

**EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DE  
LA PLANTA DE BENEFICIO ANIMAL DEL MUNICIPIO DE TIMBIO, CON  
SISTEMAS DE HUMEDALES CONSTRUIDOS A ESCALA PILOTO CON DOS  
TIPOS DE MACROFITAS.**

**JULIÁN DAVID ALVARADO ALVARADO  
ANDREA STEFANIA SALAZAR QUICENO**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL,  
PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL  
POPAYÁN  
2017**

**EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DE  
LA PLANTA DE BENEFICIO ANIMAL DEL MUNICIPIO DE TIMBIO, CON  
SISTEMAS DE HUMEDALES CONSTRUIDOS A ESCALA PILOTO CON DOS  
TIPOS DE MACROFITAS.**

**JULIÁN DAVID ALVARADO ALVARADO  
ANDREA STEFANIA SALAZAR QUICENO**

**Informe final de trabajo de grado en modalidad de investigación, presentado  
como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero e Ingeniera  
Ambiental**

**Director  
Ph.D JUAN CARLOS CASAS ZAPATA  
Departamento de Ingeniería Ambiental y Sanitaria**

**Codirector  
Msc. WILSON ANDRÉS BETANCOURT VILLALOBOS  
Coordinador Programa de Ingeniería Ambiental**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL,  
PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL  
POPAYÁN  
Marzo 2017**

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

---

---

**Firma del director**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

**Popayán, 09 Marzo de 2017**

## **DEDICATORIA**

A Dios por darme la sabiduría para enfrentar cada obstáculo como un reto a superar. "Tú eres mi refugio, mi fortaleza, el Dios en quien confío".

Salmo 91

A mi madre por creer en mí y apoyarme incondicionalmente, por ser mi ejemplo y orgullo más grande.

A mis hermanos Alejandra, German, Juan y Diana para que algún día los pueda ver cumpliendo sus sueños.

A mis familiares y amigos porque siempre estuvieron presentes apoyándome compartiendo una sonrisa conmigo.

Al Grupo de Estudiantes de Ingeniería Ambiental GEIA, por tantas lecciones de vida y que perdure para siempre.

**Julián David Alvarado Alvarado**

A Dios por ser mi guía, mi fortaleza, por cubrirme con su manto y darme la sabiduría para enfrentar este camino.

A ese ser que desde el cielo me acompaña, mi abuelito, para ti esto porque gracias a ti estoy aquí.

A mi padre por su apoyo y a mi madre por ser mi motor de vida, el ejemplo a seguir.

A mis amigos y familiares por el apoyo, por cada lección y cada consejo recibido.

A mis docentes por esa gran labor, pasión y dedicación que ponen en cada conocimiento brindado.

Al Grupo de Estudiantes de Ingeniería Ambiental GEIA, por permitirme vivir esta etapa de liderazgo, pasión y compromiso por la Ingeniería Ambiental, por formar en mí una gran mujer llena de aspiraciones, ideales y propósitos.

**Andrea Stefania Salazar Quiceno**

## **AGRADECIMIENTOS**

A nuestras familias por ser nuestra fuente de inspiración, por su sacrificio y apoyo.

A nuestro Director Ph. D. Juan Carlos Casas Zapata por la confianza depositada, sus valiosos aportes y acompañamiento, en pro de formarnos como unos excelentes profesionales.

A el M.Sc. Edwin Rengifo Canizales y demás docentes del programa de Ingeniería Ambiental, por sus asesorías e interés en este proyecto.

Al personal de la Vice rectoría de Investigaciones que nos guiaron en este difícil pero satisfactorio proceso.

A la Ingeniera Adriana Sarria Secretaria de Desarrollo Agropecuario Ambiental y Económico de Timbio y personal a su cargo, por disposición y apoyo para hacer realidad la ejecución de esta investigación.

A la Abogada María del Mar Muñoz, personal del área de planeación y tesorería de la Alcaldía Municipal de Timbío por su apoyo y colaboración.

Al todo el personal que labora en la planta de beneficio animal de Timbio por su acompañamiento y colaboración.

Al Ingeniero Yesid Carvajal director de la CRC por su confianza y apoyo en esta investigación.

A Diego Zuluaga encargado del Laboratorio de la CRC, por su paciencia y disposición continúa.

A todas las personas que apoyaron este sueño, por sus consejos y palabras de aliento.

## CONTENIDO

RESUMEN.....	14
INTRODUCCIÓN.....	15
1. ANTECEDENTES.....	16
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
3. JUSTIFICACIÓN.....	19
4. OBJETIVOS.....	20
4.1. OBJETIVO GENERAL.....	20
4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	20
5. MARCO TEORICO.....	21
5.1. SISTEMAS DE HUMEDALES CONSTRUIDOS.....	21
5.2. CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES CONSTRUIDOS.....	21
5.2.1 Humedales Construidos de Flujo superficial.....	21
5.2.2 Humedales Construidos de Flujo subsuperficial.....	21
5.3. COMPONENTES DE LOS SISTEMAS DE HUMEDALES.....	22
5.3.1 Sistemas de entrada y Salida del agua residual.....	22
5.3.2 Suelo y medio de soporte.....	22
5.3.3 Vegetación.....	22
5.3.4 Impermeabilización.....	23
5.3.5 Microorganismos y demás organismos que se desarrollan en los humedales.....	23
5.4. MECANISMOS DE DEPURACIÓN EN LOS HCs.....	23
5.5. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DE LAS AGUAS RESIDUALES.....	24
5.5.1 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> ).....	24
5.5.2 Demanda química de Oxígeno (DQO).....	24
5.5.3 Solidos suspendidos totales (SST).....	25
5.5.4 Grasas y aceites.....	25
5.5.5 pH.....	25
5.5.6 Temperatura.....	25

5.6. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL DE MATADEROS.....	25
6. METODOLOGÍA .....	27
6.1. ÁREA DE ESTUDIO .....	27
6.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE BENEFICIO .....	28
6.2.1 Pasos en el proceso de beneficio.....	29
6.3. DESCRIPCIÓN DE LA UNIDAD A ESCALA PILOTO .....	30
6.3.1 Tratamiento primario .....	32
6.3.2 Tratamiento Secundario .....	32
6.3.3 Sistema de Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial Horizontal	35
6.4. ALIMENTACIÓN DEL SISTEMA Y RECOLECCIÓN DEL ARI .....	36
6.4.1 Recolección de ARI.....	36
6.4.2 Alimentación.....	37
6.5. CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE .....	38
6.6. ACLIMATACIÓN.....	38
6.7. CAUDAL DE ALIMENTACIÓN.....	39
6.7.1 Caudal de alimentación HCFSSH .....	39
6.7.2 Caudal de alimentación del tratamiento primario y secundario .....	40
6.8. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS.....	40
6.9. ELECCIÓN DE MACROFITAS .....	41
6.10. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	41
7. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	42
7.1. CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DEL AFLUENTE Y EFLUENTE DEL SISTEMA A ESCALA PILOTO CON HCFSSH.....	42
7.1.1 Cálculo de la DBO <sub>5</sub> estimada y porcentajes de remoción teóricos. ....	42
7.2. EFICIENCIAS DE REMOCION.....	44
7.2.1 Demanda Biológica de Oxígeno DBO <sub>5</sub> .....	44
7.2.2 Demanda Química de Oxígeno DQO .....	47
7.2.3 Sólidos Suspendidos Totales SST .....	50
7.2.4 Temperatura.....	53
7.2.5 pH.....	54
8. CONCLUSIONES .....	55

9. RECOMENDACIONES.....56  
BIBLIOGRAFÍA.....57



## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Principales mecanismos de remoción y transformación de los .....	24
<b>Tabla 2.</b> Características generales de las aguas residuales del matadero.....	26
<b>Tabla 3.</b> Caracterización del agua residual industrial, planta de beneficio animal Timbio – Cauca.....	38
<b>Tabla 4.</b> Métodos de medición de parámetros fisicoquímicos .....	40
<b>Tabla 5.</b> Valores medios de los parámetros fisicoquímicos del afluente y efluente .....	42
<b>Tabla 6.</b> Valores medios de grasas y aceites del afluente y efluente .....	43
<b>Tabla 7.</b> Valores de significancia de Shapiro-Wilk (normalidad) y estadístico de Levene (igualdad de varianzas) para RemDBO <sub>5</sub> .....	45
<b>Tabla 8.</b> Valores de significancia de Shapiro-Wilk (normalidad) y estadístico de Levene (igualdad de varianzas) para RemDQO .....	48
<b>Tabla 9.</b> Valores de significancia de Shapiro-Wilk (normalidad) y estadístico de Levene (igualdad de varianzas) para RemSST .....	51

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Área de estudio .....	27
<b>Figura 2.</b> Diagrama de Flujo del proceso de sacrificio .....	28
<b>Figura 3.</b> Corrales de la planta de Beneficio animal municipio de Timbío.....	29
<b>Figura 4.</b> Unidad a escala piloto en AutoCad 3D. ....	31
<b>Figura 5.</b> Corte transversal desde el sedimentador y desde el FAFA. ....	33
<b>Figura 6.</b> Corte longitudinal sistema tratamiento primario y secundario.....	34
<b>Figura 7.</b> Corte longitudinal HCFSSH .....	35
<b>Figura 8.</b> Porcentajes de remoción promedios de DBO5 los HCFSSH.....	44
<b>Figura 9.</b> Diagrama de cajas y bigotes para los porcentajes de remociones de DBO <sub>5</sub> .....	46
<b>Figura 10.</b> Porcentajes de remoción promedios de DQO en los HCFSSH. ....	47
<b>Figura 11.</b> Diagrama de cajas y bigotes para los porcentajes de remociones de DQO.....	49
<b>Figura 12.</b> Porcentajes de remoción promedios de SST en los HCFSSH.....	50
<b>Figura 13.</b> Diagrama de cajas y bigotes para los porcentajes de remociones de SST .....	52
<b>Figura 14.</b> Comportamiento de la Temperatura .....	53
<b>Figura 15.</b> Comportamiento del pH .....	54

## LISTA DE FOTOS

<b>Foto 1.</b> Unidad a escala piloto construida. ....	31
<b>Foto 2.</b> Desde el FAFA a tanque de regulación.....	33
<b>Foto 3.</b> Unidad de tratamiento primario y secundario.....	34
<b>Foto 4.</b> Sistema de HCFSSH.....	36
<b>Foto 5.</b> Proceso de cernido y tamizado .....	36
<b>Foto 6.</b> Macro goteo a la salida de la tubería de 1". De tanque de almacenamiento a sedimentador. ....	37
<b>Foto 7.</b> Macro goteo del sistema de salida del tanque regulador de caudal.....	37

## LISTA DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Diseño de sedimentador primario y Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente FAFA.....	63
<b>Anexo 2.</b> Diluciones usadas en el proceso de aclimatación.....	69
<b>Anexo 3.</b> DBO <sub>5</sub> estimada y porcentajes de remoción teóricos .....	70
<b>Anexo 4.</b> Valores parámetros fisicoquímicos reportados por el laboratorio de la Corporación Autónoma Regional del Cauca CRC .....	71
<b>Anexo 5.</b> Porcentajes de remoción para cada muestreo.....	72
<b>Anexo 6.</b> Res. 631 de 2015.....	73

## GLOSARIO

<b>AR</b>	<b>Agua Residual</b>
<b>ARI</b>	<b>Agua Residual Industrial</b>
<b>HC</b>	<b>Humedal Construido</b>
<b>HCs</b>	<b>Humedales Construidos</b>
<b>HCFSH</b>	<b>Humedal Construido de Flujo Sub-Superficial Horizontal</b>
<b>HC – h</b>	<b>Humedal Construido plantado con <i>Heliconia pssitacorum</i></b>
<b>HC – c</b>	<b>Humedal Construido plantado con <i>Cyperus papyrus</i> “nana”</b>
<b>DBO<sub>5</sub></b>	<b>Demanda Biológica de Oxígeno</b>
<b>DQO</b>	<b>Demanda Química de Oxígeno</b>
<b>SPSS</b>	<b>Statistical Package for the Social Sciences</b>
<b>SST</b>	<b>Sólidos Suspendedos Totales</b>
<b>Sig.</b>	<b>Significancia</b>

## RESUMEN

El estudio tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de remoción de los sistemas de HCFSSH a escala piloto sembrados con dos tipos de macrofitas, para el tratamiento de los efluentes de la central de beneficio animal del Municipio de Timbío Cauca. Se construyó una unidad experimental a escala piloto, compuesta por un sistema de almacenamiento con capacidad de 120 L, un sedimentador primario y un FAFA con caudal de entrada de 48 L/día, como parte del tratamiento primario y secundario respectivamente y cuatro Humedales Construidos en fibra de vidrio con un caudal entrada de 12 L/día para cada humedal y un tiempo de retención hidráulico de 4 días.

Se tomaron 6 muestras con un intervalo promedio de 15 días para el efluente del sistema y el afluente de cada uno de los HC, analizando los parámetros fisicoquímicos de DBO<sub>5</sub>, DQO, SST, pH y Temperatura.

Dos humedales fueron sembrados con *Heliconia Psittacorum* "Golden Torch" (HC-h) y dos con *Cyperus Papyrus* "nana" (HC-c), los porcentajes de remoción medios obtenidos fueron: DBO<sub>5</sub> (69 % y 70 %), DQO (69 % y 65 %) y SST (74 % y 68 %) para HC-h y HC-c respectivamente, estos valores se consideran adecuados teniendo en cuenta las características del efluente, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas para las eficiencias de remoción entre HC-h y HC-c.

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico, el incremento de la producción industrial y el crecimiento de las poblaciones han ocasionado que los contaminantes de los residuos líquidos (industriales, domésticos) se incrementen día a día, en volumen, carga, concentración y diversidad (Maldonado & Ramón, 2006). En Colombia el crecimiento de los diferentes sectores de producción, evidencia la gran demanda del recurso hídrico que enfrenta el país y por consiguiente la alta generación de vertimientos. Por ello, se hace necesario estudiar diferentes alternativas de tratamiento, con el fin de controlar la contaminación de suelos, aguas subterráneas, cuerpos de agua, y evitar problemas de salubridad (Díaz, 2014). Particularmente en la industria de beneficio animal para la producción de carne, la descarga de aguas altamente contaminadas es alarmante, debido a que no se hace ningún tipo de tratamiento.

La mayoría de los sistemas de tratamiento para remover contaminantes de este tipo de ARI han resultado inviables económica, técnica o ambientalmente; ya sea en sus fases de construcción, operación o mantenimiento, haciendo recomendable desarrollar tecnologías apropiadas, que sean económicas, eficientes y confiables (Díaz, 2014). Debido a la importancia de un tratamiento adecuado de las AR provenientes de las centrales de beneficio animal, se ha incrementado el uso de nuevas tecnologías para el tratamiento de estos efluentes en los últimos años, considerando que los sistemas convencionales han sido sometidos a muchos juicios por desventajas en su operación y mantenimiento, entre otras consideraciones. De esta forma la necesidad de implementar tecnologías capaces de remover altas cargas contaminantes, con procesos de operación y mantenimiento, sencillos y económicos, ha llevado a la utilización de sistemas descentralizados como los HC.

Los HC son sistemas complejos e íntegros en los que tienen lugar interacciones entre el agua, plantas, animales, microorganismos, energía solar, suelo y aire; con el propósito de mejorar la calidad del AR y proveer un mejoramiento ambiental (Osnaya, 2012). Estos sistemas han sido utilizados principalmente para el tratamiento de ARD. Sin embargo, en el presente, los HC se utilizan para tratar una amplia variedad de contaminantes, incluyendo las AR agrícolas e industriales, diversas aguas de escorrentía y los lixiviados de rellenos sanitarios (Vymazal, 2008). De esta manera desarrollar estudios para evaluar el funcionamiento de los HC con efluentes de las centrales de beneficio animal, contribuirá a la reducción de impactos ambientales que se generan sobre fuentes puntuales.

Teniendo en cuenta el propósito del presente estudio se evaluó el comportamiento de los HCFSSH sembrados con *Heliconia Psittacorum* "Golden Torch" y *Cyperus Papyrus* "Nana", como tratamiento secundario para el efluente proveniente de la central de beneficio animal del municipio de Timbío, Cauca.

