



Universidad
Tecnológica
de Pereira

PULIMENTO DE MATERIA ORGÁNICA CON HUMEDALES FSS EN FRIGOVITO S.A.

**EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN HUMEDALES
ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL A ESCALA PILOTO COMO
TRATAMIENTO DE PULIMENTO EN LAS AGUAS RESIDUALES
DE FRIGOVITO S.A.**

**VICTOR ALFREDO ANDRADE CALVACHI
JAMES ARIEL ROSERO CARVAJAL**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL LOCAL
PEREIRA
2018**



Universidad
Tecnológica
de Pereira

PULIMENTO DE MATERIA ORGÁNICA CON HUMEDALES FSS EN FRIGOVITO S.A.

**EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN HUMEDALES
ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL A ESCALA PILOTO COMO
TRATAMIENTO DE PULIMENTO EN LAS AGUAS RESIDUALES
DE FRIGOVITO S.A.**

**VICTOR ALFREDO ANDRADE CALVACHI
JAMES ARIEL ROSERO CARVAJAL**

**Trabajo de grado para optar el título de
Especialista en Gestión Ambiental Local**

**ASESOR
Ing. M.Sc. Ph.D. JUAN MAURICIO CASTAÑO ROJAS**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL LOCAL
PEREIRA
2018**



Universidad
Tecnológica
de Pereira

PULIMENTO DE MATERIA ORGÁNICA CON HUMEDALES FSS EN FRIGOVITO S.A.

DEDICATORIA

A mis Padres, con mucho gusto y honor de participarle este triunfo, agradezco por su acostumbrado apoyo. En especial a mi Padre, que desde el inicio de esta etapa me apoyo, que satisfacción poder contar con su grata y ejemplar presencia. ¡Gracias!

VICTOR

*A mis Padres.
A mi Hijo.*

JAMES



Universidad
Tecnológica
de Pereira

PULIMENTO DE MATERIA ORGÁNICA CON HUMEDALES FSS EN FRIGOVITO S.A.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos agradecimientos a:

A la Universidad Tecnológica de Pereira por mantenernos las puertas abiertas para la culminación de esta etapa académica, especialmente a:

Doctor Juan Mauricio Castaño, Asesor y guía de la presente investigación.

Doctor Adalberto Arroyabe Gutiérrez, Jurado.

Doctora Marcela Uribe Lasta, Jurado.

Ana Milena Hincapié, por su constante e incansable colaboración y apoyo.

A la empresa FRIGOVITO S.A. quien tiene los créditos por permitirnos la realización de la presente investigación, especialmente a:

Doctor Carlos Serrano Wagner.

Todo el personal operativo que ayudo a la ejecución de la investigación.

Y a todas las demás personas que de una u otra forma contribuyeron en la realización de este proyecto.

¡Gracias!



TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	11
INTRODUCCION	15
1 CAPITULO 1	16
DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	16
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	16
1.1.1 Formulación del problema	16
1.2 JUSTIFICACIÓN	18
1.3 OBJETIVOS	20
1.3.1 Objetivo general	20
1.3.2 Objetivos específicos	20
1.4 MARCO REFERENCIAL	21
1.4.1 Marco contextual	21
1.4.2 Marco de antecedentes – estado del arte	21
1.4.3 Marco teórico	24
2 CAPITULO 2	29
DISEÑO A ESCALA PILOTO DE TRES HUMEDALES ARTIFICIALES CONSIDERANDO LAS CARACTERÍSTICAS DEL EFLUENTE DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE FRIGOVITO S.A.	29
2.1 METODOLOGÍA	29
2.1.1 Metodología de construcción y cálculo	29
2.2 RESULTADOS	33
2.2.1 Ubicación y medidas de tanques	33
2.2.2 Calculo hidráulico	34
2.2.3 Ancho de la lámina de agua	35
2.2.4 Área útil superficial	35
2.2.5 Calculo de caudal de diseño	35
2.2.6 Calculo de capacidad de los tanques de almacenamiento y distribución	36
2.3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	36
3 CAPITULO 3	38
IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA PILOTO CON LAS ESPECIES SELECCIONADAS CARRIZO, PAPIRO Y TOTORA	38
3.1 METODOLOGÍA Y RESULTADOS	38
3.1.1 Metodología y ejecución para el desarrollo de los tres humedales artificiales	38



Universidad
Tecnológica
de Pereira

PULIMENTO DE MATERIA ORGÁNICA CON HUMEDALES FSS EN FRIGOVITO S.A.

3.2	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	44
4	CAPITULO 4.....	46
	EVALUACION DE LA REMOCIÓN EN CARGAS CONTAMINANTES MEDIDAS EN PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DE DBO ₅ Y DQO EN LOS TRES HUMEDALES ARTIFICIALES, CON EL PROPÓSITO DE DETERMINAR LA EFICIENCIA CON CADA ESPECIE VEGETAL	46
4.1	METODOLOGÍA	46
4.1.1	Análisis estadístico de los parámetros DBO ₅ y DQO en cada uno de los humedales artificiales.....	46
4.2	RESULTADOS.	46
4.3	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	49
5	CAPITULO 5.....	56
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	56
6.1	CONCLUSIONES.....	56
6.2	RECOMENDACIONES.....	58
7	REFERENCIAS.....	59



Universidad
Tecnológica
de Pereira

PULIMENTO DE MATERIA ORGÁNICA CON HUMEDALES FSS EN FRIGOVITO S.A.

LISTA DE CUADROS

<i>CUADRO 1. VALORES DE CONCENTRACIÓN DBO Y DQO DE CADA HUMEDAL</i>	<i>48</i>
<i>CUADRO 2. VALORES DE CARGA CONTAMINANTE DE DBO Y DQO DE CADA HUMEDAL.....</i>	<i>48</i>
<i>CUADRO 3. VALORES ESTADÍSTICOS Y PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE DBO Y DQO DE CADA HUMEDAL</i>	<i>49</i>



Universidad
Tecnológica
de Pereira

PULIMENTO DE MATERIA ORGÁNICA CON HUMEDALES FSS EN FRIGOVITO S.A.

LISTA DE TABLAS

<i>TABLA 1. ESTADO DEL ARTE.....</i>	<i>22</i>
<i>TABLA 2. PROCESOS GENERALES DE DEPURACIÓN EN LOS HUMEDALES ARTIFICIALES.....</i>	<i>25</i>
<i>TABLA 3. PORCENTAJES DE AGUA PARA ESTABILIZACIÓN DE HUMEDALES</i>	<i>43</i>



LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. SECTORES DE LA PLANTA	21
FIGURA 2. CARRIZO.....	27
FIGURA 3. PLANTA VEGETAL – PAPIRO.....	27
FIGURA 4. PLANTA VEGETAL - TOTORA.....	28
FIGURA 5. ESTRUCTURA INICIAL DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES.....	29
FIGURA 6. DIFERENCIA ENTRE ALTURAS DE LOS HUMEDALES	30
FIGURA 7. CONEXIONES Y VÁLVULAS DE SALIDA PRESENTES EN LOS TANQUES.....	30
FIGURA 8. DIMENSIONES DE ANDAMIOS, VISTA LATERAL	33
FIGURA 9. MEDIDAS DEL TANQUE EN CENTÍMETROS.....	34
FIGURA 10. PUNTOS DE CORTE Y DESPLAZAMIENTO CON RESPECTO AL ORIGEN	35
FIGURA 11. PARTES DE UN HUMEDAL	38
FIGURA 12. COMPONENTES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES ESCALA PILOTO	39
FIGURA 13. MATERIAL DE SOPORTE EN EL HUMEDAL (VISTA SUPERIOR).....	39
FIGURA 14. ESTRUCTURA DE LOS HUMEDALES (VISTA FRONTAL).....	40
FIGURA 15. ROSETONES DE PET	40
FIGURA 16. CONFORMACIÓN DEL MEDIO FILTRANTE DEL HUMEDAL	41
FIGURA 17. ESPECIE CARRIZO	41
FIGURA 18. ESPECIE TOTORA.....	42
FIGURA 19. ESPECIE VEGETAL PAPIRO.....	42
FIGURA 20. ESTADO DE PLANTAS AL FINAL DE LA ESTABILIZACIÓN	44
FIGURA 21. REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LA EVOLUCIÓN DEL PAPIRO.....	53



Universidad
Tecnológica
de Pereira

PULIMENTO DE MATERIA ORGÁNICA CON HUMEDALES FSS EN FRIGOVITO S.A.

LISTA DE GRAFICAS

GRÁFICA 1. COMPORTAMIENTO DE LAS TRES ESPECIES VEGETALES FRENTE AL PARÁMETRO DBO_5 ...	50
GRÁFICA 2. COMPORTAMIENTO DE LAS TRES ESPECIES VEGETALES FRENTE AL PARÁMETRO DQO. ...	51
GRÁFICA 3. REMOCIONES PROMEDIO DBO	52
GRÁFICA 4. REMOCIONES PROMEDIO DQO	52



Universidad
Tecnológica
de Pereira

RESUMEN

Una de las problemáticas ambientales de mayor impacto y recurrencia es el vertimiento de aguas residuales con altas cargas contaminantes sobre el recurso hídrico. Para reducir estas cargas o concentraciones, se aplican diversos procesos en serie, como los pretratamientos, tratamientos primarios y tratamientos secundarios. Con éstos, muchas veces, es más que suficiente para alcanzar las remociones exigidas por la normatividad, sin embargo, para ser amigables con el medio ambiente, se puede optar por un tratamiento de pulimento como los humedales artificiales, con el cual además de generar un aislamiento vegetal a una planta de tratamiento convencional, se puede establecer una aceptable remoción adicional en carga orgánica.

En la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales – PTAR de FRIGOVITO S.A., empresa dedicada al sacrificio de ganado bovino y porcino para abastecimiento de carne al municipio de Pasto y municipios aledaños en el departamento de Nariño, está conformada por un pretratamiento de desbaste y flotación, un tratamiento primario por sedimentación y un tratamiento secundario de lagunaje; a pesar de que tiene una buena eficiencia con remoción por encima del 90% en carga contaminante para los parámetros fisicoquímicos como DBO₅ y DQO, en la actualidad no cumplen con los límites máximos permisibles exigidos por la Resolución 0631 de 2015, los cuales son en términos de DBO₅ de 450 mg/L y DQO es de 800 mg/L, mientras las características del efluente sin incluir los humedales, arrojan valores en términos de concentración en DBO₅ de 917 mg/L y en DQO de 3.136,5 mg/L.

De acuerdo a lo anterior y con el propósito de reducir las concentraciones acordes a lo establecido en la normatividad vigente y mitigar los impactos negativos al cuerpo hídrico receptor de vertimientos, se implementó un tratamiento adicional de pulimento por medio de humedales artificiales a escala piloto, donde se evaluó tres especies vegetales en un montaje en paralelo para la remoción de materia orgánica remanente aún presente en el efluente de la PTAR industrial y así determinar la remoción adicional que brinda cada uno de estos sistemas, con el propósito de seleccionar uno de estos tratamientos de pulimento que disminuya las cargas contaminantes existentes en el vertimiento actual.

Los humedales artificiales se construyeron mediante el reúso de tanques plásticos en Polietileno de Alta Densidad – PEHD, los cuales se diseñaron con características hidráulicas apropiadas para su funcionamiento; una vez calculado el caudal a tratar, se llevó a cabo la implementación de los mismos con una adecuada selección de las especies vegetales y teniendo en cuenta los factores físicos y climatológicos que ellas requieren; se seleccionó una planta endémicas (totora) y dos introducidas, con características adaptativas para la remoción de sustancias contaminantes. Se utilizaron en los humedales artificiales plantas como: Carrizo (*Phragmites australis*), Papiro (*Cyperus papyrus*) y Totora (*Typha Spp*). Estas se adaptaron a un medio filtrante y de soporte construido con material plástico residual, fundamentalmente por trozos de botellas de PET, polietileno de tereftalato. La adaptación por parte de las plantas seleccionadas fue positiva, a pesar de que, en las primeras etapas el carrizo evidenció dificultad.

Después de la adaptación vegetal en los humedales artificiales, se realizó como etapa final del proyecto, diez (10) caracterizaciones de laboratorio para los parámetros DBO₅ y DQO tanto del afluente y del efluente de cada humedal. Los resultados de las pruebas de laboratorio fueron



Universidad
Tecnológica
de Pereira

PULIMENTO DE MATERIA ORGÁNICA CON HUMEDALES FSS EN FRIGOVITO S.A.

analizados y procesados determinado por medio de cálculos, las eficiencias que cada sistema de humedal arrojó. Con los resultados obtenidos se evidenció que la eficiencia de las tres especies es similar, sin embargo, se encontró que el papiro puede ser una mejor alternativa de remoción para los parámetros DBO_5 pues al contemplar los valores de remoción alcanzados se obtuvo resultados entre 68,5% y 90,8% y de DQO de 68,3% y 84,0%. El análisis de datos permitió establecer, además, que las remociones promedio para DBO_5 y DQO se encuentran en 80,2% y el 75,3% con desviaciones estándar de 7 y 4.9 respectivamente. En cuanto a las concentraciones del efluente del humedal con papiro, se pudieron observar valores que variaron entre 91mg/L y 257mg/L para la DBO_5 y entre 478 mg/L y 1.159 mg/L para la DQO, permitiendo en la mayoría de datos dar cumplimiento con la normatividad vigente para vertimientos líquidos.

Palabras Claves: Humedal artificial, pulimento, agua residual, especies vegetales, materia orgánica.



Universidad
Tecnológica
de Pereira

ABSTRACT

One of the environmental problems of greatest impact and recurrence is the discharge of wastewater with high pollutant loads on the water resource. To reduce these charges or concentrations, various processes are applied in series, such as pretreatments, primary treatments and secondary treatments. With these, many times, it is more than enough to achieve the removals required by the regulations, however, to be friendly to the environment, you can opt for a polishing treatment such as artificial wetlands, with which in addition to generating a plant isolation to a conventional treatment plant, an acceptable additional removal in organic load can be established.

