momento de aceptar o rechazar la hipótesis nula del diseño experimental (GuiaSPSS, 2013).

7.1.7.1.3 Confirmación de la hipótesis del diseño experimental.

Como se determinó en el capítulo 6.2.2.1, bajo el diseño experimental trazado para determinar la relación de las dos variables y el rendimiento de los humedales artificiales, se generaron 3 hipótesis nulas y 3 hipótesis alternativas. Por lo cual, como se aprobó la hipótesis de esfericidad por medio de la prueba Mauchly, lo que prosigue es definir la hipótesis para cada caso, usando la tabla 11 de prueba de efectos, en la fila *esfericidad asumida* y en la columna *sig (p)*, si el valor es menor a 0,05 se rechaza la hipótesis nula y se aprueba la hipótesis alternativa.

El valor de 0,05 es consecuencia de definir un intervalo de confianza del 95%, porcentaje usado regularmente en investigaciones con medidas repetidas, como es el presente caso (GuiaSPSS, 2013).

Tabla 16. *Prueba de efectos intra-sujetos*

Origen		Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Sig.
TRH	Esfericidad asumida	247,722	2	123,861	2,586	,136
	Greenhouse-Geisser	247,722	1,339	185,020	2,586	,166
	Huynh-Feldt	247,722	2,000	123,861	2,586	,136
	Límite-inferior	247,722	1,000	247,722	2,586	,183
DBO	Esfericidad asumida	182,250	1	182,250	1,194	,336
	Greenhouse-Geisser	182,250	1,000	182,250	1,194	,336
	Huynh-Feldt	182,250	1,000	182,250	1,194	,336
	Límite-inferior	182,250	1,000	182,250	1,194	,336
TRH * DBO	Esfericidad asumida	4344,500	2	2172,250	12,298	,004
	Greenhouse-Geisser	4344,500	1,108	3922,776	12,298	,020
	Huynh-Feldt	4344,500	1,606	2705,346	12,298	,008
	Límite-inferior	4344,500	1,000	4344,500	12,298	,025

Nota: Calculado con alfa 0,05. Adaptado de software IBM SPSS statistics, por Rodríguez & Vargas, 2018.

Como se evidencia en la tabla 11, la prueba de efectos acepta la hipótesis nula para el Tiempo de Retención Hidráulico ($p > 0,05$) y para la carga orgánica inicial definida en DBO ($p > 0,05$), de manera individual, y por otra parte rechaza la H_{03} y acepta la hipótesis alternativa (H_{a3}) para la combinación TRH-DBO ($p < 0,05$), lo que indica que las variables TRH y DBO no inciden de manera considerable individualmente en el rendimiento de los humedales artificiales, o por lo menos, los datos no son suficientes para determinar un efecto relevante de una sola variable en el rendimiento general de los humedales artificiales, pero si se combinan estas dos variables, sí generan un efecto importante en el porcentaje de remoción de los contaminantes.

Lo anterior se fundamenta de manera teórica, pues el rendimiento de los humedales artificiales no depende de una sola variable, sino en efecto la combinación de diferentes variables, la mayoría de estas controladas, que intervienen en los procesos físicos, biológicos y químicos; tanto el sustrato, la vegetación, la calidad del agua a tratar, como la metodología a usar en cada humedal influyen de manera considerable en su efectividad (Remtavares, 2013).

Resaltando entonces, que para llevar a cabo de manera eficiente cada uno de los procesos de tratamiento como la filtración, la sedimentación, precipitación química y demás mecanismos de depuración, es necesario determinar el grado de influencia de cada variable en dichos procesos, pero, teniendo en cuenta su relación con las demás variables involucradas en el proceso, lo que permite potencializar la efectividad del tratamiento (Delgadillo et al., 2010)

También se puede apreciar en la tabla 15 que a pesar de que las dos variables de manera individual no determinan el porcentaje de remoción, el TRH es más dominante que la carga orgánica inicial de DBO, lo que determina que esta variable es muy importante y determinante en el momento de decidir las características funcionales de los humedales, sin embargo, se debe tener en cuenta que es una variable, que como se demostró anteriormente, se relaciona con otras variables, aportando sinérgicamente al proceso depurativo en este tipo de sistemas.

7.1.7.2 Análisis de regresión para los resultados.

El presente análisis de regresión, se realiza teniendo en cuenta los diferentes porcentajes de remoción obtenidos por el humedal blanco y los humedales réplicas, respecto a los 6 diferentes tratamientos (teniendo en cuenta los tres parámetros), y con los cuales se hizo el anterior análisis estadístico en SPSS. La figura 9 que se evidencia a continuación, representa el grado de dispersión de los resultados respecto a una recta lineal (que define si es el humedal blanco o

las réplicas), la ecuación de la recta y el valor de coeficiente de Pearson (R^2), complementando gráficamente el análisis anterior, y permitiendo confirmar los anteriores análisis.

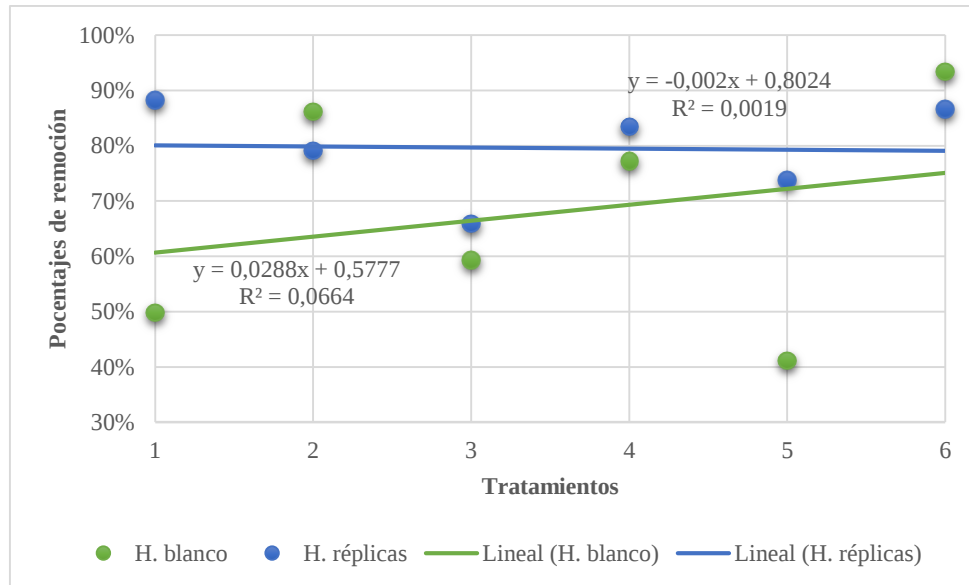


Figura 9. Gráfica de dispersión de los % de remoción, respecto a los tratamientos, teniendo en cuenta el tipo de humedal, por Rodríguez & Vargas, 2018.