## 1. ANTECEDENTES

Durante los años cincuenta en Europa se introduce el concepto de humedales como sistemas para mejorar la calidad del agua. (Kadlec y Knight, 1996).

Los primeros experimentos con el uso de plantas de humedales para el tratamiento de aguas residuales se llevó a cabo en Alemania en la década de 1950 (Seidel, 1961, Vymazal, 2011), pero los sistemas de escala completa se construyeron sólo a finales de 1960 (Jong 1976., Vymazal, 2014). Existiendo varios tipos de humedales de acuerdo al comportamiento del flujo, así Los Humedales Construidos de flujo subsuperficial horizontal (HCFSSH) fueron iniciados por Käthe Seidel en la década de 1960 en Alemania y se extendieron por Europa y otras partes del mundo durante los años 80 y 90 (Vymazal, 2012).

Los humedales construidos se han utilizado tradicionalmente para tratar aguas residuales municipales en áreas que no tienen sistemas públicos de alcantarillado o que están económicamente subdesarrollados (Brix, 2009; Vymazal, 2009), más técnicamente equipados para el saneamiento de pequeñas comunidades (García *et al.*, 2010), pero durante las últimas dos décadas la aplicación de humedales construidos también incluyó aguas residuales industriales y agrícolas, lixiviación de tierra y escorrentía de aguas pluviales (Vymazal, 2011). Eliminando compuestos orgánicos, sólidos suspendidos, patógenos, metales y nutrientes (Haberl *et al.*, 1995; Kadlec y Wallace, 2009; Ranieri *et al.*, 2013a).

Para el tratamiento de ARI de centrales de beneficio animal con HC se reportan pocos casos siendo usados como tratamiento primario, como parte del tren de tratamiento en su tercera fase y a escala piloto para evaluar eficiencias de remoción.

Los primeros experimentos para tratar las aguas residuales de central de beneficio fueron reportados por Finlayson *et al.* (1990) de Australia. PoggiVaraldo *et al.* (2002) describieron un HC de 1144 m<sup>2</sup> como parte del sistema de tratamiento de aguas residuales de un matadero en el Estado de Hidalgo, México. El sistema consistió en sedimentación primaria, laguna anaeróbica y un humedal construido de flujo horizontal. Las eficiencias totales del tratamiento fueron 90%, 91%, 85% para la DQO, DBO y TSS, respectivamente (Vymazal, 2009).

De la misma forma, para el año 2013 Odong *et al.* Investigaron el potencial de depuración de HC para tratar agua residual de la central de sacrificio de Kampala, Uganda y estudiaron las características morfológicas de *Cyperus papyrus*, *Typha domingensis*, *Miscanthidium violaceum* y *Phragmites mauritianus*. Entre las plantas, *Cyperus papyrus* presentó la mayor absorción de contaminantes y la mayor biomasa. Los anteriores resultados motivaron a estos autores a realizar un estudio más detallado dos años más tarde sobre el comportamiento de *Cyperus papyrus* en la remoción de contaminantes del efluente pre-tratado del matadero de la ciudad de



Kampala; los porcentajes de remoción para turbidez, NH<sub>4</sub> -N, TN, o-PO<sub>4</sub>, TP, DQO y coliformes fecales fueron 76, 48, 46, 74, 63, 60 y 100, respectivamente (Odong *et al.*, 2013, 2015).

Específicamente en Colombia en el municipio del Tambo - Cauca, el estudio realizado escala piloto por Muñoz y Guerra en el año 2015, usando HCFSSH en la central de beneficio de porcinos, los sistemas fueron plantados con *Heliconia psittacorum* y *Cyperus haspan* con flujo continuo de 12 L/día y un tiempo de retención hidráulico de 4 días. Los parámetros fisicoquímicos medidos fueron DQO, SST, Temperatura y pH, La especie *Heliconia psittacorum* presentó eficiencias de remoción de DQO de 79.34% y de SST de 88.66% mientras que la especie *Cyperus haspan* alcanzó porcentajes de remoción de DQO de 78.48% y de SST de 82.47%. (Muñoz y Guerra, 2016).

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según (UNESCO, 2016) la demanda mundial de agua está condicionada por el crecimiento demográfico, la urbanización, las políticas de seguridad alimentaria y energética y los procesos macroeconómicos como la globalización del comercio, los cambios en la alimentación y el aumento del consumo. Se prevé que la demanda mundial de agua aumente un 55% en 2050, debido principalmente a las crecientes necesidades de la industria, la producción térmica de electricidad y el uso doméstico.

En Colombia el crecimiento de la producción industrial de los últimos años no es diferente al contexto global, específicamente el proceso de faenado en las centrales de beneficio animal ha aumentado y con ello la demanda del recurso hídrico, consumiendo en promedio entre 1 y 8,3 m<sup>3</sup> de agua potable y generando entre 0,4 y 3,1 m<sup>3</sup> de agua residual por cabeza de ganado sacrificado (Castro et al, 2016).

Si bien en el país existen normas para el aseguramiento de la calidad sanitaria y ambiental, como la Ley 09 de 1979 para la protección del medio ambiente y la resolución 240 del 2013 por la cual se establecen los requisitos sanitarios para el funcionamiento de las plantas de beneficio animal; El 99% de las centrales de beneficio en el país no cuenta con un sistema de tratamiento de aguas residuales adecuado, el 93% vierte sus aguas residuales directamente a un cuerpo de agua, al alcantarillado o a campo abierto, el 84% vierte el contenido ruminal directamente a los cuerpos de agua o en campo abierto, el 33% no hace en lo absoluto ningún uso de la sangre resultante de los procesos de sacrificio y faenado y el 57% no cuenta con rubro presupuestal propio (Guerreo & Ramírez, 2004).

La planta de beneficio animal del municipio de Timbío no cuenta con una infraestructura adecuada para el tratamiento de las ARI, la descarga presenta concentraciones de DBO<sub>5</sub> de 1428 mg/L y 3487 mg/L; DQO de 2246 mg/L Y 5520 mg/L y SST 625 mg/L y 1708,50 mg/L para los días de menor y mayor sacrificio respectivamente (Paredes, 2016), generando un deterioro en las condiciones ambientales y sanitarias aguas abajo.

Por esta razón se desea evaluar el uso de HC como una alternativa a los sistemas de tratamiento convencionales, por su efectividad y bajo costo. Sin embargo, para su desarrollo, resulta necesario estudiar el comportamiento y las eficiencias de remoción en el control de los contaminantes que se encuentran considerados en la legislación, propendiendo a conservar la calidad de los cursos de agua (Piñeyro, M, 2011). Este estudio contara con la implementación de HCFSSH a escala piloto con dos tipos de macrofitas *Heliconia Psittacorum* "Golden Torch" y *Cyperus Papyrus* "nana", permitiendo establecer el funcionamiento de los sistemas en condiciones climáticas propias de la zona y bajo altas cargas contaminantes.

### 3. JUSTIFICACIÓN

En los últimos años el deterioro que algunas prácticas y tecnologías tradicionales han ocasionado al medio ambiente y a la calidad de vida, han provocado reacciones de la comunidad y de los mercados que vienen exigiendo que se establezcan prácticas y procesos, que protejan los recursos naturales y aseguren una oferta de bienes de consumo limpios para las presentes y futuras generaciones (Guerrero *et al*, 2004).

La disposición indiscriminada de las aguas residuales provenientes de las plantas de beneficio animal, pone en riesgo la salud Humana y las actividades productivas aguas abajo de la descarga, igualmente afectan el ecosistema obligándolo a soportar altos grados de contaminación, muchas veces generando daños irreversibles.

En la planta de beneficio animal del municipio de Timbío sacrifican semanalmente un promedio de 55 reses y no existen condiciones suficientes para hacer un tratamiento a las AR generadas en el proceso, lo cual, hace necesario la implementación de un sistema de tratamiento para evitar que se realice la descarga directamente a la fuente hídrica más cercana, el río Timbío; Considerando el uso de tecnologías de tratamiento que sean de bajo costo, de fácil operación y mantenimiento, haciendo en este caso particular a los Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial horizontal una posible opción para el tratamiento adecuado de las aguas residuales.

Los humedales construidos HC son sistemas artificiales que han sido diseñados para utilizar los procesos naturales que implican vegetación, suelos y sus ensamblajes microbianos asociados para ayudar en el tratamiento de aguas residuales (Vymazal, J, 2014).

Por lo tanto se evaluará si la implementación de estos sistemas es técnica y ambientalmente viable, considerando que debe existir un tratamiento primario y secundario eficaz del AR, proponiendo el uso de humedales construidos como refinamiento del tratamiento secundario para degradar los contaminantes presentes en las aguas residuales de la central de beneficio animal del municipio de Timbio.

## 4. OBJETIVOS

### 4.1. OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la eficiencia de remoción de los sistemas de HCFSSH sembrados con dos tipos de macrofitas, para el tratamiento de los efluentes de la central de beneficio animal del Municipio de Timbio Cauca.

### 4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar el contenido de materia orgánica en el afluente y efluente de los sistemas de tratamiento a escala piloto analizando la variables de DBO<sub>5</sub>, DQO y SST sembrados con *Heliconia Psittacorum* "Golden Torch" y *Cyperus Papyrus* "nana".
- Identificar cuál de las dos plantas presenta el mejor comportamiento en la remoción de materia orgánica en los sistemas de Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial Horizontal a escala piloto.

## **5. MARCO TEORICO**

### **5.1. SISTEMAS DE HUMEDALES CONSTRUIDOS**

Los humedales construidos son sistemas de fitodepuración de aguas residuales (Delgadillo *et al*, 2010), diseñados y construidos para realizar procesos naturales y remover contaminantes de agua residual dentro de un ambiente más controlado (Faulwetter *et al.*, 2009; Vymazal, 2015). Donde se incluyen procesos biológicos, químicos y físicos similares a procesos que ocurren en humedales de tratamiento natural (Kadlec and Knight, 1996; Vymazal, 2005).

### **5.2. CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES CONSTRUIDOS**

Los humedales basados en macrófitas enraizadas emergentes pueden ser de dos tipos, de acuerdo a la circulación del agua que se emplee (Delgadillo *et al*, 2010): Humedales de flujo superficial, si el agua circula en forma superficial por entre los tallos de las macrófitas y Humedales de flujo subsuperficial, si el agua circula por debajo de la superficie del estrato del humedal.

#### **5.2.1 Humedales Construidos de Flujo superficial**

En los Humedales construidos de flujo Horizontal superficial el agua se vierte en superficie en un extremo del lecho, trasiega expuesta a la atmosfera, lenta y horizontalmente para finalmente ser evacuada en el extremo opuesto del lecho, por medio de un vertedero (Arias, *et al*, 2003). Las aguas poco profundas, la velocidad de flujo baja y la presencia de los tallos de la planta regulan el flujo de agua, especialmente en canales largos y estrechos (Reed *et al.*, 1998).

#### **5.2.2 Humedales Construidos de Flujo subsuperficial**

Los humedales con flujo subsuperficial, son estanques o canales con el fondo generalmente impermeable sobre el cual se coloca un medio poroso que puede ser suelo, arena o grava en el que se siembra las plantas emergentes. Las aguas residuales aplicadas a estos sistemas son generalmente pres tratadas. Este tipo de humedales pueden ser construidos con *flujo horizontal subsuperficial*, en el que el medio poroso se mantiene saturado por el agua (Ayllón, 2014); Los humedales verticales de flujo subsuperficial son una de las configuraciones del flujo subsuperficial que posee mayor capacidad de transferencia de oxígeno debido a su

diseño (lecho insaturado) y modo operativo (alimentación intermitente) y requieren una superficie menor en comparación con otros tipos de HC que funciona sin inducción de aire (Guivernau, 2017).

### **5.3. COMPONENTES DE LOS SISTEMAS DE HUMEDALES**

#### **5.3.1 Sistemas de entrada y Salida del agua residual.**

El agua ingresa en forma permanente. Es aplicada en la parte superior de un extremo y recogida por un tubo de drenaje en la parte opuesta inferior. El agua residual no ingresa directamente al medio granular principal (cuerpo), sino que existe una zona de amortiguación generalmente formada por grava de mayor tamaño. El sistema de recogida consiste en un tubo de drenaje cribado, rodeado con grava de igual tamaño que la utilizada al inicio (Delgadillo *et al*, 2010).

#### **5.3.2 Suelo y medio de soporte**

En los humedales construidos el proceso de tratamiento de las aguas residuales es llevado a cabo, fundamentalmente, por un complejo grupo de microorganismos adherido a las raíces de las plantas, rizoma y sobre la superficie del medio (Reed et al, 1995).

En los sistemas con flujo subsuperficial el medio puede ser suelo, arena o grava y los espacios libres del medio sirven como canales para el flujo del agua. Sobre la superficie del medio crece la masa de microorganismos semejante a lo que ocurre en un filtro percolador. En los sistemas con flujo subsuperficial que emplean grava la capacidad de remoción de fósforo es muy limitada (Silva, 2002).

#### **5.3.3 Vegetación**

Pocas plantas prosperan en las aguas negras o grises que tiene altas niveles de nutrientes y DBO, que son típicos de los humedales construidos (Mitch and Gosselink 2000). Hay unas pocas plantas que son utilizados normalmente para humedales, muchos de los cuales pueden ser encontrados en humedales naturales (Yocum, D. 2008). Por lo general plantas propias de la región donde se va a instalar el humedal, pueden servir como macrofitas para desarrollar su medio en estos sistemas.

Las macrófitas suponen un sustrato para el biofilm, compuesto por una densa comunidad microbiana (Gumbricht 1993, Chappel & Goulder 1994). Esta comunidad es la responsable de la mayoría de los procesos microbiológicos que ocurren en los

humedales, descomponiendo la materia orgánica en productos nutrientes asimilables por las plantas, produciendo antibióticos y desnitrificado (Pyñeiro, 2011).

#### **5.3.4 Impermeabilización**

Los HCFSSH se componen por uno o más lechos de poca profundidad con algún tipo de barrera para prevenir las infiltraciones que puedan afectar tanto al suelo como a las aguas subterráneas. El tipo de barrera dependerá de las condiciones locales. En algunos casos es suficiente con una adecuada compactación del terreno, pero en otros se puede recubrir con arcilla o membranas de plástico (PVC, polietileno de alta densidad) (Soriano, 2009).

#### **5.3.5 Microorganismos y demás organismos que se desarrollan en los humedales**

Los procesos mediados microbially en los HC dependen principalmente de las condiciones hidráulicas, las propiedades de las aguas residuales, incluyendo la calidad y disponibilidad de sustrato y nutrientes, el material del filtro o el tipo de suelo, las plantas y los diferentes factores ambientales. La biomasa microbiana se encuentra dentro de rangos similares en los humedales horizontales y verticales de flujo subsuperficial y de flujo superficial (Truu et al, 2009).

En los humedales se desarrollan una gran variedad de organismos que abarcan desde microorganismos como bacterias y protozoos hasta pequeños animales; siendo las bacterias el grupo fundamental en el proceso depurador de las aguas residuales (Silva, 2002).

Los tipos de microorganismos presentes en un humedal varían según la zona, así en la zona superior del humedal donde predomina la presencia de oxígeno liberado por las raíces de las plantas y del oxígeno llegado por difusión atmosférica, se desarrollan colonias de microorganismos aerobios. El resto del lecho granular predomina la presencia de microorganismos anaerobios (Soriano, C, 2009).

### **5.4. MECANISMOS DE DEPURACIÓN EN LOS HCs**

La eliminación de contaminantes del agua en los humedales construidos se logra mediante una combinación interactiva de procesos físicos, químicos y biológicos determinados por las condiciones físico-químicas de los humedales (Moortel et al, 2009).