In the Wastewater Treatment Plant - PTAR of FRIGOVITO SA, company dedicated to the slaughter of bovine and porcine cattle for meat supply to the municipality of Pasto and neighboring municipalities in the department of Nariño, it is conformed by a pre-treatment of roughing and flotation, a primary treatment by sedimentation and a secondary treatment of lagooning; Although it has a good efficiency with removal above 90% in pollutant load for the physicochemical parameters such as DBO_5 and DQO, at present they do not comply with the maximum permissible limits required by Resolution 0631 of 2015, which are in terms of DBO_5 of 450 mg/L and DQO is 800 mg/L, while the characteristics of the effluent without including the wetlands show values in terms of DBO_5 concentration of 917 mg/L and DQO of 3,136.5 mg/L.

In accordance with the above and with the purpose of reducing the concentrations according to the provisions of the current regulations and mitigating the negative impacts to the water body receiving discharges, an additional polishing treatment was implemented by means of artificial wetlands at pilot scale, where three plant species were evaluated in a parallel assembly for the removal of remaining organic matter still present in the effluent of the industrial WWTP and thus determine the additional removal provided by each of these systems, with the purpose of selecting one of these treatments. polish that diminishes the existing polluting loads in the current shedding.

The artificial wetlands were constructed by reusing plastic tanks in High Density Polyethylene - PEHD, which were designed with hydraulic characteristics appropriate for their operation; once the flow to be treated was calculated, the implementation of them was carried out with an adequate selection of the plant species and taking into account the physical and climatological factors that they require; Two endemic and one introduced plants were selected, with adaptive characteristics for the removal of polluting substances. Plants such as Reed (*Phragmites australis*), Papyrus (*Cyperus papyrus*) and Totora (*Typha Spp*) were used in artificial wetlands. These were adapted to a filter and support medium constructed with residual plastic material, mainly by pieces of PET bottles, polyethylene terephthalate. The adaptation by the selected plants was positive, although in the early stages the reed showed difficulty.

After the plant adaptation in the artificial wetlands, ten (10) laboratory characterizations for the DBO_5 and DQO parameters of the effluent and the effluent of each wetland were carried out as the final stage of the project. The results of the laboratory tests were analyzed and processed determined by means of calculations, the efficiencies that each wetland system showed. With



Universidad
Tecnológica
de Pereira

PULIMENTO DE MATERIA ORGÁNICA CON HUMEDALES FSS EN FRIGOVITO S.A.

the obtained results it was evidenced that the efficiency of the three species is similar, however, it was found that the papyrus can be a better removal alternative for the DBO_5 parameters because when contemplating the removal values reached, results were obtained between 68.5 % and 90.8% and DQO of 68.3% and 84.0%. The data analysis allowed to establish, in addition, that the average removals for DBO_5 and DQO are found in 80.2% and 75.3% with standard deviations of 7 and 4.9 respectively. As for the effluent concentrations of the papyrus wetland, values ranging from 91mg/L to 257mg/L for DBO_5 and between 478 mg/L and 1.159 mg/L for DQO could be observed, allowing for most data comply with current regulations for liquid discharges.

Key words: Constructed Wetland, polish, residual water, plant species, organic matter



Universidad
Tecnológica
de Pereira

INTRODUCCION

La mejora en la calidad del agua en humedales naturales ha sido observada por científicos e ingenieros durante muchos años, y ha llevado al desarrollo de humedales artificiales para imitar en ecosistemas construidos los beneficios de calidad del agua y hábitat de los humedales naturales.

La vegetación emergente más comúnmente utilizada en humedales de flujo subsuperficial, incluye las espadañas y aneas (*Typha spp.*), los juncos (*Scirpus spp.*) y los carrizos (*Phragmites spp.*). En Europa los *Phragmites* son las plantas preferidas para esta aplicación. Esta planta tiene varias ventajas debido a que se trata de una planta durable de rápido crecimiento que no es una fuente alimenticia para aves o la vida silvestre (EPA, 2002).

Considerando lo anterior, se establece que la presente investigación tiene como objetivo principal verificar el comportamiento de humedales artificiales construidos como tratamiento de pulimento que generen la mejor remoción para las aguas tratadas de la central de sacrificio FRIGOVITO S.A. apoyándose en objetivos específicos como:

- El diseño e implementación de humedales artificiales en las instalaciones del FRIGOVITO S.A., adaptando especies vegetales seleccionadas para el pulimento de las aguas residuales.
- Evaluaciones ambientales a través de caracterizaciones fisicoquímicas que arrojen las mejores remociones de acuerdo a la especie vegetal seleccionada en cada uno de los humedales.

De lo anterior se obtuvieron resultados donde se indicó cuál de los humedales artificiales con las tres opciones de especies vegetales plantadas, contribuirá de mejor manera a la remoción de materia orgánica como complemento al tren de tratamiento existente en la empresa. De igual manera se estableció un humedal sin especies vegetales para hacer un comparativo del aporte que hacen las plantas en este tipo de sistemas con respecto a un blanco que funciona únicamente como filtro subsuperficial.



CAPITULO 1

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente la empresa FRIGOVITO S.A., es la compañía encargada del abastecimiento cárnico en la mayoría de los municipios del departamento de Nariño y en especial del municipio de Pasto, desarrolla actividades de sacrificio de ganado bovino y porcino, con valores promedio año alrededor de 22.500 cerdos y 23.300 reses en donde el empleo de agua es un elemento fundamental para dichas actividades y lo cual conlleva a la inevitable generación de vertimientos líquidos a pesar de que la empresa cuenta con un plan de uso eficiente y de ahorro de agua - PUEAA y ha implementado estrategias de producción más limpia (P+L).

Con la generación de aguas residuales producto de las actividades de faenado, se vierten una serie de contaminantes que afectan las condiciones naturales del cuerpo hídrico receptor, el cual se encuentra amparada por la normatividad vigente bajo el Decreto Único Reglamentario 1076 de 2015 y la Resolución 0631 de 2015.

Con el propósito de dar cumplimiento a lo expuesto y minimizar el impacto negativo al recurso hídrico, FRIGOVITO S.A. ha adoptado un sistema de tratamiento de aguas residuales compuesto por un pretratamiento de desbaste y flotación, seguido de un tratamiento primario por sedimentación y finalmente por un tratamiento secundario por lagunaje, en este último se cuenta con 3 lagunas, la primera para aireación, la segunda con procesos facultativos y la tercera para maduración.

A pesar de que en la actualidad la eficiencia de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales – PTAR, cuenta con porcentajes relativamente altos de remoción en carga contaminante por encima del 90%, no permite dar cumplimiento a lo establecido en el artículo 9, capítulo VI de la Resolución 0631 de 2015 en cuanto a los límites máximos permisibles para beneficio dual de ganadería, lo cual hace que el cuerpo hídrico receptor como la quebrada La Lorian, reciba concentraciones superiores a las referidas por la norma, generando impactos negativos en la calidad de agua de dicha quebrada; esto implicaría no solo posibles sanciones de la Autoridad Ambiental, sino también el potencial incremento en el pago de tasa retributiva. En este sentido, la empresa dentro de su política ambiental y con el ánimo de mejorar sus procesos y su interacción con el medio ambiente, le surge la necesidad de optimizar su PTAR, incluyendo un sistema de tratamiento terciario conformado por humedales artificiales que permita dar un pulimento final a las aguas residuales ya tratadas y de esta manera generar un vertimiento con características de mínima contaminación.

1.1.1 Formulación del problema. De acuerdo a lo expuesto en el planteamiento del problema, surge como pregunta de investigación: ¿Cuál de los humedales artificiales de flujo subsuperficial con las especies vegetales como Carrizo, Papiro o Totora, realiza



Universidad
Tecnológica
de Pereira

PULIMENTO DE MATERIA ORGÁNICA CON HUMEDALES FSS EN FRIGOVITO S.A.

las mejores remociones de carga orgánica en términos de DBO_5 y DQO como tratamiento de pulimento en las aguas residuales tratadas de FRIGOVITO S.A.?



Universidad
Tecnológica
de Pereira

1.2 JUSTIFICACIÓN

El recurso hídrico de manera directa o indirecta es el que finalmente recibe todo tipo de vertimientos líquidos provenientes de las diferentes actividades humanas de desarrollo y subsistencia. A medida que los ríos recorren su cauce, son expuestos a ser fuentes de innumerables vertimientos con altas concentraciones contaminantes que, a pesar de su capacidad de autodepuración, en algunos casos son tan altas que desequilibran el sistema hídrico, sus condiciones naturales y generan un decaimiento radical en la calidad del cuerpo de agua receptor. Es necesario por eso, velar porque la aplicación de la normatividad en relación a vertimientos se cumpla a cabalidad, y que las empresas o personas generadores de estos vertimientos tengan compromiso ambiental y mejoren las condiciones de cantidad y calidad de los mismos. Para esto, se han venido implementando estrategias inmersas en los planes de uso eficiente y de ahorro de agua, como también en los permisos de vertimientos.

Analizando los problemas presentados por la creciente contaminación en el recurso hídrico, en Colombia se ha optado por cambiar la normatividad pensando en el grado de afectación que generan los vertimientos líquidos sobre el recurso. El Decreto 1594 de 1984 estableció responsabilizar de remociones en carga contaminante a los diferentes generadores de agua residual; sin embargo, este decreto era relativamente permisivo para generadores de altas concentraciones. Posteriormente el Decreto 3930 de 2010 con su Decreto Reglamentario Único Sectorial 1076 de 2015 y la Resolución 0631 de 2015, estableció que los generadores deberían adaptarse a condiciones de calidad de las fuentes receptoras de los vertimientos, con lo cual las exigencias en términos de remoción, establecerían límites máximos permisibles de concentraciones en los efluentes. Ello con el fin de mejorar la condición de las fuentes receptoras de manera considerable. Cabe anotar que la quebrada La Lorianana como fuente receptora de vertimientos, aún no se encuentra ordenada por la Corporación Autónoma de Nariño - CORPONARIÑO, por lo tanto, no existen objetivos de calidad sobre éste cuerpo hídrico, sin embargo, FRIGOVITO S.A., anticipándose a esta situación ha propuesto el estudio de este tratamiento terciario para considerar su factibilidad a la norma vigente y ante un posible ordenamiento del cuerpo hídrico receptor.

Las plantas de tratamiento existentes necesitarían implementar tratamientos adicionales para adaptarse a las exigencias de la nueva normatividad. Es por eso que surge la necesidad de identificar tratamientos de pulimento que, a un bajo costo de implementación y facilidad de su control y mantenimiento, generen remociones adicionales que permitan cumplir con las nuevas exigencias.

Una vez las aguas tratadas, presentan una buena remoción de sólidos, una excelente alternativa a considerar como tratamiento adicional son los humedales artificiales. El humedal puede considerarse como un reactor biológico tipo "proceso biopelícula sumergida", con aireación natural, en el que las plantas emergentes toman oxígeno de su parte aérea para introducirlo en la sumergida hacia los rizomas. Se crea un mosaico de zonas aerobias y anaerobias próximas entre sí, que favorecen los procesos de descomposición de la materia orgánica, nitrificación, desnitrificación, precipitación de fosfatos y muerte de patógenos (Lahora, s.f.). De esta manera,



Universidad
Tecnológica
de Pereira

PULIMENTO DE MATERIA ORGÁNICA CON HUMEDALES FSS EN FRIGOVITO S.A.

se espera que los humedales artificiales sean una manera conveniente y viable que brinda un tratamiento de pulimento para las aguas residuales tratadas de la empresa FRIGOVITO S.A.

En la actualidad el caudal efluente de la PTAR de FRIGOVITO S.A es en promedio de 0,45 l/s, con el cual se podría generar un área de humedal con las condiciones iniciales de estudio, y a escala real de 269 m², que con las condiciones de área existente en la empresa podría ser factible, permitiendo dar continuidad con el estudio tras solventar esta posible restricción.



Universidad
Tecnológica
de Pereira

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general. Evaluar la remoción de materia orgánica en tres humedales artificiales de flujo subsuperficial a escala piloto, como tratamiento de pulimento en las aguas residuales de FRIGOVITO S.A.

1.3.2 Objetivos específicos

- Diseñar a escala piloto tres humedales artificiales considerando las características del efluente de la planta de tratamiento de FRIGOVITO S.A.
- Implementar el sistema piloto con las especies seleccionadas carrizo, papiro y totora.
- Evaluar la remoción en cargas contaminantes medidas en parámetros fisicoquímicos de DBO_5 y DQO en los tres humedales artificiales, con el propósito de determinar la eficiencia con cada especie vegetal.



1.4 MARCO REFERENCIAL

1.4.1 Marco contextual. El proyecto de investigación se desarrolló en la planta de beneficio animal del municipio de Pasto FRIGOVITO S.A., la cual se encuentra ubicada fuera del perímetro urbano al suroeste del municipio de Pasto en el corregimiento de Jongovito, con coordenadas $1^{\circ}40'30''$ N y $77^{\circ}47'41''$ W, a una distancia de 5 kilómetros del casco urbano. Su altura es de aproximadamente 2.760 m.s.n.m, con una temperatura de aproximadamente 11°C , presenta un relieve limitadamente elevado, con una notoria diversidad biológica.

Figura 1. Sectores de la Planta



Fuente: Imagen adaptada de Google Earth 2017.

1. Zona de Corrales.
2. Planta de Sacrificio.
3. Zona de oficinas y administrativa.
4. Proceso de Tratamiento de las aguas residuales.

1.4.2 Marco de antecedentes – estado del arte. En la siguiente tabla se presenta los antecedentes investigativos más relevantes a nivel internacional, nacional y local que se han realizado con respecto al tema de investigación.