Nota: Tto 1 (TRH 2 d, DBO 170 mg/l); Tto 2 (TRH 5 d, DBO 170 mg/l); Tto 3 (TRH 8 d, DBO 170 mg/l); Tto 4 (TRH 2 d, DBO 340 mg/l); Tto 5 (TRH 5 d; DBO 340 mg/l); Tto 6 (TRH 8 d, DBO 340 mg/l). Recuperado de software IBM SPSS statistics

Lo expuesto en esta gráfica, permite corroborar la dispersión de los datos, tanto del humedal blanco, como de las réplicas, demostrando ilustrativamente que el humedal blanco de manera clara, presentó una dispersión mayor respecto a los humedales réplica, como se definió en el análisis del capítulo 7.1.7.1.1 con la desviación estándar. Las razones que influyen en el grado de dispersión de los datos son consecuencia, inicialmente, de la diferencia de datos recolectados por tipo de humedal, pues como se mencionó anteriormente, detrás de cada punto verde expuesto en la gráfica (humedal blanco), hay 6 datos promediados, y, para cada punto azul (humedales réplicas) hay promediados 18 datos en este valor, además, como se mencionó anteriormente, el humedal blanco está más expuesto a los cambios térmicos por no presentar una capa vegetal en la superficie.

Por otra parte, el resultado de R^2 proporcionó un dato muy bajo tanto para los humedales réplicas, como para el humedal blanco, consecuente con la dispersión de los datos respecto a línea recta, lo que significa que, de manera clara la línea recta sólo permite evidenciar la variabilidad de los datos, mas no refleja el comportamiento de los resultados como una tendencia lineal (Martínez, 2005).

7.2 Efectividad de los humedales artificiales implementados con la especie *H. psittacorum*.

A continuación, en la tabla 12 se observa la efectividad de los humedales artificiales y se comparan los porcentajes de remoción de los tres parámetros evaluados, con los antecedentes de la especie *Heliconia psittacorum*, además se calcula la media tanto de los antecedentes como la de los valores de esta investigación y por último la media general, para determinar la eficiencia de los humedales.

Tabla 17. Relación de los porcentajes de remoción para los parámetros DBO, DQO y SST, con los antecedentes.

	Referencias	% DBO	% DQO	% SST
Antecedentes	(Montoya, Ceballos, Casas, & Morató, 2010)	98,29	93,99	-
	(Peña, Madera, Sánchez, & Medina, 2013)	68,33	68,5	84
	(Aragón, Parra, & Peña, 2015)	31	89	-
	(Carvajal, Ortiz, & Vega, 2017)	94,6	94,1	63,3
	(Chinchilla, 2017)	71,23	48,23	84,61
	Media (antecedentes)	72,69	78,76	77,30
	Autoras	86,5	76,1	76,5

Nota.: Los antecedentes se escogieron luego de realizar una revisión en artículos y trabajos de grado, por Rodríguez & Vargas, 2018.

Cabe resaltar que estos antecedentes, tiene en común el tipo de humedal artificial de flujo subsuperficial a escala piloto y claramente que tiene sembrada la especie *Heliconia psittacorum*, sin embargo, para el caso de los referentes: Aragón et al., (2015), Carvajal et al., (2017), Chinchilla (2017) y Montoya J. et al, (2010) estos implementaron una y hasta dos especies aparte de la *H. psittacorum*. Teniendo en cuenta la cantidad de especie se evidencia que no es un factor influyente en los porcentajes de remoción para la DBO₅ porque por ejemplo Aragón Calderón, Parra Collazos, & Peña Torres (2015) y Chinchilla (2017), arrojaron datos muy por debajo de porcentaje obtenido en este estudios.

Se puede apreciar que el menor valor en cuanto a la DBO₅ y en general para los tres parametros lo obtuvo la investigación de Aragón et al., (2015) de acuerdo a las condiciones

que operaron los humedales, se puede interpretar que este valor se da porque la concentración de entrada de DBO_5 fue de 600 mg/l en un tiempo estimado de 5 días, entonces si comparamos dicho resultado con esta investigación que operó bajo una DBO_5 de 340 mg/l y bajo TRH: 2, 5 y 8 días y aún así el porcentaje de remoción no supera el 90%, de esta manera se puede deducir que la concentración que usaron es alta para los humedales por lo cual arrojó un porcentaje de remoción solo del 31%, quizás si se opera el sistema con un mayor tiempo de retención mejora el porcentaje.

Un antecedente relevante que se destaca es el de las autoras Carvajal et al., (2017) porque manejaron concentraciones iniciales de DBO_5 446 mg/l, y un TRH: 5 días y lograron un porcentaje de remoción de 94,6%, estos resultados permiten compararlos con esta investigación ya que presentan una DBO_5 relativamente similar, sin embargo, la remoción si varía en parte porque para el presente trabajo de grado se obtuvo una remoción de 86,5%, esta diferencia en los porcentajes puede obedecer a que en el antecedente operaron con un solo tiempo de retención mientras que esta investigación estableció tres. Por otra parte se resalta esta investigación porque se realizó en el municipio de Tauramena, Casanare, el cual hace parte de los 27 municipios que abarcan el piedemonte llanero, de esta manera se puede afirmar la pertinencia de la investigación.