**Tabla 1 Principales mecanismos de remoción y transformación de los contaminantes en los humedales.**

<b>Contaminante</b>	<b>Mecanismos de remoción</b>
Materia orgánica	Reducción por conversión biológica por intervención de bacterias facultativas y anaerobias adheridas a las superficies de las plantas y al medio granular.
Materia en suspensión	Filtración y sedimentación
Nitrógeno	Nitrificación/ desnitrificación, asimilación por las plantas y volatilización.
Fósforo	Filtración, sedimentación, adsorción, asimilación por parte de las plantas y microorganismos.
Metales pesados	Absorción de las raíces de las plantas y del medio granular, sedimentación.
Trazas de contaminantes orgánicos	Absorción, biodegradación
Patógenos	Por muerte natural, depredación, sedimentación, secreción de antibióticos de las raíces de las plantas.

**Fuente:** (Brix H, 1994; Crites and Tchobanoglous, 1998)

## **5.5. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DE LAS AGUAS RESIDUALES**

### **5.5.1 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>)**

Es la cantidad de oxígeno usada en la oxidación bioquímica de la materia orgánica, bajo condiciones determinadas en tiempo y temperatura. Es la principal prueba utilizada para la evaluación de la naturaleza del agua residual. La DBO<sub>5</sub> se determina generalmente a 20 °C después de incubación durante 5 días: se mide el oxígeno consumido por las bacterias durante la oxidación de la materia orgánica presente en el agua residual, por cinco días a 20 °C (Argandoña Y Macías, 2013).

### **5.5.2 Demanda química de Oxígeno (DQO)**

La Demanda Química de Oxígeno es la medida del oxígeno molecular requerido para oxidar el contenido de materia orgánica en una muestra que es susceptible a oxidación por un oxidante químico fuerte (Ibáñez, 2010).



### **5.5.3 Sólidos suspendidos totales (SST)**

Son aquellos que se retienen en un filtro de fibra de vidrio de tamaño de poro de 2  $\mu\text{m}$  después de que ha sido secado a una temperatura específica (Crites y Tchobanoglous, 2000). Es importante como indicador puesto que su presencia disminuye el paso de la luz a través de agua evitando su actividad fotosintética en las corrientes, importante para la producción de oxígeno (CORPONARIÑO, 2002).

### **5.5.4 Grasas y aceites**

Las grasas y los aceites son la fracción de la materia orgánica que es soluble en hexano (Sperling, M y Chernicharo, 2003). Al aceite y la grasa se les concede especial atención por su escasa solubilidad en el agua y su tendencia a separarse de la fase acuosa, su presencia complica el transporte de los residuos por las tuberías, su eliminación en unidades de tratamiento biológico y su disposición en las aguas receptoras (Crites y Tchobanoglous, 2000).

### **5.5.5 pH**

El pH es un indicador de la acidez o basicidad del agua. Influye en la actividad microbiológica y en las tasas de reacción (Sperling y Chernicharo, 2003).

### **5.5.6 Temperatura**

Este parámetro es importante en el tratamiento de aguas residuales ya que muchos procesos biológicos dependen de ella ya que es determinante para el desarrollo de la actividad bacteriana, cuyo rango óptimo se encuentra entre 25 °C a 35 °C. Cuando la temperatura se acerca a los 50 °C los procesos de digestión aerobia y nitrificación bacteriana se detienen; por otro lado, cuando la temperatura es menor a 5 °C la actividad microbiana se inhibe (Crites, 2000).

## **5.6. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL DE MATADEROS**

La principal fuente de contaminación de las aguas residuales de los mataderos se originan de las heces y orina, sangre, pelusa, lavazas y residuos de la carne y grasas de las canales, los suelos, los utensilios, alimentos no digeridos por los intestinos, las tripas de los animales sacrificados y de vapor condensado procedente del tratamiento de los despojos (Muñoz, 2005).

En la central de beneficio del municipio de Timbío el sistema de recolección de agua sangre se realiza por medio de canales, que cuenta con rejillas de diferente espesor encargadas de la retención de sólidos de mayor tamaño; el cuarto de lavado de estómagos cuenta con un conducto que permite la separación del rumen hacia un depósito para su posterior uso, sin embargo el agua residual de todo el proceso de faenado es conducida por tubería hacia el río.

**Tabla 2. Características generales de las aguas residuales del matadero.**

<b>Parámetro</b>	<b>Rango</b>	<b>Media</b>
CTO (mg / L)	70-1.200	546
DBO <sub>5</sub> (mg / L)	150-4635	1209
DQO (mg / L)	500-15,900	4221
NT (mg / L)	50-841	427
SST (mg / L)	270-6400	1164
Ph	4,90-8,10	6.95
TP (mg / L)	25-200	50
Orto-PO <sub>4</sub> (mg / L)	20-100	25
Orto-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg / L)	10-80	20
K (mg / L)	0.01-100	90
Color (mg / l Pt escala)	175-400	290
Turbidez (FAU)	200-300	275

**Fuente:** (Bustillo, C. *et al*, 2015)

## 6. METODOLOGÍA

### 6.1. ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se llevó a cabo en la central de beneficio animal del municipio de Timbío ubicado en la zona centro del Departamento del Cauca, sobre la vertiente occidental de la Cordillera Central. Hace parte del Macizo Colombiano conocido como meseta de Popayán o valle interandino de Pubenza, formado en medio de las cordilleras central y occidental, La central de sacrificio animal está situada en la cabecera municipal localizada a los  $02^{\circ} 21'22''$  de Latitud Norte y  $76^{\circ} 41'16''$  de Longitud Oeste. Con una franja altitudinal entre 1000 y 2000 msnm, con una temperatura media que varía entre 16 y 23 °C.

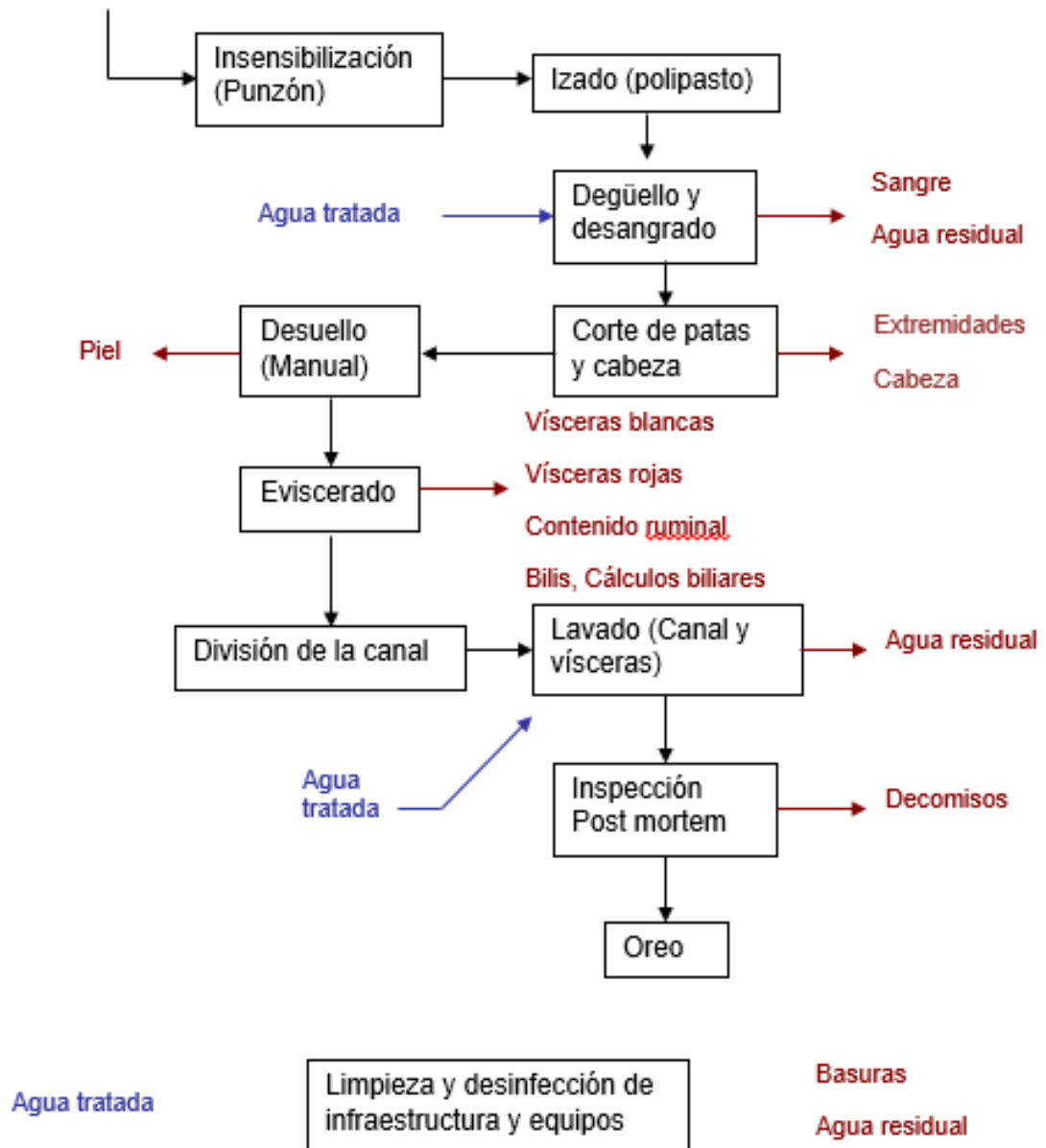


Figura 1. Área de estudio

## 6.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE BENEFICIO

El sistema de tratamiento para esta investigación se ubicó en el área perimetral de la planta física de beneficio animal, la cual por medio de tuberías descarga directamente sus aguas residuales al río Timbío.

**Ganado listo para el sacrificio**



**Figura 2. Diagrama de Flujo del proceso de sacrificio**

### 6.2.1 Pasos en el proceso de beneficio

- **Recepción del ganado para sacrificio:** El ganado llega aproximadamente tres horas antes del sacrificio y es ubicado en los corrales dentro de la feria, donde son marcados y pesados para la identificación por parte del propietario.



**Figura 3. Corrales de la planta de Beneficio animal municipio de Timbío.**

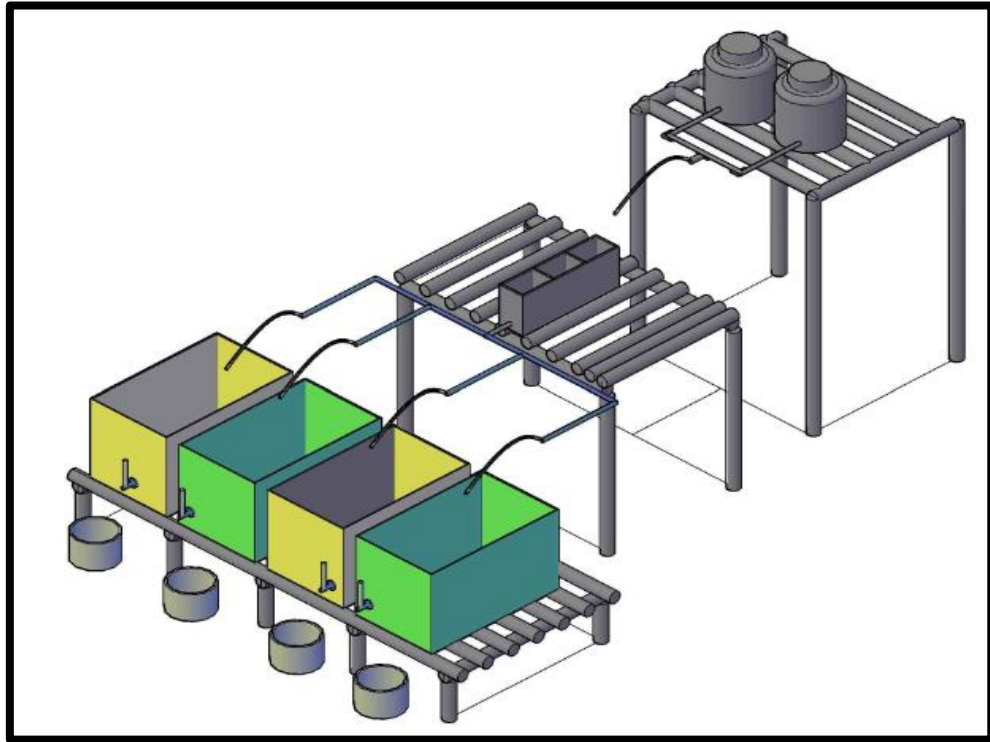
- **Transporte al salón de beneficio:** Los animales son transportados en camiones desde la feria a uno pocos metros donde se encuentra el salón de beneficio, cuando llegan son dispuestos en un corral antes del ingreso, donde se les realiza un baño sencillo en todo el cuerpo y en las pezuñas.
- **Insensibilización:** El animal ingresa a la cabina de insensibilización donde una lanza atraviesa la parte superior del lomo, provocando la caída del animal.
- **Izado:** Se sujeta el animal por medio de un grillete a una de sus patas traseras y es levantado por medio polipasto de izamiento.
- **Desangrado:** Una vez izado se realiza un corte sobre el cuello del animal para permitir la salida de la sangre, un porcentaje de esta sangre es recolectada para subprocesos por parte de comerciantes, los restos van directamente a las canales de recolección de AR.

- **Corte de cabeza y miembros anteriores:** Se realiza el corte de cabeza y patas, haciendo disposición sobre la mesa de lavado donde son limpiadas y organizadas.
- **Corte de miembros posteriores y desuelle:** Se realiza el corte longitudinal del animal y se hace el proceso de desuelle donde se le retira la piel, se realiza el lavado necesario retirando los restos de sangre.
- **Proceso de evisceración:** Una vez abierto el animal se retiran todas las vísceras (rojas y blancas) y son conducidas a salones independientes donde se hace la inspección necesaria por parte del médico veterinario, quien determina o no el posible uso para subproductos.
- **Lavado de vísceras:** las vísceras blancas (estómagos e intestinos) son lavadas cuidadosamente, se retira todo el rumen presente dentro de ellas, este es conducido por un canal de recolección destinado para el aprovechamiento; las vísceras rojas son suspendidas sobre estructuras de acero inoxidable en ganchos especiales, una vez realizada la inspección se depositan en contenedores aptos para su transporte.
- **División del canal:** Se realiza el corte del esternón atravesando la mitad del animal dividiendo el cuerpo en dos (dos canales), posterior a esto se realiza el corte en cuartos de canal y por último se dejan dispuesto en el área para el oreo.
- **Cargue de canales:** Finalmente se realiza el cargo del producto en camiones con las condiciones de higiene y asepsia necesarias para su transporte a los puntos de comercialización.

### 6.3. DESCRIPCIÓN DE LA UNIDAD A ESCALA PILOTO

El sistema instalado consta de dos tanques plásticos (Tanques de Alimentación) de 60 L cada uno que garantizan el flujo constante del AR, un sedimentador primario y un Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente FAFA como parte inicial del tratamiento, diseñados para un caudal de 48 L/día, un tanque de regulación de caudal y un sistema de cuatro HCFSSH a escala piloto en fibra de vidrio, alimentados por medio de macro goteros con un caudal de 12 L/día para cada uno.

Se utilizó tubería de PVC de 1" para conectar todo el sistema, la medición y control de caudales se hizo por medio de macro medidores para garantizar los tiempos de retención requeridos y caudales constantes



**Figura 4. Unidad a escala piloto en AutoCad 3D.**



**Foto 1. Unidad a escala piloto construida.**

### **6.3.1 Tratamiento primario**

El sedimentador se diseña según criterios de (Romero, 1999; RAS, 2000), con Tiempo de Retención Hidráulico de 4 horas, un caudal de 48 L/día, relación largo ancho de 1.5:1 obteniendo dimensiones 0.16 m de ancho, 0.24 m de largo y 0.32 m de profundidad de (0.22m de lámina de agua y 0.10m de borde libre); una diferencia de alturas de 0.02 m que proporciona una pendiente suave para la recolección de sólidos.