Tabla 1. Estado del arte

NIVEL	TITULO DE LA INVESTIGACION	OBJETIVO GENERAL	RESULTADO OBTENIDO
	Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: La EDAR de los Gallardos (Armería) ^a .	Determinación del tiempo óptimo en el que el humedal alcanza su desarrollo recomendable, conociendo la reducción de la DBO5, DQO, eliminación de sólidos suspendidos, y eliminación de nutrientes (nitrógeno y fosforo), en comparación con la reducción exigida.	Tiempo necesario para el funcionamiento óptimo de mínimo un año, porcentajes de reducción de la DBO5 superiores a 25mg/L, porcentaje de remoción de nitrógeno del 36%.
	Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Barcelona ^b .	Evaluación de humedales artificiales en aguas de origen urbano.	Los humedales artificiales son una tecnología viable para el tratamiento de aguas residuales, con gran futuro en países con climas tropicales o subtropicales, y donde las condiciones de inversión para el tratamiento de aguas residuales sean un limitante.
INTERNACIONAL	A comparison of constructed wetlands used to treat domestic wastes: conventional, drawdown, and aerated systems ^c .	Comparar sistemas de humedales artificiales con diferentes configuraciones tras el aporte de oxígeno externo.	Existen buenos resultados en sistemas tipo humedal artificial, tanto convencionales como con la utilización de aireación en dichos sistemas. La selección pasa entonces a evaluar los costos de operación por el consumo adicional de energía.
	Constructed Wetlands: Design Approaches. (En Gales) ^d .	Diseñar humedales artificiales de flujo subsuperficial utilizados como filtro de crecimiento biológico para reducir las concentraciones de DBO, nutrientes y sólidos.	Se encontraron datos de dimensiones adecuadas para la construcción de humedales, además de tener en cuenta las características del área junto con sus condiciones meteorológicas para lograr una remoción entre el 30% y 70% de DBO y un 80% para sólidos.



	<p>Postratamiento de aguas residuales en plantas de beneficio de ganado porcino y bovino utilizando humedales artificiales^e.</p>	<p>Postratar las aguas residuales de las piscinas de oxidación en plantas de beneficio de ganado porcino y bovino mediante la utilización de humedales artificiales.</p>	<p>Seleccionar a la planta Typha latifolia, como la especie más apropiada para el postratamiento de las aguas de las centrales de sacrificio, considerando aspectos tales como, eliminación de contaminantes, tasas de crecimiento, resistencia a enfermedades y plagas y permitiendo que las aguas residuales cumplan con las disposiciones de la normatividad ambiental vigente.</p>
NACIONAL	<p>Tipo de humedales y mecanismos de remoción. Seminario Humedales Artificiales para el manejo, tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua^f.</p>	<p>Describir el funcionamiento de los humedales artificiales y sus mecanismos de remoción.</p>	<p>Los humedales artificiales tienen ventajas en comparación con los usos de humedales naturales, como son, la selección del sitio, flexibilidad en el dimensionamiento y, quizás el elemento más importante, control sobre el régimen hidráulico y tiempos de retención.</p>
	<p>Sistemas de humedales construidos pretratamientos básicos. Seminario Humedales Artificiales para el Tratamiento de Aguas Residuales^g.</p>	<p>Determinar la importancia de los pretratamientos antes de los humedales artificiales.</p>	<p>Los humedales de flujo subsuperficial son sistemas no convencionales para el tratamiento de aguas residuales. Para su operación adecuada es preciso que el agua residual reciba algún nivel de pretratamiento.</p>
	<p>Evaluación sobre el humedal artificial subsuperficial en el tratamiento de las aguas residuales domésticas generadas en el centro ambiental Chimayoy municipio de Pasto^h.</p>	<p>Evaluar el humedal artificial subsuperficial utilizado para el tratamiento de las aguas residuales domésticas generadas en el centro Ambiental Chimayoy – municipio de Pasto (Nariño).</p>	<p>El humedal artificial subsuperficial favorece el rendimiento, en remoción de DBO5, sólidos y coliformes, las eficiencias de remoción de DBO5 alcanzan valores hasta del 92.9%.</p>



REGIONAL	Evaluación de la remoción de contaminantes para el tratamiento de lixiviados utilizando diferentes especies vegetales en humedales artificiales a escala piloto, en el relleno sanitario Antanas del municipio de Pasto ⁱ .	Evaluar la efectividad de las especies vegetales totora y carrizo en un sistema de humedales artificiales, a escala piloto para la remoción de cargas contaminantes en DBO ₅ , DQO, SST y nutrientes presentes en el lixiviado proveniente del proceso anaerobio del relleno sanitario Antanas del municipio de Pasto.	Disminución considerablemente de cargas contaminantes de los parámetros establecidos en el Decreto 1594 de 1984, para DBO ₅ , DQO y SST, manteniendo rangos de temperatura menor a 40°C y pH entre 5-9 unidades. Se concluyó que la especie vegetal Carrizo (<i>Pragmites</i> sp.) es el que representa un mejor rendimiento acoplado a la línea de tratamiento del relleno sanitario Antanas.
-----------------	--	---	--

Nota. Fuente: ^a Lahora, 2003; ^b Lara, 1999; ^c Matthys, Parkin & Wallace, s.f.; ^d Wallace, 2003; ^e Viveros, 2016; ^f Paredes, 2014; ^g Castaño, 2001; ^h Oliva, 2003; ⁱ Huertas & Obando, 2009.

1.4.3 Marco teórico. Los términos y conceptos a considerar para la profundización y análisis en el tema de tratamiento de aguas residuales y en el caso específico con humedales artificiales son amplios; sin embargo, a continuación, se presentan los más relevantes a tener en cuenta como aporte y complemento para solución del problema de la presente investigación.

Como lo menciona Andrade (citado por Zapata, 2014). Los humedales artificiales son sistemas de fitodepuración de aguas residuales, que consisten en el desarrollo de un cultivo de macrófitas enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado. Las macrófitas hacen posible que el agua residual sea tratada de manera progresiva y lentamente por medio de interacciones físicas, químicas y biológicas. Ampliando un poco más este concepto y especificándolo con humedales artificiales de flujo subsuperficial (FS, subsurface flow wetlands), estos se diseñan concretamente para el tratamiento de algún tipo de agua residual en su fase final de tratamiento, posterior a sistemas tratamiento complementarios y están construidos comúnmente en forma de un lecho o canal que contiene un medio apropiado (EPA, 2000). Algunas de las principales características de los humedales son (Delgadillo, 2010; Seoánes, 1999):

- Flujo Sub-superficial: El agua corre a través de un medio granular y filtrante, circula por los rizomas y las raíces de las plantas, éste flujo puede ser Horizontal o Vertical.
- Hidrología de los humedales artificiales: Estos presentan características hidrológicas fundamentales estipuladas por su condición artificial. Sin embargo, en humedales naturales, las capacidades de las especies vegetales implantadas llegan a aumentar la eficiencia de remoción como en la regulación de sedimentos, control de nutrientes y la transformación o reducción de contaminantes disueltos, cuando se manipulan las propiedades del suelo para que éste tenga una óptima interacción con las plantas.
- Factores incidentes: En el proceso que se llevó a cabo en los humedales artificiales influyen los siguientes factores:



- Caudal del líquido a recibir.
- Selección de la vegetación a implantar.
- Condiciones ambientales, morfológicas y climatológicas de la zona (Temperatura, humedad, topografía, entre otros).
- Parámetros de diseño:
 - Tiempo de Retención hidráulica.
 - Profundidad.
 - Figura geométrica.
 - Dimensiones.
 - Carga admisible de DBO.
 - Fluctuaciones de la carga hidráulica.

Cabe resaltar que para la escogencia del sistema de tratamiento como pulimento de las aguas residuales de la planta de beneficio animal FRIGOVITO S.A., se indagó un sistema eficiente y que se pueda complementar con las lagunas de tratamiento existentes en la empresa, por ello se escogió a los humedales artificiales los cuales presentan una variedad de procesos que interfieren en la depuración de aguas como los que se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Procesos generales de depuración en los humedales artificiales

FASE	PROCESO
Acción Bacteriana	Conversión y transformación de contaminantes. Se reduce la DBO.
Absorción de oxígeno	El oxígeno disuelto lo toma de la atmósfera, si la lámina líquida del humedal no está en saturación.
Desorción de oxígeno	Contraria a la absorción.
Sedimentación	Por el movimiento lento del líquido, los sólidos en suspensión son depositados en el fondo. A veces se produce floculación mientras en otros turbulencias por lo cual éstos sólidos se distribuyen uniformemente por todo el humedal.
Degradación natural	La supervivencia de muchos organismos tiene plazo limitado, por lo cual la mayoría de éstos mueren pasado un periodo de tiempo en el humedal.
Adsorción	A través de la adsorción, un cuerpo logra capturar las moléculas de otro y mantenerlas en su propia superficie. De este modo, se diferencia de la absorción, donde las moléculas penetran en su superficie.
Volatilización	Los contaminantes volátiles presentes en el líquido son transferidos a la atmósfera.
Reacciones químicas	Además de las reacciones fotoquímicas, existen fenómenos de hidrólisis, oxidaciones diversas, reducciones, etc.
Evaporación	Muchos gases que se pueden aportar con el afluente se pueden evaporar, y de igual manera sucede con la parte de la masa de la humedad, que puede ver reducido su volumen.

Fuente: Seoánes (1999)



- Tratamientos biológicos: estos se especializan en eliminar sustancias suspendidas, coloidales o materia orgánica degradable disuelta; las cantidades y proporciones dependen de la naturaleza del agua residual. Las características del agua residual están medidas en términos de demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO) y sólidos volátiles Suspendidos (SVS), las cuales se pueden minimizarse a partir de la utilización de tratamientos biológicos. Dependiendo del tipo de bacterias y la oportunidad de oxígeno a utilizar en el tratamiento biológico, estos se clasifican en aerobios, anaerobios, anóxicos y facultativos.

Se emplean bacterias como microorganismos primarios, en la mayoría de los procesos de tratamientos biológicos de agua residual, aunque también se puede emplear otros microorganismos que cumplan el mismo fin. La degradación de la materia orgánica es efectuada por los microorganismos como alimento para producir protoplasma para nuevas células durante el proceso de crecimiento.

El crecimiento de la población depende de factores ambientales como: pH, Temperatura, Concentración del sustrato, hidrógeno aceptor, concentración de nutrientes esenciales (nitrógeno, fósforo, sulfuros etc.), minerales esenciales, presión osmótica, toxicidad media, subproductos y el grado de mezclado. En los procesos biológicos ocurren reacciones metabólicas que se dividen en tres fases: Oxidación, Síntesis y respiración Endógena.

- Vegetación: Para el adecuado funcionamiento y eficiencia de remoción de la carga contaminante es necesario la selección de la vegetación teniendo en cuenta parámetros fundamentales para su óptimo crecimiento y retención de sustancias o contaminantes. Se recomienda utilizar plantas endémicas debido a su facilidad de crecimiento y adaptabilidad. Se debe tener presente para una adecuada implementación de vegetales lo siguiente:
 - Tipo de Humedad.
 - Temperatura.
 - Superficie del humedal o de los humedales.
 - Profundidad de la Instalación.
 - Composición de los vertidos al humedal.
 - Necesidad o no de recolección periódica de vegetación.
 - Tipo de Sustrato.

Con base lo anterior se seleccionó las siguientes especies vegetales que, por sus características, antecedentes de depuración y adaptabilidad se podían emplear en el presente estudio y generar óptimos resultados para el tratamiento de aguas como las siguientes:

- Carrizo: Nombre científico (*Phragmites australis*). Es un neófito de gran tamaño, no es ramificado, tiene hojas de 50x5cm, de color verde grisáceas, aplanadas. Vive en zonas de alta humedad en los bordes de Lagunas, marismas y ríos, llegando a formar grandes poblaciones, habita entre los 1.000-3.900 msnm, se encuentra en comunidades cañaverales y espadales de aguas poco profundas y lénticas. Crece con luz intensa,



Universidad
Tecnológica
de Pereira

aunque soporta sombra, la temperatura es moderada (piso montano), el pH en los suelos debe estar entre 4,5 y 7,5. (Asturnatura, s.f.).

Figura 2. Carrizo



Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Phragmites_australis

- **Papiro:** Planta Africana, muy común en el río Nilo en Egipto. Su nombre botánico (*Cyperus papyrus*) de tipo vivaz, debe estar expuesta al sol, es de hoja perenne, necesita vivir en suelo encharcado. Esta planta es de rápido crecimiento por lo tanto puede llegar a ser invasora, son plantas robustas que vegetan a expensas de tallos subterráneos (tubérculos), de los cuales surgen ramas de aproximadamente 90 cm coronadas por hojas radiales de unos 25 cm de ancho, tiene floración pequeña de color marrón (planthogar.net, s.f.).

Figura 3. Planta – Papiro



Fuente: <http://www.plantasyjardines.es/conociendo-una-planta-legendaria-papiro/>



Universidad
Tecnológica
de Pereira

- **Totora:** Su nombre botánico es (*Typha Spp*), Es una planta acuática de tipo junco, puede llegar a tener de 3–4 m de altura. Crece naturalmente en los humedales de agua dulce. Son plantas fanerógamas, de hojas perennes, las cuales crecen anualmente, dependiendo del clima puede acelerarse o reducir el ciclo de vida. Sus raíces se anclan en la planta sustrato del fango. De la raíz se despliega el rizoma, de éste brotan las yemas que llegan a ser tallos. Naturalmente en los humedales se multiplican extensamente llegando a una densidad de 300 hasta 400 plantas por metro cuadrado (museocampesino, 2010).

Figura 4. Planta vegetal - Totora



Fuente: <https://fotosdeaquidealla.wordpress.com/album-fotografico-del-charco-de-los-carrizos-por-antonio-merida/juncos-o-totora/>



CAPITULO 2

DISEÑO A ESCALA PILOTO DE TRES HUMEDALES ARTIFICIALES CONSIDERANDO LAS CARACTERÍSTICAS DEL EFLUENTE DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE FRIGOVITO S.A.

2.1 METODOLOGÍA

2.1.1 Metodología de construcción y cálculo. Para la implementación de los humedales se optó con alternativas como la reutilización de materiales reciclables y la disminución de costos por concepto de excavación y compra de geomembrana, para lo cual se empleó tanques de 170 L en polietileno de alta densidad. Dichos tanques fueron cortados por la mitad de forma horizontal, empleando las dos partes del tanque para cada humedal.

Con el propósito de garantizar un flujo continuo sin bombeo a la entrada de los humedales y evitar retorno de agua, se ubicó las secciones de los tanques en andamios como se muestra en la figura 5, donde la primera mitad se encuentra a mayor altura que la segunda, para posibilitar el flujo de agua por gravedad y trabajo en serie de cada sistema.

Figura 5. Estructura inicial de los humedales artificiales



El abastecimiento de agua residual se realizó por medio del almacenamiento en 2 tanques plásticos ubicados al inicio de la estructura (figura 6) en otro andamio, con una altura mayor para garantizar la cabeza de presión y la altura piezométrica de agua para cada sistema de humedales.