En definitiva, se destaca la eficiencia de los humedales artificiales con la especie, pues como se aprecia en la tabla 12, la DBO_5 de este estudio muestra una diferencia en la media con respecto a los antecedentes del 13,81%, es decir que fue más eficiente, mientras que para los parámetros DQO y SST, ocurre lo contrario, ya que para la DQO los antecedentes arrojaron una eficiencia mayor en aproximadamente 2% y en los SST alrededor del 1%. Sin embargo, al realizar la media de los antecedentes para los tres parámetros, esta investigación obtuvo el mayor con un valor de 79,7% frente a los antecedentes que obtuvieron 76,2%. En general se evidencia que las diferencias de las eficiencias no son significativas, esto puede obedecer a factores como: los tiempos de retención utilizados, las dimensiones de los humedales, las concentraciones iniciales, la cantidad de parámetros evaluados y que los antecedentes analizados que presentaron porcentajes superiores se encuentran en la parte concéntrica del país.

7.3 Recomendaciones técnicas para el uso de humedales artificiales con la especie *Heliconia psittacorum*

7.3.1 Características del piedemonte llanero.

El tratamiento de agua residual doméstica mediante humedales artificiales implementados con la especie *Heliconia psittacorum*, al haber sido desarrollado en un municipio perteneciente al piedemonte llanero, como lo es Villavicencio, es posible replicar el uso de estos sistemas en diferentes municipios pertenecientes a esta misma subregión, para la remediación de sus aguas contaminadas por el sector doméstico, teniendo en cuenta principalmente que estos municipios presentan características climatológicas (Ver apéndice 14) e hidrológicas similares, igualmente en su vegetación, particularidades de interés para la puesta en marcha de humedales artificiales.

Inicialmente, es importante resaltar las condiciones climatológicas para Villavicencio, en las cuales fue desarrollado el proyecto, pues son datos que permiten relacionar el entorno exterior, en el desarrollo de los humedales artificiales, y además facilita la comparación para con los demás municipios del piedemonte llanero, por lo tanto, en la tabla 13 se expone los datos de temperatura y precipitación desde julio a diciembre.

Tabla 18. *Datos de temperatura y precipitación en el tiempo de la investigación*

Fase plantación y adaptación de la especie <i>H. psittacorum</i>		
Mes	Temperatura (°C)	Precipitación (mm)
Julio	24,9	476,77
Agosto	26	508,26
Septiembre	26,7	231,39
Fase experimental		
Mes	Temperatura (°C)	Precipitación (mm)
Octubre	27,1	432,03
Noviembre	27,2	190,98
Diciembre	27,7	51,05

Nota: Información adaptada por Vanguardia, 2019, por Rodríguez & Vargas, 2019.

Esta información expone las variaciones de precipitación que caracterizó el desarrollo de la presente investigación, y además el aumento de temperatura para los últimos tres tratamientos. Asimismo, la estación ubicada en el aeropuerto Vanguardia, proporcionó un valor de precipitación media anual para el año 2018 de 3490,12 mm y una temperatura de 26,62 °C, lo que cataloga a la ciudad, según la clasificación Caldas-Lang, bajo un clima cálido húmedo (CH); cálido por situarse a una altura sobre el nivel del mar de 0-1000 msnm y tener una

temperatura $>24^{\circ}\text{C}$, y húmedo por tener una relación precipitación/temperatura de 100-160 (Boada, 2011).

Los datos expuestos en el apéndice 14 , permiten definir que estos municipios presentan características climáticas similares a las definidas para el desarrollo del tratamiento, clasificando a la mayoría de ellos también en el tipo de clima CH según Caldas-Lang, exceptuando 7 municipios: Barranca de Upía, Cubarral, El calvario, Guamal, Restrepo, Arauquita y San Carlos de Guaroa. Siendo los municipios de Cubarral, El calvario y Restrepo de tipo de clima templado semi húmedo (TSh), Guamal cálido super húmedo (CSH) y Barranca de Upía, San Carlos de Guaroa, y Arauquita calido semi húmedo (CSh).

En cuanto a la vegetación, los municipios del piedemonte llanero, corresponden al Bosque Húmedo Tropical según la clasificación Holdrige, bosque que ha sido extinguido para fines productivos y agropecuarios, y actualmente posee gramíneas mezcladas con arbustos y árboles, condiciones favorables para implementar humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas (Jamijoy, Menjivar, & Rubiano, 2015), pues al haber sido destruidos los bosques, facilita el espacio para los humedales, además este sistema actúa como hábitat para diferentes especies que se vieron afectados de manera negativa con la tala del bosque nativo, y la relación de la biota con el humedal, aumenta la similitud hacia los humedales naturales y en efecto, potencializan el proceso depurativo.

7.3.2 Recomendaciones técnicas para el piedemonte llanero.

Con base en la puesta en marcha de la presente prueba piloto, y teniendo en cuenta que está sujeta a nuevos estudios donde se verifique el comportamiento de estas y otras importantes variables que influyen en el uso de los humedales artificiales, es posible sugerir factores controlados como lo son rango para el Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) y rango para la concentración inicial de DBO, en la remediación de aguas residuales domésticas que presenten una contaminación media y medianamente alta en zonas rurales de municipios ubicados en el piedemonte llanero.

Los resultados indican que para las concentraciones usadas en el experimento se observó un tiempo de retención más apropiado para cada una, de esta forma, para una concentración inicial de 170 mg/l el tiempo de retención más efectivo fue 2 días (88,33%), y para la concentración máxima de 340 mg/l, el tiempo en el cual se obtuvo los mejores resultados fue en 8 días (86,67)% (humedales réplica), esto soportado de forma estadística y teóricamente, resaltando

que a pesar que en otros días de retención también se obtuvieron resultados satisfactorios, estos tiempos en promedio disminuyen considerablemente los valores en los tres parámetros DBO, DQO y SST.

Es importante mencionar que el TRH tiene una relación estrecha con la concentración de DBO, pues esta variable define el tiempo apropiado para que el agua residual entre en contacto con el sustrato y se lleve a cabo los diferentes procesos, en especial el físico, teoría que es apoyada por estudios realizados en Environmental Protection Agency, que comprueban la relación del TRH con la capacidad en remoción de los humedales (Rincón & Millán, 2013), por lo cual, es apropiado apoyar los resultados obtenidos, y recomendar un TRH distinto para cada concentración.