En cuanto a los porcentajes de remoción usados según (Romero, 1999), en el proceso de sedimentación se remueve para  $DBO_5$  entre 25% - 40%, asumiendo un valor del 30%; los valores encontrados en la caracterización fisicoquímica para  $DBO_5$  en los días de menor y mayor sacrificio en la planta de beneficio fueron 1426 mg/L y 3487 mg/L respectivamente según Paredes, (2016), con una  $DBO_5$  promedio 2457.5 mg/L, obteniendo una  $DBO_5$  de salida del sedimentador de 1720.25 mg/L. (Anexo 1)

### **6.3.2 Tratamiento Secundario**

El FAFA se diseña según criterios de (Romero, 1999; RAS 2000), para una concentración de entrada de  $DBO_5$  de 1720.25 mg/L, en base al cual se obtiene un Tiempo de Retención Hidráulico de 7 Horas y un valor del coeficiente característico del sustrato en digestión (k) de 2, para un con coeficiente del medio filtrante (m) de 0,660.

Se obtuvo un volumen total de 0,012 m<sup>3</sup> para el FAFA, con dimensiones 0.16 m de ancho, 0.24 m de largo y 0.30 m de profundidad (0.20 m de lámina de agua y 0.10m de borde libre); se utilizó como lecho filtrante grava triturada de 1" pre lavada, el flujo proveniente del sedimentador ingresa a este sistema por medio de perforaciones realizadas a 0.03 m de la base, con radio de 0.01m, permitiendo el proceso de sedimentación anterior y garantizando el sentido del flujo ascensional (Anexo 1).

Para el tanque de regulación de caudal se asumen las dimensiones del FAFA con dimensiones de 0.16 m de ancho, 0.24 m de largo y 0.30 m de profundidad, con el propósito de garantizar el tiempo de retención de los dos tratamientos anteriores y el caudal de 48 L/día que será distribuido en los HCFSSH. El agua proveniente del FAFA ingresa por la parte superior a través de vertederos triangulares.





Figura 5. Corte transversal desde el sedimentador y desde el FAFA



Foto 2. Desde el FAFA a tanque de regulación

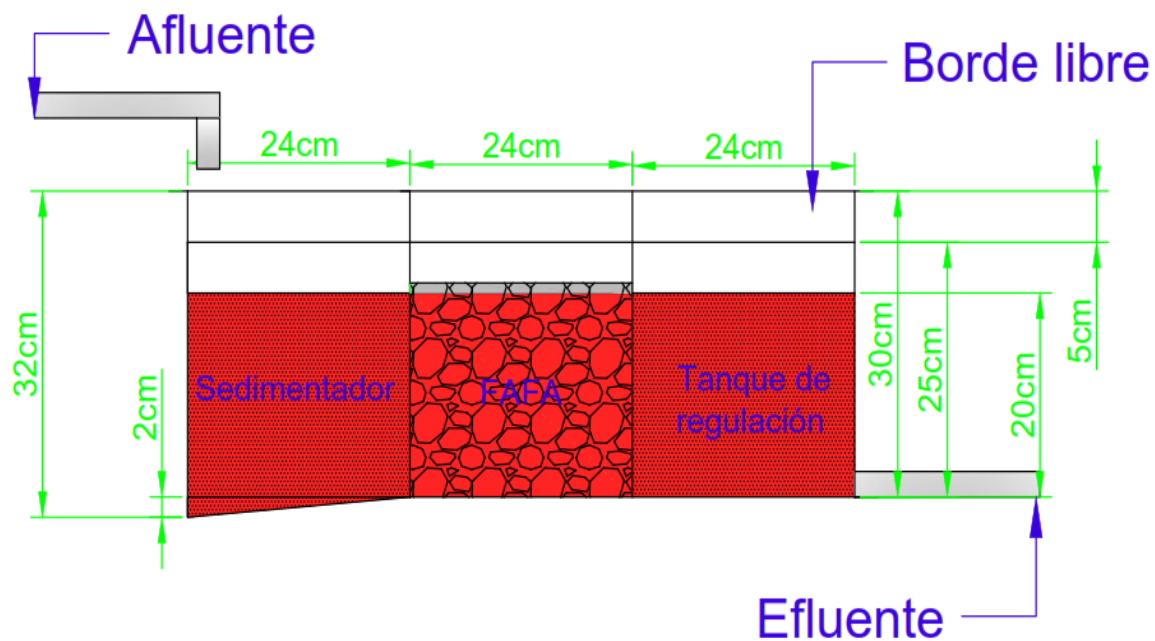


Figura 6. Corte longitudinal sistema tratamiento primario y secundario.



Foto 3. Unidad de tratamiento primario y secundario.

### 6.3.3 Sistema de Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial Horizontal

De acuerdo a investigaciones realizadas a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales sintéticas, de lixiviados de rellenos sanitarios y de centrales de beneficio de porcinos (Sánchez, 2007; Fernández y Jiménez, 2014; Delgado y Pino, 2015 y Muñoz y Guerra, 2016), se adoptaron las dimensiones de 0.6 m de ancho, 1 m de largo y 0.6 m de profundidad para cada uno de los cuatro tanques construidos en fibra de vidrio; 0.25 m de altura de grava triturada de una pulgada pre lavada como medio de soporte, una altura de lámina de agua 0.2 m y una pendiente del 1%, con una densidad de 6 unidades de macrófitas sembradas por 0.6 m<sup>2</sup>.

Los humedales 1 y 3 se plantaron con *Heliconia psittacorum* "Golden Torch" (HC-h) y los humedales 2 y 4 con *Cyperus papyrus* "nana" (HC-c), las macrofitas se sembraron a una distancia de 0.25 m entre cada una a lo largo del tanque y de 0.20 m a lo ancho, se situaron dos piezómetros de tubería PVC perforada de dos pulgadas de diámetro, a la entrada y salida de cada humedal, con altura de 0.40 m y ubicados una distancia de 0.25 m al inicio y al final de cada tanque.

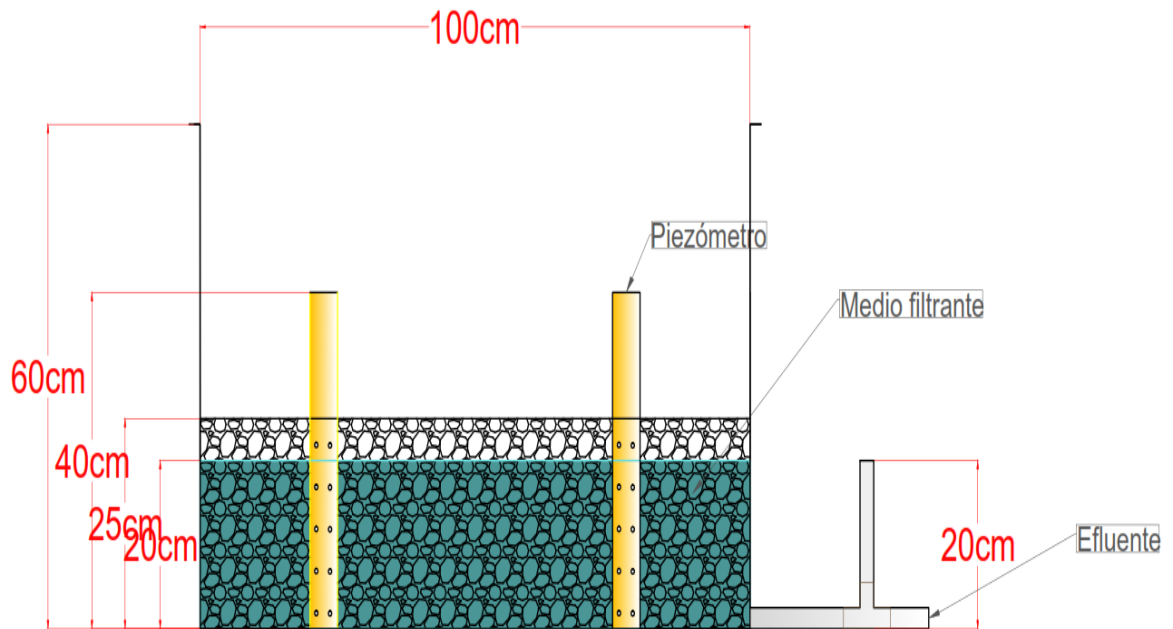


Figura 7. Corte longitudinal HCFSSH



**Foto 4. Sistema de HCFSSH**

## **6.4. ALIMENTACIÓN DEL SISTEMA Y RECOLECCIÓN DEL ARI**

### **6.4.1 Recolección de ARI**

La recolección del agua se realizó en baldes de 18 L a la salida de la tubería que llega al río Timbio proveniente de la central de beneficio, la planta cuenta con un pre tratamiento al interior que consta de un sistema de rejillas para los sólidos de mayor tamaño y además de ello se hace la separación del rumen que es depositado en un conducto especial para su posterior aprovechamiento.

El agua recolectada es deposita en un tanque de almacenamiento de 120L, donde se realiza el proceso de cernido y tamizado para retener las partículas más finas, que en su mayoría fueron coágulos y componentes ruminales, evitando así los sólidos que pudiesen taponar la tubería del sistema.



**Foto 5. Proceso de cernido y tamizado**

### 6.4.2 Alimentación

El agua recolectada se deposita en los dos tanques de alimentación con capacidad de 60 L cada uno, así para garantizar un caudal de salida de 48L/día fue necesario cargar los tanques cada dos días. La diferencia de alturas entre las estructuras de soporte de los tanques de alimentación y el sedimentador primario, permitió el flujo por gravedad entre los sistemas.

El control del caudal a la salida de los tanques de alimentación, el tanque de regulación y de los HCFSSH, fue posible por la instalación de macro goteros.



**Foto 6. Macro goteo a la salida de la tubería de 1". De tanque de almacenamiento a sedimentador.**



**Foto 7. Macro goteo del sistema de salida del tanque regulador de caudal**

## 6.5. CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE

**Tabla 3. Caracterización del agua residual industrial, planta de beneficio animal Timbio – Cauca.**

Ítem	Día menor sacrificio	Día mayor sacrificio	Norma Res 0631 de 2015
Caudal (L/S)	1,37	2,29	NR
Temperatura (°C)	20,44	19,32	40,00
pH	8,03	7,89	6,00-9,00
Turbiedad (NTU)	127	169	NR
Sólidos disueltos totales (ppm)	596,40	570,84	NR
SST (mg/L)	625,00	1708,50	225,00
Salinidad (ppm)	554,60	461,64	NR
Conductividad $\mu$ S	865,60	832,67	NR
Grasas y Aceites (mg/L)	92,40	120,00	30,00
Oxígeno disuelto (mg/L)	6,41	6,66	NR
DBO5 (mg/L O <sub>2</sub> )	1428	3487	450
DQO (mg/L O <sub>2</sub> )	2246	5520,50	800
Coliformes Totales	16000000	8100000	NR
Coliformes Fecales	530000	915000	NR

**Fuentes:** Paredes, 2016

## 6.6. ACLIMATACIÓN

Durante el primer mes bajo condiciones batch, se usó la dilución de ARI y agua potable, trabajando por un periodo de 8 días cada dilución, las relaciones usadas fueron 1:7, 1:5, 1:1 y 1:0.43, para detalles de los volúmenes de dilución ver anexo 2.

Se inició con la puesta en marcha de todo el sistema a escala piloto bajo condiciones de flujo continuo con la dilución 1:0.43 durante 15 días, con el objetivo de que los tratamientos primario y secundario tuvieran un periodo de adaptación a la carga orgánica, es aquí donde el sistema logra una mayor adaptación al AR que va a tratar, mejorando paulatinamente su eficiencia. Esto depende en gran parte de la alta o baja actividad microbiana que se logre en el reactor y la carga orgánica que se esté aplicando (Torres, 2003).

Una vez culminado este periodo se alimentó el sistema con la relación 1:0 por 30 días, obteniendo así un total de 75 días para finalizar el proceso de aclimatación y arranque.

## 6.7. CAUDAL DE ALIMENTACIÓN

### 6.7.1 Caudal de alimentación HCFSSH

La determinación del Caudal se realizó en base a la ecuación de Reed planteada en su libro *Natural Systems for Waste Management and treatment* con la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{L * W * y * n}{t} \quad (1)$$

Donde:

$L$ : Largo de la celda del humedal, m

$W$ : Ancho de la celda del humedal, m

$y$ : Profundidad de la celda del humedal, m

$n$ : Porosidad o espacio disponible para el flujo del agua a través del humedal

$Q$ : Caudal medio a través del humedal, m<sup>3</sup>/d

Obteniendo:

$$Q = \frac{1m * 0.6m * 0.2m * 0.4}{4 \text{ días}}$$

$$Q = 0.012 \frac{m^3}{día}$$

$$Q = 12 \frac{L}{día}$$

Así se tiene 1m de largo y ancho de 0.6 m en el HC, una altura de la columna de agua de 0.20 m y 0.4 m de porosidad para la grava triturada de una pulgada de diámetro, se asume un Tiempo de Retención Hidráulico de 4 días según Tchobanoglous y Crites, (2000).

## 6.7.2 Caudal de alimentación del tratamiento primario y secundario

De acuerdo al caudal encontrado para cada humedal de 12 L/día, se determinó usar el caudal correspondiente al valor de los 4 HC, es decir 48 L/día para el diseño de los sistemas de tratamiento primario Y secundario.

## 6.8. PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS

Los parámetros fisicoquímicos medidos en este estudio fueron Demanda Biológica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), grasas y aceites, pH, y temperatura (T°).

Se realizaron seis muestreos con un promedio de 15 días, para los tres muestreos iniciales se analizaron las variables de DBO<sub>5</sub>, DQO, SST, grasas y aceites, pH y T°; para los tres muestreos finales se analizó DQO, SST, pH y T°, esto debido a limitaciones de personal del laboratorio de la Corporación Autónoma Regional del Cauca CRC, entidad que apoyó el análisis fisicoquímico en todo el proyecto, de esta manera los datos obtenidos para la variable de DBO<sub>5</sub> de los tres muestreos finales se muestran como DBO<sub>5</sub> estimada y para grasas y aceites se tomaron los tres valores iniciales para el promedio.

El método que se empleó para la determinación de cada parámetro se muestra en la Tabla 4 en los cuales se tuvieron en cuenta las técnicas, procedimientos y recomendaciones del Standard Methods for the examination of water and wastewater, 20th Edition.

**Tabla 4. Métodos de medición de parámetros fisicoquímicos**

<b>Parámetro</b>	<b>Método</b>
Ph	SM 4500 – H B
Temperatura (°C)	Termométrico
DBO <sub>5</sub>	SM 5210 B / SM 4500 – OG prueba de la DBO <sub>5</sub>
DQO	SM 5220 D, Modificado / Método de reflujó cerrado, colorimétrico en ultravioleta visible
SST	SM 2540 D / Sólidos Suspendidos Totales secados a 103-105 ° C
Grasas y Aceites	SM 5520 D

**Fuente:** Standard Methods for the examination of water and wastewater, 20th Edition.



Con los resultados de estos análisis se calcularon los porcentajes de remoción de DBO<sub>5</sub>, DQO y SST de los sistemas de HCFSSH, así se determinó mediante análisis estadístico que planta tuvo una mayor influencia en la remoción de los contaminantes.

## **6.9. ELECCIÓN DE MACROFITAS**

La *Heliconia pssitacorum* “Golden Torch”, fue elegida por ser propia de la región, la variedad de *Heliconia pssitacorum* ha sido estudiada con Agua residual doméstica según Konneruo, *et al*, (2009) y con agua residual de beneficio de porcinos (Muñoz y Guerra, 2015); de igual forma la *Cyperus papyrus* “nana” por su capacidad de depuración con diferentes tipos de aguas usando Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial de acuerdo (Luna y Aburto, 2014).

## **6.10. ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

Para esta investigación se tomaron como referencia los cuatro humedales construidos, agrupando los datos correspondientes a los HC sembrados con *Heliconia pssitacorum* “Golden Torch”, (Humedal 1 y 3) y a los HC sembrados con *Cyperus papyrus* “nana” (Humedal 2 y 4), siendo el factor de tratamiento las dos especies de plantas mencionadas y las variables de respuesta los parámetros de DBO<sub>5</sub>, DQO y SST analizando los porcentajes de remoción para cada parámetro en cada sistema de tratamiento.

El experimento realizado fue de medidas repetidas puesto que, se hizo más de una medición de la variable de respuesta sobre la misma unidad experimental. Las medidas repetidas proporcionan información en el tiempo de la variable de respuesta bajo los tratamientos estudiados ayudando a conocer qué tan rápido se manifiestan los efectos de dichos tratamientos en las unidades experimentales (Correa, 2004).