Figura 6. Diferencia entre alturas de los humedales



En la base de los tanques de almacenamiento se implementó una conexión en forma de “H” con tubería en PVC para la circulación de agua, en donde se conectó tres mangueras de 1/8” para la salida de agua y abastecer a cada sistema de humedal con un caudal calculado previamente. Entre cada unidad (mitad de tanque) en serie, se alimenta de agua por mangueras del mismo diámetro con válvulas de globo a la entrada y salida de cada sistema de apertura y cierre para la regulación del caudal. Figura 7.

Figura 7. Conexiones y válvulas de salida presentes en los tanques



Después de tener implementado el sistema por medio de los andamios de soporte para los humedales, se procedió a calcular el caudal diseño necesario que tratará cada mitad del tanque



de acuerdo a las dimensiones ya establecidas en cada unidad. Esto se llevó a cabo mediante una serie de operaciones, formulas y cálculos numéricos donde se destaca las siguientes ecuaciones:

Ecuación general de la circunferencia:

$$(X^2 + Y^2) = r^2 \quad \text{Ec. 1}^1$$

Dónde:

X: Desplazamiento en el eje x.

Y: Desplazamiento en el eje y

r: Radio del semicírculo, m.

Para poder establecer el área transversal del humedal, se trasladó a ecuaciones las dimensiones reales del semitanque y del tirante del agua dentro del humedal. Para ello se desplazó el valor del radio, r unidades en el eje X y r unidades en el eje Y, modificando así la ecuación de la siguiente manera, y como se lo puede evidenciar más adelante en la figura 10.

$$(X - h)^2 + (Y - k)^2 = r^2 \quad \text{Ec. 2}$$

$$Y = H \quad \text{Ec. 3}$$

Dónde:

X: Desplazamiento en el eje x.

Y: Desplazamiento en el eje y.

r: Radio del semicírculo, m.

h: Centro de la circunferencia en el eje x.

k: Centro de la circunferencia en el eje y.

H: Altura de la lámina de agua.

Con el ancho ya calculado, se continúa con la medición del largo efectivo en la depuración del tanque, para calcular el área superficial con la siguiente ecuación:

$$A_s = l * ancho \quad \text{Ec. 9}$$

Dónde:

A_s: Área superficial.

l: largo

Para determinar el caudal a tratar en cada humedal se parte de la siguiente ecuación, en la cual se ha despejado Q:

$$Q = \frac{A_s * K}{\ln \left| \frac{C_0}{C_e} \right|} \quad \text{Ec. 10}^2$$

¹ ORDUÑA FLORES Javier, Geometría analítica, México, México DC, 2012, 72p.

² SEOÁNES CALVO MARIANO, Aguas residuales: tratamiento por humedales artificiales, Fundamentos científicos, Tecnologías, Diseño, EDICIONES MUNDI PRENSA, 1999. 185p.



Dónde:

Q: Caudal del afluente de cada humedal, m³/día.

A_s: Área superficial del primer tanque, m².

C₀: Concentración de DBO a la entrada, mg/L.

C_e: Concentración de DBO a la salida, mg/L.

K: Constante de reacción de primer orden en base área para flujo pistón³

Constante cinética de primer orden (K):

$$Kt = K_{20} \cdot (\theta)^{(T-20)}$$

$$Kt = 1,104 \cdot (1,06)^{(12-20)} = 0,693d^{-1}$$

Donde:

Kt: proporción de la constante de temperatura de las aguas residuales d⁻¹

K₂₀: constante cinética para remoción de DBO₅, a 20°C, 1,104 d⁻¹

Θ: coeficiente para corrección de temperatura, 1,06

T: temperatura del agua residual, 12 °C

Área superficial (A_s):

$$A_s = \frac{Q \cdot (L_n C_o - L_n C_e)}{(K_t \cdot D \cdot n)}$$

$$K = Kt * D * n = 0,693 d^{-1} * 0,17 m * 0,85 = 0,1 \frac{m}{d}$$

Para el diseño de los humedales se asume una remoción del 50% en términos de carga contaminante, además se consideró que la diferencia entre los caudales de entrada y de salida serian despreciables en relación a la magnitud de la evapotranspiración, teniendo en cuenta las dimensiones a escala de los humedales a construir; por lo tanto se asumió que la concentración de salida seria la mitad de la concentración de entrada, pudiendo aplicar entonces que $C_e = 0,5 C_0$, es decir que $\frac{C_o}{C_e} = 2$;

entonces:

$$Q = \frac{A_s * Kt * D * n}{\ln|2|} \quad \text{Ec. 12}$$

El llenado de cada tanque de almacenamiento se hizo manualmente, con la ayuda de operarios de la planta de sacrificio, garantizando así el flujo continuo en los humedales artificiales durante todo el tiempo de estudio. La supervisión permanente del nivel de los tanques y la

³ INGENIERIA HIDRAULICA Y AMBIENTAL, Metodología para el diseño de humedales con flujo subsuperficial horizontal, 2011, 63p.



labor de reabastecimiento garantizó un normal funcionamiento de los humedales. El tiempo para reabastecer los tanques se lo calculó con los datos del caudal y la capacidad de almacenamiento de los tanques.

$$t = \frac{V_{ta}}{m * Q} \quad \text{Ec. 13}$$

$$V_{ta} = n * \left(\frac{\pi * D^2}{4} * h_t \right) \quad \text{Ec. 14}$$

Dónde:

t: Tiempo para cada recarga de los tanques de abastecimiento, horas.

N: Número de tanques de abastecimiento.

m: Número de humedales.

V_{ta} : Volumen de los tanques, m^3 .

Q: Caudal para cada humedal, m^3/h .

h_t : Altura total del tanque de abastecimiento, m.

2.2 RESULTADOS

2.2.1 Ubicación y medidas de tanques. Cada una de las secciones de los tanques se ubicaron en andamios construidos como se observa en la figura 8. Para las salidas de agua de cada mitad de tanque, se asumió una altura de 18 cm tomada desde la base del tanque. Figura 9.

Figura 8. Dimensiones de andamios, vista lateral

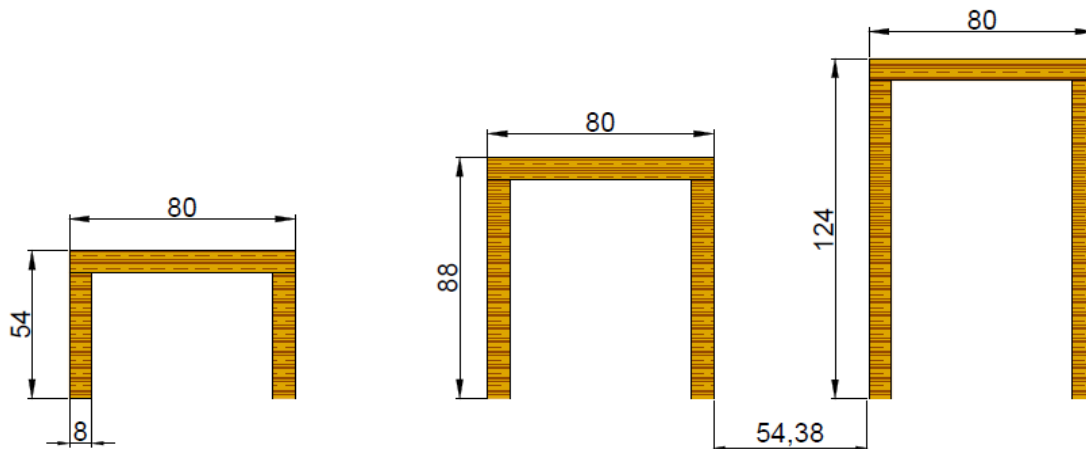
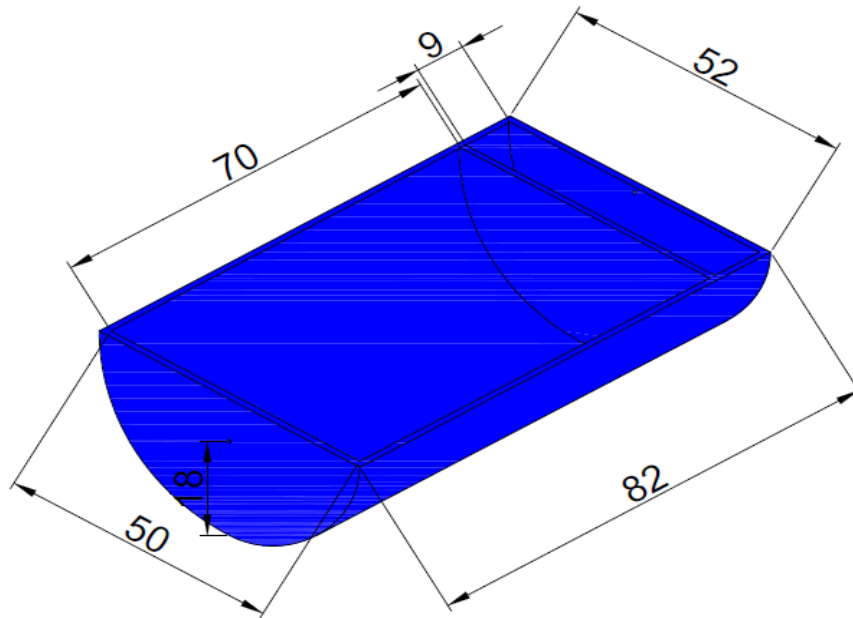




Figura 9. Medidas del tanque en centímetros



2.2.2 Calculo hidráulico. Se empleó la ecuación 1, ecuación general de la circunferencia donde se emplea un valor real de 25 cm como radio del tanque, reemplazando:

$$(X^2 + Y^2) = 25^2$$

Teniendo en cuenta que se ha dejado 1 cm de borde libre del tanque y que $Y=H$ (Ec.3), el valor de H es igual a 17cm y que el centro de la circunferencia se desplazó al cuadrante positivo para facilitar los calculo, se obtienen los dos puntos donde intersectan las dos ecuaciones:

$$(X - 25)^2 + (Y - 25)^2 = 25^2$$

$$Y = \sqrt{25^2 - (X - 25)^2} + 25$$

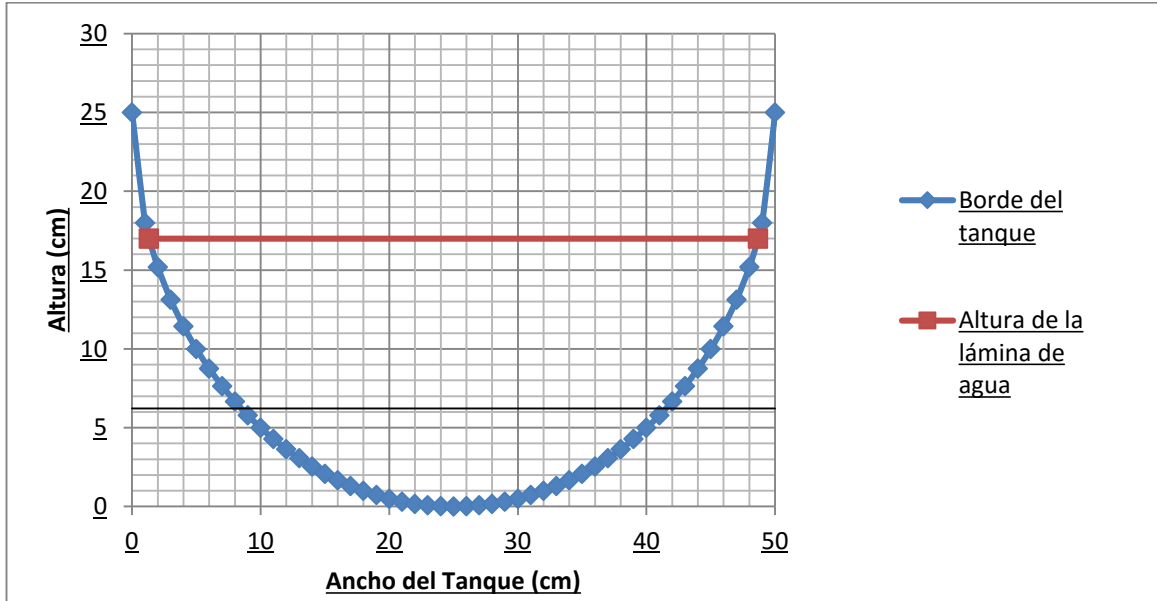
$$X_1 = 1.315$$

$$X_2 = 48.685$$

De acuerdo a los resultados anteriores se obtuvo los puntos de corte entre el nivel de agua con el borde del tanque. Figura 10.



Figura 10. Puntos de corte y desplazamiento con respecto al origen



2.2.3 Ancho de la lámina de agua. Para ello se realiza la diferencia de los valores de x encontrados, cuyos datos son la distancia con respecto al eje “Y” en cm.

$$\text{Ancho} = 48.685\text{cm} - 1.315\text{cm} = 47.37\text{cm}$$

2.2.4 Área útil superficial. Cada tanque cuenta con un largo interno de 78 cm; sin embargo, el área inicial en 8 cm de distancia no realiza depuración, dicha área se maneja como cámara de aquietamiento, la cual recibe el agua y la distribuye en flujo pistón hacia el canal. En tal sentido con el largo útil y el ancho se calculó el área superficial de cada sección (Ec.9):

$$A_s = 70\text{cm} * 47,37\text{cm} = 3315.9\text{cm}^2 \approx 0,332 \text{ m}^2$$

Como ya se mencionó este estudio pretendió dar un valor agregado a la reutilización de elementos como los tanques plásticos, por lo cual el área superficial no podría ser igual al área de fondo del humedal, sin embargo, considerando que los humedales a escala real suelen construirse en el terreno con secciones transversales trapezoidales, la de los tanques podrían semejar a las reducciones de área reales producto de la utilización de una sección trasversal semicircular, como la presentada en éste estudio.