Cabe destacar el comportamiento de los dos días de retención tanto para la concentración de 170 mg/l, como para la concentración de 340 mg/l, obteniendo unos resultados de remoción de 88,33% y 83,67% respectivamente, lo que indica que dos días son suficientes para eliminar gran parte de la materia orgánica presente en el líquido, sin embargo, a pesar que dos días son aptos, los resultados permitieron observar un mejor comportamiento de 8 días en 340 mg/l DBO, con un grado de confiabilidad alto, lo que facilitó tomar la decisión de escoger 8 días para esta concentración, apoyado incluso por la remoción obtenida en el blanco, pues el tratamiento 6 (TRH 8 d: 340 mg/l DBO) obtuvo una remoción del 93,67%.

Por consiguiente, obteniendo un promedio de remociones para los parámetros DBO, DQO y SST mayor al 80%, permite deducir que con la relación de área (1:0,65), cantidad de especies vegetales (6/m²), tiempos de retención escogidos y demás características de los humedales, este sistema a escala piloto puede remediar aguas con contaminación media y medianamente alta (Cisterna & Peña, 2012), y partiendo de allí, la máxima carga de concentración orgánica inicial recomendada es de 340 mg/l de DBO.

De esta manera, teniendo en cuenta que la estimación de carga orgánica generada por aguas residuales domésticas oscila entre 25 y 80 g DBO/hab*día (para un caudal de 150 aprox/hab*día) (RAS , 2017), se lleva a cabo una relación para la utilización de este sistema en diferentes comunidades en el piedemonte llanero, como se demuestra en la tabla 14.

Tabla 19. *Área superficial necesaria para diferentes núcleos*

Usuario	Carga orgánica inicial (g DBO/día)	Área superficial requerida (m ²)
Escala piloto	7	0,46

Tabla 20. (Continuación)

1 habitante	50	3,28
1 vivienda unifamiliar	200	13,12
1 condominio	4000	262
1 vereda	8000	525,71

Nota: De acuerdo al RAS, en una vivienda habita aproximadamente 4 personas, un condominio es de 20 viviendas en promedio y vereda de 40 viviendas, adaptado de (RAS Título J, 2010), por Rodríguez & Vargas, 2018.

La tabla anterior expone además, que a pesar que a escala piloto se removió carga orgánica considerable, el caudal era de 20 L/día en su nivel máximo, y de acuerdo al RAS, la generación de agua residual doméstica oscila entre 150 y 200 L/día, para lo cual se hace necesario tener en cuenta bajo referencias, la carga contaminante en función del caudal generado, en este caso para un promedio de 175 L/día, se generan cerca de 50 g DBO/hab*día, lo que permitió replantear las nuevas dimensiones teniendo en cuenta tanto carga orgánica inicial, como caudal, para el tratamiento de aguas residuales generadas per cápita.

Los datos para una vivienda unifamiliar, un condominio y una vereda, se hicieron teniendo en cuenta la estimación del RAS de la cantidad de personas y viviendas que conforman a cada uno, si se parte que para 1 habitante es necesario un área superficial de 3,28 m², para una vivienda que está conformada por 4 personas en promedio, es necesario 13,12 m² (4 habitantes*3,28 m²), y así sucesivamente es el cálculo para un condominio y para una vereda.

No obstante, para las áreas definidas anteriormente, se debe elegir una profundidad máxima de 60 cm, pues con profundidades mayores a este valor, las raíces más profundas de los rizomas empiezan a debilitarse (RAS , 2017). Por otra parte, se sugiere mantener la relación de distribución del sustrato en el humedal, el cual ocupa cerca del 75% de su área, dejando el restante como borde libre en caso de obstrucción que impida la circulación del líquido. Y por último seguir usando la especie *H. psittacorum*, pues es una especie apta para todo el territorio llanero, por ser una especie dominante en este sector de la región Orinoquia, y su preferencia por este tipo de clima, suelo y demás condiciones (Jerez, 2007).

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos en el desarrollo experimental realizado en humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal a escala piloto, cuya especie vegetal sembrada fue la especie *Heliconia psittacorum*, se demuestra el potencial remediativo que posee los humedales artificiales como sistema de tratamiento en ARD, teniendo porcentajes de remoción desde 66,33% hasta 88,33% en promedio para los tres indicadores de contaminación DBO, DQO y SST, esto, teniendo en cuenta los tres tiempos de retención hidráulica propuestos, los cuales fueron 2, 5 y 8 días, y manipulando experimentalmente la entrada de DBO en dos concentraciones 170 y 340 mg/l (tratamientos).

Se señala que los humedales artificiales con la especie *H. psittacorum*, tuvieron una alta potencialidad para disminuir la contaminación en ARD, debido a que la media de remoción en los tres parámetros, obtenida de los 6 tratamientos utilizados es del 80%, valor que se encuentra dentro de la media de efectividad de los humedales artificiales, la cual oscila desde el 75 hasta el 95% (Morales et al., 2013); además, para la DBO se removió un porcentaje de 86,5% , para la DQO de 76,16 y SST de 76,5%, datos que igualmente reflejan un buen desempeño remediativo por parte de los humedales artificiales pues cada índice contaminante fue removido con un valor mayor al 76%, siendo de forma evidente más eficaz para la DBO, pues como lo especifican Hoffman & Platzer (2011), el tipo de humedal utilizado en la presente investigación, remueve con más efectividad la DBO, que otras variables como DQO y SST.

Entre los resultados más relevantes, se encontró que para la entrada de DBO de 170 mg/l, el tiempo de retención hidráulico con mejor desempeño, fue de 2 días (88,33%), y para la entrada de DBO de 340 mg/l fue de 8 días (86,67%), teniendo en cuenta las tres variables respuesta. Esto se evaluó, considerando tanto los resultados de los humedales réplicas, como del humedal blanco, puesto que el humedal testigo también presentó remociones imponentes, donde para el tratamiento 6 (TRH 8 d: 340 mg/l) obtuvo una efectividad del 93,67%, y para el tratamiento 2 (TRH 5 d: 170 mg/l) un valor de 86,33%.