Para el análisis de datos se usó el programa estadístico SPSS versión 22.0 y Microsoft Excel 2013. Los datos obtenidos para los porcentajes de remoción de DBO<sub>5</sub>, DQO y SST, fueron en base al análisis y reporte del laboratorio de la CRC para las mismas variables medidas en cada unidad experimental (Anexo 3), los datos anteriores trabajados en Microsoft Excel.

## 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 7.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL AFLUENTE Y EFLUENTE DEL SISTEMA A ESCALA PILOTO CON HCFSSH.

Se realizaron 6 muestreos con una frecuencia promedio de 15 días al afluente del sistema de tratamiento primario y secundario y al efluente de los HCFSSH.

#### 7.1.1 Cálculo de la DBO<sub>5</sub> estimada y porcentajes de remoción teóricos.

Con base en los resultados reportados para DBO<sub>5</sub> y DQO en los tres muestreos iniciales, se calculó la relación promedio en el afluente del sistema y en el efluente de los HCFSSH. (Ver anexo 3), esto debido a que en no se logró el análisis de laboratorio de la DBO<sub>5</sub> para los tres muestreos finales.

Con el relación encontrada y con la DQO obtenida en los últimos tres muestreos, tanto a la entrada del sistema como a la salida de los humedales, se estimó la DBO<sub>5</sub> para los tres muestreos finales para obtener homogeneidad en el número de datos y realizar un análisis estadístico adecuado.

Debido a que solo se realizó el análisis a la entrada del sedimentador y a la salida de los HC, fue necesario el cálculo de los porcentajes de remoción teóricos para las variables de DBO<sub>5</sub>, DQO y SST a la salida del tratamiento de sedimentación y filtración. (Ver anexo 3).

Las concentraciones de salida en el sedimentador y en el filtro se obtuvieron de acuerdo a los porcentajes de remoción teóricos establecido por Romero (1999) y por la RAS (2000), siendo las concentraciones de salida del filtro las empleadas para los cálculos de remoción en los HCFSSH.

**Tabla 5. Valores medios de los parámetros fisicoquímicos del afluente y efluente**

VARIABLE	AFLUENTE DEL SISTEMA	AFLUENTE HCFSSH TEORICO	EFLUENTE	
			HC - h	HC - c
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	3273	1466	478,17	429,42
DQO (mg/L)	4341	1945	729,50	659,08
SST (mg/L)	834	227	59,46	60,93
pH	7,05	7,05	7,67	7,62
TEMPERATURA (°C)	22,33	22,33	20,9	21,03

**HC – h:** Humedal sembrado con *Heliconia pssitacorum* “Golden Torch”

**HC – c:** Humedal sembrado con *Cyperus papyrus* “nana”

Se realizó el análisis para el parámetro de Grasas y Aceites el cual puede constituir un problema serio de polución en centrales de beneficio, frigoríficos e industrias empacadoras de carnes. Su cuantificación es necesaria para determinar la necesidad del Pre tratamiento, la eficiencia de los procesos de remoción y el grado de polución por estos compuestos (Argandoña, 2010).

Se realizó para los tres muestreos iniciales el análisis de este parámetro, esto debido a las limitaciones económicas y de personal disponible en el laboratorio aliado para este proyecto.

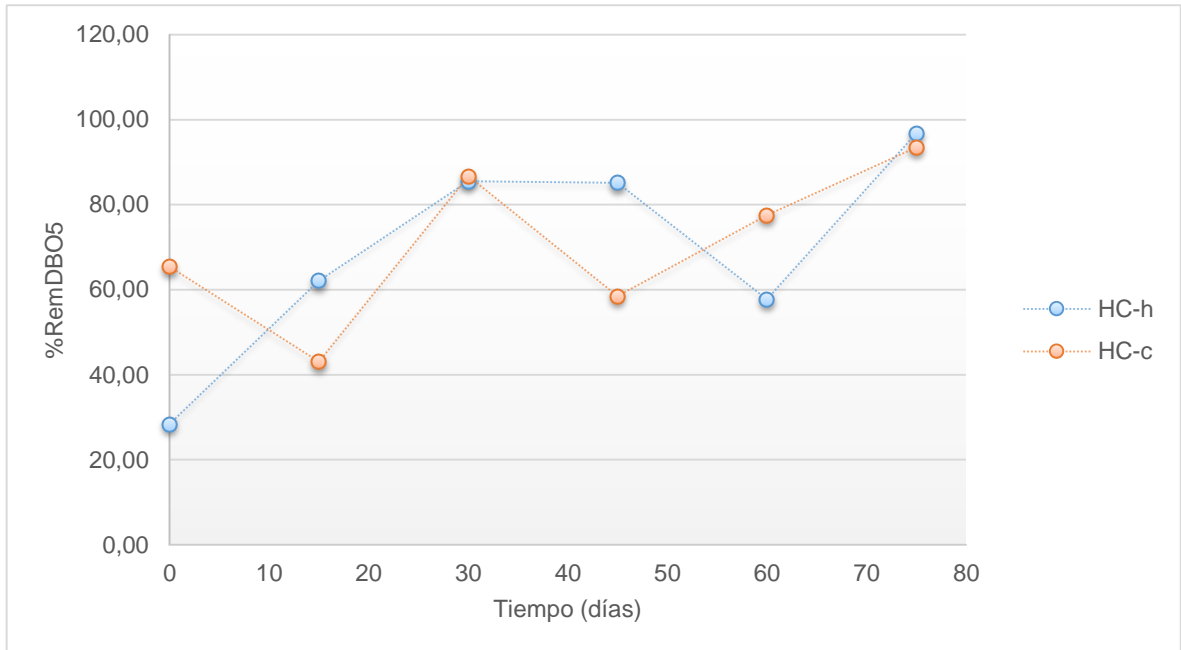
**Tabla 6. Valores medios de grasas y aceites del afluyente y efluente**

VARIABLE	AFLUENTE DEL SISTEMA	EFLUENTE HCFSSH	
		HC - h	HC - c
<b>Grasas y Aceites (mg/L)</b>	45,16	8,88	7,88

En cuanto a este caso específico se infiere que un porcentaje en la remoción de grasas realizó en el sedimentador, de acuerdo a las RAS 2000, “Los sedimentadores primarios pueden usarse como sistemas de remoción de grasas, en dicho caso debe asegurarse que exista la capacidad de almacenamiento y los dispositivos mecánicos que permitan la evacuación del sobrenadante de forma segura”, donde para su extracción en el caso de estudio se realizó manualmente una vez por semana.

## 7.2. EFICIENCIAS DE REMOCION

### 7.2.1 Demanda Biológica de Oxígeno DBO<sub>5</sub>



**Figura 8. Porcentajes de remoción promedios de DBO<sub>5</sub> los HCFSSH.**

En la figura 8 se observa un comportamiento no homogéneo entre los porcentajes de remoción para los HC-h y HC-c, apreciando que ambas tienden a tener altos porcentajes de remoción, destacándose el último muestreo con un porcentaje de remoción de 96,8 y 93,5 respectivamente.

El HC-h al inicio presenta un porcentaje de remoción menor en comparación HC-c, dicha diferencia puede estar representada en que la *Heliconia* requiere un periodo de adaptación mayor (Wu *et al*, 2015)

Para HC-h se presenta un incremento en el porcentaje de remoción a partir del primer muestreo, variando en el día 60 con un comportamiento atípico donde la remoción disminuye en comparación con lo obtenido.

Se obtuvieron los siguientes valores medios en cuanto a porcentaje de remoción  $70 \pm 30,46$ ,  $70,8 \pm 21,95$  para los HC-h y HC-c respectivamente, el valor alto de las desviaciones estándar se explica por la variabilidad de datos en cuanto a las remociones presentadas entre cada muestreo.

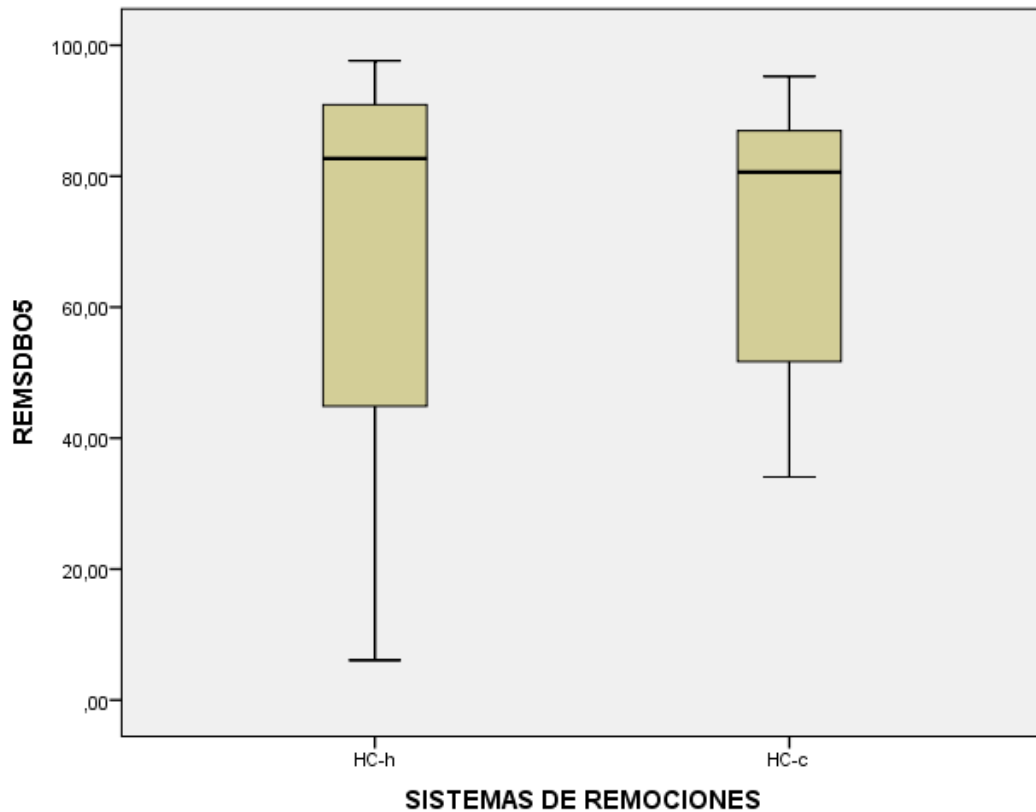
**Tabla 7. Valores de significancia de Shapiro-Wilk (normalidad) y estadístico de Levene (igualdad de varianzas) para RemDBO<sub>5</sub>.**

	Significancia		
	Shapiro-Wilk		Estadístico Levene
	HC-h	HC-c	
<b>RemDBO<sub>5</sub></b>	0,022	0,05	0,189

Según la prueba de Shapiro-Wilk para los HC-h no existe normalidad entre los datos y para HC-c si hay presencia de normalidad de acuerdo al valor de referencia  $\alpha=0.05$ , en cuanto a la igualdad de varianzas por la prueba de Levene se comprueba que existe homogeneidad para todo el conjunto de datos dado que el valor de significancia es mayor a 0.05. De esta forma se hace posible el uso de la prueba t de student para muestras independientes.

#### **7.2.1.1 Prueba t de student para muestras independientes en la remoción de DBO<sub>5</sub>**

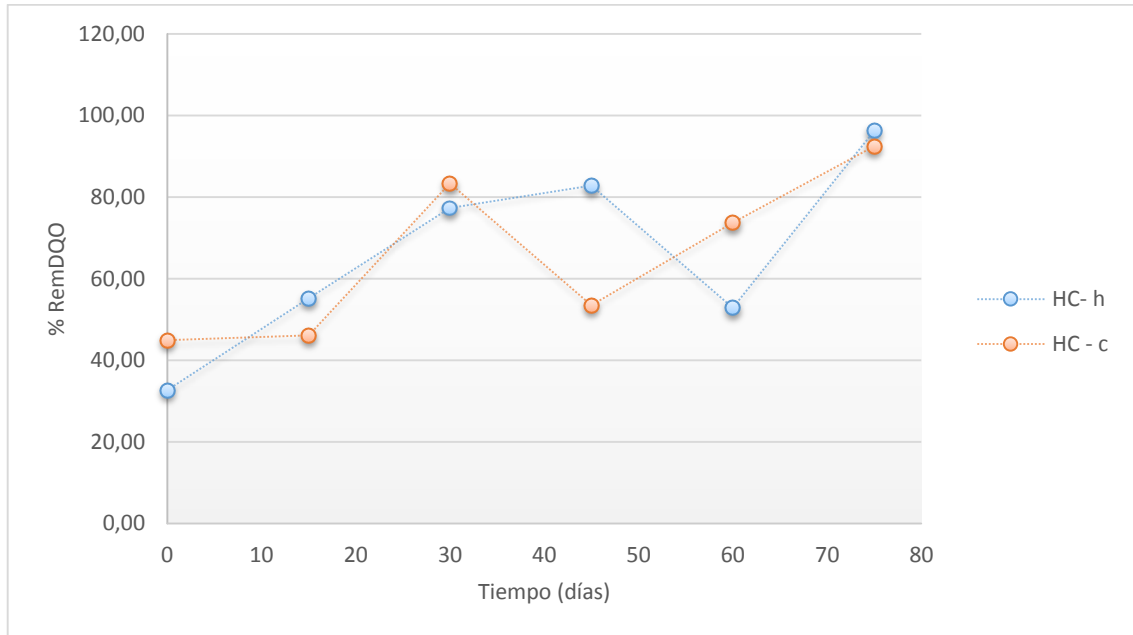
Se obtiene para la t de student un valor de significancia de 0,189, superando el valor de referencia del 5% ( $\alpha=0,05$ ), lo cual indica que estadísticamente no se presentan diferencias significativas entre los dos tipos de planta para la remoción de DBO<sub>5</sub>, lo cual se comprueba en la siguiente figura.



**Figura 9. Diagrama de cajas y bigotes para los porcentajes de remociones de DBO<sub>5</sub>**

En HC-h se presenta una mayor dispersión de los datos evidenciado remociones entre 50 % y 89%, donde la mediana tiende hacia los porcentajes de mayor remoción, comparado con HC-c donde la dispersión de datos es menor con remociones entre 57 % y 85 %, pero la mediana también tiende a ubicarse hacia los valores más altos. Así se asume que las diferencias en cuanto a la remoción no son significativas entre los dos tipos de macrofitas, por lo tanto no se puede establecer cuál de las dos especies tuvo mayor influencia en la remoción de materia orgánica.

## 7.2.2 Demanda Química de Oxígeno DQO



**Figura 10. Porcentajes de remoción promedios de DQO en los HCFSSH.**

En la figura 9 se observan los comportamientos para cada tipo de planta en la remoción de DQO, resaltando que aunque tiene un comportamiento similar a la DBO los porcentajes de remoción están siendo mayores en ambos casos.

Para ambas plantas hay un aumento en la concentración de DQO en tiempos estratégicos lo cual afecta directamente los porcentajes de remoción haciendo que este decaigan, esto es notorio para HC-h en el muestreo 5 y para HC-c en el muestreo cuatro, donde según Quipuzco (2002) reporta que los HC en alguna etapa no presentan reducciones de las concentraciones de DQO, por el contrario, los valores se incrementan debido al arrastre o desprendimiento de la biopelícula formada alrededor de los rizomas, así se provoca su degradación en el medio y por lo tanto el incremento de compuesto orgánicos e inorgánicos que aumentan la concentración de DQO.

Por otro lado, de acuerdo con Korkusuz *et al*, (2004), las concentraciones de la carga orgánica en el afluente y el efluente son afectadas por cambios en el volumen del agua en el sistema, debido a los efectos de la precipitación pluvial y de la evapotranspiración, el último proceso concentra especialmente los componentes en el humedal, debido a que el volumen del agua baja y las concentraciones de carga orgánica se incrementan.