2.2.5 Calculo de caudal de diseño. Como se cuenta con dos secciones que se dividió el tanque, el área superficial se multiplicara por 2 para efectuar los cálculos de caudal para cada humedal así:



$$Q = \frac{A_s * K}{\ln \left| \frac{C_0}{C_e} \right|} = \frac{2 * (0,33159m^2) * 0,1m/d}{\ln|2|} = 0,0957m^3/d$$

2.2.6 Cálculo de capacidad de los tanques de almacenamiento y distribución. Mediante la ecuación del cilindro y en base a las medidas tomadas con diámetro de 52cm y altura 80 centímetro, se determina con la siguiente expresión:

$$V_{ta} = n * \left(\frac{\pi * D^2}{4} * h_t \right) = 2 * \left(\frac{\pi * (0,52m)^2}{4} * 0,8m \right) = 0,34m^3$$

$$t = \frac{0,34m^3}{3 * 0,0957m^3/d} = 1,1845días \approx 28,43 \text{ horas}$$

El anterior valor determina el tiempo que los tanques se evacúan, por lo tanto, se estableció un periodo de frecuencia de llenado de 24 horas, lo cual garantiza la permanencia de agua y facilita el trabajo de los operarios.

2.3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Por lo general los diseños para el tratamiento de aguas parten de un caudal medido en campo o aforado, en la presente investigación se calculó el caudal de diseño, debido a que se opta por aprovechar tanques de polietileno de alta densidad que la empresa FRIGOVITO S.A. desecha, evitando así la contaminación al suelo y reducir costos económicos como la compra de geomembrana. Además, por el limitado espacio, se opta por implementar un sistema de tratamiento a escala piloto con una gradación menor a la real. Por las razones anteriores es pertinente ajustarse a las dimensiones de estos tanques prefabricados.

De acuerdo a lo mencionado por Lara (1998), una de las condiciones importantes a tener en cuenta para la formación de humedales es evitar la infiltración. Características que “pueden crearse para construir un humedal casi en cualquier parte, modificando la superficie del terreno para que pueda recolectar el agua y sellando la cubeta para retener el agua”; de acuerdo a lo anterior, la adecuación de los tanques de polietileno de alta densidad, podría ser una buena opción para la construcción y operación de humedales artificiales de flujo subsuperficial, para caudales similares a los presentados en éste estudio.

Para las ubicaciones de entradas y salidas de agua de las unidades de tratamiento, se adoptaron unas alturas de 25 y 18 centímetros respectivamente, las cuales se tomaron desde la base del tanque, ubicadas y perforadas en cada unidad y en el centro del eje “Y” del tanque. La primera se realizó mediante tubos de PVC perforados lo que contribuye a la oxigenación del agua y asegurar el flujo y la dispersión por el ancho del humedal; este goteo hace que en la entrada de los humedales se airee el agua y estimule el crecimiento microbiano. Como lo afirma Lara (1988b) “los niveles de oxígeno disuelto pueden llegar a ser bajos, en algunos casos pueden ser necesarias también instalaciones de post aireación” (p.33). La segunda perforación de 18



Universidad
Tecnológica
de Pereira

PULIMENTO DE MATERIA ORGÁNICA CON HUMEDALES FSS EN FRIGOVITO S.A.

cm de altura, se empleó para garantizar la canalización del líquido de la parte subsuperficial y no de la superficie como de la parte más honda del tanque.

Con el propósito de evitar pegar las dos mitades de los tanques y hacer un solo sistema, cada unidad se implementó separada con ayuda de los andamios y aprovechando la acción de la gravedad del fluido. Figura 7.

Como el tirante de la lámina de agua no llega a la mitad del tanque exactamente si no que, la lámina circula por debajo de la mitad, se optó por usar la ecuación de la circunferencia para calcular el ancho de la lámina porque sería erróneo tomar el diámetro del tanque.

Relaciones largo ancho de hasta aproximadamente 3:1 o 4:1 son aceptables (Lara, 1998c). Los humedales implementados en la presente investigación cuentan con una relación largo ancho de aproximadamente 3:1. Lo que indica que pueden ser medidas óptimas para el funcionamiento de los tres humedales artificiales.

Lara (1998d) refiere en su trabajo de depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales, que existe una eficiencia del 80% en la remoción de DBO como de DQO, aseveración mayor a la suposición realizada para la Ec. 12 de la remoción mínima en concentración del 50%, lo cual permitiría una mayor eficiencia de la mínima propuesta.

Diferentes autores afirman como en el caso de Lara (1998c) que “Para los casos de Sistemas a flujo libre (FWS) y Sistemas de flujo subsuperficial (SFS), se usa un tratamiento preliminar, este puede estar dado por tanques sépticos, tanques Imhoff, lagunas, tratamiento preliminar, convencional o sistemas similares” (p.73), evitando así la acumulación de material orgánico que puede ser fácilmente biodegradable mediante otros procesos. Esto es válido y estar de acuerdo en cuanto a la ubicación de los humedales como tratamiento terciario, por lo que se ubicó los humedales después de las lagunas presentes en la planta de sacrificio.



CAPITULO 3

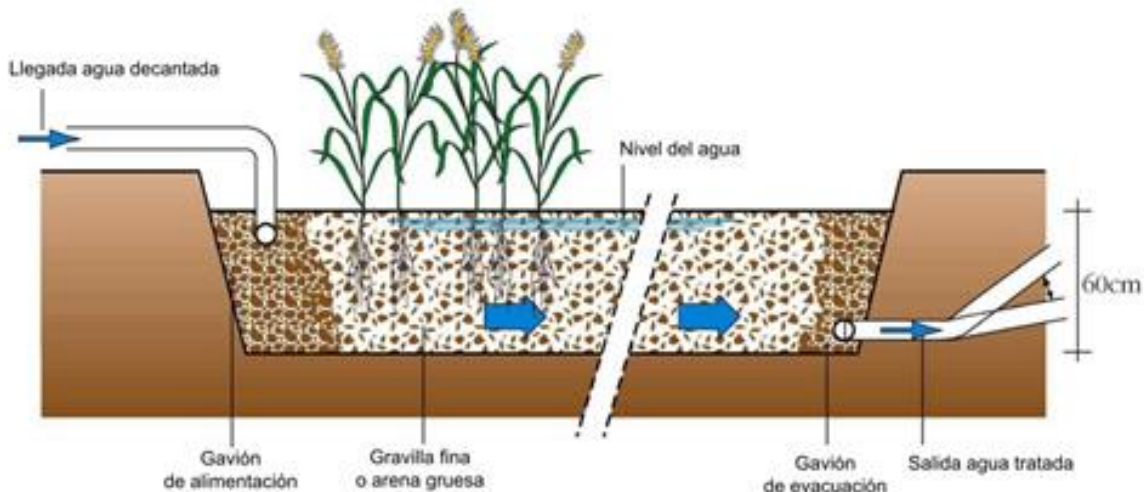
IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA PILOTO CON LAS ESPECIES SELECCIONADAS CARRIZO, PAPIRO Y TOTORA.

3.1 METODOLOGÍA Y RESULTADOS

3.1.1 Metodología y ejecución para el desarrollo de los tres humedales artificiales.

Como lo establece Seoánes (1999), para la construcción de los humedales artificiales, se debe tener en cuenta los componentes que conforman este sistema (figura 11), como el medio de distribución, la adquisición del material filtrante, una división que separe el medio de distribución del medio filtrante, además del medio de soporte, y la conexión de dispersión de agua para cada tanque.

Figura 11. Partes de un humedal

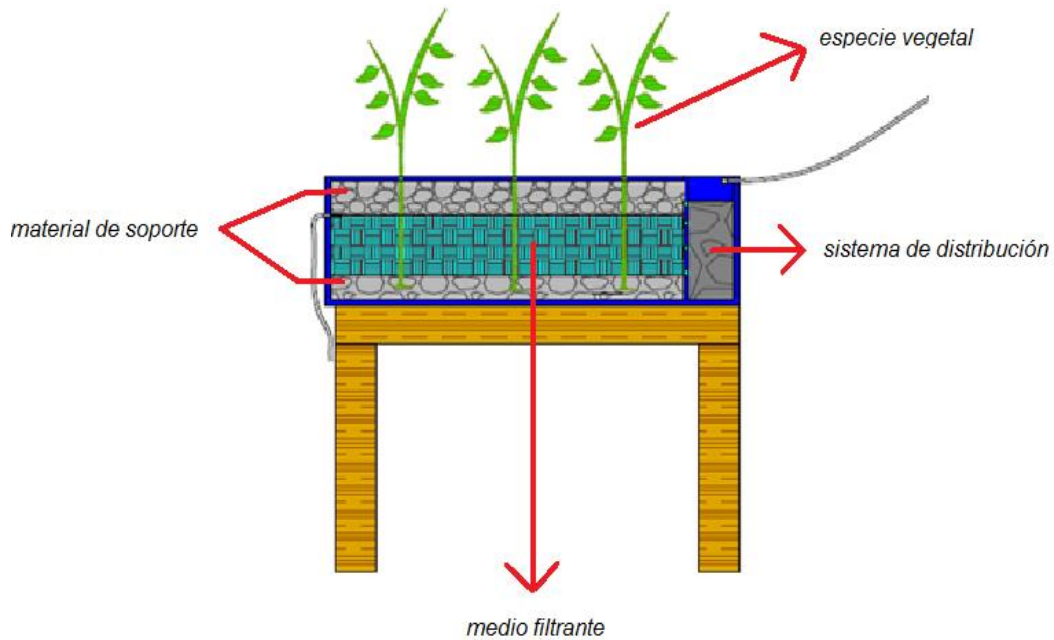


Fuente: <http://weschile.com/tecnologias/aguas-residuales/> 2018.

Es importante resaltar que para la adecuación del medio de soporte, en la presente investigación se incluyeron materiales no convencionales tomados a partir de residuos sólidos reutilizados, provenientes de la recolección y adecuación de botellas plásticas tipo PET (Polietileno tereftalato); con esta decisión se da origen a resultados que desde el punto de vista ambiental, además de aportar en el conocimiento de tecnologías para el tratamiento de agua, se establece un vínculo hacia la realización de residuos sólidos con potencial de aprovechamiento, los cuales normalmente terminan su vida útil en el relleno sanitario.

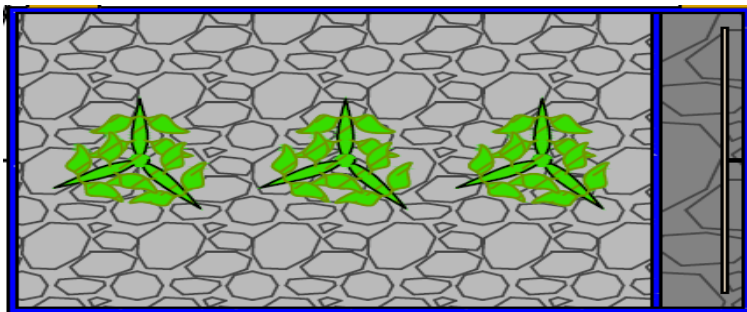


Figura 12. Componentes de los humedales artificiales escala piloto



Con el fin de dar estabilidad a las plantas en el medio de soporte plástico y garantizar el flujo subsuperficial, se utilizó material pétreo tipo triturado grueso en el fondo del humedal y en la superficie, como se muestra en las figuras 12 y 13.

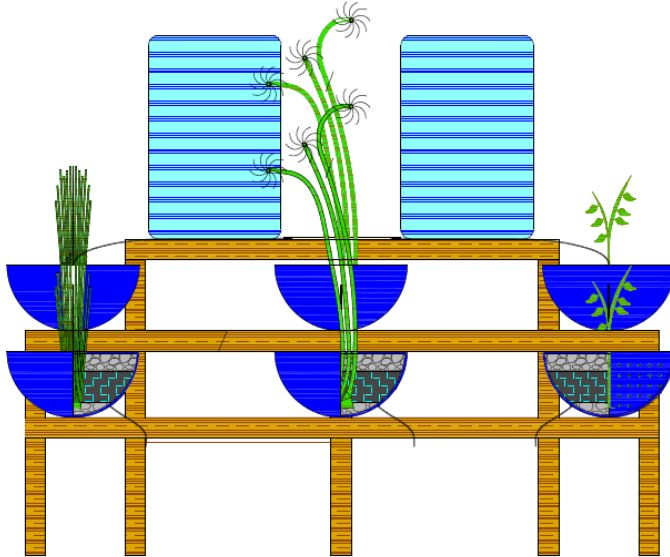
Figura 13. Material de soporte en el humedal (vista superior)



El humedal artificial comúnmente se construye utilizando materiales impermeables en la zona excavada de acuerdo a su volumen. En esta investigación, los humedales no se construyeron sobre el suelo, reutilizando tanques de PEHD polietileno de alta densidad, adecuados con cortes longitudinales como se muestra en la figura 14.



Figura 14. Estructura de los humedales (vista frontal)



Para facilitar la instalación del medio filtrante, las botellas PET, se cortaron y conformaron con la ayuda de amarres plásticos, buscando darles similitud con los elementos que comercialmente se los conoce como rosetones. Esto además maximiza la densidad del material manteniendo el área efectiva. La adecuación del material de soporte se muestra en la figura 15 y 16.

Figura 15. Rosetones de PET





Figura 16. Conformación del medio filtrante del humedal.



Una vez conformado la estructura de soporte de los humedales, se procedió al trasplante de las especies vegetales seleccionadas, las cuales se adquirieron con anterioridad para poder iniciar el proceso de preinoculación, poniendo en contacto a las plantas con agua residual efluente del sistema en una mezcla con agua lluvia. Figura 17.

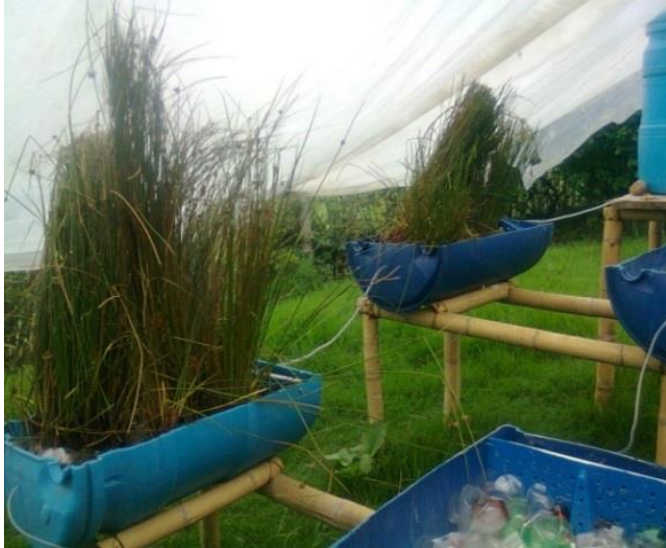
Figura 17. Especie Carrizo





Universidad
Tecnológica
de Pereira

Figura 18. Especie Totora



En las figuras 17, 18 y 19 se presentan imágenes del trasplante en los humedales artificiales, del Carrizo (*Phragmites australis*), la Totora (*Typha*) y el Papiro (*Cyperus Papyrus*), respectivamente.