Es pertinente mencionar, que los resultados obtenidos en campo, fueron expuestos a un tratamiento estadístico, el cual permitió concluir inicialmente cuales fueron los resultados más efectivos por tratamiento, además, que el humedal blanco presentó mayor variación en sus resultados respecto a los humedales réplicas, teniendo como causa la diferencia de datos

analizados (3 réplicas vs 1 blanco), y los cambios climatológicos que pueden incidir más sobre el humedal blanco, que en los humedales réplicas, por la interacción vegetación-sustrato, que en el humedal testigo no se presenta. Sumado a esto, con ayuda del análisis mediante la esfericidad de Mauchly, y la prueba de efectos intra sujetos con el software IBM SPSS, se aprobó la hipótesis alternativa 3, la cual indica, que la interacción DBO-TRH incide ciertamente en el comportamiento de los humedales artificiales.

Basado en los antecedentes por parte de la especie *Heliconia psittacorum*, se puede apreciar, según la media que, para la DBO5 se obtuvo un porcentaje de remoción del 86,5%, comparado con la media de los antecedentes, los cuales arrojaron un valor de 72,69%, de esta manera se afirma que la presente investigación es más eficiente en un 13% aproximadamente. También se realizó la media de todos los resultados de los antecedentes, es decir, se tuvieron en cuenta los tres parámetros (DBO5, DQO y SST), donde se obtuvo un porcentaje de 79,7% para esta investigación y un 76,2% para los antecedentes, de esta manera se puede evidenciar la mayor eficiencia de los humedales artificiales respecto a los antecedentes, lo que permite destacar la importancia de los humedales sembrados con la especie *Heliconia psittacorum* en el tratamiento de aguas residuales de tipo domésticas.

Adicionalmente, es importante resaltar que las condiciones operacionales del tratamiento, utilizadas en los humedales artificiales ubicados en el municipio de Villavicencio, se pueden replicar en 20 de los 27 municipios de los departamentos: Meta, Casanare y Arauca, que hacen parte del piedemonte llanero, los cuales presentaron una clasificación climática y vegetativa similar, a la incidente en la presente investigación, es decir, 20 municipios tienen tipología climática CH (cálido húmedo) según la teoría de Caldas-Lang.

Finalmente, con ayuda de datos obtenidos por el RAS, se pudo determinar las áreas superficiales requeridas para el tratamiento de ARD generadas por un habitante, una vivienda, un condominio y una vereda, respecto a las dimensiones utilizadas en la presente prueba piloto, por lo cual se determinó que por habitante es necesario 3,28 m², para una vivienda 13,12 m², para un condominio o barrio de 20 casas 262 m² y para una vereda 525,71 m². De igual manera, se recomienda que para estas dimensiones, se utilice el 75% de área para el sustrato, y dejar el resto para el borde libre en caso de que se obstruya el paso del líquido; además, para la operación del tratamiento, se sugiere que se utilice 2 días de retención para concentraciones esperadas de 170 mg/l y 8 días de retención para concentraciones máximas de 340 mg/l.

Recomendaciones

Como recomendaciones metodológicas del estudio experimental, se puede definir que los humedales artificiales son una técnica eficiente en el tratamiento de aguas residuales, sin embargo, son sistemas complejos, en los cuales intervienen diferentes variables en sus procesos físicos, químicos y biológicos, lo que significa, que se debería tener amplio conocimiento en cada una de estas variables para poder obtener la mejor eficiencia del tratamiento (Gallego, Agudelo, & Peñuela, 2016). De esta manera, en primer lugar, se recomienda replicar este tipo de experimento, en donde se manipule las mismas variables del presente proyecto para poder confirmar las conclusiones generadas por el mismo, incluso escogiendo otro tipo de vegetación con potencial Fito remediador, para poder determinar el grado de influencia, en este caso, de la especie *H. psittacorum* en los resultados obtenidos, respecto a otro tipo de vegetación.

Además de manipular las variables del presente proyecto, también se recomienda manipular variables como cantidad y tipo de vegetación, tipo de sustrato a utilizar, y de otros parámetros como DQO y SST, que son igual de importantes que la DBO. No obstante, también es indispensable para continuar desarrollando ésta técnica en el tratamiento de aguas residuales domésticas, y lograr que sea eficaz en la remoción de contaminantes, llevarlo a escala real con las características similares definidas en los pilotos, y aparte también utilizar agua residual doméstica real con niveles de contaminación afines a las utilizadas en el presente experimento.

En cuanto al análisis de las muestras, de acuerdo a lo experimentado por el presente proyecto, para aguas residuales domésticas artificiales, es decir preparadas de forma sintética a nivel laboratorio, es recomendable utilizar el método Oxitop para DBO, pues el método Winkler, por su técnica de dilución, genera datos erróneos para este parámetro.

Igualmente, es relevante tener en cuenta el desarrollo de la especie vegetal en la estimación del tiempo de puesta en marcha del sistema de tratamiento, pues después del trasplante de rizomas, se debe esperar cerca de dos meses para la adaptación de la misma, como lo fue necesario en el presente caso de investigación, teniendo presente que los tiempos de fertilización son a la semana 1 y semana 8 en el tiempo de adaptación de la especie (ICA, 2012).

En cuanto a las recomendaciones técnicas para el diseño y operación de los humedales artificiales, es importante mencionar que la superficie del humedal debe mantenerse plana para evitar erosión y con un borde libre adicional por si se llega a presentar acumulación de agua, sin embargo, para el fondo del humedal, éste debe tener una pendiente de 0,5 a 1% de la entrada a la salida, para mejorar el drenaje del ARD.