De esta forma se aprecia para ambos sistemas en el muestreo 6 y de acuerdo a la precipitación presentada el día anterior al muestreo registrando un promedio de lluvia de 23,6 mm, datos obtenidos de la estación meteorológica de la Facultad de Ingeniería civil en Popayán (se trabajan con estos datos por la falta de información en estaciones más cercanas al municipio de Timbio), siendo este el valor más alto de lluvias presentado durante los días de muestreo, disminuyendo la concentración de carga orgánica en los HC produciendo un aumento en el porcentaje de remoción.

Las medias de los porcentajes de remoción de DQO fueron para HC-h  $69\pm 26$  y  $66\pm 23$  en HC-c, encontrando similitudes en las eficiencias asumiendo que los humedales sembrados con Heliconia tuvieron un mejor comportamiento pero no representan diferencias estadísticamente importantes con respecto al HC sembrado con Cyperus.

Como se indica en la tabla 8 las pruebas analizadas para normalidad y varianza no arrojan la existencia de significancia entre los dos sistemas, asumiendo que es posible aplicar la prueba t de student para muestras independientes.

**Tabla 8. Valores de significancia de Shapiro-Wilk (normalidad) y estadístico de Levene (igualdad de varianzas) para RemDQO**

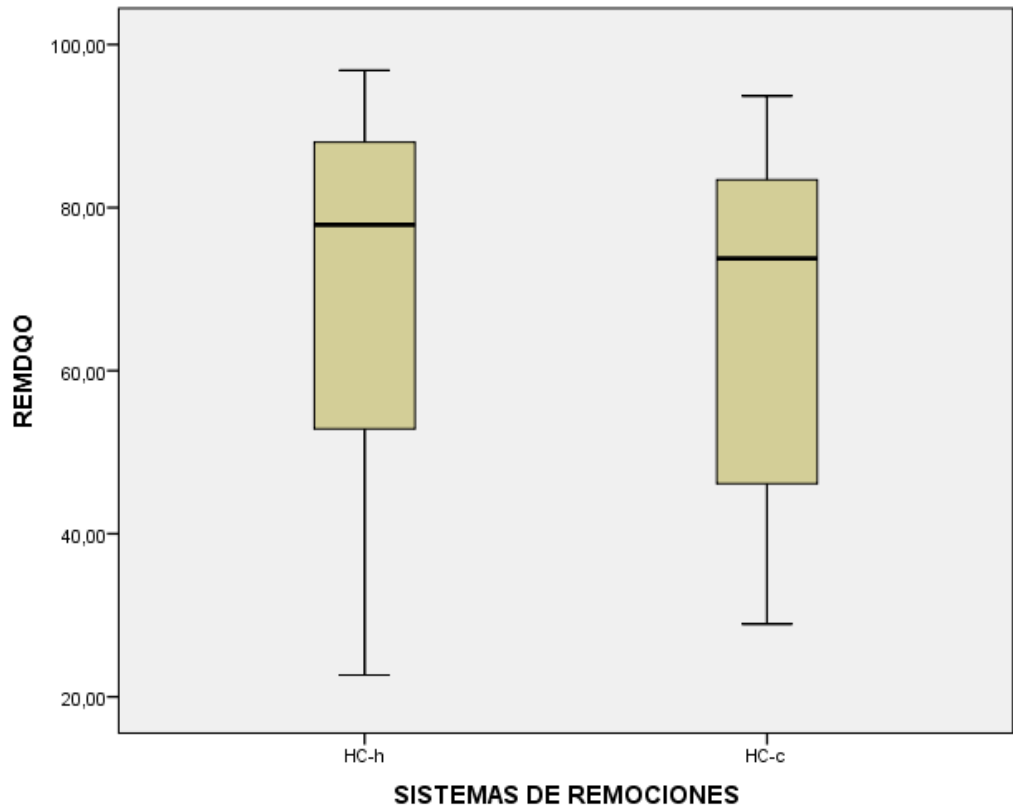
	Significancia		
	Shapiro-Wilk		Estadístico Levene
	HC-h	HC-c	
%RemDQO	0,089	0,227	0,734

#### 7.2.2.1 Prueba t de student para muestras independientes para la remoción de DQO

Se comprueba que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las remociones de DQO para los dos tipos de plantas, donde se confirma que existe igualdad en las varianzas por lo tanto reporta para la prueba t un valor de sig. de 0,733 mayor a la referencia  $\alpha=0,05$ .

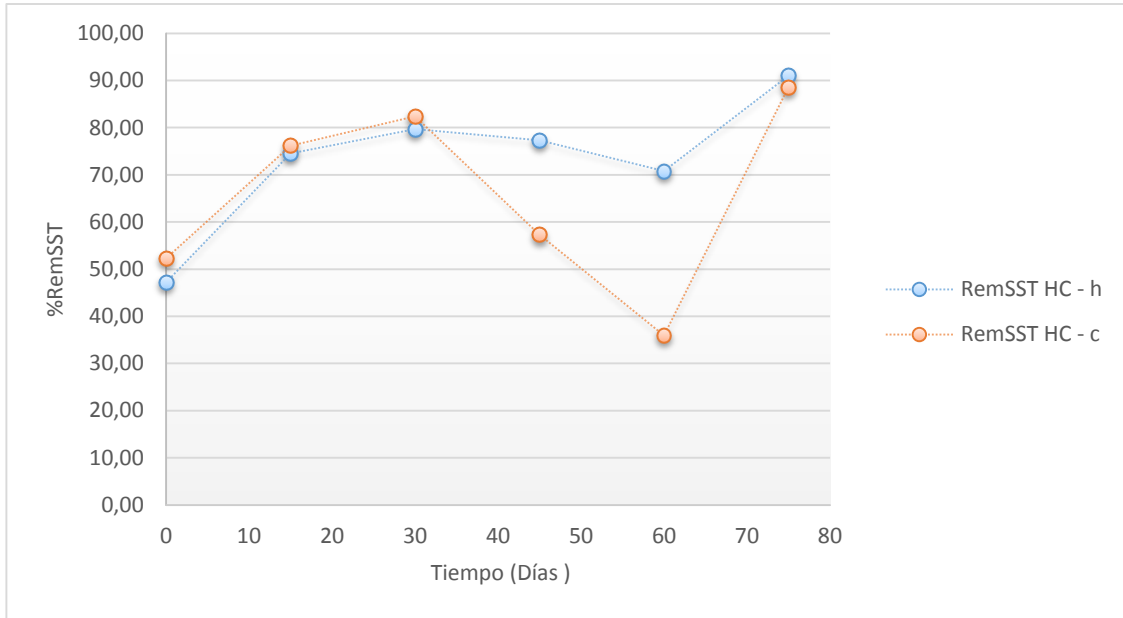
Lo anterior se puede apreciar gráficamente en la siguiente figura 10 donde para HC-h las remociones están entre 52 % y 87 % y para HC-c entre 51 % y 80 %, mostrando similitudes en el comportamiento de la mediana ubicada para ambos casos en los rangos más altos de porcentajes de remoción para DQO.





**Figura 11. Diagrama de cajas y bigotes para los porcentajes de remociones de DQO**

### 7.2.3 Sólidos Suspendidos Totales SST



**Figura 12. Porcentajes de remoción promedios de SST en los HCFSSH.**

La remoción de sólidos suspendidos en los HCFSSH se produce a través de la filtración del medio granular y por precipitación, los mecanismos que tienen lugar son la adsorción, proceso de equilibrio que consiste en la adhesión de moléculas de un material, encima de la superficie de otro absorbente, la hidrólisis y los mecanismos propios de la filtración (Ayllón, 2014).

En la figura 11 se presenta un comportamiento homogéneo para la remoción de SST en el HC-h, a diferencia del HC-c donde se presenta un decremento en el porcentaje en el muestreo cuarto y quinto esto posiblemente al aumento poblacional del *Cyperus* la cual presenta una mayor densidad foliar.

El aumento de sólidos que provocan una baja remoción para el HC-c es posible según Ayllón, (2014) por la descomposición de rizomas y raíces en las zonas subterráneas e igualmente por descomposición de algas, hongos y bacterias existentes en el medio, ocasionando descomposición transversal en el humedal.

De acuerdo a la estadística descriptiva se presentan las medias de eficiencia de remoción para HC-h  $74 \pm 15$  y para HC-c  $68 \pm 19$ , presentándose una diferencia que no es significativa estadísticamente.

**Tabla 9. Valores de significancia de Shapiro-Wilk (normalidad) y estadístico de Levene (igualdad de varianzas) para RemSST**

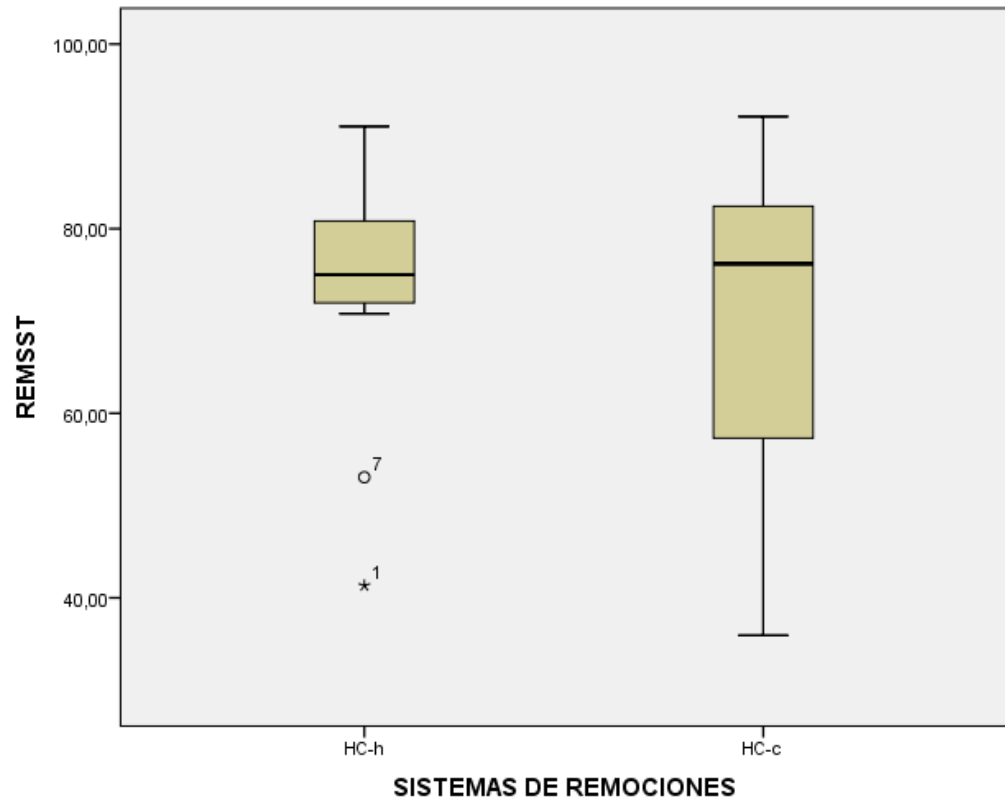
	Significancia		
	Shapiro-Wilk		Estadístico Levene
	HC-h	HC-c	
<b>RemSST</b>	0,108	0,201	0,235

Por las pruebas de Shapiro-Wilk y el estadístico de Levene se confirma que los valores de sig. son mayores al 0,05 indicando que existe normalidad e igualdad de varianzas haciendo posible el uso de la prueba t para muestras independientes

### **7.2.3.1 Prueba t de student para muestras independientes para la remoción de SST**

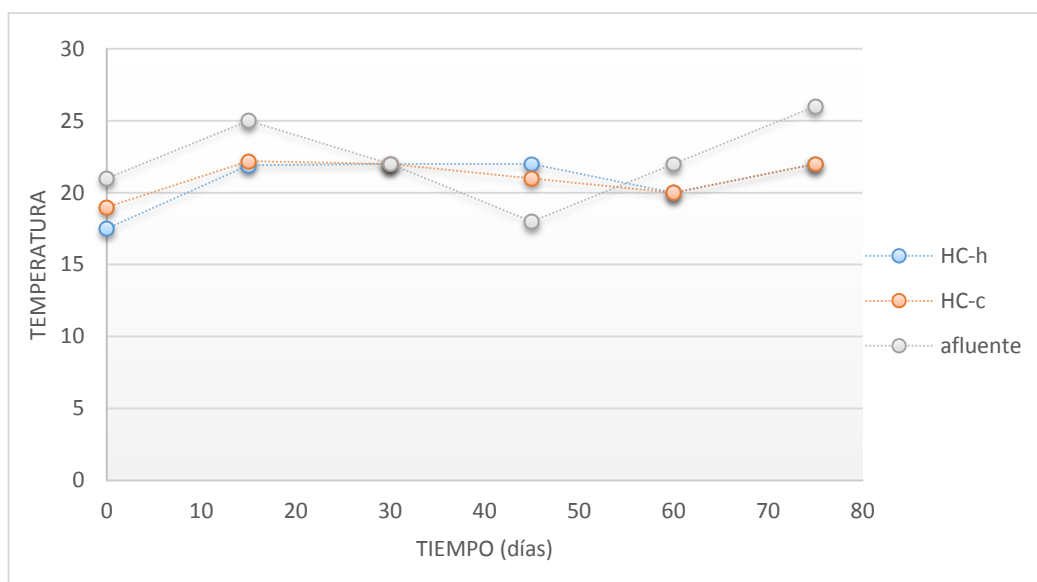
Se obtiene que no existen diferencias significativas para las remociones entre los dos sistemas, con un valor de significancia de 0,459.

En el diagrama de cajas y bigotes se observa para HC-h una menor dispersión de datos ya que el rango inter cuartil es menor en comparación con el sistema HC-c y la concentración de los datos para HC-h se ve reflejada hacia los valores más altos de remoción en el rango de 64 % y 84 %, reportando un valor del 53% y un valor extremo de 43 %, donde los mejores están ubicados en el rango de 75 % y 80 % con la mediana recargada hacia el valor menor, existiendo diferencia en el HC-c que se presentan remociones entre el 55 % y 81 % y la mediana ubicada hacia el valor mayor.



**Figura 13. Diagrama de cajas y bigotes para los porcentajes de remociones de SST**

## 7.2.4 Temperatura



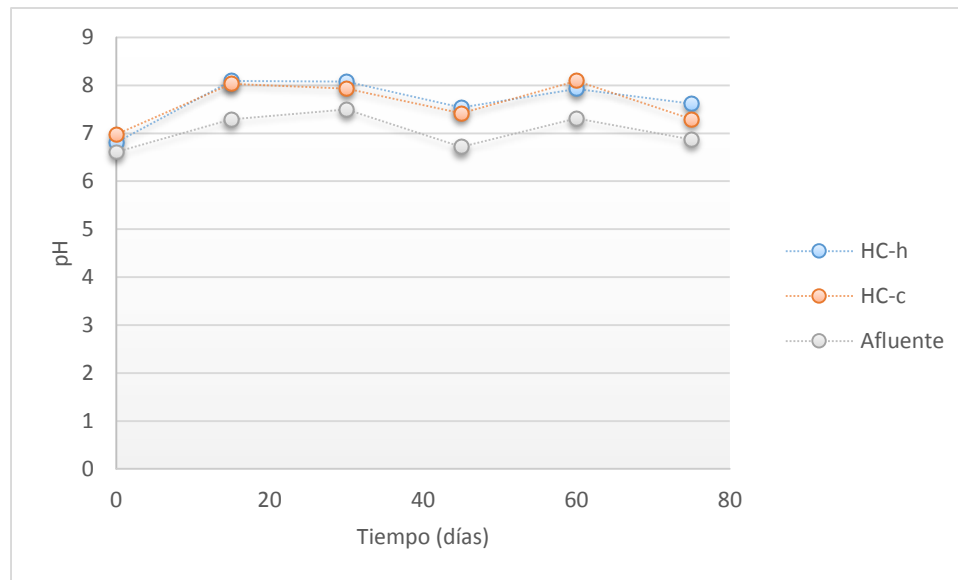
**Figura 14. Comportamiento de la Temperatura**

La temperatura no tiene variaciones significativas entre sistemas, se observa que en comparación con la entrada la temperatura se regula desde la entrada a la salida para casi todos los muestreos, notando temperatura de entrada menor a la de los humedales solo en el punto 4 posiblemente por condiciones metrológicas el día del muestreo, sin embargo se garantiza la temperatura constante a la salida de los HC.