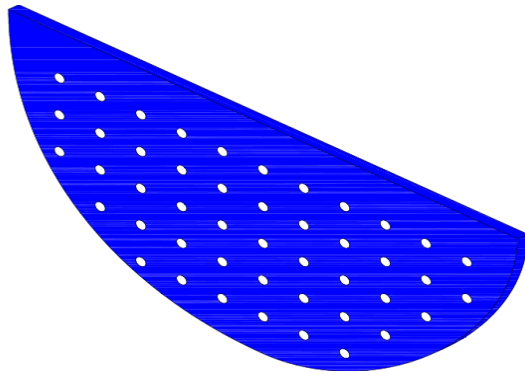
Figura 19. Especie vegetal papiro





De manera paralela, se estableció una configuración de humedal únicamente con medio filtrante, con el fin de correlacionar y establecer la acción de los humedales con respecto a las plantas en la remoción de las cargas orgánicas. Para la instalación del sistema de distribución en cada tanque se implementó, además, una pared plástica con perforaciones para permitir el paso del agua residual a lo ancho del humedal, y así garantizar un flujo tipo pistón Figura 20.

Figura 20. División plástica perforada.



Para buscar una estabilización de los sistemas se realizó una inoculación durante 14 semanas agregando porcentajes de agua residual proveniente de la laguna de maduración, mezclada con agua lluvia recolectada en un tanque. Los porcentajes utilizados se indican en la siguiente tabla:

Tabla 3. Porcentajes de agua para estabilización de humedales

Semana	Agua residual (%)	Agua lluvia (%)
1	0	100
2	0	100
3	10	90
4	20	80
5	30	70
6	40	60
7	50	50
8	60	40
9	70	30
10	80	20
11	90	10
12	100	0
13	100	0
14	100	0

Durante la parte inicial del proceso se notó en las diferentes especies signos negativos como: caída de hojas, inclinación de tallos y decoloración. Sin embargo, a partir de la semana 8 se



notó nuevamente el retoño de las plantas y el crecimiento de las mismas como se muestra en la figura 21.

Figura 21. Estado de plantas al final de la estabilización.



3.2 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

La puesta de plantas emergentes como las usadas en la presente investigación, es de vital importancia como lo afirma Lara (1998e), estas permiten velocidades bajas, así como el depósito de materiales suspendidos. La materia orgánica propia del agua residual, contiene carbono, nutrientes que son incorporados a los tejidos de las plantas. “El escape de oxígeno desde las estructuras subsuperficiales de las plantas, oxigena otros espacios dentro del sustrato. El tallo y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos” (Lara, 1998, pp. 9-8).

En cuanto a la selección de las plantas para cada uno de los humedales, se escogió carrizo, totora y papiro; las dos primeras son típicas para tratamiento de aguas residuales y fáciles de encontrar a nivel rural en la región de Nariño. Con respecto al papiro, a pesar que la planta no es endógena, se ha convertido en una usual planta ornamental por lo cual se puede considerar este tipo de aporte al humedal artificial.

Se esperaba evidenciar un impacto negativo sobre las especies vegetales teniendo en cuenta el trasplante y la alimentación en condiciones de alta humedad. Se presentó marchitamiento en las hojas del carrizo principalmente, probablemente, porque este tipo de planta a diferencia de la Totora y el Papiro, provenía de un suelo con un nivel menor de humedad. El papiro, aunque no es una de las plantas típicas para el tratamiento de agua residual, ha mostrado una adaptabilidad significativa evidenciada en su crecimiento, color y en el inicio de nuevos brotes.



Universidad
Tecnológica
de Pereira

PULIMENTO DE MATERIA ORGÁNICA CON HUMEDALES FSS EN FRIGOVITO S.A.

Para mantener flujo constante, se adecuó un sistema de almacenamiento elevado, desde el cual se alimentaron los humedales por gravedad. El caudal controlado se ajustó a partir de aforos volumétricos permanentes y el manejo de válvulas adaptadas a la entrada de cada humedal. El almacenamiento fue alimentado a su vez con la ayuda de una bomba sumergible, desde el efluente de la laguna de maduración de la PTAR existente.

A partir de la tercera semana se notó con claridad la presencia de biopelícula adherida al medio de soporte, la cual fue creciendo en densidad a medida que se continuó con el proceso de adaptación. Teniendo en cuenta que se trata de un flujo subsuperficial, se podría establecer que la biopelícula actúa de manera anaerobia, pero teniendo en cuenta que la profundidad del medio es baja y que el material superior es triturado grueso, con una buena relación de vacíos, también se puede inferir que principalmente a nivel superficial podría contarse con tratamiento con características aerobias.

Como lo afirma Halverson (2004), cuando en un humedal el nivel del agua sobrepasa el nivel del medio se puede sentir malos olores lo cual facilita la presencia de vectores como mosquitos e insectos en general. Esto se evidenció en la fase inicial de inoculación, en la cual aún no se tenía el material triturado sobre el medio filtrante. Posteriormente al agregarse el triturado, este sirvió además para brindar estabilidad física al sistema, como también para garantizar el flujo subsuperficial y así lograr la minimización de olores y la presencia de vectores.



CAPITULO 4

EVALUACION DE LA REMOCIÓN EN CARGAS CONTAMINANTES MEDIDAS EN PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS DE DBO₅ Y DQO EN LOS TRES HUMEDALES ARTIFICIALES, CON EL PROPÓSITO DE DETERMINAR LA EFICIENCIA CON CADA ESPECIE VEGETAL

4.1 METODOLOGÍA

4.1.1 Análisis de los parámetros DBO₅ y DQO en cada uno de los humedales artificiales.

Teniendo en cuenta que las ecuaciones de diseño se adaptaron a las dimensiones de los tanques plásticos, en ellos, por medio de válvulas, se ajustó el caudal de trabajo de los humedales con aforos permanentes; se logró adoptar un protocolo de aforo con la ayuda de una probeta de 10 ml y un cronómetro para la toma de tiempo y con los cuales se ajustó a un tiempo de 5 segundos un volumen de 6 ml, equivalente a 1,2 ml/s.

Teniendo en cuenta que el caudal de trabajo para cada humedal es de 0,0011 L/s, prácticamente representado por un goteo constante; se decidió hacer un muestreo simple, considerando que además de esta circunstancia planteada, la composición del agua tratada es relativamente constante a través de un tiempo prolongado, con lo cual puede decirse que la muestra simple en un tiempo acumulado hasta alcanzar el volumen necesario, se convirtió en un intervalo de tiempo representativo para el estudio. Cabe anotar que, para conseguir el volumen necesario para la muestra, se debía recolectar el goteo por aproximadamente 30 minutos.

Los muestreos solo se iniciaron después del periodo de adaptación de las plantas, el cual fue de 14 semanas en los humedales construidos, en los cuales se evidenció de manera subjetiva el comportamiento de marchitamiento y readaptación de las plantas, así como la formación de la biopelícula en el material de soporte. Una vez contemplada la adaptabilidad de los sistemas se dio inicio al muestreo semanal para la caracterización de DBO₅ y DQO.

Las 10 muestras tomadas de manera semanal se llevaron bajo las indicaciones de transporte a los laboratorios de Calidad de Agua de la Universidad de Nariño, para el análisis correspondiente de DBO₅ por método estándar ASTM D888-05 por Luminiscencia y DQO por método estándar 215220-D Colorimétrico de reflujo cerrado.

4.2 RESULTADOS.

Los datos que se presentan a continuación en la tabla 4, son los resultados de los muestreos producto de las caracterizaciones tanto del afluente como del efluente del sistema de humedales.



Universidad
Tecnológica
de Pereira

PULIMENTO DE MATERIA ORGÁNICA CON HUMEDALES FSS EN FRIGOVITO S.A.

Con respecto al caudal de trabajo, de 0,0957 m³/día o 0,001108 l/s, y el cual se lo ajustó a la entrada de los humedales como se mencionó anteriormente, por medio de válvulas y se controló por aforos volumétricos tanto a la entrada y la salida de los sistemas, se evidenció de manera práctica con estos múltiples aforos, que no existía una diferencia representativa de los caudales de entrada y salida, por esta razón se los asumió como iguales, permitiendo concluir además, que para sistemas piloto con áreas superficiales pequeñas los caudales de afluente y efluente no difieren significativamente por factores como la evapotranspiración, sin embargo para sistemas construidos a escala real, este factor debe considerarse para la evaluación de cargas contaminantes.



Cuadro 1. Valores de concentración DBO y DQO de cada humedal

Muestra	Entrada (mg/L)		Salida (mg/L)				Salida (mg/L)			
	Entrada	Entrada	Totora	Papiro	Carrizo	Blanco	Totora	Papiro	Carrizo	Blanco
	DQO	DBO ₅	DQO				DBO ₅			
1	2989	1005	645	842	842	846	81	92	144	285
2	3661	899	1207	1159	1302	1262	268	224	325	452
3	2856	1129	884	860	932	934	204	234	251	379
4	3722	815	836	824	896	892	230	257	225	317
5	2996	732	573	478	478	598	116	91	78	202
6	3039	989	669	633	729	789	194	158	133	281
7	2745	1186	690	618	797	791	193	170	164	255
8	3164	725	690	753	672	785	210	201	200	289
9	3123	804	887	905	1030	1045	170	153	208	287
10	3070	886	681	690	609	738	187	198	188	321
Mínimo	2745	725	573	478	478	598	81	91	78	202
Máximo	3722	1186	1207	1159	1302	1262	268	257	325	452

Con los resultados mostrados en el cuadro 1, podemos observar que todos los valores mínimos cumplen la normatividad vigente, Resolución 0631 de 2015, Capítulo IV, Sector de Actividades productivas de agroindustria y ganadería, el cual en su artículo noveno establece que, para el beneficio dual la concentración máxima a verter debe ser de 450 mg/L en términos de DBO y de 800 mg/L en términos de DQO. Caso contrario sucede con los máximos obtenidos para DQO, los cuales sobrepasan las exigencias de norma.

Sin embargo, contemplando los resultados de carga y haciendo la respectiva transformación a concentraciones promedio, (cuadro 2), se podría afirmar que los sistemas presentan unas buenas remociones cumpliendo estos en su mayoría con las exigencias de la normatividad, denotando así una adecuada eficiencia en todas las especies.

Cuadro 2. Valores de carga contaminante de DBO y DQO de cada humedal

Muestra	CAUDAL (m ³ /día)	Entrada (Kg/día)		Salida (Kg/día)				Salida (Kg/día)			
		Entrada	Entrada	Totora	Papiro	Carrizo	Blanco	Totora	Papiro	Carrizo	Blanco
		DQO	DBO ₅	DQO				DBO ₅			
1	0,0957	0,286	0,096	0,062	0,081	0,081	0,081	0,008	0,009	0,014	0,027
2		0,350	0,086	0,116	0,111	0,125	0,121	0,026	0,021	0,031	0,043
3		0,273	0,108	0,085	0,082	0,089	0,089	0,020	0,022	0,024	0,036
4		0,356	0,078	0,080	0,079	0,086	0,085	0,022	0,025	0,022	0,030
5		0,287	0,070	0,055	0,046	0,046	0,057	0,011	0,009	0,007	0,019
6		0,291	0,095	0,064	0,061	0,070	0,076	0,019	0,015	0,013	0,027
7		0,263	0,114	0,066	0,059	0,076	0,076	0,018	0,016	0,016	0,024
8		0,303	0,069	0,066	0,072	0,064	0,075	0,020	0,019	0,019	0,028
9		0,299	0,077	0,085	0,087	0,099	0,100	0,016	0,015	0,020	0,027
10		0,294	0,085	0,065	0,066	0,058	0,071	0,018	0,019	0,018	0,031
Mínimo		0,263	0,069	0,055	0,046	0,046	0,057	0,008	0,009	0,007	0,019
Máximo		0,356	0,114	0,116	0,111	0,125	0,121	0,026	0,025	0,031	0,043
Prom. Carga		0,300	0,088	0,074	0,074	0,079	0,083	0,018	0,017	0,018	0,029
Prom. Concentració		3136,50	917,00	776,20	776,20	828,70	868,00	185,30	177,80	191,60	306,80



Con los anteriores datos mostrados en el cuadro 1 y 2, se calculó el porcentaje de remoción para los parámetros DQO y DBO₅ de los humedales en cada fecha, así como la media, la varianza y la desviación estándar, de acuerdo a lo mencionado por Romero (2004), lo anterior con el fin de identificar el grado de dispersión de los anteriores datos respecto a la media, de lo cual se denotó que no hay significancia de variación entre los datos promedios obtenidos, como se muestra en el cuadro 3.

Cuadro 3. Valores estadísticos y porcentajes de remoción de DBO y DQO de cada humedal

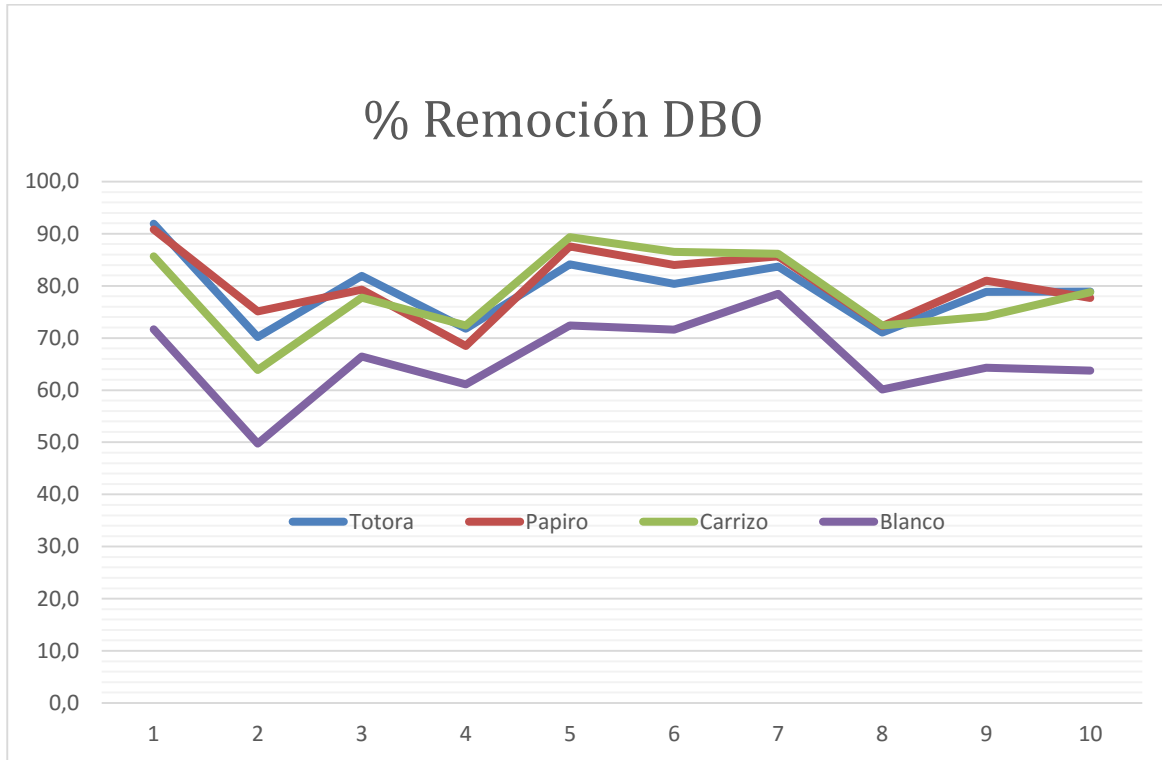
	%Remoción DQO				%Remoción DBO			
	Totora	Papiro	Carrizo	Blanco	Totora	Papiro	Carrizo	Blanco
	78,4	71,8	71,8	71,7	91,9	90,8	85,7	71,6
	67,0	68,3	64,4	65,5	70,2	75,1	63,8	49,7
	69,0	69,9	67,4	67,3	81,9	79,3	77,8	66,4
	77,5	77,9	75,9	76,0	71,8	68,5	72,4	61,1
	80,9	84,0	84,0	80,0	84,2	87,6	89,3	72,4
	78,0	79,2	76,0	74,0	80,4	84,0	86,6	71,6
	74,9	77,5	71,0	71,2	83,7	85,7	86,2	78,5
	78,2	76,2	78,8	75,2	71,0	72,3	72,4	60,1
	71,6	71,0	67,0	66,5	78,9	81,0	74,1	64,3
	77,8	77,5	80,2	76,0	78,9	77,7	78,8	63,8
MINIMO	67,0	68,3	64,4	65,5	70,2	68,5	63,8	49,7
MAXIMO	80,9	84,0	84,0	80,0	91,9	90,8	89,3	78,5
MEDIA	75,3	75,3	73,7	72,4	79,3	80,2	78,7	66,0
VARIANZA	21,0	24,1	40,7	22,7	46,6	49,6	66,8	65,7
DES. ESTAN.	4,6	4,9	6,4	4,8	6,8	7,0	8,2	8,1

4.3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Los resultados de remoción en porcentaje se graficaron para las tres especies, con el fin de facilitar el análisis del comportamiento de cada una de las muestras tomadas. Graficas 1 y 2.



Gráfica 1. Comportamiento de las tres especies vegetales frente al parámetro DBO_5

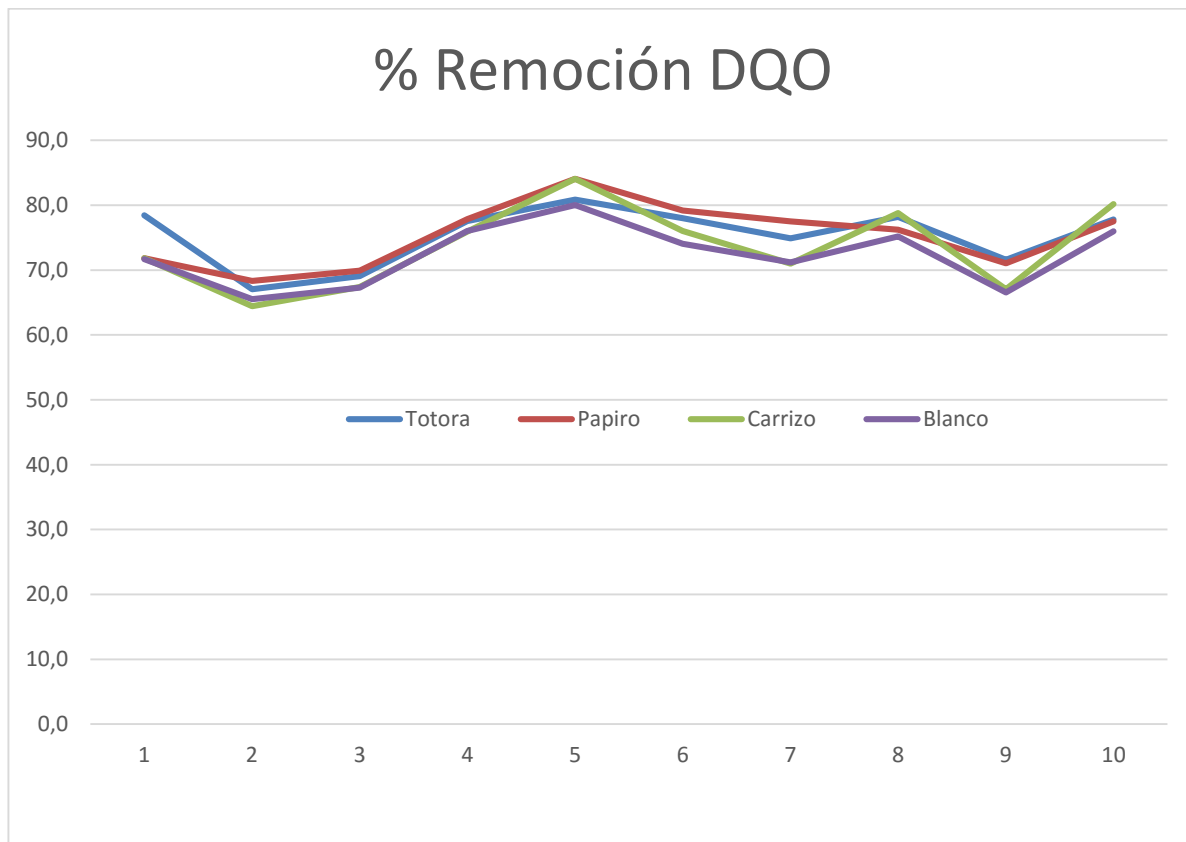


En la gráfica 1 se puede observar que el rendimiento de los humedales con las tres especies e incluido el blanco, son similares. El comportamiento de ascenso y descenso en las curvas es similar, dado a que en la mayoría de los periodos registrados se evidencia un ascenso o descenso de las remociones, manejándose de manera similar en todos los sistemas estudiados. Solo se evidenció un pico de descenso significativo en la muestra 2, posiblemente por estar al final del periodo de estabilización del sistema, o por pertenecer todavía al mismo. Cabe anotar que durante las 14 semanas de estabilización se tomaron algunas muestras aleatorias de observación, sin embargo, no se tienen en cuenta para el análisis debido a que no fueron sistemáticas por costos. De igual manera, es importante aclarar que, aunque durante el periodo de estudio se presentaron algunas lluvias aisladas, se estableció el cronograma de muestreo de tal manera que estas no afectaran por dilución de manera representativa las muestras.

Se puede afirmar que la especie que presenta mayor inestabilidad es el carrizo, ya que muestra valores máximos y mínimos alejados de la media, a diferencia de las otras dos especies cuyos datos muestran mayor cercanía a la media de cada uno.



Gráfica 2. Comportamiento de las tres especies vegetales frente al parámetro DQO.

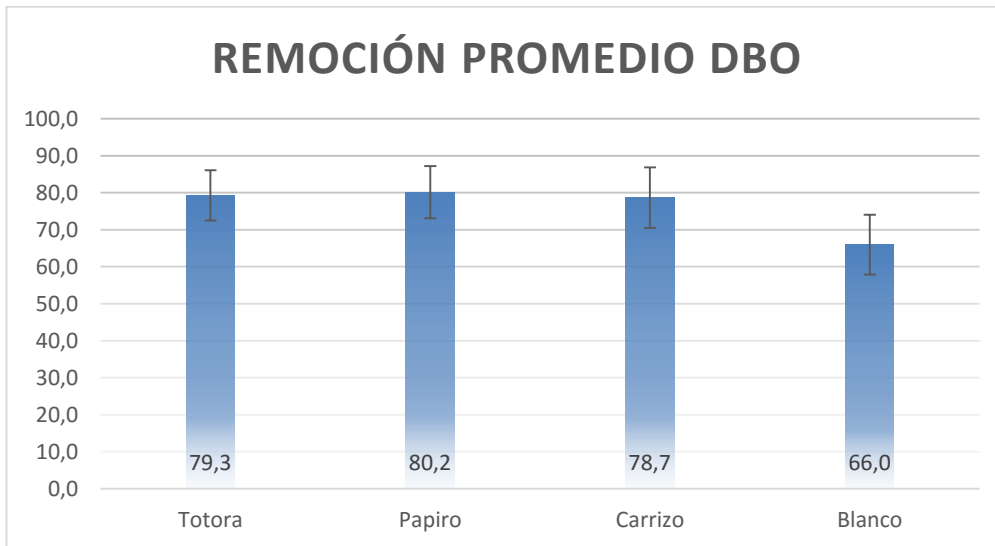


El comportamiento de las tres especies frente a los dos parámetros estudiados en esta investigación es similar, sin embargo, en cuanto al parámetro DQO, se puede afirmar que el sistema presenta una mayor estabilización, ya que no alcanza picos extremos, manteniéndose cerca a la media, la cual resulta cercana para los tres humedales e inclusive para el sistema sin especie vegetal. Grafica 2.

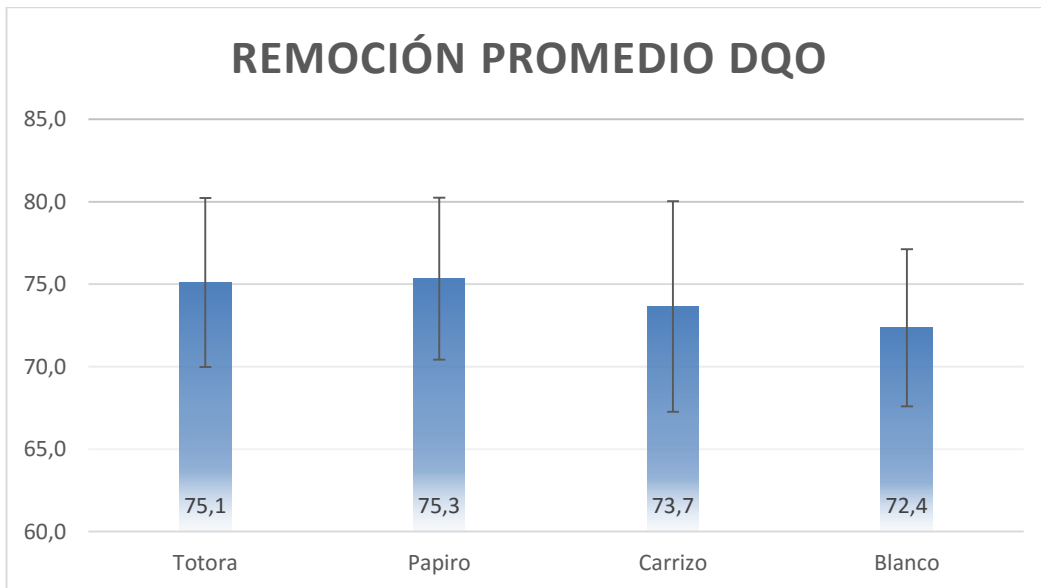
Se puede afirmar que las tres especies (totora, papiro y carrizo) presentan un promedio de remoción más alto para el parámetro de DBO que para el de DQO, indicando la presencia de sustancias susceptibles a ser oxidadas más biológicamente que químicamente. Por otra parte, se puede indicar que el sistema sin plantas, obtuvo también excelentes remociones, pero en comparación con los humedales siempre fueron menores a estos.



Gráfica 3. Remociones promedio DBO



Gráfica 4. Remociones promedio DQO



Se puede observar en la gráfica 3 que en el parámetro de DBO_5 , la especie que realiza una mejor remoción es el papiro, lo cual hace de esta una investigación relevante, ya que esta no es una de las más usadas en este tipo de tratamiento y como se mencionó anteriormente hoy en día se emplea como planta ornamental, permitiendo inferir que el humedal artificial podría tener este valor agregado. Gran parte de las investigaciones con humedales artificiales están hechas con las especies también usadas en la presente investigación, como son la totora y el carrizo, ya que como lo establece Wong, Breen, Somes y Lloyd (1999), se conoce que estas dos especies, brindan un ambiente adecuado para los microorganismos, lo que se constituye



Universidad
Tecnológica
de Pereira

como un papel vital para las plantas, maximizando de este modo la remoción del contaminante.

En una investigación llevada a cabo en 1999 en España por Lahora, se toman dos especies para estudio de remoción, obteniendo como uno de los principales resultados que las macrófitas phragmites australis (carrizo) y la typha (totora), no pueden resistir concentraciones de alto valor, lo cual se desvirtuaría con lo comprobado en este estudio, ya que se puede observar que la entrada al sistema de humedales posee concentraciones de DBO5 y DQO altas, por ser aguas residuales industriales originadas en el beneficio animal y a pesar de contar con un sistema de tratamiento de lagunaje. Los resultados obtenidos en la presente investigación, permitirían pensar en adelantar futuras investigaciones con mayor profundidad y con diferentes concentraciones de afluente a los humedales, para así generar conclusiones a nivel general sobre la posibilidad de operación y tratamiento de estos sistemas.

Es importante también recalcar que, aunque por un determinado periodo las especies presentaron marchitez, en su proceso de adaptación, mostraron una alta resiliencia, reflejado no solo en su biomasa, aspecto y color, sino también en los resultados de remoción obtenidos por parte de cada una de estas. Cabe resaltar que la de las tres especies, la única que no presento síntomas negativos fue el papiro, y por el contrario fue la que presento retoños tempranos y un mayor aumento de biomasa como se evidencia en la siguiente figura.

Figura 22. Registro fotográfico de la evolución del papiro





En la región, la investigación en este tipo de tratamientos es relativamente nueva, y por ende carece de información contextualizada para ser aplicada. Además, existe una buena gama de especies a estudiar con características apropiadas para hacer parte de un humedal artificial; es por eso que en este trabajo se resalta el hecho que la especie *Cyperus papyrus* (papiro), puede ser utilizada en la depuración de aguas residuales con contenido de materia orgánica tanto biodegradable como no biodegradable, se acepta que tiene un rendimiento muy similar al de las otras dos especies contempladas, lo que la convierte en una opción adecuada para el tratamiento de aguas residuales de este tipo pero contando con el valor agregado de su buena aceptación como planta ornamental, lo cual haría de esta una especie atractiva para incluir en sistemas expuestos.

La remoción de DQO y DBO por parte del humedal sembrado papiro fue muy buena, aunque no se han realizado muchos estudios con ésta especie, se encontró una investigación realizada en Camerún en 2011, para la cual se utilizó el Papiro en un medio filtrante de arena para tratar agua residual doméstica a escala piloto y se obtuvo una eficiencia de remoción para DBO₅ y DQO de 78,23% y 71,38% respectivamente, Fonkou (2011) concluyó que una condición importante a destacar fue la temperatura, ya que el proceso fue realizado a una temperatura de 20,8°C lo cual favoreció el desarrollo de las plantas. En la presente investigación los porcentajes de remoción son superados lo cual puede atribuirse al cambio de material filtrante, el que pudo llegar a intervenir en los resultados de remoción, aportando una mayor adherencia, brindando unas mejores condiciones para los microorganismos.

La especie papiro al encontrarse en distintas densidades, suelen indicar distinta remoción, lo cual se comprobó por Rahmadyanti y Edi en un estudio realizado en Indonesia en 2012, donde se obtuvo una remoción máxima para los humedales con 12, 9 y 6 plantas (por metro cuadrado) de 93,17%, 88,05% y 86,28% respectivamente, en un medio de grava y suelo de jardín. De acuerdo con la anterior información, la remoción que se obtuvo en la presente investigación fue cercana debido a la densidad que fue aproximadamente de 3 plantas/m², es decir que, si se plantaran más, la eficiencia de remoción podría ser mayor.

Los resultados de remoción media para los dos parámetros DBO₅ y DQO son altos ya que se encuentran cercanos al 80 y 75 % respectivamente, esto puede deberse a la incorporación de oxígeno realizada por las especies, como lo afirma Jensen (2001), estas plantas mediante el proceso de respiración mandan el oxígeno desde sus tallos a las raíces, además de proveer sustratos a los microorganismos, facilitando de esta manera la degradación de los componentes orgánicos.

La remoción en la presente investigación tuvo un alto valor para DBO y DQO en comparación a un estudio realizado en Dakota en 2001 donde se utilizaron totoras en humedales artificiales para el efluente proveniente de una casa lechera. La remoción de DBO se encontró en rangos del 43,2% al 87,6% y para DQO desde 29,7% a 60,9%. La remoción de DBO y DQO en la presente investigación para el humedal sembrado con dicha especie vegetal fue mayor, debido a que las condiciones del ambiente de donde fueron extraídas (humedales del relleno Antanas) hasta el lugar donde se ubicaron los humedales son similares, lo cual facilita la adaptación. Es importante resaltar que la presente investigación se desarrolló en un sitio donde la temperatura



Universidad
Tecnológica
de Pereira

PULIMENTO DE MATERIA ORGÁNICA CON HUMEDALES FSS EN FRIGOVITO S.A.

promedio fue de 12°C logrando una alta eficiencia de remoción, lo que indicaría que las temperaturas bajas no son una restricción para la implementación de humedales artificiales.

Según la EPA, otro género de la familia de la especie (*Scirpus robustus*) fue utilizada en una investigación en Arcata (Estados Unidos) en 1993, donde se construyeron humedales artificiales para tratar el agua residual de San Francisco, en este proceso se logró una remoción del 77% de DBO. A diferencia de la presente investigación, las especies se ubicaron en la bahía de Humbolt (California) donde recibían gran cantidad de agua marina y un efluente de agua residual lo cual pudo afectar en la remoción de DBO.



CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta la hipótesis donde se planteó que el carrizo podría presentar una mayor remoción, una vez analizados los resultados se determinó que fue la especie vegetal papiro la que arrojó mejores remociones en términos de DBO, sin embargo, la diferencia con respecto a las otras especies, en especial con la totora no es significativa en los parámetros de estudio.

La utilización de materiales reciclables cumplió con el propósito estructural y de medio filtrante, generando un comportamiento adecuado, lo cual permite tenerlo como alternativa de reúso para este tipo de tratamientos, además que ayuda a mitigar los impactos negativos al medio ambiente.

El medio escogido como material filtrante (PET) es una opción adecuada para el reemplazo de grava o suelo usados comúnmente, ya que, desde el comienzo del proceso de inoculación, se observó la formación de biopelícula, lo cual favoreció en los resultados de las remociones por cada especie.

En cuanto a la adaptación de las plantas al medio, se afirma que las especies totora y carrizo son las más impactadas durante el trasplante y la adaptación al agua residual, y por el contrario en la especie papiro demostró una alta tasa de resiliencia.

En cuanto a la remoción de la DBO y DQO se identificó que los humedales que tuvieron mejor desempeño fueron los sembrados con totora y papiro, destacando el proceso de adaptación de esta última, la cual tiene como valor agregado el considerarse como especie introducida y ornamental, por lo cual haría más llamativa la implementación en humedales artificiales. En todos los casos los humedales con plantas presentaron mayores remociones con respecto al humedal sin especie vegetal (blanco); sin embargo, se puede considerar que con los sistemas sin material vegetal también se puede lograr buenas remociones en términos de DBO y DQO.

Se destaca que los humedales artificiales estudiados se implementaron en clima frío, con una temperatura ambiente promedio de 10 – 12 °C, comportándose eficientemente, lo cual indica que este tipo de sistemas funcionan adecuadamente para este tipo de climas.

La investigación arrojó resultados positivos de remoción de DBO y DQO, logrando que en promedio todas las especies den cumplimiento con los límites máximos permisibles de la Resolución 0631 de 2015, llegando a obtener valores en concentración medios significativos de 177,8 mg/L en DBO₅ y de 776,2 mg/L en DQO y una eficiencia general en DBO y DQO del sistema de tratamiento de FRIGOVITO S.A. superior al 98% y 96% respectivamente.

De establecerse como una solución complementaria de tratamiento a escala real, se necesitaría un área aproximada de 269 m², equivalente a un área disponible en la empresa de 12m de ancho x 22m de largo, contigua a la laguna de maduración, por lo cual se convierte en una



Universidad
Tecnológica
de Pereira

alternativa a evaluar desde el punto de vista de inversión por parte de la empresa FRIGOVITO S.A.

El humedal sembrado con la especie papiro es la que presenta los máximos valores de remoción, lo cual hace que esta investigación cobre mayor importancia porque además de que ésta es usada por lo general como planta ornamental, no es común que se la emplee para el tratamiento de aguas residuales, estando la totora y el carrizo como las más implementadas; de acuerdo a esto, se resalta que la especie *Cyperus papyrus* (papiro), puede ser utilizada en la depuración de aguas residuales con contenido de materia orgánica tanto biodegradable como no biodegradable, se acepta que tiene un rendimiento muy similar al de las otras dos especies contempladas, lo que la convierte en una opción adecuada para la depuración de aguas de este tipo, además de que sería esta especie ornamental atractiva para incluir en sistemas expuestos.

Teniendo en cuenta que las macrófitas *phragmites australis* (carrizo) y la *typha Spp* (totora) utilizadas en este estudio, estuvieron alimentadas con aguas residuales industriales originadas del beneficio animal y en donde sus concentraciones son altas a pesar de contar con un sistema de tratamiento de lagunaje, se puede mencionar que a concentraciones altas los humedales funcionan adecuadamente contrario a lo mencionado por la investigación llevada a cabo en 1999 en España por Lahora, ya que estas pueden resistir concentraciones de alto valor.



Universidad
Tecnológica
de Pereira

6.2 RECOMENDACIONES

Con el fin de seleccionar las plantas para los humedales artificiales se recomienda para futuras investigaciones, indagar con otras especies que puedan adaptarse de una manera adecuada a este tipo de sistemas.

Es importante caracterizar otro tipo de parámetros como son los nutrientes y de esta manera establecer el potencial de reúso que tendrían estas aguas para algún tipo de cultivos vegetales.

En futuras investigaciones sería importante probar con distintas formas y materiales para la conformación del medio filtrante y así conocer la influencia que este factor tiene en la eficiencia de remoción en los humedales.

Como tratamiento de pulimento el sistema de humedales piloto que se empleó en la presente investigación, se podría implantar como sistemas de tratamiento de viviendas unifamiliares, ya que las estructuras plásticas se pueden adaptar a escala real, pues los caudales se los podría considerar similares a los del presente estudio.

Sería necesario adelantar futuras investigaciones que profundicen en sistemas con consideraciones de dimensionamiento para humedales, pero sin especie vegetal, revisando remociones específicas y teniendo en cuenta parámetros como la porosidad, el medio filtrante o el espesor de lecho filtrante.



REFERENCIAS

- Castaño, J. (2011). Sistemas de humedales construidos pretratamientos básicos. Seminario Humedales Artificiales para el Tratamiento de Aguas Residuales.
- Huertas J. & Obando A. (2009). Evaluación de la remoción de contaminantes para el tratamiento de lixiviados utilizando diferentes especies vegetales en humedales artificiales a escala piloto, en el relleno sanitario Antanas del municipio de Pasto-Nariño (Tesis de pregrado). Universidad Mariana, Pasto, Colombia.
- Lahora A. (2003). Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: La EDAR de los Gallardos (Armería). Revista S.A. GALASA, 1(1), 99-112. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2244838>
- Lahora, A (s.f.). Los humedales artificiales como tratamiento terciario de bajo coste en la depuración de aguas residuales urbanas. Gestión de aguas del Levante Almeriense, S.A. España.
- Lara, B. (1999). Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales (Tesis de maestría). Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- Matthys A., Parking G. & Wallace S. (s.f.). A comparison of constructed wetlands used to treat domestic wastes: conventional, drawdown, and aerated systems. 1-8. Recuperado de <http://www.naturallywallace.com/docs/Technical%20Paper%20-%20IWA%202000%20Constructed%20Wetlands%20to%20Treat%20Dom.pdf>
- Oliva, C. (2003). Evaluación sobre el humedal artificial subsuperficial en el tratamiento de las aguas residuales domésticas generadas en el centro ambiental Chimayoy municipio de Pasto (Tesis de pregrado). Universidad Mariana, Pasto, Colombia.
- Paredes, D. (2014). Tipo de humedales y mecanismos de remoción. Seminario Humedales Artificiales para el manejo, tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua. 1-182. Recuperado de https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/sistemas-de-humedales/files/assets/common/downloads/publication.pdf
- Romero, J. (Ed.). (2004). Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Seoánes, M. (1999). Aguas residuales: tratamiento por humedales artificiales, Fundamentos científicos, Tecnología, Diseño. Madrid: Ediciones Mundi Prensa.
- Viveros, D. (2016). Posttratamiento de aguas residuales en plantas de beneficio de ganado porcino y bovino utilizando humedales artificiales (Tesis de maestría). Universidad de Manizales, Manizales, Colombia.



Universidad
Tecnológica
de Pereira

PULIMENTO DE MATERIA ORGÁNICA CON HUMEDALES FSS EN FRIGOVITO S.A.

Wallace S. (2003). *Constructed Wetlands: Design Approaches*.



BIBLIOGRAFÍA

Asturnatura.com. Recuperado de <http://www.asturnatura.com/especie/phragmites-australis.html>

Camacho, José (1998). Eliminación biológica de fósforo en aguas residuales urbana (Tesis doctoral). Universidad de Castilla, La Mancha, España.

Curt M (s.f.). Manual de Fito depuración.

Conte, G., Martinuzzi, L., Giovannelli, F., Masi, A., Pucci, B. (2000). Constructed wetlands for wastewater treatment in central Italy. Regional Environmental Protection Agency. Prato. Italy.

Cheremisinoff, N (1998). Biotechnology for waste and wastewater treatment, Noise Publications, 1998.

EPA. Environmental Protection Agency. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment and Wildlife Habitat. Port Blakely Mill Company. USA.1993. Arcata, California – A Natural System for wastewater reclamation and resource enhancement.

Fonkou, T., Ivo, S., Lekeufack, M., Mekontso, F., Amougou, A. (2011). Potential of *Cyperus Papyrus* in Yard-Scale Horizontal Flow Constructed Wetland for Wastewater Treatment in Cameroon. University of Dschang. Cameroon.

Garmendia A. Evaluación de Impacto ambiental: Elementos del medio.

Halverson, N (2004). Review of Constructed Subsurface Flow vs. Surface Flow Wetlands. Westinghouse Savannah River Company. Aiken. USA.

Ingeniería Hidráulica y Ambiental. Metodología para el diseño de humedales con flujo subsuperficial horizontal.

Jensen, L. (2001). Pilot scale constructed wastewater treatment wetland. Center for water and watershed studies. University of Washington. USA.

Paz, M., Gorga, M. (2005). Biorremediación aplicable humedales artificiales. Instituto juvenilia Valencia. Argentina.

Planthogar.net. Recuperado de <http://planthogar.net> Plantas de Jardín, Papiro, *Cyperus papyrus*

Rahmadyanti, E., Edi, W. (2012). Domestic Wastewater Treatment using Constructed Wetland as a Development Strategy of Sustainable Residential. University State of Surabaya. Indonesia.



Universidad
Tecnológica
de Pereira

PULIMENTO DE MATERIA ORGÁNICA CON HUMEDALES FSS EN FRIGOVITO S.A.

Rigola, M. (1989). Tratamiento de Aguas Industriales: Aguas de Proceso y Residuales, MARCOMBO S.A.

Wong, T., Breen, P., Somes, N., Lloyd, S. (1999). Managing Urban Stormwater Using Constructed Wetlands. Monash University. Australia.