Asimismo, se sugiere utilizar un pre tratamiento, y dejar los humedales artificiales como tratamiento secundario, de esta forma, se incrementará el porcentaje de remoción de sólidos suspendidos totales, y en caso de llevarlo a escala real, este tratamiento primario eliminaría sólidos que pueden obstruir el humedal, teniendo en cuenta que en la fase de pre tratamiento se eliminan cerca del 60% de sólidos, además se está evitando una acumulación de sólidos suspendidos o colmatación de lodos. En caso de no poder instalar un tratamiento primario robusto, se puede instalar rejillas que atrapen los sólidos más grandes, y en la entrada del humedal artificial diseñar un “dique” con piedras grandes, a cierta distancia de la entrada del lecho, este dique retendrá sólidos y permitirá la distribución de manera uniforme sobre toda la profundidad y ancho del humedal (Hoffman & Platzer, 2011).

Es importante tener en cuenta, que para llevar a cabo esta técnica de tratamiento de aguas residuales a escala real ya sea para una vivienda unifamiliar o para pequeños cascos urbanos, se debe preparar tanto en teoría como en práctica a las personas que se vayan a hacer cargo de la construcción y del mantenimiento de los humedales artificiales, pues aunque parezca un sistema sencillo y de fácil adecuación, una falla en el diseño o edificación del mismo, disminuye la capacidad de depuración en el tratamiento.

No obstante, tanto para el desarrollo de este tipo de investigaciones, ya sea a escala piloto como en el presente caso, como para escala real en algún tipo de población, se recomienda utilizar los medios de seguridad adecuados para entrar en contacto con este sistema, el uso de guantes, tapabocas, bata u overol de protección, casco de seguridad en caso de estar frente a diferencias de alturas considerables, botas de seguridad, y demás implementos útiles para evitar alguna afectación negativa en la salud, teniendo en cuenta que se está manipulando aguas residuales contaminadas.

Bibliografía

- Alcaldía de Villavicencio, M. (6 de octubre de 2016). *Plan de desarrollo 2016-2019 "Unidos podemos"*. Obtenido de Plan de desarrollo 2016-2019 "Unidos podemos": <http://www.villavicencio.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Presentacion.aspx>
- Aragón, R., Parra, A., & Peña, M. (2015). Evaluación preliminar del funcionamiento de un sistema prototipo de humedales artificiales empleando *heliconia psittacorum* y *cyperus papyrus* para el tratamiento de aguas residuales. *Agroecología: Ciencia y tecnología*, 3(1), 7-12. Obtenido de <http://revistas.sena.edu.co/index.php/agroeccyt/article/view/932/1021>
- Arriols, E. (6 de Agosto de 2018). *Qué son las aguas residuales y cómo se clasifican*. Obtenido de <https://www.ecologiaverde.com/que-son-las-aguas-residuales-y-como-se-clasifican-1436.html>
- Boada, P. (2011). Caracterización climatológica de la cuenca alta del río Bogotá. *Tesis de grado. Universidad de la Salle. Bogotá, Colombia*. Obtenido de repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/13969/T41.11%20B63c.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Bocado, J. R. (Octubre de 2010). Influencia del tipo y granulometría del sustrato en la depuración de las aguas residuales por el sistema de Humedales Artificiales. *Tesis de postgrado. Universidad de Cádiz. Cádiz, España*. Obtenido de Tesis de postgrado. Universidad: <https://rodin.uca.es/xmlui/handle/10498/15878>
- Caballero, J., & Osorio, R. (2016). Tratamiento de aguas residuales usando *Rhizophora Mangle* para la remoción de nutrientes y materia orgánica en un humedal artificial de flujo vertical. *Tesis de pregrado. Universidad de Cartagena. Cartagena de Indias, Colombia*. Obtenido de <http://repositorio.unicartagena.edu.co:8080/jspui/bitstream/11227/3723/1/Tesis%20Humedal.pdf>
- Carvajal, A., Zapattini, C., & Quintero, C. (2018). Humedales Artificiales, una alternativa para la depuración de Aguas Residuales en el Municipio de Mizque, Bolivia. *Diseño y tecnología para el desarrollo*, 1(5), 99-108. Obtenido de <http://polired.upm.es/index.php/distecd/article/view/3744>
- Carvajal, C., Ortiz, P., & Vega, A. (2017). Propuesta de tratamiento de aguas residuales domésticas, implementando un humedal artificial de flujo subsuperficial empleando bambusa so en la finca el recreo ubicada en Tauramena, Casanare. *Revista de tecnología*, 16(1), 65-76. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6546150>
- Castrillón, O., Bedoya, O., & Montoya, D. (2006). Efecto del pH sobre el crecimiento de microorganismos durante la etapa de maduración en pilas estáticas de compost. *Producción + limpia*, 1(2), 87-98. Obtenido de

http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/512/1/pl_v1n2_87-98_compost.pdf

- Chinchilla, L. L. (10 de Enero de 2017). Diseño y evaluación de un sistema piloto a partir de plantas hiperacumuladoras para la depuración de los lixiviados generados en el parque tecnologico ambiental “las bateas” del municipio de Aguachica, Cesar. *Tesis de pregrado. Universidad Francisco de Paula Santander*. Ocaña, Colombia. Obtenido de <http://repositorio.ufpso.edu.co:8080/dspaceufpso/bitstream/123456789/1528/1/30031.pdf>
- Cisterna, P., & Peña, D. (2012). *Determinación de la relación DQO/DBO5*. México.
- DANE. (2005). *Proyección municipios 2005 - 2020*. Bogotá: Gobierno de Colombia.
- DANE. (6 de noviembre de 2018). *Resultados preliminares censo nacional de población y vivienda 2018*. Obtenido de Información para todos : <https://www.dane.gov.co/files/censo2018/informacion-tecnica/cnpv-2018-presentacion-2da-entrega.pdf>
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Barcelona: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA).
- Fundación horizonte verde. (20 de Noviembre de 2012). *El agua en la Orinoquía*. Obtenido de Agua: <http://www.horizonteverde.org.co/attachments/article/19/EL%20AGUA%20EN%20LA%20ORINOQUIAECOFONDO.pdf>
- Gallego, M., Agudelo, R., & Peñuela, G. (2016). Optimización del tratamiento de aguas residuales de cultivos de flores usando humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal. *Facultad Nacional de Salud Pública*, 34(1), 20-29. Obtenido de <https://aprendeenlinea.udea.edu.co/revistas/index.php/fnsp/article/view/20108/20779286>
- García, D., & Leal, D. (2006). Desarrollo de un humedal artificial piloto con especies no convencionales para mitigar la contaminación generada por el vertimiento de aguas residuales provenientes del centro de visitantes del parque nacional natural Amacayacu – Amazonas. *Trabajo de pregrado. Universidad de la salle*. Bogotá, Colombia. Obtenido de <http://repository.lasalle.edu.co/handle/10185/14844>
- Gobernacion de Casanare. (2010). *Plan vial departamental*. Yopal. Obtenido de <https://www.casanare.gov.co/?idcategoria=14383#>
- Granados, M. (2018). Estudio de factibilidad de la implementación de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en ecosistema de alta montaña en Toquilla. *Trabajo de postgrado. Universidad Libre*. Bogotá, Colombia. Obtenido de <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/11576/Proyecto%2C%20art%2C%20ADculo%20y%20plantilla%20congreso.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- GuiaSPSS. (2013). *ANOVA medidas repetidas*. Obtenido de <http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jmmarin/esp/GuiaSPSS/16anovar.pdf>

- Gutierrez, H., & De la Vara, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. México D.F: McGraw-hill/interamericana editores, s.a.
- Hidalgo, M., & Mejía, E. (2010). Diagnóstico de la contaminación por aguas residuales domésticas, cuenca bajo de la quebrada La Macana, San Antonio de Prado municipio de Medellín. *Tesis de postgrado. Universidad de Antioquia*. Medellín, Colombia. Obtenido de <http://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/1304/1/DiagnosticoContaminacionAguasResidualesDomesticas.pdf>
- Hoffman, H., & Platzer, C. (2011). *Technology Review of Constructed Wetlands Subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment*. Echborn: Elisabeth Von Muench.
- Huertas, R., & Marcos, C. (2013). *Guía práctica para la depuración de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. España: Confederación Hidrográfica del Duero.
- ICA. (2012). *El cultivo de heliconias; Manejo para la temporada invernal*. Bogotá: Produmedios.
- IDEAM. (2015). *Informe del estado del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables 2012, 2013 y 2014*. Obtenido de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023237/IEARN_tercera_parte_calidad_recursos_2014.pdf
- IDEAM. (2018). *Consulta y descarga de datos hidrometeorológicos*. Obtenido de <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- Jamijoy, D., Menjivar, J., & Rubiano, Y. (2015). Indicadores químicos de calidad de suelos en sistemas productivos del Piedemonte de los Llanos Orientales de Colombia. *Acta agronómica*, 64(4), 302-307. Obtenido de https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/38731
- Jerez, E. (2007). Cultivo de las Heliconias. *Cultivos tropicales*, 28(1), 29-35. Obtenido de <http://www.redalyc.org/pdf/1932/193215858005.pdf>
- Kenbi. (2018). *Kenbipedia*. Obtenido de El ecológico: http://www.kenbi.eu/kenbipedia_3.php
- Lahora, A. (2003). Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: La Edar de los Gallardos (Almería). *Ecología, manejo y conservación de los humedales*, 1(7), 99-112. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2244838>
- Lara, J. (Mayo de 1999). Depuración de aguas residuales institucionales municipales con humedales artificiales. *Tesis de postgrado. Universidad Politécnica de Cataluña*. Barcelona, España. Obtenido de <https://www.ecohabitar.org/wp-content/uploads/2015/09/humedales-artificiales.pdf>
- Larriba, J., & González, O. (2017). Cinética de remoción de DBO en humedales con flujo subsuperficial horizontal. *Ingeniería hidráulica y ambiental*, 38(1), 17-30. Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382017000100002

- Londoño, L., & Marín, C. (2009). Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial alimentados con agua sintética. *Tesis de tecnólogo químico. Universidad tecnológica de Pereira*. Pereira, Risaralda, Colombia. Obtenido de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/1817/628162L847.pdf?sequence=1>
- López, G. (10 de marzo de 2013). *Disoluciones y sustancias solubles*. Obtenido de <http://garazi97.blogspot.com/p/disoluciones-y-sustancias-soluble.html>
- Martín, G. (2010). *Estructura y composición del pastizal natural*. Tucumán: Universidad Nacional de Tucumán.
- Martín, I., Betancourt, J., Salas, J., Peñate, B., Pidre, J., & Nieves, S. (2006). *Guía sobre tratamiento de aguas residuales urbanas, para pequeños núcleos de población*. Canarias: Daute diseño, S.L.
- Martínez, H. (2005). Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal. *Anuario Jurídico y Económico Escurialense*, 1(38), 317-331. Obtenido de <https://libros-revistas-derecho.vlex.es/vid/errores-frecuentes-coeficiente-lineal-57260433>
- Medina, A. (2018). *Proyecto Chema Tierra*. Obtenido de <https://www.chematierra.mx/la-tierra/curiosidades/10-datos-alarmantes-sobre-el-agua/>
- Mena, J., Rodríguez, L., Núñez, J., & Villaseñor, J. (2009). *Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: Ventajas de los sistemas híbridos*. Ciudad Real. Obtenido de http://www.conama9.conama.org/conama9/download/files/CTs/2643_JMena.pdf
- Ministerio de Vivienda. (2017). *Colombia supera la meta en el tratamiento de aguas residuales en el país*. Obtenido de <http://www.minvivienda.gov.co/sala-de-prensa/noticias/2017/diciembre/colombia-supera-la-meta-en-el-tratamiento-de-aguas-residuales-en-el-pais>
- Montoya, J., Ceballos, L., Casas, J., & Morató, J. (diciembre de 2010). Estudio comparativo de la remoción de materia orgánica en humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial usando tres especies de macrófitas. *Revista EIA*(14), 75-84. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/eia/n14/n14a07.pdf>
- Morales, G., López, D., Vera, I., & Vidal, G. (2013). Humedales construidos con plantas ornamentales para el tratamiento de materia orgánica y nutrientes contenidos en aguas servidas. *Theoria*, 22(1), 33-46. Obtenido de <http://www.redalyc.org/pdf/299/29936198004.pdf>
- Oliver, N. (Julio de 2017). Estudio de los humedales artificiales de flujo superficial del Tancat de la Pipa como instrumentos para la restauración ambiental del lago de l'Albufera de València. *Tesis doctoral*. Valencia, España. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/90400/OLIVER%20-%20Estudio%20de%20los%20Humedales%20Artificiales%20de%20Flujo%20Superficial%20del%20Tancat%20de%20la%20Pipa%20como%20in....pdf?sequence=1>

- Palta, G., & Morales, S. (diciembre de 2013). Fitodepuración de aguas residuales domésticas con Poaceas: *Brachiaria mutica*, *Pennisetum purpureum* y *Panicum maximun* en el municipio de Popayán, Cauca. *Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustria*, 11(2), 57-65. Obtenido de <http://revistabiotecnologia.unicauca.edu.co/revista/index.php/biotecnologia/article/view/298>
- Peña Salamanca, E., Madera Parra, C., Sánchez, J., & Medina Vásquez, J. (diciembre de 2013). Bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediación: caso *Heliconia psittacorum* (heliconiaceae). *Revista de la academia Colombiana de ciencias exactas, físicas y naturales*, 37(145), 469-481. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/racefn/v37n145/v37n145a04.pdf>
- Pérez, G., Enciso, S., Del prado, M., & Castañón, J. (2017). Diseño hidráulico de un humedal artificial a nivel laboratorio. *Estudio de posgrado. Instituto tecnológico de Tuxtla Gutiérrez*. México. Obtenido de https://www.academia.edu/4139814/DISE%C3%91O_HIDR%C3%81ULICO_DE_UN_HUMEDAL_ARTIFICIAL_A_NIVEL_LABORATORIO
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2016). *Objetivos del Desarrollo Sostenible*. Obtenido de <http://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>
- Quintero, J. (mayo de 2014). Evaluación de humedales artificiales pilotos de flujo horizontal y tipo superficial y subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales. *Ingenium*, 15(29), 85-112.
- Ramírez, Y., & Rodríguez, D. (2016). Formulación de una propuesta de rediseño de un humedal artificial de flujo subsuperficial para el mejoramiento del saneamiento básico ambiental del sector el Porvenir, vereda los Soches, Usme. *Tesis de pregrado. Universidad de la Salle*. Bogotá, Colombia. Obtenido de http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/18697/41101021_2016.pdf?sequence=1
- Rangel, O. (2015). *Flora Orinoquense*. Bogotá: Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de http://bdigital.unal.edu.co/7325/1/FLORA_ORINOQUENSE.pdf
- RAS. (2017). Obtenido de <http://www.minvivienda.gov.co/ResolucionesAgua/0330%20-%202017.pdf>
- RAS Título J. (2010). Obtenido de http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/100811_titulo_j_ras%20_.pdf
- Remtavares. (16 de mayo de 2013). *Humedales artificiales como sistemas naturales de depuración de aguas residuales. Conceptos e historia*. Obtenido de <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2013/05/16/131891>
- Resolución 631. (17 de Marzo de 2015). *Establece los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y*

- a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.* Obtenido de <https://www.rds.org.co/es/recursos/resolucion-631-de-2015-parametros-vertimientos>
- Rey Ríos, D. E. (20 de Abril de 2017). Inventario de los sistemas de tratamiento de aguas residuales de los municipios del Meta. *Tesis postgrado. Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito*. Bogotá D.C., Colombia. Obtenido de <https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/001/593/2/Rey%20R%C3%ADos%2C%20Diana%20Elenith%20-%202017.pdf>
- Ribóo, D. (Noviembre de 2010). *Introducción al diseño experimental*. Obtenido de <https://luisdi.files.wordpress.com/2008/08/unidad-3.pdf>
- Rincón, J., & Millán, N. (2013). Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales de la Universidad Libre. *Tesis de pregrado. Universidad Libre*. Bogotá, Colombia. Obtenido de <https://repository.unilivre.edu.co/bitstream/handle/10901/9997/EVALUACION%20DE%20UN%20HUMEDAL%20HSS%20PARA%20LA%20U%20LIBRE..pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rodríguez, I., & Lozano, W. (septiembre de 2012). Preparación, composición y uso de agua residual sintética para alimentación de reactores prototipo y de laboratorio. *Revista de didáctica ambiental*(11), 10-16. Obtenido de <http://www.didacticaambiental.com/revista/numero11/completa.pdf>
- Santana, M., Bonilla, J., & Castillo, C. (2015). *Rango de consumo básico*. Bogotá: Ministerio de vivienda.
- Smart, F. (2017). *La conductividad eléctrica del agua*. Obtenido de Smart biblioteca: <https://www.smart-fertilizer.com/es/articles/electrical-conductivity>
- Suaza, A. (2016). Análisis del desempeño y operación de humedales construidos de flujo subsuperficial vertical para tratamiento de agua residual doméstica en países tropicales. *Tesis de pregrado. Universidad católica de Manizales*. Manizales, Caldas, Colombia. Obtenido de <http://repositorio.ucm.edu.co:8080/jspui/bitstream/handle/10839/1326/Alvaro%20David%20Moncada%20Suaza.pdf?sequence=1>
- Torres, E., & Marín Sanabria, A. (2012). Optimización del humedal artificial subsuperficial para tratamiento de aguas residuales. *Ingenio libre*, 29-38. Obtenido de <http://www.unilivre.edu.co/revistaingeniolibre/revista-11/art2.pdf>
- UNESCO. (2018). *Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua*. Italia. Obtenido de http://www.unesco.org/new/es/media-services/single-view/news/nature_based_solutions_for_water_world_water_day_2018/
- Vanguardia. (2019). *Tu tiempo*. Obtenido de Valores climáticos medios y totales anuales: <https://www.tutiempo.net/clima/2018/ws-802340.html>
- Villegas, M., & Vidal, E. (2009). Gestión de los procesos de descontaminación de aguas residuales domésticas de tipo rural en Colombia. 1983-2009. Medellín, Colombia. Obtenido de <http://tesis.udea.edu.co/bitstream/10495/55/1/GestionProcesosDescontaminacion.pdf>