Según Brix, 1994 la evidencia de inercia térmica de la vegetación se da cuando los valores obtenidos en el afluente son ligeramente mayores en relación a los obtenidos para los efluentes, como es el caso.

La temperatura media del agua a la entrada fue de 22.3 °C, para la salida fue 20,9±1.9 °C y 21±1.3 °C para HC-h y HC-c respectivamente, siendo adecuada para la remoción de materia orgánica (Kadlec y Knight, 1996).

## 7.2.5 pH



**Figura 15. Comportamiento del pH**

El pH entre sistemas tienen un comportamiento homogéneo, en promedio para HC-h es  $7.7 \pm 0.48$  y para HC-c  $7.6 \pm 0.46$ , presentan rangos óptimos para el crecimiento bacteriano entre 4.0 y 9.5 de según Metcalf y Eddy, (1991). De esta forma se asume que para ambos sistemas existe un buen comportamiento que permite el desarrollo de la actividad microbiana.

Los tratamientos con Heliconia y con Cyperus reportaron mayores valores de pH en comparación con el promedio del afluente que fue de 7.05, esto se podría justificar por la oxidación bioquímica de ácidos orgánicos como también la destrucción de sales de ácidos orgánicos. (Romero, 1999)

## 8. CONCLUSIONES

La caracterización fisicoquímica del AR proveniente de la central de beneficio animal del municipio de Timbio, permitió establecer que por sus altos niveles de contaminación no son adecuados para ser vertidos al alcantarillado o a un cuerpo receptor directamente.

Se comprobó que no existen diferencias estadísticamente significativas en los porcentajes de remoción para DBO<sub>5</sub>, DQO y SST, entre los tratamientos con *Heliconia pssitacorum* “Golden Torch” y *Cyperus papyrus* “nana”

Se logró establecer los porcentajes de remoción promedio para HC-h y HC-c que fueron en DBO<sub>5</sub> (69 % y 70 %), DQO (69 % y 65 %) y SST (74 % y 68 %) respectivamente. Indicando un comportamiento adecuado para la remoción de dichos contaminantes.

Los valores máximos permisibles de 450 mg/L, 900 mg/L y 200 mg/L para respectivamente reportados por la Resolución 0631 de 2015, indican el cumplimiento de la norma, al comparar los valores en las concentraciones promedio reportadas a la salida de los HCFSSH, exceptuando la concentración de DBO<sub>5</sub> para HC-h que es ligeramente mayor al límite permisible.

Aunque los sistemas estuvieron bajo un periodo de aclimatación considerable, se presentan variaciones en las concentraciones de salida de DBO<sub>5</sub>, DQO y SST esto reflejado en los altos valores de desviación estándar reportado en la estadística descriptiva específicamente las variables de DQO Y DBO<sub>5</sub>, lo cual puede ser justificado por la falta de maduración de los HC al momento de la toma de muestras.

Ambas especies mostraron altas eficiencias de remoción, haciendo posible el uso de cualquiera de las dos, en este caso se recomienda el uso de *Cyperus papyrus* “nana” por su capacidad de adaptación al tipo de agua, a las condiciones ambientales y por su reproducción homogénea, a diferencia de la *Heliconia pssitacorum* que presentó daños en su fisiología foliar, por las altas cargas orgánicas a la cual estuvo sometida.

## 9. RECOMENDACIONES

Los HCFSSH deben usarse como refinamiento del tratamiento secundario o como tratamiento terciario para tratar agua residual de efluentes industriales con altas cargas orgánicas como lo son los provenientes de las plantas de beneficio animal, resaltando la importancia un tratamiento preliminar y primario exitoso.

Antes de su implementación a escala real es importante realizar un estudio por un periodo de tiempo prolongado, que permita la maduración de los sistemas de HC.

Es importante realizar un análisis fisicoquímico completo a la salida de cada unidad de tratamiento, permitiendo conocer concentraciones reales para cada parámetro.

Se debe realizar la medición de nutrientes para ratificar el uso del HCFSSH con efluente de la central de beneficio animal, dado que los altos contenidos de nitrógeno y fosforo pueden alterar su funcionamiento.

Para un estudio completo del comportamiento del humedal es importante realizar una evaluación de las variaciones fisiológicas de las plantas, para comprobar la incidencia de las altas cargas contaminantes en su reproducción, su desarrollo foliar y el crecimiento de las raíces.

Es recomendable que para conocer con mayor precisión los procesos que ocurren en el sistema de tratamiento, se evalúen a detalle otros procesos bajo las condiciones de este trabajo, como el efecto del sustrato sobre la retención de materia orgánica, la distribución hidráulica a lo largo del sistema y la asociación de microorganismos con las dos especies de plantas instaladas en los HCFSSH.



## BIBLIOGRAFÍA

ARGANDOÑA, Ligia Y MACÍAS, Ramón. Determinación de sólidos totales, suspendidos, sedimentados y volátiles, en el efluente de las lagunas de oxidación situadas en la parroquia colón, cantón Portoviejo, provincia de Manabí, durante el período de marzo a septiembre 2013. Trabajo de grado Modalidad trabajo comunitario, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.

ARIAS, Carlos Y BRIX, Hans. Humedales artificiales para el tratamiento de Aguas Residuales. En: Ciencia e Ingeniería Neogranadina. Vol. 13. (2003): Pág. 17 – 24.

AYLLÓN, Alberto. Determinación del tractament primari óptim per a aiguamolls construïts de flux horitzontal. 2014. Tesis de especialización. Universidad Politécnica de Catalunya, España.

BRIX, Hans. Use of constructed wetlands in water pollution control: Historical development, present status, and future perspectives. En: Water Science Technology. Vol. 30. (1994); Pág. 209–223.

BRIX, Hans., KOOTTATEP, Thammarat Y KONNERUP, Dennis. Treatment of domestic wastewater in tropical, subsurface flow constructed wetlands planted with Canna and Heliconia. En: Ecological Engineering. Vol. 35. (2009); Pág. 248 – 257.

BUSTILLO-LECOMPTE, Ciro Y MEHRVAR, Mehrab. Slaughterhouse wastewater characteristics, treatment, and management in the meat processing industry: A review on trends and advances. En Journal of Environmental Management. Vol. 161. (2015); Pág. 287 -302.

CASTRO, Liliana., ESCALANTE, Humberto., GOMES, Oscar y JIMENEZ, Diana. Análisis del potencial metanogénico y energético de las aguas residuales de una planta de sacrificio bovino mediante digestión anaeróbica. DYNA. En: Universidad Nacional de Colombia. Vol. 83 (1999); Pág. 41 – 49.

CORPONARIÑO. Sólidos suspendidos totales. (En línea). 2017.

CRITES, Ron Y TCHOBANOGLIOUS, George. Tratamiento de Aguas Residuales en pequeñas poblaciones, Estados Unidos: McGraw Hill Interamericana S.A. (2000).

CRITES, Ron Y TCHOBANOGLIOUS, George. Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados. Bogotá, Colombia. (2000).

DELGADILLO, Oscar., CAMACHO, Alan., PÉREZ, Luis y ANDRADE, Mauricio. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. 2010. Cochabamba, Bolivia.

DELGADO, Laura y PINO, Manuel. Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica, nutrientes y plomo, en lixiviados del relleno sanitario “el ojito” del municipio de Popayán, Cauca mediante humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal. Popayán, 2015, Trabajo de Investigación (Tesis de pregrado en Ingeniería Ambiental), Universidad del Cauca, Facultad de Ingeniería Civil, Programa de Ambiental y Sanitaria.

DIAZ, Carlos. Tratamiento de agua residual a través de humedales. En: V Congreso Internacional de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás Seccional Tunja. (2014). p. 1-8.

FAULWETTER, Jennifer., GAGNON, Vincent., SUNDBERG, Carina., CHAZARENC, Florent., BURR, Mark., BRISSON, Jacques., CAMPER, Anne. Y STEIN, Otto. Microbial processes influencing performance of treatment wetlands: A review. En: Ecological Engineering. Vol. 35, (2009); Pág. 987 – 1004.

FINLAYSON, Max., VON OERTZEN, Isabelle. y CHICK, Alan. Treating poultry abattoir and piggery effluents in gravel trenches. En: Cooper, P.F., Findlater, B.C. (Eds.), Constructed Wetlands in Water Pollution Control. Pergamon Press, Oxford, UK, (1990). Pág. 559–562.

GARCIA, Joan., ROUSSEAU, Diederik., TYROLLER, Lina y SANTA, Santa. Application of the gas tracer method for measuring oxygen transfer rates in subsurface flow constructed wetlands. En: Water Research, Vol. 44. (2010); Pág. 4217 – 4225.

GUERRERO, Jhoniers. y RAMIREZ, Ignacio. Manejo Ambiental de residuos en Mataderos de pequeños municipios. En: Scientia Et Technica. Vol 26. (2004); Pág. 199- 204.

GUIVERNAU, Miriam., SILVA DE SOUZA, Samara., VIÑAS, Marc., SEZERINO, Pablo., PELISSARI, Catiane., GARCÍA, Joan Y AVILA, Cristina. Unraveling the active microbial populations involved in nitrogen utilization in a vertical subsurface flow constructed wetland treating urban wastewater. En: Catiane Pelissari. Science of the Total Environment. (2017).

HABERL, R., PERFLER, R. Y MAYER, H. Constructed wetlands in Europe. En: Water, Science and Technology, Vol. 32. (1995). Pág. 305 – 315.

IBAÑEZ, Gina. Validación de la técnicas de análisis de agua: DQO, DBO<sub>5</sub>, sólidos totales, sólidos suspendidos y disueltos a través de evidencias estadísticas

conforme a los dispuesto en la norma ISO 17025 del 2005 y la identificación de mesofilos, coliformes totales y fecales, en la Universidad Libre Seccional Socorro. .2010. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

FERNANDEZ, Carolina y JIMENEZ, Yina. Estudio del comportamiento hidráulico de humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial para el tratamiento del lixiviado del relleno sanitario el ojito. (2014). Tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería Civil, programa de Ingeniería Ambiental, Universidad del Cauca.

JONG, J. The Purification of Wastewater with the Aid of Rush or Reed Ponds. Philadelphia: Universidad de Pennsylvania Press. (1976).

KADLEC, Robert., WALLANCE, Scott. Treatment wetlands. Londres: Taylor & Francis Group. (2009).

KADLEC, Robert. y R. KNIGHT. Treatment Wetlands. Boca Ratón, Florida. Lewis Publishers. (1996).

KORKUSUZ E.A., BEKLIOGLU M. Y DEMIRER G.N. Treatment efficiencies of the vertical flow pilot-scale constructed wetlands for domestic wastewater treatment. En: Turkish J. Eng. Env. Sci. Vol. 28. (2004). Pág. 333-344.

LUNA, Victor y ABURTO, Sergio. Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón. En Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas. Vol. 17, (2014). Pág. 32 – 55.

MALDONADO, Julio y RAMÓN, Jacipt. Sistema de tratamiento para aguas residuales en mataderos. En: Revista ambiental agua, aire y suelo. Vol 1, (2006); Pág. 34–47.

MITSCH, William. Y JAMES, Gosselink. Wetlands. 3 ed. New York: John Wiley and Sons, Inc, 2000.

MUÑOZ, Deyanira. Sistema de tratamiento de aguas residuales de matadero: para una población menor 2000 habitantes”. En biotecnología Universidad del Cauca. Vol. 3. (2005); Pág. 88 – 98.

MUÑOZ, Jessica y GUERRA, Daniela. Evaluación de sistemas de humedales construidos a escala piloto sembrados con dos tipos de macrófitas para el tratamiento del agua residual proveniente del sacrificio de porcinos en el matadero del municipio del Tambo cauca. El Tambo, 2016, Trabajo de Investigación (Tesis de pregrado en Ingeniería Ambiental), Universidad del Cauca, Facultad de Ingeniería Civil, Programa de Ambiental y Sanitaria.

ODONG, Robinson.; KANSIIME, F., OMARA, J. & KYAMBADDE, J. Tertiary treatment of abattoir wastewater in a horizontal subsurface flow-constructed wetland under tropical conditions En: *Environmental Technology and Management*. Vol.15. (2015).

ODONG, Robinson.; KANSIIME, F.; OMARA, J. & KYAMBADDE, J. The Potential of Four Tropical Wetland Plants for The Treatment of Abattoir Effluent. En *Environmental Technology and Management*, Vol. 16. (2013); Pág. 203–222.

OSNAYA, M. Propuesta de Diseño de un Humedal Artificial para el Tratamiento de Aguas Residuales en la Universidad de la Sierra Juárez. (2012). México: Universidad Sierra Juárez.

PAREDES, Yader. Estudio de calidad de las aguas residuales y optimización del sistema de tratamiento existente en la planta de sacrificio del municipio de Timbío en el departamento del cauca. (2016). Trabajo de grado. (Informe de pasantía por el título de Ingeniero Ambiental y Sanitario), Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, Popayán.

PIÑEYRO, Marcelo. Eficiencia En La Depuración De Un Efluente De Frigorífico Por Humedales Construidos A Escala. (2011). Tesis licenciatura en biología. Universidad De La Republica, Montevideo.

POGGI-VARALDO, Héctor., GUTIÉREZ-SARAVIA, Alejandro., FERNÁNDEZ-VILLAGÓMEZ, Georgina., MARTÍNEZ-PEREDA, Pedro. y RINDERKNECHT-SEIJAS, Noemí. A full-scale system with wetlands for slaughterhouse wastewater treatment. In: Nehring, K.W., Brauning, S.E. (Eds.), *Wetlands and Remediation II*. Battelle Press, Columbus, OH, 2002. Pág. 213–223.

QUIPUZCO Enrique. Evaluación del comportamiento de dos pantanos artificiales instalados en serie con *Phragmites Australis* para el tratamiento de aguas residuales domésticas. En: *Rev. Inst. Investig. Fac. Minas Metal. Cienc. Geogr.* Vol. 5. (2002); Pág. 52-57.

RANIERI, Ezio., GORGOGNONE, Angela. y SOLIMENO, Alessandro. A comparison between model and experimental hydraulic performances in a pilot-scale Horizontal subsurface flow Constructed wetland. En: *Ecological Engineering*. Vol. 60, (2013); Pág. 45 – 49.

REED, Sherwood. *Natural Systems for waste management and treatment*. New York, Estados Unidos: McGraw Hill. (1995).

REED, Sherwood., CRITES, Ronald. Y MIDDLEBROOKS, Joe. *Natural Systems for Waste Management and treatment*. McGraw Hill Professional. (1998).

SANCHEZ, Nazly. Estandarización de las condiciones que influyen en el tratamiento de agua residual domestica utilizando la técnica de humedales artificiales. Medellín, 2007 Trabajo de Investigación (Tesis de pregrado en Ingeniería Ambiental), Universidad del Cauca, Facultad de Ingeniería Civil, Programa de Ambiental y Sanitaria

SEIDEL, Karen. Zur Problematik der Keim- und Pflanzengewasser. En: Verh Internat. Verein. Limnol. Vol. 14, (1961). Pág 1035–1039.

SILVA, Juan. Humedales Construidos. En: Hydraulic and Environmental Engineering. (2002). Pág. 1- 18.

SORIANO, Carlos. Caracterización de la materia particulada de la linea de aguas residuales de un sistemas de humedales construidos. 2009. Tesis. Catalunya: Universidad Politécnica de Catalunya.

SPERLING, Marcos y CHERNICHARO, Carlos. Biological Wastewater treatment in warn climate regions. (2003).

TORRES, Patricia. Tratamiento De Aguas Residuales Del Proceso De Extracción De Almidón De Yuca En Filtro Anaerobio: Influencia Del Medio De Soporte. En Scientia et Technica. Vol. 23. (2003); Pág. 75 – 80.

TRUU Marika, JUHANSON jaanis y TRUU jaak. Microbial biomass, activity and community composition in constructed wetlands. En: Science of the total Environment. Vol. 407. (2009); Pág. 3958– 3971.

UNESCO. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. En Linea. (25 de Julio de 2016), Disponible en: (<http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002441/244103s.pdf>).

VIMAZAL, Jan. Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A review. En: Ecological Engineering. Vol. 73. (2014); Pág.724-751.

VIMAZAL, Jan. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Five Decades of Experience En: Environmental Science Technologic, Vol. 45, (2011); Pág. 61- 69.

VIMAZAL, Jan. Constructed Wetlands, Surface Flow. En: Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, (2015); Pág. 765 – 776.

VIMAZAL, Jan. Constructed Wetlands, Surface Flow. En: Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, (2012); Pág. 748 – 764.

VIMAZAL, Jan. Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: a review. Hydrobiologia, Vol. 674. (2011); Pág. 133–156.

VIMAZAL, Jan. The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. En: Ecological Engineering. Vol. 35, (2008); Pág. 1–17.

VIMAZAL, Jan. The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. En: Ecological Engineering. Vol. 35. (2009); Pág. 1 – 17.

VYMAZAL, Jan., OTTOVÁ, V y BALCAROVÁ, J. Microbial characteristics of constructed wetlands. En: Water Science and Technology. Vol. 35. (1997); Pág. 117 – 123.

WU, Shubiao., WALLACE, Scott., BRIX Hans., KUSCHK Peter., KIPKEMOI KIRUI, Wesley., MASI, Fabio Y RENJIE Dong. Treatment of industrial effluents in constructed wetlands: Challenges, operational strategies and overall performance. En Environmental pollution. Vol. 201. (2015); Pág 107 – 120.

YOCUM, Dayna. Manual de Diseño: Humedal Construido para el Tratamiento de las Aguas Grises por Biofiltración. Santa Barbara, California. Estados Unidos: Bren School of Environmental Science and Management, University of California. (2008).

## Anexo 1. Diseño de sedimentador primario y Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente FAFA.

### SEDIMENTADOR PRIMARIO

Se halla el volumen del sedimentador con el Caudal de diseño (Q) de 48 L/ día de la ecuación (1).

$$Q = \frac{V}{TRH} \quad (1)$$

Donde,

Q: Caudal de diseño

TRH: Tiempo de Retención hidráulica

V: Volumen

Según (Romero, 1999) el TRH para sedimentadores primarios rectangulares es de 4 días.

$$V = Q * TRH \quad (2)$$

$$V = 48 \frac{L}{día} * 4 \text{ Horas} * 1 \frac{día}{24 \text{ horas}}$$

$$V = 8 L * \frac{1m^3}{1000L}$$

$$V = 0.008 m^3$$

Para el área del sedimentador se asume una altura de 0.20 m y una relación de largo ancho de 1.5:1 de acuerdo a lo establecido en la RAS 2000.

Así

$$V = A * h \quad (3)$$

Donde,

A: Área del sedimentador  
h: altura del sedimentador

$$A = \frac{0,008 \text{ m}^3}{0.20 \text{ m}}$$

$$A = 0.04 \text{ m}^2$$

Luego y de acuerdo a la relación 1.5:1

$$A = b * l \tag{4}$$

Donde,

b: ancho del sedimentador  
l: largo del sedimentador

$$l = 1.5 * b \tag{5}$$

Se relaciona (4) y (5) así,

$$A = b * l \tag{6}$$

$$A = b * (1.5 * b)$$

$$A = 1.5 b^2$$

Se obtiene el ancho (b)

$$b = \sqrt{\frac{A}{1.5b^2}}$$

$$b = \sqrt{\frac{0.04 \text{ m}^2}{1.5}}$$

$$b = 0.16 \text{ m}$$



Así el largo es,

$$l = 1.5 * 0.16 \text{ m}$$

$$l = 0.24 \text{ m}$$

Se asume una pendiente suave de 0.02m.

### FILTRO ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE (FAFA)

Se realizó el diseño el FAFA con un caudal de entrada al sistema de  $Q= 48 \text{ L/día}$ , ya que este es caudal necesario para garantizar tiempos de retención y eficiencias de remoción en los HC.

Se calcula el tiempo de retención hidráulico y los valores del coeficiente característico del sustrato en digestión K, basado en la tabla E.4.29 de la RAS2000. Para un valor de DBO5 a la entrada del filtro de  $1720.25 \text{ mg/L}$ .

**Tabla 1. Tiempos de retención hidráulica y valores de k**

Rango de la concentración orgánica del afluente al filtro anaerobio. (Expresada en $\text{DBO}_{\text{TOTAL}}$ en mg/L)	Rango del tiempo de retención hidráulica en el filtro anaerobio. Se expresa $t_{\text{min}}$ , $t_{\text{max}}$ , $t_{d1}$ y $t_{d2}$ . Donde el tiempo de diseño $t_d$ es igual a $(t_{d1} + t_{d2})/2$ . (horas)				Valores del coeficiente característico del sustrato en digestión, K, para un sustrato "típico" doméstico o municipal, correspondiente a los t expresados en la columna anterior			
	$t_{\text{min}}$	$t_{d1}$	$t_{d2}$	$t_{\text{max}}$	Para $t_{\text{min}}$	Para $t_{d1}$	Para $t_{d2}$	Para $t_{\text{max}}$
Mínima : 50 Co (media): 65 Máxima: 80	3.0	4.0	6.5	12	1.4	1.5	1.6	1.8
Mínima : 80 Co (media): 190 Máxima: 300	2.5	4.0	6.5	12	1.0	1.1	1.3	1.7
Mínima : 300 Co (media): 650 Máxima: 1000	2.5	4.0	6.5	12	1.4	1.6	1.8	2.1
Mínima : 1000 Co(media): 3000 Máxima: 5000	3.0	6.0	8.0	12	1.7	1.9	2.1	2.5

**Fuente: RAS 2000**

Cálculo del tiempo de retención hidráulico de diseño:

$$td = \frac{td_1 + td_2}{2}$$

$$td = \frac{6 + 8}{2}$$

$$td = 7$$

Calculo de los valores del coeficiente característico del sustrato en digestión

$$K = \frac{K_1 + K_2}{2}$$

$$K = \frac{1.9 + 2.1}{2}$$

$$K = 2$$

Calculo el volumen útil,

$$V = Q * \emptyset$$

$$V = 0.048 \frac{m^3}{día} * 7 \text{ horas} * \frac{1 \text{ día}}{\text{hora}}$$

$$V = 0.014 m^3$$

### Área superficial

Asumiendo una profundidad útil de 0.20 m, se asume esta altura porque el sistema a diseñar es a escala piloto.

$$A = \frac{0.014 m^3}{0.20m}$$

$$A = 0.07 m^2$$

### Eficiencia esperada:

Se realiza el siguiente cálculo, según Romero Rojas

$$E = 100 \left( 1 - \frac{k}{\phi^m} \right)$$

Asumiendo un factor de lecho (m) de 0,660 correspondiente a grava de tritura que fue el medio que se utilizó.

$$E = 100 \left( 1 - \frac{2}{70^{0.660}} \right)$$

$$E = 45 \%$$

Eficiencia requerida:

$$E = \frac{1720.25 \frac{mg}{L} - 1100 \frac{mg}{L}}{1720.25 \frac{mg}{L}} * 100$$

$$E = 36 \%$$

Despejando  $\phi$

$$36 = 100 * \left( 1 - \frac{2}{\phi^{0.660}} \right)$$

$$\phi = 5.55 \text{ horas}$$

$$\phi = 0.23125 \text{ días}$$

Calculo del volumen útil con tiempo de retención hidráulico de 5.55 horas

$$V = \frac{Q}{\phi}$$

$$V = 0.048 \frac{m^3}{día} * 5.55 \text{ Horas} * \frac{día}{24 \text{ horas}}$$

$$V = 0.012m^3$$

Las dimensiones del filtro se calcularon en base a las RAS2000 en el literal E.4.7.9.2 para filtros rectangulares.

$$b \leq l \leq 3b$$

$$L \leq 2H$$

Así las dimensiones del FAFA son:

$$b = 0.16 \text{ m}$$

$$L = 0.24 \text{ m}$$

$$Bl = 0.10 \text{ m}$$

$$H = 0.30 \text{ m}$$

$$hu = 0.20 \text{ m}$$

## Anexo 2. Diluciones usadas en el proceso de aclimatación

Ecuación general de las relaciones usadas para la alimentación del sistema.

$$\frac{1}{\text{efluente}} = \frac{x}{\text{agua potable}}$$

### 1. Relación 1:7

Se usaron 420 L de agua potable y 60 L del efluente recolectado al cual se le realiza proceso de cernido y tamizaje.

$$x = 7$$

La dilución obtenida es del 12,5 % siendo concentración del afluente.

### 2. Relación 1:5

Se usaron 400 L de agua potable y 80 L del efluente cernido y tamizado.

$$x = 5$$

La dilución obtenida es del 16,7 % siendo concentración del afluente.

### 3. Relación 1:1

Se usaron 240 L de agua potable y 240 L del efluente cernido y tamizado.

$$x = 1$$

La dilución obtenida es del 50 % siendo concentración del afluente.

### 4. Relación 1:0.43

Se usaron 144 L de agua potable y 336 L del efluente cernido y tamizado.

$$x = 0.43$$

La dilución obtenida es del 70 % siendo concentración del afluente.

### Anexo 3. DBO<sub>5</sub> estimada y porcentajes de remoción teóricos

A continuación se presentan los promedios de los datos reportados por el análisis fisicoquímico de los tres muestreos iniciales, para los parámetros que serán base para la DBO<sub>5</sub> estimada, los datos base para el promedio se pueden ver en el anexo 4.

**Tabla 1. Promedios de los tres muestreos iniciales para DBO<sub>5</sub> y DQO**

PARAMETRO	ALMACENAMIENTO	HC-h1	HC-h2	HC-c1	HC-c2
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	4250,00	1159,3	482,67	880,33	511,00
DQO (mg/L)	5636,67	1654,00	857,67	1244,00	896,67
DBO <sub>5</sub> /DQO Relación	0,7540	0,7009	0,5628	0,7077	0,5699

Con la relación obtenida DBO<sub>5</sub>/DQO se encuentra la DBO<sub>5</sub> estimada para los tres muestreos finales donde se logró analizar solamente la variable DQO para cada tratamiento, de la siguiente manera.

$$\frac{DBO_5}{DQO} = Relación$$

$$DBO_5 = Relación * DQO$$

De esta forma encontramos el valor de DBO<sub>5</sub> estimada reportada en la tabla 2.

**Tabla 2. DBO<sub>5</sub> estimada para los tres muestreos finales**

MUESTREO	ALMACENAMIENTO	HC-h1	HC-h2	HC-c1	HC-c2
4	1210	111	50	353	97
5	1395	449	79	166	114
6	4283	77	46	158	91

**Anexo 4. Valores parámetros fisicoquímicos reportados por el laboratorio de la Corporación Autónoma Regional del Cauca CRC**

<b>Sistemas</b>	<b>Muestreo</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/L)</b>	<b>DQO (mg/L)</b>	<b>SST (mg/L)</b>	<b>pH</b>	<b>°T (°C)</b>	<b>Grasas y Aceites (mg/L)</b>
<b>HC-h 1</b>	<b>1</b>	1900	2270	75	6,69	16	21,4
	<b>2</b>	1254	1887	70	7,97	21,9	23,1
	<b>3</b>	324	805	47,5	8,26	22	17,3
	<b>4</b>	111	159	33,3	7,47	22	N.A.
	<b>5</b>	449	641	155	8,07	20	N.A.
	<b>6</b>	77	110	42,5	7,77	22	N.A.
<b>HC-h 2</b>	<b>1</b>	997	1393	60	6,93	19	13,3
	<b>2</b>	303	899	72,5	8,21	21,9	17,8
	<b>3</b>	148	281	45	7,9	22	12,9
	<b>4</b>	50	88	48,2	7,6	22	N.A.
	<b>5</b>	79	140	22,8	7,78	20	N.A.
	<b>6</b>	46	81	41,7	7,46	22	N.A.
<b>HC-c 1</b>	<b>1</b>	985	1471	80	6,76	19	16,7
	<b>2</b>	1356	1752	66,7	7,93	22,5	22,6
	<b>3</b>	300	509	40	8,14	22	14,8
	<b>4</b>	353	499	66,6	7,55	20	N.A.
	<b>5</b>	166	235	50	8,16	20	N.A.
	<b>6</b>	158	223	36,7	7,31	22	N.A.
<b>HC-c 2</b>	<b>1</b>	413	807	42	7,19	19	11,1
	<b>2</b>	986	1597	66,7	8,13	21,9	19,3
	<b>3</b>	134	286	40	7,73	22	13,3
	<b>4</b>	97	170	86,7	7,29	22	N.A.
	<b>5</b>	114	200	85,7	8,02	20	N.A.
	<b>6</b>	91	160	70	7,28	22	N.A.
<b>Entrada</b>	<b>1</b>	4515	4620	470	6,61	21	66,1
	<b>2</b>	4590	6940	1030	7,29	25	116
	<b>3</b>	3645	5350	837	7,5	22	88,9
	<b>4</b>	1210	1605	660	6,72	18	N.A.
	<b>5</b>	1395	1850	287	7,31	22	N.A.
	<b>6</b>	4283	5680	1720	6,87	26	N.A.

### Anexo 5. Porcentajes de remoción para cada muestreo

Se trabajaron con las remociones teóricas para el sedimentador primario y FAFA por lo tanto se generaron tres valores negativos que fueron excluidos de por el programa estadístico SPSS.

<b>Sistemas</b>	<b>Muestreo</b>	<b>%RemDBO5</b>	<b>%RemDQO</b>	<b>%RemSST</b>
<b>HC-h 1</b>	<b>1</b>	6	-10	41
	<b>2</b>	39	39	75
	<b>3</b>	80	66	79
	<b>4</b>	79	78	81
	<b>5</b>	28	23	-99
	<b>6</b>	96	96	91
<b>HC-h 2</b>	<b>1</b>	51	33	53
	<b>2</b>	85	71	74
	<b>3</b>	91	88	80
	<b>4</b>	91	88	73
	<b>5</b>	87	83	71
	<b>6</b>	98	97	91
<b>HC-c 1</b>	<b>1</b>	51	29	37
	<b>2</b>	34	44	76
	<b>3</b>	82	79	82
	<b>4</b>	35	31	63
	<b>5</b>	73	72	36
	<b>6</b>	92	91	92
<b>HC-c 2</b>	<b>1</b>	80	61	67
	<b>2</b>	52	49	76
	<b>3</b>	92	88	82
	<b>4</b>	82	76	52
	<b>5</b>	82	76	-10
	<b>6</b>	95	94	85



**Anexo 6. Res. 631 de 2015.**

**“Por la cual se establecen 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”**

A continuación se presentan la relación de parámetros y límites máximos permisibles de acuerdo a la actividad de GANADERIA, para el proceso de sacrificio.

PARÁMETRO	UNIDADES	GANADERIA DE BOVINO, BUFALINO, EQUINO, OVINO Y/O CAPRINO	GANADERIA DE BOVINO, BUFALINO, EQUINO, OVINO Y/O CAPRINO	GANADERIA DE PORCINOS	GANADERIA DE PORCINOS
		CRÍA	BENEFICIO	CRÍA	BENEFICIO
<b>Generales</b>					
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O <sub>2</sub>	500,00	900,00	900,00	800,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/L O <sub>2</sub>	250,00	450,00	450,00	450,00
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	150,00	200,00	400,00	200,00
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	5,00	5,00	5,00	5,00
Grasas y Aceites	mg/L	20,00	50,00	20,00	30,00
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
<b>Compuestos de Fósforo</b>					
Ortofosfatos (P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Fósforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
<b>Compuestos de Nitrógeno</b>					
Nitratos (N-NO <sub>3</sub> )	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitritos (N-NO <sub>2</sub> )	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH <sub>3</sub> )	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitrógeno Total (N)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
<b>Iones</b>					
Cloruros (Cl)	mg/L		500,00		500,00
Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L		500,00		500,00
<b>Otros Parámetros para Análisis y Reporte</b>					
Acidez Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Alcalinidad Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Dureza Cálcica	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Dureza Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte