

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO  
SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL PARA LA BIORREMEDIACIÓN DE AGUAS  
MIELES DE CAFÉ, EN LA FINCA LA CLANERA, VEREDA LA CHORRERA DEL  
MUNICIPIO DE TIMBIO, CAUCA

JUAN DAVID ZÚÑIGA FERNÁNDEZ



FUNDACIÓN  
UNIVERSITARIA  
DE POPAYÁN  
35 ANIVERSARIO

FUNDACION UNIVERSITARIA DE POPAYAN  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES  
PROGRAMA DE ECOLOGIA  
POPAYAN  
2019

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO  
SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL PARA LA BIORREMEDIACIÓN DE AGUAS  
MIELES DE CAFÉ, EN LA FINCA LA CLANERA, VEREDA LA CHORRERA DEL  
MUNICIPIO DE TIMBIO, CAUCA.

AUTOR  
JUAN DAVID ZÚÑIGA FERNÁNDEZ

TRABAJO DE GRADO

DIRECTOR  
DANIEL ANDRES FERIZ GARCIA  
BIOLOGO. Mg RECURSOS HIDROBIOLOGICOS CONTINENTALES

CODIRECTOR

VICTORIA PIZO  
QUÍMICA

FUNDACION UNIVERSITARIA DE POPAYAN  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES  
PROGRAMA DE ECOLOGIA  
POPAYAN  
2019



FUNDACIÓN  
UNIVERSITARIA  
DE POPAYÁN  
35 ANIVERSARIO

FUNDACION UNIVERSITARIA DE POPAYAN  
PROGRAMA DE ECOLOGÍA

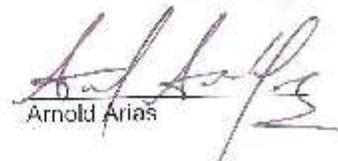
ACTA DE SUSTENTACIÓN PRIVADA

Siendo las 10:30 am, del día 19 de marzo del 2019 fueron convocados en el auditorio en la sede Los Robles, los jurados: Luis Gerardo Chilito y Arnold Arias, en calidad de pares evaluadores del proyecto de grado denominado, "IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL PARA LA BIORREMEDIACIÓN DE AGUAS MIELES DE CAFÉ, EN LA FINCA LA CLANERA, VEREDA LA CHORRERA DEL MUNICIPIO DE TIMBIO, CAUCA", presentado por el estudiante Juan David Zúñiga Fernández, asesorado por Daniel Feriz Garcia.

El trabajo se considera: Aprobado.

Para constancia se firma a los 19 días del mes marzo del 2019.

  
Luis Gerardo Chilito

  
Arnold Arias



Redes administrativas: Timbío San Juan Cauca y Nechí - Atl. - Los Postos en Nechí - Cauca  
Calle 4 No. 1940 San Juan de los Rios, Cauca

Popayán, Cauca, Colombia  
Rég. No. 25810745 | [www.fup.edu.co](http://www.fup.edu.co) | Fundación Universitaria de Popayán



FUNDACIÓN  
UNIVERSITARIA  
DE POPAYÁN  
35 ANIVERSARIO

## ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA TRABAJO DE GRADO

FECHA: 19 de noviembre del 2018  
HORA: 11:00 am.  
LUGAR: Fundación Universitaria de Popayán sede Los Robles.

Se realizó la Sustentación Pública del Trabajo de Grado denominado:  
"IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO  
SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL PARA LA BIORREMEDIACIÓN DE AGUAS  
MIELES DE CAFÉ, EN LA FINCA LA CLANERA, VEREDA LA CHORRERA DEL  
MUNICIPIO DE TIMBIO, CAUCA", presentado por el estudiante Juan David Zúñiga  
Fernández, asesorado por Daniel Feriz García.

El trabajo se considera:  
APROBADO:

*Luisa Fernanda García V*  
Luisa Fernanda García Varela  
Directora del programa de Ecología

**Se adjunta acta de asistencia.**



Sedes administrativas: Claustro San José Calle 5 No. 8-58 - Los Robles km 8 vía al sur  
Sede Norte del Cauca: Calle 4 No. 10-50 Santander de Quilichao

Popayán, Cauca, Colombia  
PBX: (57-2) 8330225 | [www.fup.edu.co](http://www.fup.edu.co) | Fundación Universitaria de Popayán

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo va dedicado a mi madre Olga Jimena Fernández por brindarme su apoyo en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor. A mi padre Ruber Zúñiga por los ejemplos dados motivándome a salir adelante y su apoyo incondicional, a mis hermanos Gustavo Zúñiga, Fernando Zúñiga, a mi novia Denise Astudillo, quienes son y serán el más grande motivo para alcanzar mis objetivos y su especial cariño y amor ilimitado que han permitido conseguir un logro más en mi vida, y por quien lucho diariamente. Igualmente un agradecimiento muy especial a mis tíos y tías; y demás familiares y amigos infinitas gracias.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por darme la posibilidad de cumplir las metas propuestas para ser una persona cada vez mejor.

A mi familia por su esfuerzo, sacrificio y apoyo incondicional.

A Daniel Andrés Feriz García Biólogo. Mg Recursos Hidrobiológicos Continentales, director de esta investigación, por su apoyo, acompañamiento y dedicación.

A Victoria Pizo Química, instructora SENA, codirectora de la investigación por sus asesorías, dedicación y aporte en el desarrollo de esta investigación.

A los docentes del área académica del pregrado en ecología de la Fundación universitaria de Popayán, por compartir sus conocimientos y experiencias durante nuestro proceso de formación profesional.

Al personal de laboratorio de la fundación universitaria de Popayán por el apoyo brindado en la fase analítica del desarrollo de la investigación.

A Darío Daza, por dar el permiso en la finca la Clanera para la ejecución del proyecto de investigación.

Al ingeniero ambiental Huber Manuel Pino Alegría asesor del proyecto por su apoyo y colaboración durante la investigación.

Además de esto, agradezco a todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron o participaron en la realización de esta investigación, por lo que brindo el más sincero agradecimiento

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
1. INTRODUCCIÓN .....	16
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	18
3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN .....	20
4. JUSTIFICACIÓN .....	21
5. OBJETIVOS .....	22
5.1. OBJETIVO GENERAL .....	22
5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	22
6. MARCO TEÓRICO.....	23
6.1. EL CAFÉ .....	23
6.1.1. Beneficio del café .....	23
6.1.2. Beneficio tradicional.....	23
6.2. HUMEDALES ARTIFICIALES.....	24
6.2.1. Humedales de flujo subsuperficial .....	26
6.2.2. Humedales subsuperficiales de flujo horizontal .....	26
6.2.3. Procesos de remoción .....	27
6.2.4. Componentes de un humedal artificial.....	27
6.3. VEGETACIÓN ESTUDIADA .....	28
6.3.1. Heliconia .....	29
6.3.2. Junco .....	29
6.3.3. Caña brava .....	30
7. MARCO DE REFERENCIA .....	31
8. ANTECEDENTES .....	34
9. METODOLOGÍA.....	38
9.1. LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	38
9.2. MATERIALES .....	40
9.3. MÉTODOS.....	40
9.3.1. Parámetros fisicoquímicos de aguas mieles.....	41
9.3.2. Sistema de tratamiento a escala piloto. ....	43

9.3.3.	Construcción del sistema de humedal artificial para aguas mieles de café.	45
9.3.4.	Aclimatación de las especies vegetales.....	46
9.3.5.	Determinación de la eficiencia del sistema .....	48
10.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	49
10.1.	CARACTERIZACIÓN DEL VERTIMIENTO. ....	49
10.2.	ESTABLECIMIENTO DEL SISTEMA DE HUMEDAL ARTIFICIAL PARA AGUAS MIELES DE CAFÉ.....	51
10.3.	DESARROLLO DE LAS PLANTAS EN EL SISTEMA DE TRATAMIENTO.	53
10.4.	Junco ( <i>Juncus effusus</i> ).....	53
10.4.1.	Heliconia ( <i>Heliconia wagneriana</i> ).....	54
10.4.2.	Caña brava .....	56
10.4.3.	Control de crecimiento.....	57
10.5.	PARÁMETROS EVALUADOS EN LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE CARGA CONTAMINANTE EN EL PROCESO DE BIORREMEDIACIÓN DE AGUAS MIELES DE CAFÉ.....	60
10.5.1.	Demanda Química de Oxígeno DQO. ....	62
10.5.2.	Demanda Biológica de Oxígeno DBO <sub>5</sub> .....	65
10.5.3.	Oxígeno Disuelto OD.....	68
10.5.4.	NITROGENO (Nitratos, Nitritos, Amonio).....	71
10.5.5.	Fosfatos.....	78
10.5.6.	Turbidez.....	81
10.5.7.	pH.....	84
10.5.8.	CONDUCTIVIDAD.....	86
11.	CONCLUSIONES .....	89
12.	RECOMENDACIONES .....	91
13.	BIBLIOGRAFÍA .....	92
14.	GLOSARIO. ....	95
15.	ANEXOS .....	97

## LISTA DE CONTENIDO DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Clasificación de humedales artificiales. ....	25
Figura 2. Humedal de flujo superficial. ....	25
Figura 3. Humedal de flujo subsuperficial horizontal. ....	26
Figura 4. Localización área de estudio. ....	38
Figura 5. Beneficiadero y disposición final del vertimiento. ....	39
Figura 6. Caracterización del vertimiento. ....	41
Figura 7. Diseño sistema de tratamiento. ....	43
Figura 8. Modelo 3D del sistema de tratamiento. ....	44
Figura 8. Sistema de tratamiento implementado. ....	44
Figura 9. Siembra y aclimatación de las especies vegetales. ....	47
Figura 11. Adecuación del terreno. ....	52
Figura 12. Ubicación unidades experimentales ....	52
Figura 13. Llenado tanque almacenamiento. ....	52
Figura 14. Desarrollo junco agua miel. ....	53
Figura 15. Desarrollo agua potable. ....	54
Figura 16. Desarrollo Heliconia agua miel. ....	55
Figura 17. Desarrollo Heliconia agua potable. ....	56
Figura 18 caña brava en el sistema de HA. ....	56

## LISTA DE CONTENIDO DE GRAFICAS

Pág.

Grafica 1. Crecimiento de especies vegetales en el tiempo. ....	57
Grafica 2 Media de crecimiento. ....	59
Grafica 3. Biodegradabilidad de materia orgánica en el sistema de tratamiento. ..	61
Grafica 4. Porcentajes de remoción de DQO en el tiempo. ....	62
Grafica 5. Medias de DQO entre tratamientos. ....	64
Grafica 6. Media de entra y salida de DQO en el sistema. ....	65
Grafica 7. Porcentajes de remoción de DBO <sub>5</sub> a través del tiempo.....	66
Grafica 8. Media de remoción de DBO <sub>5</sub> entre tratamientos. ....	67
Grafica 9. Media de entrada y salida de DBO entre tratamientos. ....	68
Grafica 10. Comportamiento Del Oxígeno Disuelto En El Tiempo.....	69
Grafica 11. Medias O.D en la salida entre los distintos tratamientos. ....	69
Grafica 12 media de entrada y salida de O.D en mg/L .....	70
Grafica 13. Concentración de Nitratos (mg/L) en el tiempo. ....	72
Grafica 14. Media De Porcentaje De Remoción De Nitratos entre tratamientos....	73
Grafica 15. Media de entrada y salida de nitratos mg/L.....	74
Grafica 16 Concentración De Nitritos En El Tiempo .....	75
Grafica 17. Media de nitritos entre los tratamientos.....	75
Grafica 18. Media de entrada y salida de NO <sub>2</sub> mg/L.....	76
Grafica 19 concentración de amonio en el tiempo .....	77
Grafica 20. Media de amonio entre tratamientos. ....	77
Grafica 21. Media de entrada y salida de amonio mg/L.....	78
Grafica 22 Comportamiento De Los Fosfatos En El Tiempo. ....	79
Grafica 23. Media de porcentajes de remoción de fosfatos .....	80
Grafica 24. Media de entrada y salida de fosfatos mg/L .....	81
Grafica 25. Comportamiento de la Turbidez en el tiempo.....	82
Grafica 26 porcentajes medios de remoción de turbidez .....	83
Grafica 27. Media de entrada y salida de turbidez.....	84
Grafica 28. Comportamiento del PH en el tiempo.....	85
Grafica 29. Media de pH entre tratamientos. ....	85
Grafica 30. Media de entrada y salida del pH. ....	86
Grafica 31. Comportamiento de la conductividad en el tiempo. ....	87
Grafica 32. Media de porcentaje de remoción entre tratamientos.....	87
Grafica 33. Media de entrada y salida de conductividad.....	88

## LISTA DE CONTENIDO TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Materiales de construcción.....	40
Tabla 2. Equipos de medición de parámetros fisicoquímicos.....	42
Tabla 3. Resolución 0631 de 2015 niveles permitidos.....	49
Tabla 4. Valores medios del análisis fisicoquímico de las aguas mieles de café a la entrada (afluente) y la salida (efluente) del sistema en los distintos tratamientos implementados. ....	60

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo 1. Resultados de laboratorio .....	97
Anexo 2. Resultados eficiencia de remoción % .....	99
Anexo 3. Análisis estadístico (significancia), media de remoción. ....	100
Anexo 4. Prueba T para muestras relacionadas. ....	108
Anexo 5 Análisis estadístico de crecimiento. ....	112
Anexo 6. Informe de caracterización del vertimiento. ....	114
Anexo 7. Fotos.....	115

## LISTA DE ACRÓNIMOS

<b>C</b>	control con agua miel de café.
<b>CB</b>	Caña Brava " <i>Gynerium sagittatum</i> "
<b>CC</b>	café cereza
<b>CPS.</b>	Café pergamino seco
<b>DBO</b>	Demanda biológica de oxígeno
<b>DQO</b>	Demanda química de Oxígeno
<b>H</b>	Heliconia
<b>HA</b>	Humedal artificial
<b>HAFSSH</b>	humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal
<b>J</b>	Junco
<b>N</b>	Nitrógeno
<b>NH<sub>3</sub></b>	Amoniaco
<b>NO<sub>2</sub>-</b>	Nitritos
<b>NO<sub>3</sub>-</b>	Nitrato
<b>O.D</b>	Oxígeno Disuelto
<b>PO<sub>4</sub></b>	Fósforo
<b>SST</b>	Sólidos Suspendidos Totales
<b>TRH</b>	Tiempo de retención hidráulico
<b>UE</b>	Unidad Experimental

## RESUMEN

Este estudio evaluó la eficiencia del sistema de humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) en la remoción de materia orgánica y nutrientes presentes en el agua miel de café en la finca La Clanera, vereda La Chorrera del municipio de Timbio, Cauca. Se establecieron trece unidades experimentales (UE), plantando tres con *Juncus effusus*, tres con *Heliconia wagneriana*, tres con *Gynerium sagittatum*, y un control agregándoles agua miel de café, además de estas se plantaron en agua potable tres humedales de control de crecimiento cada uno con una especie vegetal. De las distintas unidades experimentales solamente sobrevivieron dos especies (*Juncus effusus*, *Heliconia wagneriana*) las cuales se aclimataron en el sistema de tratamiento para agua miel de café, y con estas se realizó el estudio.

Las medidas que se manejaron para las UE fueron de 35.5 cm de ancho, 52 cm de largo y 28.5 cm de profundidad, utilizando como medio de soporte grava de 1/2 pulgada de diámetro, con un caudal de 1.365 L/día y un tiempo de retención hidráulico de 4 días. Se realizaron mediciones cada 15 días durante 4 meses de la concentración de DBO, DQO, Nutrientes (nitratos, nitritos, amonio, fosfatos), oxígeno disuelto, el comportamiento del pH, conductividad, turbidez a la entrada y salida de los humedales artificiales.

Las remociones medias obtenidas para un tiempo de retención hidráulico de 4 días para los tratamientos con heliconia, junco y el control fueron: DQO 54%, 48%, 44%, DBO<sub>5</sub> 65%, 56%, 22%, Fosfatos 62%, 56%, 22% respectivamente por cada tratamiento. Se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los HAFSSH-H y los HAFSSH-J para la eficiencia de remoción de DQO, DBO<sub>5</sub>, y Fosfatos, en cuanto al N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> no se encontraron diferencias significativas. Se concluye que el sistema de humedales es eficiente para ser implementado a escala real para el tratamiento de aguas mieles de café, obteniendo las mejores eficiencias de remoción de materia orgánica y nutrientes en los HAFSSH-H.

**Palabras claves:** Humedales artificiales, agua miel de café, macrófitas, Junco, Heliconia.

## ABSTRACT

The study assessed the artificial humedal system efficiency of horizontal sub-superficial in organic matter and nutrients removal presents in honey water's coffee in La Clanera farm, La Chorrera sector from Timbio-Cauca. Thirteen experimental units were established planting three with *juncus effusus*, three with *heliconia wagneriana*, three with *gynerium sagittatum*, and a control adding honey water's coffee, in addition of these, three growth control's wetlands were planted in potable water each one with a vegetal specie. Of the different experimental units only two species survived which were acclimate in honey water's coffee treatment system, and the study was made with these.

The measures that were handled for UE were 35.5 wide, 52 cm long and 28.5 deep, using gravel 1/2 inches perimeter like support way, with a flow of 1356 L/day and a four days hydraulic retention time. Measures were made every other week during four months of concentration of DBO, DQO, nutrients (nitrates, nitrites, ammonium phosphates) free oxygen, pH behavior, conductivity, entrance turbidity and artificial wetlands's way out.

The average removals obtained during a hydraulic detention time of four days for the treatment with heliconia, junco and the control were: DQO 54%, 48%, 44%, DBO<sub>5</sub> 65%, 56%, 22%, phosphates 62%, 56%, 22% respectively for each treatment. Statistically significant differences were found between the HAFS and HAFSS for the efficiency of removal of DBO, DQO and phosphates, as for N-NO<sub>3</sub> not significant differences were found. Concluding the wetlands system is efficient to be real scale implemented, obtaining best organic matter removals efficiencies and nutrients in...

**Key words:** artificial wetlands, honey water's coffee, macrophytes, heliconia, junco.

## 1. INTRODUCCIÓN

La caficultura en Colombia es una de las actividades económicas más representativas en distintas zonas del país, con lo cual se ha logrado entrar en mercados internacionales por la exportación del café pergamino seco, el cual es muy buscado al ser parte de los cafés suaves más gustados, por tener una de las mejores tasas, además con esta actividad se genera gran cantidad de empleo para la población colombiana, pero a la vez se genera una problemática ambiental asociada al manejo inadecuado de los subproductos del café, por esto se ha generado la necesidad de estudiar e implementar las alternativas y las técnicas que existen para realizar el tratamiento de las aguas mieles.<sup>1</sup>

Los humedales naturales son aquellos lugares terrestres que permanecen inundados o saturados de agua durante al menos un tiempo lo suficientemente prolongado, como para que se desarrolle en ellos un tipo de vegetación característica, adaptada a esas condiciones de inundación o saturación de agua. La importancia de los humedales naturales radica tanto en sus peculiaridades biológicas (vegetación y fauna especializada) como en las funciones que desempeñan en el ciclo del agua y de la materia orgánica, reciclado de nutrientes, mantenimiento de redes tróficas y estabilización de sedimentos. Tienen un importante papel como 'depuradoras' naturales, contribuyendo al mantenimiento de la calidad de las aguas subterráneas y superficiales<sup>2</sup>

Una alternativa implementada es el mecanismo de los humedales artificiales (HA), este se usa para simular la capacidad de un humedal natural con el propósito de tratar las aguas residuales de empresas y municipios,<sup>3</sup> en diferentes áreas productivas como lo es la minería, aguas industriales y aguas domésticas, siendo estos muy eficientes.<sup>4</sup>

---

<sup>1</sup> CÁRDENAS, R; Ortiz, J. Manejo Integrado Del Recurso Agua, En El Proceso De Beneficio Húmedo Del Café, Para La Asociación De Productores De Café Especial "ACAFETO" En El Municipio De Fresno, Departamento Del Tolima. Tesis De Grado Para Optar Por El Título De Magister En Desarrollo Sostenible Y Medio Ambiente. Universidad De Manizales. 2014. P. 11.

<sup>2</sup> FERNÁNDEZ *et al.*, 2004 citado por: DELGADO, L., PINO, H. 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. Para Obtener El Título De Ingeniero Ambiental. Popayán.: Universidad Del Cauca Facultad De Ingeniería Civil Programa De Ingeniería Ambiental. 2015. P. 21 - 22

<sup>3</sup> HARO, M; APONTE, N. Evaluación De Un Humedal Artificial Como Tratamiento De Agua Residual En Un Asentamiento Irregular. Trabajo De Grado Para Obtener El Título De Ingeniero Industrial. Ciudad Universitaria.: Universidad Nacional Autónoma De México Facultad De Ingeniería División De Ingeniería Mecánica e Industrial. 2010.

<sup>4</sup> OSNAYA, M; Propuesta de Diseño de un Humedal Artificial para el Tratamiento de Aguas Residuales en la Universidad de la Sierra Juárez. Universidad del Sierra Juárez. México 2012

Es así como los humedales artificiales son sistemas de fitodepuración de aguas residuales, que se realiza mediante un sistema que tienen tres partes principales: Recogida, tratamiento, y evacuación al lugar de restitución<sup>5</sup>. El sistema consiste en el desarrollo de un cultivo de macrófitas enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado, la acción de las macrófitas hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual (afluente), es depurada progresiva y lentamente, utilizando diferentes especies de plantas.<sup>6</sup>

En el presente estudio se evaluaron las eficiencias de remoción de materia orgánica y nutrientes en un sistema de humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH), para la biorremediación de aguas mieles a escala piloto, plantado con las especies vegetales *Juncus effusus*, *Heliconia wagneriana* y *Gynerium sagittatum*, determinando cual especie es más eficiente para controlar y disminuir la carga contaminante en el manejo de estos vertimientos.

---

<sup>5</sup> ZAPATA, A; Humedales Artificiales; Una Propuesta Para La Mitigación de La Contaminación Hídrica De La Quebrada La Nutria, De Los Cerros Orientales De Bogotá D.C. Universidad De Manizales Facultad De Ciencias Contables Económicas Y Administrativas Maestría En Desarrollo Sostenible Y Medio Ambiente Manizales, Colombia 2014 P. 20

<sup>6</sup> DELGADILLO, Oscar. *et al.* Depuración De Aguas Residuales Por Medio De Humedales Artificiales. Cochabamba – Bolivia.: Universidad Mayor De San Simón, 2010. P. 7.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La expansión de la zona cafetera en Colombia en los últimos años, se ha ido extendiendo en gran medida, cubriendo grandes áreas de terreno, el departamento del Cauca y el municipio de Timbio juegan un factor importante en el auge de crecimiento de este cultivo, con una alta producción de sacos de café aportando así a la economía nacional.<sup>7</sup> El municipio de Timbio cuenta con condiciones óptimas para el desarrollo agropecuario, y más para el café que es la principal base económica, generando desarrollo para los habitantes de la zona, pero a la vez causando un gran impacto ambiental por no realizar un buen manejo de residuos. En la vereda La Chorrera todas las familias cuentan con un cultivo de café en pequeña y gran escala, la cual es la fuente de ingresos económicos, pero las fincas no cuentan con un sistema de tratamiento para las aguas mieles, y estas son vertidas directamente a los suelos y fuentes de agua sin el respectivo manejo.

El crecimiento que ha tenido la caficultura deja en evidencia la gran demanda del recurso hídrico para los procesos de producción del cultivo. En la época de cosecha de este producto, se generan residuos como las aguas mieles (mucilago) el cual aporta hasta un 28% aproximadamente de contaminación en todo el proceso debido a su alta carga orgánica, y el manejo inadecuado de estos vertimientos causan un gran impacto ambiental.<sup>8</sup> Generando la menor disponibilidad del recurso hídrico, afectando las diferentes formas de vida contaminando los suelos, agua y aire.

La generación de los residuos se da en el proceso de beneficio que se realiza tradicionalmente por vía húmeda, en el cual se utiliza aproximadamente 40 litros de agua por Kg de café pergamino seco, generando problemas de contaminación al ambiente con los subproductos del proceso de los cuales los principales son la pulpa y el mucilago, además en la época de cosecha se genera gran cantidad de residuos a partir del proceso como las aguas mieles (mucilago), las cuales debido a su alta carga orgánica son agentes contaminantes.<sup>9</sup>

El manejo inadecuado de estos subproductos está afectando el ambiente, y en Colombia aún existen regiones que no hacen un respectivo manejo de estos vertimientos, los cuales están causando la contaminación de suelos, aguas subterráneas, y cuerpos de agua. Por estas malas prácticas y por la falta de recursos para establecer un sistema de tratamiento de este mucilago se está ocasionando un impacto ambiental como lo es el deterioro del suelo y la disminución de la calidad del agua a través de la caficultura. Como se pudo observar en la finca la Clanera que no cuenta con un sistema de tratamiento para

---

<sup>7</sup> Federación Nacional De Cafeteros. 2015.

<sup>8</sup> CENICAFÉ., construyendo el modelo para la gestión integrada del recurso hídrico en la caficultura colombiana. Chinchiná 2011.

<sup>9</sup> RAMÍREZ, César *et al.* Manejo De Lixiviados Y Aguas De Lavado En El Proceso De Beneficio Húmedo Del Café. CENICAFÉ 2015.

estos vertimientos, al contar con un cultivo de 25000 arboles de café en etapa productiva el cual genera gran cantidad de residuos sólidos y de aguas mieles, que no están siendo tratadas correctamente y están afectando un ecosistema natural, alterando las condiciones óptimas de desarrollo de las distintas especies por la modificación de los parámetros fisicoquímicos.

A pesar que el Centro Nacional de Investigaciones De Café (CENICAFÉ) ha realizado e implementado técnicas para minimizar las cantidades de residuos del café, no se ha logrado controlar en su totalidad esta problemática. Todas las zonas cafeteras que no cuentan con un sistema de tratamiento para los subproductos del café, están generando una afectación al ambiente, por tal motivo es necesario buscar alternativas que sean simples y eficientes para el tratamiento de estos residuos.

### 3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál es la eficiencia del sistema de humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal para la remoción de materia orgánica (DQO, DBO) y nutrientes (nitratos, nitritos, fosfatos) presentes en el agua miel de café, utilizando las especies vegetales *Juncus effusus*, *Heliconia wagneriana* y *Gynerium sagittatum*?

#### 4. JUSTIFICACIÓN

Hoy en día, se reconoce que los lixiviados son uno de los mayores problemas ambientales en términos de la contaminación del agua, dado que una pequeña cantidad de este residuo puede contaminar grandes volúmenes de agua subterránea, afectando la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos y de esa manera, tienden a ser bioacumulados y bioaumentados a medida que se avanza en los diferentes niveles de la cadena trófica.<sup>10</sup> Colombia no es ajena a la problemática ambiental derivada de la producción de residuos sólidos y por lo tanto de lixiviados generados por las actividades mineras, industriales y agroindustriales.<sup>11</sup>

Es por esto que partir de estas actividades surge la necesidad de investigar, analizar y proponer soluciones que reduzcan esta problemática, y una alternativa viable es la utilización de los humedales construidos, por ser una tecnología simple, universal y adaptable, resultan ser sostenibles y adecuados para la biorremediación de lixiviados, por sus características como su bajo costo y sus versátiles mecanismos de eliminación de contaminantes.<sup>12</sup>

De acuerdo, a estudios a nivel internacional y nacional y experiencias aplicadas en el área se busco implementar este estudio con el fin de aportar en la reducción de la contaminación generada por el agua miel en las zonas cafeteras, utilizando un sistema de biorremediación con humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH), plantados con especies vegetales encontradas en el área, para beneficiar a los caficultores de la región, que les contribuya a disminuir el deterioro de la calidad del agua y demás impactos generados en el ambiente, utilizando métodos asequibles a las comunidades, que los beneficie, sean fáciles de establecer, y que no representen altos costos para su utilización, así poder utilizar este recurso en otra actividad de la misma finca como lo es el riego de cultivos, y la utilización del material vegetal en otras actividades económicas como la elaboración de abonos orgánicos.

---

<sup>10</sup> (OBERSTEINER et al., 2007; RENOUE et al., 2008; DE FEO AND MALVANO, 2009) citados por: CORTÉS, A. Evaluación Del Desempeño De Humedales Construidos Subsuperficial De Flujo Horizontal Sembrados Con Especies Nativas Tropicales Para La Eliminación De Cr (Vi) Y Cd (Ii) De Lixiviado De Relleno Sanitario. Universidad del valle. 2014. P 21

<sup>11</sup> CORTÉS, A. Evaluación Del Desempeño De Humedales Construidos Subsuperficial De Flujo Horizontal Sembrados Con Especies Nativas Tropicales Para La Eliminación De Cr (Vi) Y Cd (Ii) De Lixiviado De Relleno Sanitario. Universidad del valle. 2014. P 21

<sup>12</sup> Chiemchaisri et al., 2009 citado por: CORTÉS, A. Evaluación Del Desempeño De Humedales Construidos Subsuperficial De Flujo Horizontal Sembrados Con Especies Nativas Tropicales Para La Eliminación De Cr (Vi) Y Cd (Ii) De Lixiviado De Relleno Sanitario. Universidad del valle. 2014. P 21

## 5. OBJETIVOS

### 5.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia del sistema de humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal para la remoción de materia orgánica y Nutrientes, de las aguas mieles resultantes del proceso de beneficio húmedo del café, utilizando las especies vegetales *Juncus effusus* (junco), *Heliconia wagneriana* (heliconia) y *Gynerium sagittatum* (Caña brava) en la finca La Clanera, vereda La Chorrera del municipio de Timbio, Cauca.

### 5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las características fisicoquímicas del vertimiento del beneficio húmedo del café (DBO, DQO, SST, pH, turbiedad, conductividad, oxígeno disuelto) Nutrientes (nitratos, nitritos, amonio, fosfatos).
- Establecer el sistema de tratamiento con humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal para la biorremediación aguas mieles resultantes del beneficio húmedo de café en la finca La Clanera.
- Evaluar la eficiencia de remoción de carga contaminante en el proceso de biorremediación de aguas mieles del café con las especies vegetales *Juncus effusus* (junco), *Heliconia wagneriana* (heliconia) y *Gynerium sagittatum* (Caña brava).

## 6. MARCO TEÓRICO

El café es una planta que pertenece a la familia de las rubiáceas, género *coffea*, las condiciones ideales para el cultivo se encuentran entre 1.200 y 1.800 metros sobre el nivel del mar, con temperaturas templadas que oscilen entre los 17°C y 23°C y con precipitaciones anuales entre 1.800 y 2.800 milímetros, con buena distribución en los diferentes meses del año. Las principales zonas cafeteras del país, están distribuidas en los departamentos de Antioquia, Boyacá, Caldas, Caquetá, Cauca, Cesar, Casanare, Cundinamarca, La Guajira, Huila, Magdalena, Meta, Nariño, Norte de Santander, Quindío, Risaralda, Santander, Tolima y Valle del Cauca.<sup>13</sup>

### 6.1. EL CAFÉ

El fruto de café, está compuesto por la pulpa, formada por el exocarpio (epidermis) y parte del mesocarpio; el color de esta varía de verde a amarillo y rojo, dependiendo de la variedad y el estado de maduración, se encuentra envuelto por la epidermis, el mucílago o mesocarpio que rodea los granos es rico en azúcares y pectinas, el espesor de su capa gruesa de tejido esponjoso es de aproximadamente 0,5 mm (en la cara plana del grano) y 0,2mm (en la parte convexa). El pergamino (endocarpio) cubre el grano o almendra, que es de consistencia dura y frágil y su color es amarillo pálido; bajo esta cubierta se encuentra una capa que está adherida a la almendra, es de consistencia más fina que la anterior y es llamada película plateada, la cual cubre el embrión o germen.<sup>14</sup>

#### 6.1.1. Beneficio del café

Es el proceso mediante el cual se transforma el café cereza (CC) en café pergamino seco (c.p.s), separando las partes del fruto y disminuyendo la humedad del grano para conservarlo bajo las condiciones seguras de almacenamiento.<sup>15</sup>

#### 6.1.2. Beneficio tradicional.

El beneficio tradicional del café se caracteriza por alto consumo de agua y poco o ningún aprovechamiento de los subproductos principalmente de la pulpa, lo que genera altos niveles de contaminación. En este sistema el café maduro con frecuencia es transportado y clasificado antes de su llegada a la máquina

---

<sup>13</sup> Federación Nacional De Cafeteros 2014

<sup>14</sup> Roa M., G.; et al. Beneficio Ecológico Del Café. Chinchiná (Colombia), CENICAFÉ, 1999

<sup>15</sup> Federación Nacional De Cafeteros 2015.

despulpadora, para retirar el mucílago el café despulpado es sometido al proceso de fermentación natural. Una vez finaliza el proceso de fermentación que tiene una duración de 12 a 18 horas según sean las condiciones de temperatura de la región, en esta etapa ocurren múltiples reacciones bioquímicas con la presencia de bacterias, levaduras y enzimas que transforman los compuestos pécticos y azúcares constituyentes del mucílago en alcoholes y ácidos, que luego se retiran con el lavado en tanques mediante tres o cuatro enjuagues con agua limpia.<sup>16</sup> Las labores anteriormente mencionadas generan consumos alrededor de 40 L/kg de c.p.s. El proceso finaliza cuando el café lavado es llevado al secado ya sea al sol o mecánicamente, En este sistema de beneficio las aguas de lavado son arrojadas generalmente a las fuentes de agua, generando una contaminación de 115,1 g de DQO/kg de C.C <sup>17</sup>

La pulpa y el mucílago contenidos en un kilogramo de café cereza pueden consumir todo el oxígeno presente en 7,4 m<sup>3</sup> de agua pura, propiciando su rápida putrefacción en 24 horas<sup>18</sup> ,Además se resalta que por esta contaminación se tienen las siguientes consecuencias: Muerte de los animales acuáticos y de las plantas por la falta de oxígeno y por la alta acidez del agua, proliferación de malos olores, atracción de insectos y deterioro del paisaje, el agua se convierte en no potable, el agua no se puede reutilizar para uso industrial y tampoco en otros beneficiaderos de café.

## 6.2. HUMEDALES ARTIFICIALES

Los humedales artificiales (HA) son sistemas de Fitodepuración para el tratamiento de agua residual que actúan como filtros biológicos, consisten en un estanque o cauce poco profundo en el que se siembran plantas acuáticas que retienen sedimentos, nutrientes y contaminantes, además eliminan organismos patógenos, este proceso se realiza mediante un sistema que tienen tres partes principales: recogida, tratamiento y evacuación al lugar de restitución.<sup>19</sup> En la (Figura 1) se observa la clasificación de los humedales y el tipo de plantas que se utiliza en cada uno de estos.

---

<sup>16</sup> Roa M., G.; et al. Op. cit., p 30

<sup>17</sup> Federación Nacional De Cafeteros. 2015

<sup>18</sup> Roa M., G.; et al. Op. cit., p 30

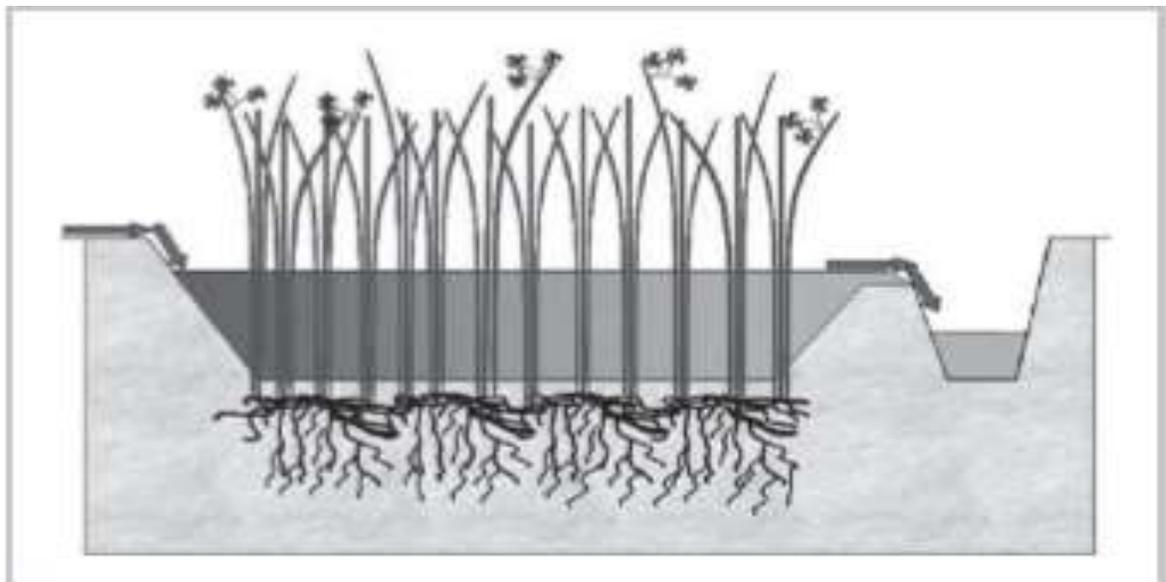
<sup>19</sup> Fernández, J. et al. 2004 citado por: DELGADILLO, Oscar, *et al.* Depuración De Aguas Residuales Por Medio De Humedales Artificiales. Cochabamba – Bolivia.: Universidad Mayor De San Simón, 2010. p 7

**Figura 1. Clasificación de humedales artificiales<sup>20</sup>.**



En la (Figura 2) se observa un humedal de flujo superficial el cual consiste en una o más canales de poca profundidad, el agua circula por los tallos de las plantas y la película de agua está expuesta directamente a la atmosfera. Estos humedales soportan poca carga orgánica por lo que generalmente son utilizados para aguas residuales que han tenido un tratamiento previo: rejillas, desarenador, trampas de grasas.

**Figura 2. Humedal de flujo superficial.<sup>21</sup>**



<sup>20</sup> DELGADILLO, Oscar, et al. Op. cit., P 9

<sup>21</sup> Ibid., p. 9

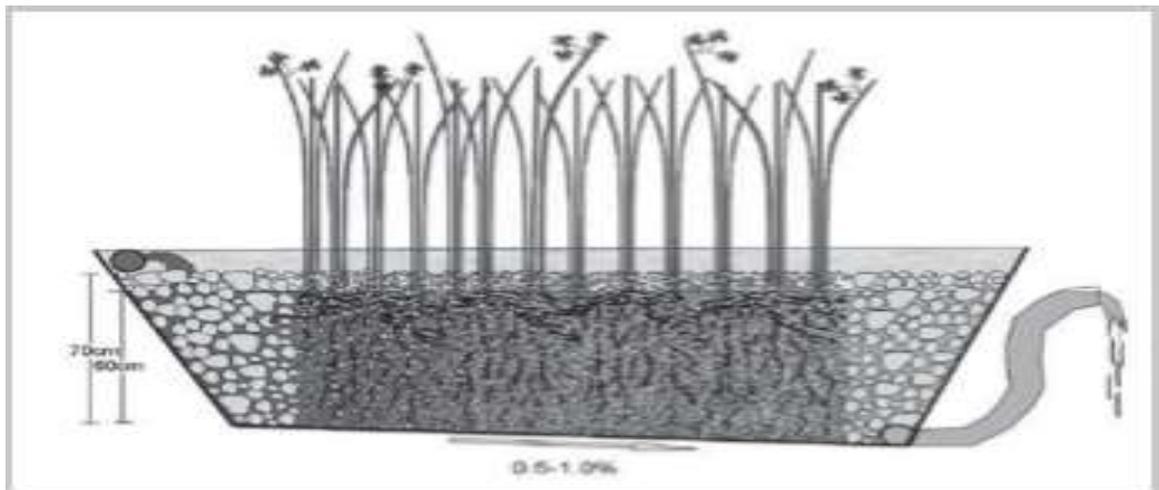
### 6.2.1. Humedales de flujo subsuperficial

Los sistemas de flujo subsuperficial (conocidos en inglés como *subsurface flow constructed wetlands*), se caracterizan por que la circulación del agua se realiza a través de un medio granular (subterráneo), con una profundidad de agua cercana a los 0,6 m. La vegetación se planta en este medio granular y el agua está en contacto con los rizomas y raíces de las plantas.<sup>22</sup>

### 6.2.2. Humedales subsuperficiales de flujo horizontal

El diseño de estos sistemas por lo general consiste en una cama, ya sea de tierra o arena y grava, plantada con macrófitas, y la cama es recubierta por una membrana impermeable para evitar filtraciones en el suelo. 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, (Figura 3). El agua residual se trata a medida que fluye lateralmente a través de un medio poroso, la profundidad del lecho varía entre 0,45 m a 1 m y tiene una pendiente entre 0,5 % a 1 %.<sup>23</sup>

**Figura 3. Humedal de flujo subsuperficial horizontal.**<sup>24</sup>



El agua residual no ingresa directamente al medio granular principal, 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. El diámetro de la grava de ingreso y salida oscila entre 50 mm a 100 mm. La zona de plantación está constituida por grava fina de un solo diámetro, en entre 3 mm a 32 mm, es fundamental que el agua residual que ingresa al sistema se mantenga en un nivel

<sup>22</sup> , U.S. EPA. 2000.

<sup>23</sup> DELGADILLO, Oscar, et al. Op. cit., P. 10

<sup>24</sup> Ibit; P 10

inferior a la superficie (5-10 cm), lo cual se logra regulando el nivel del dispositivo de salida en función a este requerimiento.<sup>25</sup>

### **6.2.3. Procesos de remoción**

Los humedales artificiales son estanques o cauces poco profundos donde se controla la cantidad de agua a tratar, así como la poda, extracción y disposición de la vegetación (ya que al morir, ésta libera contaminantes en su proceso de descomposición). Estos sistemas presentan un funcionamiento similar al de un humedal natural, sólo que éstos son manipulados y controlados de tal manera que su eficiencia es más alta, además su costo es bajo comparado con otros sistemas de tratamiento.<sup>26</sup>

Un humedal se puede construir en cualquier sitio, generalmente funciona por gravedad en un sistema tipo cascada pasando el agua residual por diferentes etapas de tratamiento hasta lograr su depuración. Cabe señalar que en los humedales artificiales se logran remociones superiores al 80%<sup>27</sup> además, de proporcionar beneficios intangibles ya que mejoran la estética del lugar en donde se encuentran.

### **6.2.4. Componentes de un humedal artificial**

Los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal se basan en cuatro componentes principales: agua residual, vegetación, sustrato, y microorganismos.<sup>28</sup>

El agua residual es la fuente de abastecimiento la cual proviene de un proceso de utilización en diferentes actividades ya sean industriales, domesticas o agroindustriales, las cuales requieren del recurso hídrico pero la contaminan con diferentes tipos de sustancias que alteran los procesos fisicoquímicos naturales.<sup>29</sup> La vegetación cumple un rol muy importante en el funcionamiento de un humedal porque proporciona una superficie adecuada para el desarrollo de microorganismos, los cuales intervienen en los procesos aerobios y anaerobios que favorecen la degradación de materia orgánica y la nitrificación, además amortiguan los cambios ambientales y las variaciones que puedan afectar la depuración del agua.<sup>30</sup> El sistema consiste en el desarrollo de un cultivo de

---

<sup>25</sup> DELGADILLO, Oscar, et al. Op. cit., p. 10

<sup>26</sup> HARO, M; APONTE, N. Op. cit., p. 17

<sup>27</sup> Ibit; P 17

<sup>28</sup> DELGADILLO, Oscar, et al. Op. cit., p. 11

<sup>29</sup> Ibit; P 11

<sup>30</sup> Cárdenas A. Evaluación Del Desempeño De Humedales Construidos Con Plantas Nativas Tropicales Para El Tratamiento De Lixiviados De Rellenos Sanitarios. Proyecto Fin De Master. Sevilla: Universidad De Sevilla. 2012.

macrófitas enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado, la acción de las macrófitas hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual afluyente es depurada progresiva y lentamente.<sup>31</sup>

El sustrato es el medio de soporte o medio filtrante el cual puede ser de diferentes tipos entre los que se encuentra piedra, grava o diferentes tipos de suelos en los cuales se da el crecimiento y desarrollo fisiológico de las plantas, generando múltiples procesos, retención, sedimentación, degradación de materia orgánica y la transformación y asimilación de los nutrientes. Este medio es muy importante en el desarrollo de las raíces y la circulación del agua en la cual está influenciada la conductividad hidráulica.<sup>32</sup> Además que favorece el desarrollo microbiológico porque se desarrollan colonias de microorganismos aerobios en la parte superior, y aprovechan el oxígeno liberado por las raíces de las plantas, en el resto del medio de soporte hay presencia de organismos anaerobios y la presencia de estos microorganismos favorecen la degradación de la materia orgánica, la eliminación de nutrientes y la desinfección.<sup>33</sup>

En el diseño de los humedales construidos es recomendado utilizar grava con menos de 30 mm. Si se utiliza grava con diámetros mayores, se incrementa la velocidad del paso del agua, y si se utiliza grava o triturado de menor tamaño se reduce la velocidad del paso de agua por el sistema originando zonas con presencia de agua en la superficie y flujos preferenciales, pero tienen la ventaja de proporcionar una mayor área superficial para la actividad microbiana y la adsorción.<sup>34</sup>

### **6.3. VEGETACIÓN ESTUDIADA**

Las plantas son organismos foto autótrofos, es decir que recogen energía solar para transformar el carbono inorgánico en carbono orgánico. Tienen la habilidad de transferir oxígeno desde la atmósfera a través de hojas y tallos hasta el medio donde se encuentran las raíces.<sup>35</sup> Además las macrófitas estabilizan la superficie del lecho, proporcionando buenas condiciones para la filtración, la transferencia de oxígeno a través de las raíces y rizomas, absorción de nutrientes y eliminan contaminantes por asimilación directa en sus tejidos.<sup>36</sup>

---

<sup>31</sup> Fernández, J. et al. Manual De Fitodepuración, Ayuntamiento De Lorca, Universidad Politécnica De Madrid. 2004

<sup>32</sup>García J., Corzo H. Sistemas Naturales De Depuración. En: Depuración Con Humedales Construidos: Guía Práctica De Diseño, Construcción Y Explotación De Sistemas De Humedales De Flujo Subsuperficial. Catalunya: Universidad Politécnica De Catalunya, 2008.

<sup>33</sup>Arias O. Estudio De La Biodegradación De La Materia Orgánica En Humedales Construidos De Flujo Subsuperficial. Departamento De Ingeniería Hidráulica, Marítima Y Ambiental. 2004.

<sup>34</sup> DELGADILLO, Oscar, et al. Op. cit., P 32

<sup>35</sup> Ibíd., P 13

<sup>36</sup> OTÁLORA R, Alejandra P., Evaluación Del Sistema De Tratamiento De Aguas Residuales Domésticas Mediante Humedales Artificiales De Alta Tasa En La Localización Petrolera De Caño Guandúl. Trabajo final para optar el título de Magister en ingeniería ambiental. Universidad

### 6.3.1. Heliconia

La mayoría de las especies del género *Heliconia*, se distribuyen en el Neotrópico, desde el sur de México hasta el norte de Argentina, incluyendo las islas del Caribe.<sup>37</sup> El género *Heliconia*, se encuentra dentro de la familia Heliconiaceae del orden Zingiberales, es el único género dentro de esta familia, donde se agrupan más de 225 a 250 especies en el mundo; siendo Colombia el de mayor número de ellas, el 98 % de estas se encuentran distribuidas en el centro y sur de América y el Caribe, un pequeño grupo también se encuentra en algunas islas del Océano Pacífico. Cerca de 180 especies del género se han descrito.<sup>38</sup>

Las heliconias son plantas herbáceas perennes cuya altura varía desde 70 cm, hasta 10 m, presenta raíces adventicias y fasciculadas, el pseudotallo está formado por la superposición de las vainas de las hojas y se origina desde el sitio de crecimiento del rizoma hasta donde brotan los peciolos de las hojas, las inflorescencia generalmente brota en forma terminal, al final del pseudotallo.<sup>39</sup>

Se utilizó este tipo de macrófitas, por ser una especie nativa del trópico con una alta abundancia de especies en Colombia, y por ser encontrada en la región. Esta especie ya ha sido utilizada en sistemas de tratamiento de aguas residuales<sup>40</sup> evidenciando la tolerancia que tienen a este tipo de sistemas, presentando alta resistencia a las variaciones climáticas del país y al ataque de plagas y enfermedades, con fácil propagación.

### 6.3.2. Junco

El *Junco effusus* (Junco fino) es una hierba perenne de 25-128 cm, con tallos de 1-5 mm cilíndricos lisos de color verde brillantes, se encuentra en la región Andina Colombiana se le conoce como esparto, Se pueden ver algunos en las orillas de

---

Nacional De Colombia, Facultad De Ingeniería, Departamento De Ingeniería Química, Bogotá. 2011 capítulo 2. P 6

<sup>37</sup> Peña, E. et al. Bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediación, caso *Heliconia psittacorum* (heliconiaceae). Rev. Acad. Colomb. Cienc. **37** (145): 469-481, 2013. ISSN 0370-3908.

<sup>38</sup> Cárdenas A. Evaluación Del Desempeño De Humedales Construidos Con Plantas Nativas Tropicales Para El Tratamiento De Lixiviados De Rellenos Sanitarios. 2012.

<sup>39</sup> Turriago, Karen. Flórez R. Víctor J; heliconias, Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, disponible

en [https://encolombia.com/economia/agroindustria/floricultura/floriculturandina\\_heliconias](https://encolombia.com/economia/agroindustria/floricultura/floriculturandina_heliconias)

<sup>40</sup> Cortés S, Andrés E. Evaluación Del Desempeño De Humedales Construidos Subsuperficial De Flujo Horizontal Sembrados Con Especies Nativas Tropicales Para La Eliminación De Cr (Vi) Y Cd (Ii) De Lixiviado De Relleno Sanitario. Universidad del valle. 2014.

Humedales, y Lagos. Tiene usos en la construcción, además se utiliza en diversas artesanías, como es el caso de la Laguna de Fúquene (Cundinamarca), donde los pescadores a fin de contribuir a solucionar la problemática (Exceso de vegetación) y mejorar sus ingresos, se han dado a la tarea de explorar las opciones artesanales que brindan las plantas acuáticas para elaborar y adornar bolsos, bateas, floreros y materas, entre otros productos.<sup>41</sup>

### 6.3.3. Caña brava

La *Gynerium sagittatum* (caña brava) es originaria de América tropical y en Colombia es nativa, cuyo hábitat se encuentra entre los 0 y 1500 m. Vive en bosques secos tropicales, húmedos y premontanos. Se propaga por secciones del tallo y la raíz. Se cortan trozos de 80 cm de largo, que se siembran horizontales en el sitio definitivo; es necesario dejar los nudos descubiertos, requiere abundante luz solar, soporta sequías y suelos con poca fertilidad, alcanza los 7 m de altura y 0.04 m de diámetro en su tallo, las hojas miden hasta 1 m de alto, son acintadas y dispuestas en forma de abanico al final de las cañas, borde aserrado, tienen pelitos. Flores de color blanco, muy pequeñas y agrupadas en inflorescencias terminales.<sup>42</sup>

---

<sup>41</sup> Escobar, J. Plantas acuáticas en los humedales de Bogotá.2012

<sup>42</sup> Mahecha et al. Citado por., Cortez S, Andrés E. Evaluación Del Desempeño De Humedales Construidos Subsuperficial De Flujo Horizontal Sembrados Con Especies Nativas Tropicales Para La Eliminación De Cr (Vi) Y Cd (Ii) De Lixiviado De Relleno Sanitario. Universidad del valle. 2014. P 39

## 7. MARCO DE REFERENCIA

El Municipio de Timbío, se encuentra situado en la región Andina, altiplano de la zona centro del departamento del Cauca, mejor conocido como meseta de Popayán, en medio de las cordilleras central y occidental, al Suroccidente de la república de Colombia. Hace parte del Macizo Colombiano. El territorio del municipio se encuentra dentro de las coordenadas planas: X = 1'055.000 al oriente. Y = 765.000 al norte X = 1'025.000 al oeste. Y= 745.000 al sur. La cabecera municipal se localiza a los 2° 21' 22" de Latitud Norte y 76° 41' 16" de Longitud Oeste a 13 kilómetros al sur de la ciudad de Popayán.<sup>43</sup> Limita al Norte con el municipio de Popayán, al Sur con los municipios de Rosas y Sotará al Oriente con el municipio de Sotará y al Occidente con el Tambo.<sup>44</sup>

La superficie del Municipio de Timbio comprende una extensión de 20.502,9 Has (205 Km<sup>2</sup>), distribuidas en alturas entre 1000 y 2000 metros sobre el nivel del mar. Pertenece a la región Subandina con un piso térmico templado húmedo (TH), con una temperatura que oscila entre 16 y 23°C y una precipitación promedio de 2026.5 mm. La temperatura promedio es de 18.6°C, que ha favorecido el asentamiento de 26.990 habitantes, de los cuales 8215 (30.4%), están ubicados en la zona urbana y 18775 (69,6%), en la zona rural, convirtiéndose de esta manera en uno de los municipios más poblados del departamento del Cauca.<sup>45</sup>

La base económica del municipio la constituyen las actividades agrícolas con predominio de cultivos de café, plátano, yuca y maíz, secundariamente las actividades pecuarias especialmente la explotación de vacunos, y en menor escala la explotación de arcillas, el comercio y las artesanías. También cuenta con unas zonas turísticas entre las cuales se encuentra: La chorrera del río Timbío, la cascada de La Chorrera, la Laguna de Camposano, la Laguna de Pan de Azúcar y el lago El Marques.<sup>46</sup>

Las estructuras geológicas que se encuentran en el municipio, afloran rocas de diferente edad, origen y composición, afectadas muchas de ellas por fallas geológicas pertenecientes al sistema de Fallas de Romeral. No se encuentran formaciones de roca con características que favorezcan la acumulación de recursos minerales en cantidades económicas explotables, las formaciones

---

<sup>43</sup> Plan básico de ordenamiento territorial del municipio de Timbio, capítulo 3, diagnóstico territorial, generalidades del municipio de Timbio. P. 13

<sup>44</sup> *Ibíd.* P. 13

<sup>45</sup> *Ibíd.* P. 13

<sup>46</sup> *Ibíd.* P. 13

geológicas más promisorias solo ofrecen la posibilidad de explotar - según el INGEOMINAS - calizas arcillas, canteras y gravilleras.<sup>47</sup>

El municipio de Timbío es atravesado por una serie de estructuras (o fallas geológicas), paralelas de dirección noreste perteneciente al sistema de Fallas de Romeral. Las fallas más importantes son Bolívar - Almaguer y Rosas - Julumito. La Primera es tal vez la que mayor efectos generan en el municipio, debido a los problemas de inestabilidad que ocasiona en la vía Panamericana entre el sector del Encenillo y Yescas.<sup>48</sup>

El sistema hídrico del municipio está conformado principalmente por las subcuencas de los ríos Hondo y Robles y otras microcuencas menores como las quebradas Guayabal, La Honda y La Chorrera, en la zona norte. Y por la zona sur, ríos Timbío, Piedras y Quilcacé y microcuencas como la quebrada La Chorrera, Palmichal, Loma Larga, san Pedro, La Alfonsa, Pambio, Las Cruces y Quilichao.<sup>49</sup>

Presenta un relieve poco heterogéneo; donde predominan los sistemas de colinas con cimas redondeadas del altiplano de Popayán, con pendientes de 3 - 7 - 12 - 25 y 50 %. En menor proporción existen áreas escarpadas y quebradas con pendientes de 50 – 75 y mayores en el sector transicional entre la meseta de Popayán y la fosa del Patía.<sup>50</sup>

Entre las unidades representativas de cobertura de los suelos está el Bosque Natural Secundario, Matorrales, Pastos, Cultivos, Misceláneos; Cultivos Forestales. El uso se da principalmente para la conservación de cuerpos de agua y extracción selectiva de algunas especies maderables; en cuanto a los matorrales, son producto de la degradación ambiental, pero son de aporte bajo y muy dispersos; los pastos son las áreas predominantes de cobertura vegetal, dedicado al sostenimiento de animales domésticos, además que tienen un uso económico: Entre los cultivos el que más predomina es el cultivo de café, que corresponde aproximadamente 3800 hectáreas que equivalen al 19,5 % del total del territorio; la cobertura vegetal de los misceláneos está compuesta principalmente por cultivos de caña panelera, maíz, yuca, plátano y los cultivos forestales con especies introducidas de rápido crecimiento como eucaliptos y pinos que tiene fines de producción industrial.<sup>51</sup>

---

<sup>47</sup> Ibíd. P. 22

<sup>48</sup> Ibíd. P. 23

<sup>49</sup> Ibíd. P. 36

<sup>50</sup> Ibíd. P. 23, 24.

<sup>51</sup> Ibíd. P. 59, 60, 61, 62.

La fauna presente en el municipio corresponde a especies generalistas y/o comunes, es decir que no presentan restricciones de hábitat, lo cual significa que ha ocurrido pérdida o desplazamiento de especies con requerimientos estrechos o especializados de nichos, que son características generalmente muy comunes tanto de mamíferos de gran porte (Osos, Dantas, venados, Pumas etc.), como de las grandes aves (Águilas, Pavas, entre otras). Las especies grandes de aves y mamíferos, que antes existían en el municipio, hoy han desaparecido debido a la destrucción de la vegetación natural, hábitat particular de estos organismos. Adicionalmente, la fragmentación de los bosques disminuye la posibilidad de comunicación entre individuos de una misma especie, relegándolos a ocupar espacios reducidos y aislados, lo cual se convierte en un limitante para desarrollar sus actividades de cortejo anidamiento y cría, también para satisfacer sus necesidades alimenticias, factores estos que las colocarían en estado vulnerable de sobrevivencia a estas condiciones.<sup>52</sup>

---

<sup>52</sup> Ibíd. P. 63

## 8. ANTECEDENTES

Se han realizado diversas investigaciones en la materia, empleando HC con resultados alentadores y satisfactorios desde que se comenzó aplicar este método en el año de 1946 por K. Seidel, pero muchas de estas experiencias han sido aplicadas en países de zonas templadas o estacionales. En Colombia se han construido humedales de flujo subsuperficial, enfocados primordialmente a la realización de pruebas piloto en el tratamiento de agua residual doméstica con caudales y poblaciones de diseño relativamente pequeñas, como en Cogua, en el departamento de Cundinamarca, la Universidad Javeriana construyó en el 2004, un humedal piloto de flujo subsuperficial.<sup>53</sup>

Los humedales construidos se han utilizado para tratar una amplia gama de aguas residuales (Domésticas, industriales, mineras y agrícolas), tienen sus inicios en Europa y el primer reporte científico en el que se señalan las posibilidades que tienen las plantas emergentes para la remoción de los contaminantes presentes en las aguas residuales pertenece a la Dra. Kathe Seidel del Instituto Max Plank, de Alemania en 1946. En el informe de sus investigaciones, ella plantea que mediante el empleo del junco común (*Schoenoplectus lacustris*) era posible la remoción de una serie de sustancias tanto orgánicas como inorgánicas, así como la desaparición de bacterias (Coliformes, Salmonella y Enterococo) presentes en las aguas residuales.

VILLARROEL, César (2005). En el trabajo titulado tratamiento terciario del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales el cortijo para uso agrícola con humedales construidos de flujo superficial. Universidad nacional de Trujillo. Reportan en la investigación aplicada y explicativa del efluente, que mediante el uso de humedales construidos de FS a escala piloto, lograron remociones de: 92,49 % de DBO<sub>5</sub>, 83,33 % de SST, 99,999 % de coliformes fecales, 99,998 % de coliformes totales y 76,52 % de cromo total.

En trabajos realizados para el tratamiento de aguas residuales en Colombia se cuenta con estudios realizados por MARÍN M. JHOAN P y CORREA R JUAN C. (2010) reportan en el trabajo evaluación de la remoción de contaminantes en aguas residuales en humedales artificiales utilizando la guadua *angustifolia Kunth*, remociones de DQO entre 60 y 85% y para DBO<sub>5</sub> entre el 72 y 92% y nitrógeno con porcentajes mayor al 40% en las unidades experimentales.

En estudios a escala real se encuentran resultados de eficiencia de remoción de materia orgánica demostrando la eficiencia de los humedales para tratar distintos tipos de vertimientos, como lo reporta Otálora R, Alejandra P. (2011) en la

---

<sup>53</sup>Lara, B., Implantación y Evolución de un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial en Cogua, Cundinamarca, Colombia 2004.

evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales domesticas mediante humedales artificiales de alta tasa en la localización petrolera de Caño Guandúl. Encontrando remociones para DBO<sub>5</sub> 53 %, DQO 63 %, para nitrógeno remociones del 50%.

CUBILLOS, J. (2011). En el trabajo evaluación de la fitorremediación como alternativa de tratamiento de aguas contaminadas con hidrocarburos. En el estudio realizado en las instalaciones de la Universidad Tecnológica de Pereira, con tres humedales construidos a nivel piloto sembrados con *Phragmites sp.* Reportan que los humedales construidos con matriz de suelo demostraron remover hidrocarburos totales de petróleo, logrando eficiencias superiores al 50 % en aguas contaminadas con altas concentraciones de estos compuestos. Los principales procesos de remoción que tuvieron lugar en la reducción del contenido del HC, se asociaron a la volatilización de los compuestos, la absorción y retención en el medio filtrante, además a los procesos microbiológicos llevados a cabo dentro de los humedales. No obstante, la alta concentración de hidrocarburos en el afluente presentó un efecto negativo en las macrófitas, causando problemas de toxicidad revelada por cambios en la coloración de las hojas, así como en su crecimiento.

PEÑA, E. et al. (2013) en el trabajo titulado Bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediación: caso *Heliconia psittacorum* (heliconiaceae). Reportan que en los estudios realizados con *Heliconia psittacorum* para evaluar su potencial fitorremediador se ha logrado demostrar que la especie presenta características adecuadas a las condiciones en los humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales, a partir de su capacidad de eliminación de DBO<sub>5</sub>, DQO y SST, mayor a 60% en la mayoría de los estudios, su capacidad para acumular metales pesados sin detrimento de sus propiedades fisiológicas y su rápido crecimiento y desarrollo. Por otro lado, esta planta genera una ganancia estética por la belleza de su inflorescencia, lo cual a su vez, puede generar beneficios económicos al comercializarse.

Cortés S, Andrés E. (2014) los cuales evaluaron el desempeño de humedales construidos subsuperficiales de flujo horizontal sembrados con especies nativas tropicales para la eliminación de Cr (vi) y cd (ii) de lixiviado de relleno sanitario, realizado en el relleno sanitario regional de Presidente, ubicado en la vereda Arenales, corregimiento de Presidente, municipio de San Pedro, Valle del Cauca-Colombia. Los cuales reportan remociones DQO, (alrededor del 50%), NTK y N-NH<sub>4</sub>, fluctuaron entre (42-51%) y el (31-56%), respectivamente, P-PO<sub>4</sub> (alrededor del 50%) trabajando con *Colocasia esculenta*, *Heliconia psittacorum* y *Gynerium sagittatum*.

También se cuenta con reportes de tratamientos de lixiviados realizados por MARTÍNEZ R, Macol; et al. (2015) en la evaluación de un sistema de biorremediación de aguas residuales porcícolas alcanzando una remoción de DQO del 67%, para nitratos no se reportan variaciones en las concentraciones y en la mayoría de los parámetros evaluados si se alcanzan una remoción significativa.

DELGADO, L., PINO, H. (2015) reportan en el trabajo titulado 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. En el cual plantaron tres humedales con *Heliconia psittacorum* y tres con *Cyperus haspan*. Las remociones medias obtenidas para un tiempo de retención hidráulico de 4 días fueron: DQO (51,67% y 64,00%), N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (45,33% y 48,17%), P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> (53,67 % y 62,67%) y Pb<sup>2+</sup> (5,74% y 14,75%). Estas eficiencias presentan un buen potencial de remoción y se consideran adecuadas teniendo en cuenta que las características del lixiviado lo clasifican como maduro, lo que implica una menor biodegradabilidad debido a que hay mayor cantidad de materia orgánica recalcitrante.

En tratamientos de aguas residuales de la agroindustria cafetera colombiana se encuentran estudios realizados por: Rodríguez, N. (2009) en el trabajo: Estudio de un biosistema integrado para el postratamiento de las aguas residuales del café utilizando macrófitas acuáticas. Reportan que los ensayos realizados utilizando sistemas acuáticos de tratamiento con mono y policultivos no mostraron diferencias estadísticas, a un nivel del 5% de significancia, en la remoción de la DBO<sub>5</sub>, SST, NT, PT y K. Operando con afluentes con una DQO media de 1670 ppm, TRH entre 12 y 14 días, un caudal medio de 104 ml/min y cargas orgánicas medias aplicadas entre 296,94 y 299,55 kg DBO<sub>5</sub>/ha-día permitieron obtener efluentes con valores de DQO entre 229 y 287 ppm y DBO<sub>5</sub> entre 100 y 130 ppm que fueron menores a la CL50 para *Lebistes reticulatus* (bioindicador más sensible en los estudios de impacto biológico realizados con aguas residuales de café tratadas anaerobiamente) que son de 490 ppm como DQO y 279 ppm como DBO<sub>5</sub>.

En estudios realizados por CENICAFÉ (2011) para el postratamiento de las aguas residuales del beneficio del café, utilizaron macrófitas flotantes y emergentes presentes en la zona cafetera, entre las plantas flotantes, el Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y la Lechuga de agua (*Pistia stratiotes*) mostraron las mayores eficiencias de remoción de DBO<sub>5</sub> en el estado estable, con valores medios, a las 3 concentraciones, de 80,91% y 80,72% respectivamente, seguidos de la oreja de agua (*Salvinia auriculata*) (79,09%). La Enea (*Typha angustifolia*) mostró una remoción media del 77,19%. Encontraron que se presenta inhibición del crecimiento de *E. crassipes* a concentraciones de DQO de 1281 ppm; para *P. stratiotes* a una concentración de DQO de 1222 ppm; para *S. auriculata* a concentraciones de DQO de 903 ppm y para *T. angustifolia* se presenta inhibición en el incremento del número de plantas a una concentración de DQO de 508 ppm. Considerando el desempeño de las 4 especies acuáticas en la remoción (medida como mg/ m<sup>2</sup>-d) de los parámetros DBO<sub>5</sub>, SST, NT, PT y K en efluentes del SMTA, se determinó que la mejor especie para el postratamiento de las aguas mieles del café, fue la especie flotante *E. crassipes*, seguida de la especie flotante *P.*

*stratiotes*, de la especie emergente *T. angustifolia* y de la especie flotante *S. auriculata*.

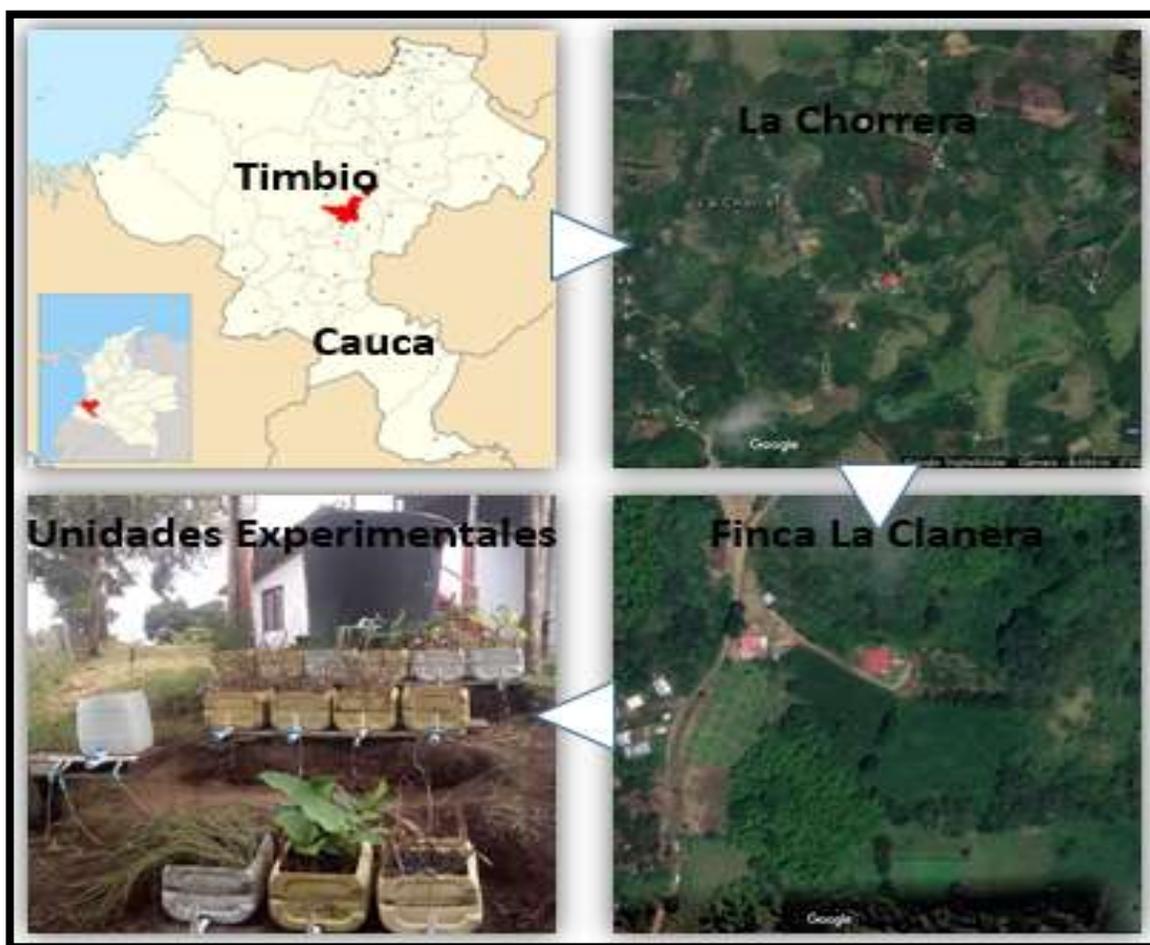
En estudios realizados por Urquijo T, Eliana Y. (2016) en el trabajo identificación de impactos ambientales relacionados con el proceso de beneficio húmedo del café en la vereda de tres esquinas - Huila – Colombia, reportan dos caracterizaciones de agua miel de café realizados en el 2015 por la Federación de Cafeteros seccional Huila en el laboratorio de la Universidad Surcolombiana en la cual para la finca la estrella se encontraron concentraciones de pH 3.71, DQO 10220 mg /L, DBO 3900 mg/L, SST 1488 mg/L, acidez 790 ppm, y para la finca la cristalina pH 2.45, DQO 9800 mg/L, DBO 4500 mg/L, SST 1728 mg/L, acidez 860 ppm, por lo cual determinaron que no es positivo dentro de los límites permisibles del Decreto 1594 de 1984 que establece pH 4.5 a 9, DQO 500 Kg/L, DBO 200 Kg/L, SST 300 mg/L, acidez menor a 50 ppm, para uso agrícola afectando las características de las fuentes hídricas del sector.

## 9. METODOLOGÍA

### 9.1. LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El trabajo de investigación se llevó a cabo en la finca La Clanera ubicada en la vereda La Chorrera a 8 kilómetros de la cabecera municipal del municipio de Timbio, en el departamento del Cauca. (N 02°23'33.7"- O 076°42'23.5") A 1874 msnm (Figura 4). Posee un área de 7 Hectáreas dentro de las cuales se encuentra ubicado el sistema de tratamiento de aguas mieles de café con HAFSSH, y las respectivas unidades experimentales a escala piloto

**Figura 4. Localización área de estudio. Fuente Google Earth**



La actividad económica de la finca principalmente es el cultivo de café, y esta cuenta con un beneficiadero tradicional por vía húmeda, en el que se realiza el proceso de despulpado, fermentación, y lavado, generando gran cantidad de residuos en la época de cosecha. La disposición final del vertimiento, inicialmente la realizaban en un pozo en la tierra almacenando el agua miel, pero por la

propagación de vectores, cambiaron la forma de disponer el vertimiento arrojándola directamente a un ecosistema natural en el que principalmente se encuentra guadua, (Figura 5) el cual es alterado en la en la temporada de cosecha por la gran cantidad de estos vertimientos que llevan una carga orgánica alta.

**Figura 5. Beneficiadero y disposición final del vertimiento: a). beneficiadero tradicional con tanques de fermentación de café, b) y c). Pozo de almacenamiento de agua miel, d). Disposición final del agua miel de café en un ecosistema natural.**

a.



b.



c.



d.



## 9.2. MATERIALES

**Tabla 1 Materiales de construcción.**

Descripción	Cantidad
Tanques plásticos de 1000 L	2
Tanques rectangulares plásticos 52*35.5*28.5 cm	13
Tanques plásticos de 20 L	13
Grava de ½ pulgada	1 metro cubico
Tubos de PVC de ½ pulgada	3 tubos de 4 metros cada uno.
Llaves plásticas	26
Codos de ½ pulgada	14
Adaptadores machos ½ pulgada	26
Adaptadores hembras ½ pulgada	26
Silicona industrial	1 tarro
Cinta teflón	2 rollos * 10 metros cada uno.
Pegante PVC	2 frasco
Material vegetal (junco, heliconia y caña brava)	6 de cada especie para un total de 72

## 9.3. MÉTODOS

Basándose en la recopilación de datos, a partir de la revisión de artículos y documentos realizados para hacer el tratamiento de lixiviados resultantes de diferentes procesos, y el enfoque a partir de estos hacia el uso o disposición final del mucilago resultante del beneficio húmedo del café, se implementaron los sistemas de tratamiento por medio de humedales construidos con macrófitas emergentes, utilizando como unidad experimental un humedal de flujo subsuperficial horizontal, el cual en su diseño de funcionamiento la película de agua no queda expuesta a la superficie, esta queda por debajo del sustrato evitando la proliferación de malos olores y la propagación de vectores.<sup>54</sup>

Se evaluaron cuatro tratamientos, tres de estos con especies vegetales presentes en el área de estudio, los cuales constaron de tres réplicas por UE, *Juncus effusus* (junco), *Heliconia wagneriana* (heliconia) y *Gynerium sagittatum* (Caña brava),

<sup>54</sup> Díaz, A, Carlos, A. Magister en ingeniería civil. Tratamiento de agua residual a través de humedales, Universidad Santo Tomás Seccional Tunja 2014.

además un control para determinar la influencia del sustrato al pasar el agua miel por el sistema del tratamiento con humedales artificiales como lo implementado por DELGADO, L; PINO, H. (2015) en relleno sanitario el ojito de la ciudad de Popayán. Así se evaluó el desarrollo de las plantas, la calidad del agua, y se comparó la eficiencia de remoción, y la degradación natural capaz de realizar cada una de las especies vegetales para este tipo de vertimientos. Para posteriormente, verificar si los resultados obtenidos cumplen con los límites permitidos establecidos en la resolución 0631 del 2015.

### 9.3.1. Parámetros fisicoquímicos de aguas mieles

En el laboratorio de la fundación universitaria de Popayán, y en el laboratorio de análisis ambientales del Centro de Teleinformática y Producción Industrial del SENA, los cuales brindaron el apoyo al estudio, se realizó un diagnóstico inicial de los parámetros fisicoquímicos de las aguas mieles determinando la carga contaminante resultante de este proceso, y con base en los resultados obtenidos se procedió a determinar la eficiencia de remoción de los HAFSSH. (Figura 6). Los parámetros evaluados (sólidos totales, pH, DBO<sub>5</sub>, DQO, turbiedad, conductividad, oxígeno disuelto, nitratos, nitritos, amonio, fosfatos) se midieron de acuerdo a los métodos y los equipos de laboratorio utilizados para el análisis de calidad de aguas determinando la concentración de cada variable (Tabla 2).

**Figura 6. Caracterización del vertimiento: a) muestra de agua miel de café, b) medición de DBO<sub>5</sub> en el Oxitop, c) vial para la medición de DQO, d) medición de DQO en el fotómetro.**





**Tabla 2. Equipos de medición de parámetros fisicoquímicos.**

Variable	Método/Equipo	
<b>OD, Nitratos, Nitritos, Amonio Fosfatos,</b>	MColortest / kit AQUAMERK	Determinación de la concentración de nutrientes y oxígeno disuelto a la entrada y la en el sistema de tratamiento
<b>conductividad</b>	conductivimetro DDS 12DW BANTE	Determinación de las variaciones de iones presentes en el agua miel de café
<b>Potencial De Hidrogeno (pH)</b>	pH metro	Medición de la variación del pH
<b>Turbiedad</b>	Turbidimetro 2100 Q HACH	Perdida de transparencia por material particulado o en suspensión
<b>DBO<sub>5</sub></b>	Oxitop BOX WTW	Cantidad de oxigeno consumido durante 5 días a 20° C para oxidar la materia orgánica
<b>DQO</b>	Termoreactor TR 420 MERK	Cantidad de oxigeno necesaria para descomponer químicamente la materia orgánica degradable y biodegradable a 148 °C en dos horas
	Fotómetro NOVA 60 MERK	

La recolección de las muestras se realizó cada quince días en un periodo de duración de cuatro meses. Los análisis se realizaron siguiendo criterios de muestreo y conservación basándose en los protocolos establecidos en la cadena de custodia NTC100, para lo cual se recolectaron muestras de 1 litro de agua utilizando tarros plásticos, los cuales fueron rotulados y almacenados en un termo refrigerante de icopor para conservar las características de la muestra y ser

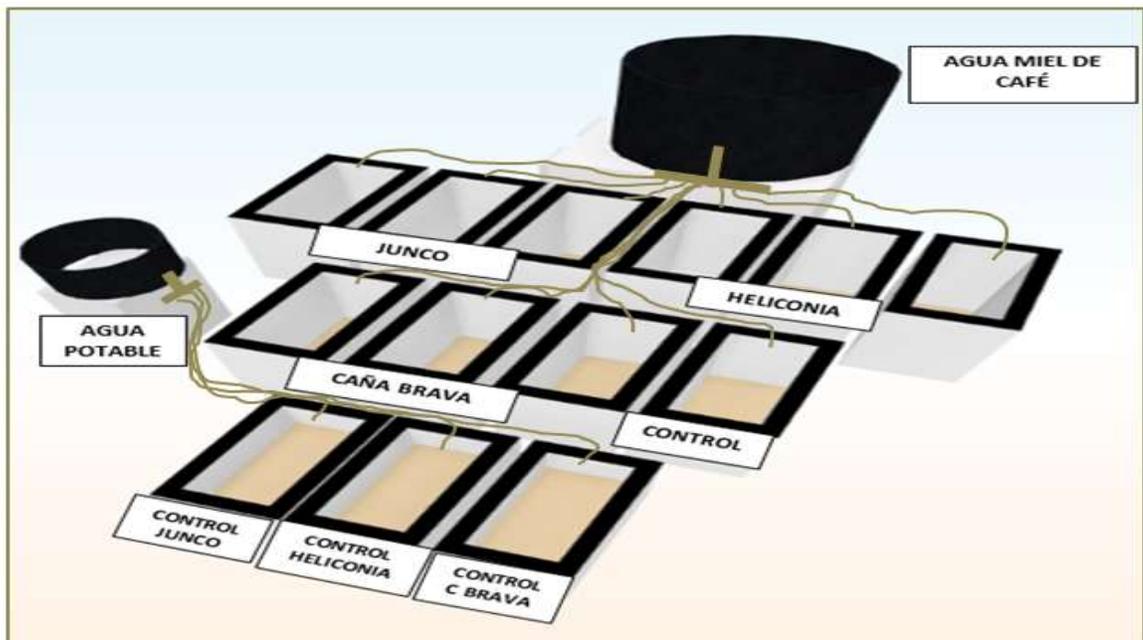
transportadas al sitio de análisis, para posteriormente realizar los respectivos análisis fisicoquímicos.

### 9.3.2. Sistema de tratamiento a escala piloto.

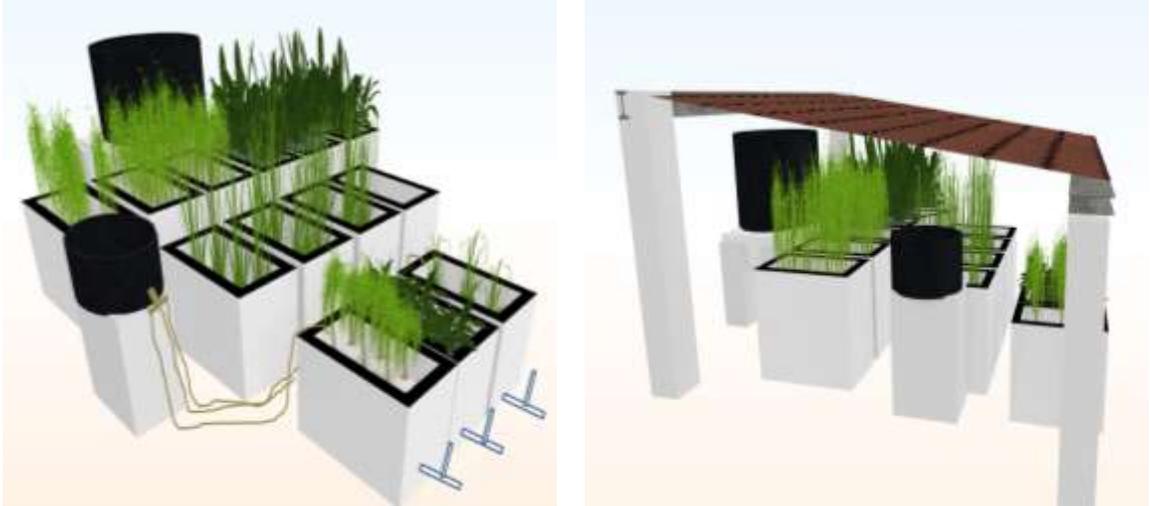
Mediante una plataforma digital conocida como florplanner.com que brinda las herramientas necesarias para el diseño de planos para construcción en 2D Y 3D, se planteó el sistema de tratamiento para las aguas mieles de café, ubicando cada especie vegetal en las respectivas unidades experimentales que consta de 13 HAFSSH.

En la (Figura 7 y 8), se puede observar el diseño en 3D del sistema de tratamiento, y la ubicación de cada una de las UE utilizadas en la investigación a escala piloto, que de acuerdo a la metodología implementada por (DELGADO, L; PINO, H. 2015), fue adaptada para utilizar recipientes plásticos de 20 L adecuados para el estudio, con unas dimensiones de 0.3 m de ancho, 0.35 m de largo, 0.21 m de altura total, una profundidad promedio del líquido en el lecho 0.13 m, y se utilizó tubería de PVC de 1/2 pulgada de diámetro, para las instalaciones de entrada y salida del vertimiento.

**Figura 7. Diseño sistema de tratamiento. Fuente. Autoría propia.**



**Figura 8. Modelo 3D del sistema de tratamiento. Fuente. Autoría propia.**



En la (Figura 8) se observa el sistema implementado en el estudio, de acuerdo a los criterios de diseño mencionados por DELGADILLO, Oscar, et al., 2010 y la metodología utilizada por DELGADO, L; PINO, H. (2015) adaptada al estudio, a la cual se le realizó el seguimiento y evaluación de los parámetros establecidos para aguas residuales.

**Figura 9. Sistema de tratamiento implementado.**



El sustrato utilizado fue triturado de roca de ½ pulgada de diámetro, con una porosidad del 40%,<sup>55</sup> las unidades experimentales fueron llenadas con triturado hasta alcanzar los 0.18 m de altura, equivalentes a 0.019 m<sup>3</sup> por cada unidad. Con el sistema de venocllisis se controló el caudal de entrada a las unidades experimentales, manteniendo un caudal promedio de 1.365 L / día, que equivale a un tiempo de retención hidráulico de 4 días, calculado por medio de la ecuación que según Crites y Tchobanoglous 1998, es el tiempo que permite que se generen los procesos de nitrificación y degradación de la materia orgánica.<sup>56</sup> Con el cual se puso en funcionamiento el sistema de tratamiento.

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{n * (L * W * d)}{t}$$

Dónde:

$$Q = \frac{0.4 \times (0.35 \text{ m} \times 0.30 \text{ m} \times 0.13 \text{ m})}{4 \text{ días}}$$

$$Q = 0.001365 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3}$$

$$Q = 1.365 \frac{\text{L}}{\text{día}}$$

$Q$  = Caudal (m<sup>3</sup>/día)

$n$  = porosidad del sustrato

$d$  = profundidad promedio del agua en el humedal (m).

$L$  = longitud del humedal (m).

$W$  = ancho del humedal (m).

$t$  = tiempo de retención hidráulico.

### 9.3.3. Construcción del sistema de humedal artificial para aguas mieles de café.

La construcción del sistema de tratamiento estuvo basada de acuerdo a los criterios de diseño mencionados por DELGADILLO, Oscar, et al. 2010, y fue adaptada al proyecto a escala piloto. Además, basándose en el diseño del humedal construido implementado en el relleno sanitario El Ojito del municipio de Popayán, para el tratamiento de lixiviados.<sup>57</sup> La cual fue modificada para realizar el tratamiento de aguas mieles en una finca cafetera con diferentes especies vegetales.

Se establecieron trece unidades experimentales que por medio de adaptación con tubería de pvc se les controló el nivel de humedad, y se les agregó el sustrato en

<sup>55</sup> DELGADILLO, Oscar, et al. Op. cit., P. 33

<sup>56</sup> DELGADO, L., PINO, H. 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. Para Obtener El Título De Ingeniero Ambiental. Popayán.: Universidad Del Cauca Facultad De Ingeniería Civil Programa De Ingeniería Ambiental. 2015. P. 30, 31.

<sup>57</sup> Ibíd. P. 30, 31, 32.

el cual se plantó el material vegetal. Diez de estas UE se utilizaron para evaluar el sistema de tratamiento de agua miel de café, nueve plantadas con tres especies de macrófitas emergentes diferentes, tres UE por especie vegetal y una UE de control del sistema, tres unidades fueron utilizadas como control de crecimiento y desarrollo de cada especie vegetal.

Para recolectar el efluente se utilizaron recipientes plásticos de 1.5 litros de capacidad uno por cada unidad experimental los cuales se monitorearon todos los días durante el proceso para llevar el control del caudal y el tiempo de retención hidráulico.

#### **9.3.4. Aclimatación de las especies vegetales**

La vegetación que se utilizó fueron especies nativas tropicales presentes en la región: *Juncus effusus* (junco), *Heliconia wagneriana* (heliconia) y *Gynerium sagittatum* (Caña brava), se lavó la raíz para eliminar residuos de tierra para no alterar el funcionamiento del sistema, a continuación se procedió a podar la raíz, para seguidamente realizar la siembra en cada UE, se sembraron seis plantas con una distribución uniforme en el área del humedal sembrando tres réplicas por especie. Para la aclimatación, de las especies vegetales se tuvo en cuenta las actividades realizadas por DELGADO, L; PINO, H. (2015) y para este estudio se comenzó con agua potable, proporcionando el nivel de humedad necesario del sistema, y bajo estas condiciones ya con las plantas sembradas se les comenzó hacer el seguimiento diario para verificar el estado fisiológico de cada especie vegetal, seguidamente se realizó un proceso de aclimatación al lixiviado del beneficio húmedo de café, el cual consto de una mezcla agua mucilago, realizando cada dos semanas un incremento gradual del 20 % de la cantidad del lixiviado hasta completar la mezcla al 100%.

En este proceso se tuvo en cuenta que no todas las plantas de las diferentes especies se aclimataron al sistema y se perdieron por lo cual se realizó la resiembra, resaltando que este proceso tuvo una duración de 4 cuatro meses desde la siembra hasta la contaminación del 100% de mezcla agua mucilago, para poder así comenzar con el proceso de estudio de remoción de materia orgánica en cada una de las especies vegetales.

El proceso de aclimatación se implementó para todo el sistema con el fin de que las especies vegetales estuvieran bajo las mismas condiciones y así poder evaluar los posibles cambios en los distintos tratamientos. (Figura 9).

Figura 10. Siembra y aclimatación de las especies vegetales.



### **9.3.5. Determinación de la eficiencia del sistema**

Se realizó un experimento comparativo de los tratamientos implementados con las diferentes especies vegetales como de sus replicas, y el control, para determinar la eficiencia de remoción de materia orgánica (DBO, DQO), Nutrientes (nitratos, nitritos, fosfatos), de las aguas mieles de café.

Utilizando el programa estadístico IBM SPSS versión 25, se evaluó la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre las medias de remoción, utilizando una significancia del 5%, con un nivel de confianza del 95%, para determinar la eficiencia de remoción de la carga contaminante, y con base en los resultados que se obtuvieron de las aguas tratadas en el sistema de HAFSSH se compararon los parámetros fisicoquímicos (pH, DBO<sub>5</sub>, DQO, turbiedad, conductividad, OD, nitratos, nitritos, amonio, fosfatos) del afluente con el efluente por cada UE, determinando cuál tratamiento obtuvo mayor eficiencia en la remoción de carga contaminante de aguas residuales de café, la influencia del sustrato en el proceso, el desarrollo de las plantas en los diferentes sistemas, además de comparar con los niveles permitidos para este tipo de vertimientos según la resolución 0631 del 2015.

## 10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 10.1. CARACTERIZACIÓN DEL VERTIMIENTO.

En la caracterización realizada al vertimiento del beneficio húmedo del café en el laboratorio de análisis ambientales del Centro de Teleinformática y Producción Industrial del SENA, se midieron los parámetros establecidos para aguas residuales y se verificaron con la normatividad vigente para dichas aguas, (resolución 0631 del 2015)<sup>58</sup> en la cual están establecidos los límites máximos permisibles para vertimientos puntuales de aguas residuales de la agroindustria.

Con esta caracterización se observó que los principales parámetros para vertimientos (DBO, DQO) están sobrepasando los niveles máximos permitidos y los parámetros de pH, turbidez, conductividad, oxígeno disuelto, nitratos, nitritos, amonio, y se les realizó un seguimiento para analizar su comportamiento durante el paso por el sistema de tratamiento, como se especifica en la norma haciendo un análisis en las variaciones que puedan causar algún tipo de afectación al ambiente. (Tabla 3).

**Tabla 3. Resolución 0631 de 2015 niveles permitidos.**

Parámetro	unidades	Caracterización de Agua miel de café laboratorio de análisis ambientales del CTPI del SENA.	Beneficio tradicional de café Niveles permitidos. Resolución 0631 de 2015
pH		5.05	5.00-9.00
Demanda química de oxígeno.(DQO)	mg/L O2	2102	650.00
Demanda bioquímica de oxígeno(DBO <sub>5</sub> )	mg/L O2	890	400.00
Solidos suspendidos totales(SST)	mg/L	0.099	400.00
Fosfatos	mg/L	0.75	Análisis y reporte
Nitratos	mg/L	10	Análisis y reporte
Nitritos	mg/L	0.025	Análisis y reporte
Amonio	mg/L	0	Análisis y reporte

<sup>58</sup> RESOLUCIÓN 631 DE 2015. De las normas de vertimiento. Bogotá, 2015.

<b>Turbidez</b>	NTU	172	Análisis y reporte
<b>conductividad</b>	uS/cm	1082	Análisis y reporte
<b>Oxigeno O<sub>2</sub></b>	mg/L O <sub>2</sub>	0	Análisis y reporte

Para determinar los efectos ecológicos que pueden causar este tipo de vertimientos de acuerdo a los resultados obtenidos en la caracterización de las aguas mieles, se pudo verificar que en estudios realizados por Rodríguez, N. (2009), con macrófitas flotantes y emergentes, este autor logro determinar que existe una inhibición de crecimiento para las especies, *E. crassipes* a concentraciones de DQO de 1281 ppm, para *P. stratiotes* 1222 ppm, para *S. auriculata* 903 ppm, y para *T. angustifolia* a 508 ppm.

Además para conocer los efectos tóxicos sobre la vida acuática, Cenicafé realizo investigaciones, en las que determinaron el impacto biológico causado por las aguas mieles de café, utilizando como bioindicadores (el pez *Lebistes reticulatus*, el microcrustáceo *Daphnia pulex* y el alga *Chlorella vulgaris*) que al tener concentraciones mayores a 490 ppm de DQO, y 279 ppm de DBO<sub>5</sub> estas pueden ser toxicas para estos organismos.<sup>59</sup>

En cuanto a la disponibilidad de materia orgánica, expresada en relación DBO<sub>5</sub>/DQO, con valores <0.3, sugieren la baja porción biodegradable, y >0.5, son altamente biodegradables susceptibles a tratamientos biológicos.<sup>60</sup> En este caso la relación DBO<sub>5</sub>/DQO es de 0.4 lo que indica que la materia orgánica se encuentra en estado biodegradable, y se puede implementar un tratamiento biológico para tratar las aguas mieles de café. Aprovechando que este tipo de aguas residuales son biodegradables, pero que poseen características fisicoquímicas particularmente agresivas con el medio ambiente: pH bajos, acidez alta y concentraciones de materia orgánica alta, correspondiente a poderes contaminantes entre 60 y 240 veces superiores a las aguas residuales domésticas<sup>61</sup> se hace necesario minimizar su impacto ambiental.

Este tipo de aguas presentan un pH ácido. Esto se debe principalmente a los ácidos orgánicos que se generan en la fermentación y es uno de los factores limitante para el desarrollo bacteriano y el buen funcionamiento de la planta.<sup>62</sup> Muchas propiedades de las sustancias químicas dependen de la concentración del

<sup>59</sup> CENICAFÉ. "Construyendo el modelo para la gestión integrada del recurso hídrico en la caficultura colombiana". 2011 P. 50.

<sup>60</sup> Cortez S, Andrés E. Evaluación Del Desempeño De Humedales Construidos Subsuperficial De Flujo Horizontal Sembrados Con Especies Nativas Tropicales Para La Eliminación De Cr (Vi) Y Cd (Ii) De Lixiviado De Relleno Sanitario. Universidad del valle. 2014. P. 24- 60

<sup>61</sup> Rodríguez, N. Estudio De Un Biosistema Integrado Para El Postratamiento De Las Aguas Residuales Del Café Utilizando Macrófitas Acuáticas. Tesis doctoral, universidad politécnica de valencia. Departamento de ingeniería hidráulica y medio ambiente. Valencia 2009 P. 27.

<sup>62</sup> OROZCO, C. et al. Evaluación de una planta piloto de tratamiento de aguas residuales del procesamiento del café: características químicas. 2005

ión hidrógeno en solución (pH), lo más favorable es entre 6,5 y 8,5 para favorecer el desarrollo de las especies acuáticas.<sup>63</sup>

## **10.2. ESTABLECIMIENTO DEL SISTEMA DE HUMEDAL ARTIFICIAL PARA AGUAS MIELES DE CAFÉ.**

Teniendo en cuenta el diseño establecido para el sistema de tratamiento con HAFSSH se realizaron las respectivas adecuaciones del terreno (limpieza, explanado y ubicación de UE) además, de contar con un fácil acceso para llenar el tanque de almacenamiento y hacer el monitoreo diario. (Figura 11). El sitio de establecimiento del sistema favoreció por tener una pendiente la cual se aprovechó para suministrar a todos los humedales la cantidad necesaria del vertimiento y no tener deficiencia del caudal.

Ya con el terreno adecuado, se ubicó un tanque de almacenamiento para el afluente, compuesto por un tratamiento previo de filtración a la hora del llenado con el agua miel de café, con el fin de eliminar los sólidos presentes en este vertimiento. Además el tanque se adaptó para tener un sistema de sedimentación, para evitar el taponamiento de la tubería, que a partir de este se instaló para abastecer cada UE. El sistema se manejó con el equipo de venoclisis por contar con niveles muy bajos de presión de agua, y se proporcionó por medio de goteo, permitiendo realizar el control del caudal, y el respectivo mantenimiento necesario del sistema.

Como medio de soporte (sustrato) se utilizó grava o triturado de roca de media pulgada. Con el fin de evitar, que se incrementara la velocidad del paso del agua, porque al tener sustrato grueso, se puede generar un flujo turbulento en el sistema, y al contrario con un sustrato demasiado pequeño se puede reducir la velocidad del paso de agua. En este medio crecen las plantas, los microorganismos y se realizan los principales procesos de depuración a partir de la actividad microbiana y la adsorción.<sup>64</sup> Ya teniendo ubicadas las unidades experimentales se procedió a realizar un manejo al sustrato el cual constó de un lavado con agua potable y una desinfección con una mezcla de agua hipoclorito y se procedió a realizar el llenado de las UE sin sobrepasar el nivel del recipiente (Figura 12).

---

<sup>63</sup> DELGADILLO, Oscar, *et al.* Op. cit., p. 73

<sup>64</sup> *Ibíd.*, P. 32

**Figura 11. Adecuación del terreno.**



**Figura 12. Ubicación unidades experimentales**



Además se construyó una estructura la cual fue utilizada para templar un plástico para aislar las unidades experimentales del agua lluvia y evitar que los rayos del sol llegaran directamente al sistema de tratamiento. Seguidamente se procedió a llenar el tanque de almacenamiento con el agua del lavado de café la cual se recolectó en una tina plástica en la salida del beneficiadero y fue llevada hasta el sitio establecido para el tratamiento. Cabe resaltar que se realizaron tres cargas al tanque de almacenamiento, para mantener el nivel de humedad en las UE durante el tiempo de estudio (Figura 13)

**Figura 13. Llenado tanque almacenamiento.**



### 10.3. DESARROLLO DE LAS PLANTAS EN EL SISTEMA DE TRATAMIENTO.

#### 10.4. Junco (*Juncus effusus*).

Debido a que, esta especie pertenece a un ecosistema de humedal que requiere de gran cantidad de agua para el desarrollo fisiológico, y se prolifera rápidamente en sistemas con gran disponibilidad de humedad, materia orgánica y de nutrientes. Lo que fue un factor muy importante al presentar gran demanda de agua en este caso agua mucilago, por tal motivo se le proporciono un caudal mayor para evitar que el sistema se quedara sin la humedad necesaria para el desarrollo de las plantas. Inicialmente presentó un desarrollo y crecimiento lento, que fue mejorando en el transcurso de la primera semana sin presentar grandes inconvenientes en el desarrollo de la raíz y proliferándose con la presencia de rebrotes.

Al comenzar la contaminación con la mezcla agua mucilago se observó un desarrollo lento de las plantas, pero tendieron a mejorar con el tiempo obteniendo un desarrollo fisiológico normal. En este punto se evidencia lo reportado por Rodríguez, N. (2009) que al tener concentraciones mayores a 508 ppm de DQO, estas inhiben el crecimiento y el aumento de las plantas en el sistema de tratamiento, y en este estudio se manejaron cargas mayores a 2000 mg/L de DQO. (Figura 14).

**Figura 14. Desarrollo junco agua miel.**



En el control del junco con agua potable inicialmente se adaptó al sistema, desarrollándose satisfactoriamente, pero comenzó a disminuir este desarrollo

gradualmente, presentando crecimiento lento. No se propago por todo el humedal, y además se observó un amarillamiento en la fisiología de la planta y no alcanzo el crecimiento máximo. En esta fase de aclimatación se presento una deficiencia de nutrientes debido a la poca disponibilidad con la que cuenta el agua potable, esto se puede verificar con el estudio realizado por Cortés S, Andrés E. (2014) el cual al momento de la aclimatación que realizaron a las especies se les agrego solución Hooglan (mezcla de nutrientes y micronutrientes ) y fueron regadas con esta solución para favorecer el desarrollo de las plantas en el nuevo ambiente, hasta comenzar el proceso de contaminación con el lixiviado que manejan en el estudio. Al contrario de lo realizado en este estudio el cual desde el inicio se realizo una adaptación con agua potable sin agregar ninguna solución y los humedales de control que no recibieron la carga de agua miel de café no tuvieron la materia orgánica y los nutrientes necesarios para desarrollarse normalmente, por ende el desarrollo fisiológico fue lento. (Figura 15).

**Figura 15. Desarrollo agua potable.**



#### **10.4.1. Heliconia (*Heliconia wagneriana*).**

Para esta especie, se observó un crecimiento y desarrollo lento por el cambio de las condiciones del ecosistema. Las plantas trasplantadas sufrieron problemas al descomponerse por el exceso de humedad en el sistema y al cambio de sustrato, debido a que esta es una especie que requiere humedad pero no en exceso en un sustrato de tierra con buena contextura física que le favorece el desarrollo, por tal razón en este proceso se realizaron varias resiembras de las plantas en las unidades experimentales hasta lograr completar la misma cantidad por cada humedal, aunque presento un crecimiento lento.

Con la contaminación de las unidades experimentales con el mucilago de lavado de café, las plantas tendieron a sufrir un amarillamiento en las hojas y tendieron a quemarse por los bordes durante los primeros veinte días de contaminación con el lixiviado, después gradualmente en su desarrollo fisiológico las hojas tendieron a tomar su color verde característico de la especie, con la presencia de algunas hojas secas resultantes del proceso de aclimatación al sistema, y continuaron su desarrollo en él HA. Como se menciona anteriormente en lo reportado por Rodríguez, N. (2009) al manejar cargas altas de DQO, se inhibe el crecimiento de las especies y no incrementan el número de plantas en el sistema, pero al aclimatarse al vertimiento de aguas mieles y la disponibilidad de nutrientes se logran desarrollar en el sistema de HA. (Figura 16).

**Figura 16. Desarrollo Heliconia agua miel.**



En el control con agua potable las heliconias se adaptaron al sistema, presentando las mismas condiciones durante los primeros meses desarrollándose satisfactoriamente, pero tendieron a decaer, presentando crecimiento lento el cual se mantuvo durante todo el proceso con un color amarillo pálido, lo cual indica una deficiencia de nutrientes, como lo confirma Cortés S, Andrés E. (2014) que al agregar la solución Hooglan favorece el desarrollo de las plantas, pero en este estudio no se utilizó esta solución, este fue manejado con agua potable durante todo el proceso, por tal motivo las plantas no tuvieron un buen desarrollo fisiológico en el sistema durante el tiempo de estudio. (Figura 17).

**Figura 17. Desarrollo Heliconia agua potable.**



#### **10.4.2. Caña brava**

No se desarrolló en el sistema de HA con el sustrato ni con la humedad establecida para el tratamiento. Se encontraron los tallos de la caña brava en estado de descomposición, por la presencia de humedad por lo cual se realizó la resiembra de los mismos, pero no se obtuvo un resultado satisfactorio de desarrollo. (Figura 18).

**Figura 18 caña brava en el sistema de HA.**

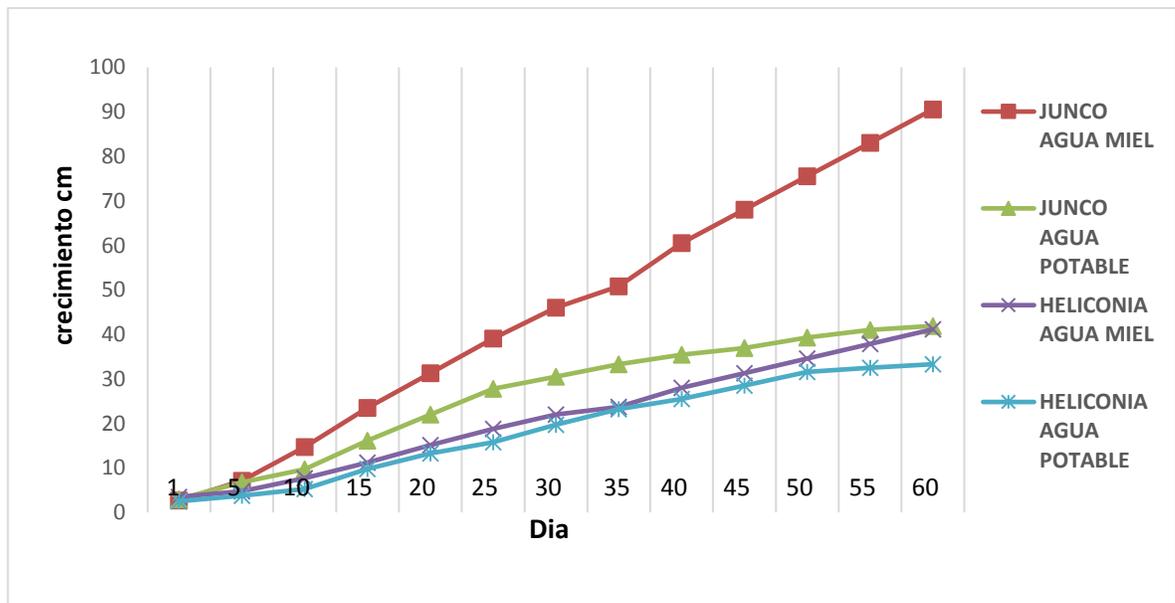


En la caña brava no se observó respuesta al desarrollo en los tratamientos, por tal motivo no se continuó con la especie para este estudio, debido a, que en la revisión bibliográfica encontrada la adaptabilidad de esta especie es media y además es muy demorada<sup>65</sup>, con susceptibilidad a los cambios de ecosistema principalmente a los factores de sustrato y humedad que no le favorecieron en las condiciones establecidas en el sistema de tratamiento por lo que no se pudo realizar el estudio de remoción de carga contaminante y solo se consideró observar el desarrollo durante el proceso, pero se obtuvo mediante la observación que los tallos sembrados se pudrieron por la humedad.

### 10.4.3. Control de crecimiento

En la (Gráfica 1) se puede observar la tendencia de crecimiento de cada una de las especies vegetales en los distintos tratamientos, y el desarrollo fisiológico de las plantas en el tiempo de estudio, se tomaron las mediciones de crecimiento cada cinco días en un periodo de dos meses para determinar el comportamiento de cada una de las especies en los distintos tratamientos (agua miel, agua potable).

**Gráfica 1. Crecimiento de especies vegetales en el tiempo.**



El crecimiento de las plantas se asocia directamente a la disponibilidad de materia orgánica presente en el agua miel de café, el cual de acuerdo a la relación DBO<sub>5</sub>/DQO es considerado un vertimiento biodegradable. También A pesar que la presencia de nutrientes fue baja, se encontró una concentración de nitratos los

<sup>65</sup> PASTRANA, I. SUÁREZ, I., Producción De Plantas De Caña Flecha (Gynerium Sagittatum) "Criolla" A Través De Micro propagación.

cuales son asimilables por las macrófitas, además se hubo una concentración de fosfatos, que es esencial para el desarrollo de diversos organismos, y estimula el crecimiento principalmente de organismos fotosintéticos que asimilan este nutriente.<sup>66</sup> Por tal motivo en los tratamientos a los cuales se les proporciono esta carga orgánica presentaron mayor eficiencia.

El junco en el tratamiento con agua miel presento el mejor desarrollo alcanzando un máximo de crecimiento de 90.6 cm, la cual tuvo una respuesta frente al tipo de vertimiento por la gran cantidad de materia orgánica que le favoreció el desarrollo presentando condiciones óptimas de crecimiento en el estudio la cual tuvo tendencia a crecer constantemente.

Con respecto al tratamiento con agua potable presento un crecimiento máximo de 41.9 cm, y durante todo el proceso mantuvo el mismo comportamiento, en el cual pudo estar influenciado por la deficiencia de nutrientes presentes en este tipo de agua y por la poca disponibilidad de materia orgánica no alcanzo el crecimiento máximo, como se menciona anteriormente en el desarrollo de las especies en los distintos tratamientos implementados con base en el reporte de Cortés S, Andrés E. (2014).

La heliconia presento un crecimiento favorable en el estudio, se alcanzó un crecimiento máximo de 41.1 cm en el tratamiento con agua miel, en un periodo de dos meses el cual por las condiciones fisicoquímicas del vertimiento le favoreció para tener este desarrollo y tendió a crecer gradualmente. En el tratamiento con agua potable no fue muy favorable, el crecimiento en las distintas condiciones presentadas alcanzo un máximo de 33 cm pero este fue muy lento, el cual se le atribuye a la deficiencia nutricional mencionada anteriormente.

En la (Gráfica 2) se puede observar la media de crecimiento, obtenida en los distintos tratamientos estudiados, en el análisis estadístico de las especies vegetales, junco y heliconia, se puede determinar que no hay significancia en canto al crecimiento (Anexo 7), lo cual permite afirmar que en los dos tratamientos manejados, los datos son muy diferentes entre especies.

En el tratamiento con junco se presentó la mayor variación, con alto crecimiento en los humedales con agua miel de café, y en agua potable los valores son bajos los que se manejan, estas diferencias son asociadas a la disponibilidad de materia orgánica con la que cuenta el vertimiento, otro factor que influye son las características ecológicas de esta especie la cual se desarrolla directamente en zonas inundadas o zonas de humedal las cuales son optimas propagándose fácil mente en el medio, y las condiciones que se le proporcionaron le favorecieron. El crecimiento de la heliconia no presenta grandes diferencias entre el tratamiento de agua miel y agua potable, los valores mas altos se encuentran en el tratamiento de agua miel, lo cual se determina que son favorables las condiciones físico

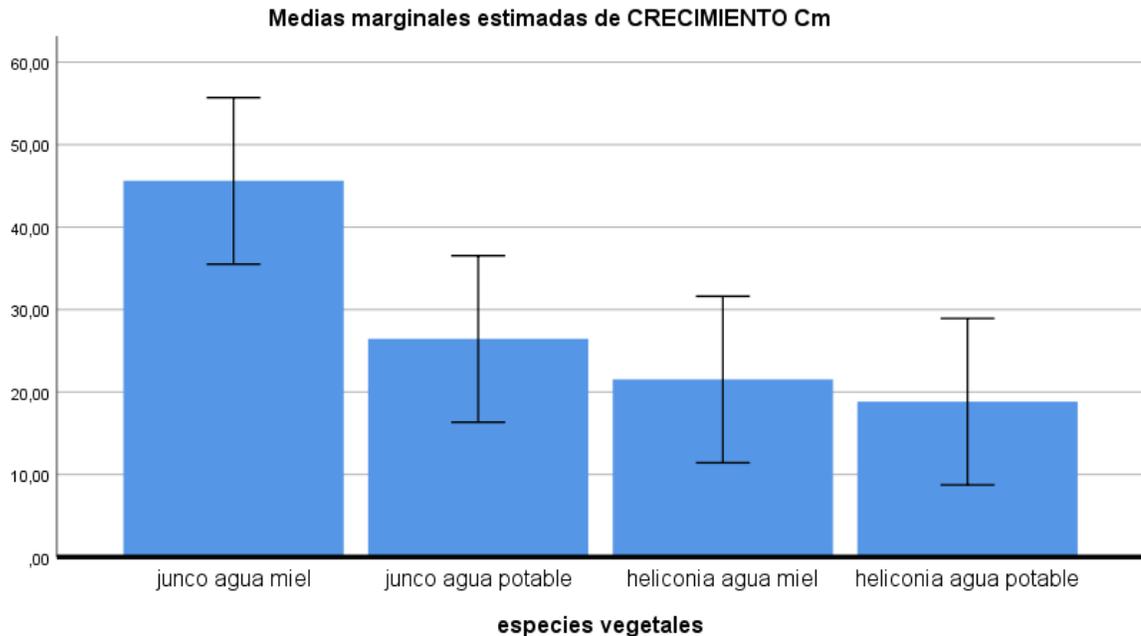
---

<sup>66</sup> Delgadillo et al. Op. cit., p 79

químicas del vertimiento para ambas especies, y respecto al agua potable el crecimiento es bajo al no haber disponibilidad de nutrientes y materia orgánica.

Las diferencias entre los tratamientos para ambas especies radica en que el junco en aguamiel obtiene su mejor desarrollo poblándose en el sistema, y en agua potable no alcanza el crecimiento máximo por el déficit de nutrientes y no se incrementa el número de plantas en el humedal. En cuanto a la heliconia las diferencias son pocas en crecimiento, pero la principal diferencia con esta especie en los distintos tratamientos es que en agua miel la heliconia logra incrementar el número de plantas cubriendo la mayoría de del área del humedal, mientras que en agua potable no se logran desarrollar mas brotes de la especie por lo que no se cubre en totalidad el humedal.

### Grafica 2 Media de crecimiento.



## 10.5. PARÁMETROS EVALUADOS EN LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE CARGA CONTAMINANTE EN EL PROCESO DE BIORREMEDIACIÓN DE AGUAS MIELES DE CAFÉ

Para realizar el análisis estadístico y la eficiencia de remoción de materia orgánica, se tuvieron en cuenta los humedales que fueron contaminados con agua miel de café, (HAFSSH-J, HAFSSH-H y HAFSSH-C) esto con el fin de evitar que se alteraran los resultados debido a que los humedales de control con junco y heliconia, fueron manejados con agua potable, por ende no contaron con una carga contaminante, y se utilizaron para observar el desarrollo de las plantas, principalmente el crecimiento y desarrollo en el sistema de tratamiento.

En la (Tabla 4) se presentan los valores medios de las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos obtenidos en la fase de laboratorio, en la cual se determinaron las concentraciones a la entrada y la salida del sistema de tratamiento evaluado con las distintas especies vegetales junco, heliconia, y un control con agua miel de café (HAFSSH-J, HAFSSH-H y HAFSSH-C).

En el (Anexo 1) se encuentran los datos recolectados durante todo el proceso de laboratorio en términos de concentración por muestra en donde se observan las variaciones de cada uno de los parámetros fisicoquímicos, relacionados directamente con el proceso de benéfico húmedo del café, el cual no tiene una cantidad de agua y de café específica al momento de realizar el lavado, por esta razón en la entrada del sistema de tratamiento pueden variar los resultados, principalmente en la DQO, por la dilución que se realiza durante el proceso.

Esto debido a que se presentan dos temporadas de cosecha y el estudio abarco las dos. En las primeras tres semanas se utilizo el agua miel de la travesía, donde es poca la cantidad de café que se recolecta, y la muestra pudo estar mas diluida, al contrario de la cosecha principal que se recolectaron las muestras para las siguientes semanas, donde se incrementa la cantidad de café para el beneficio y del mismo modo las concentraciones. En el (Anexo 2) se presentan los porcentajes de remoción para cada uno de los HAFSSH y el comportamiento en el tiempo.

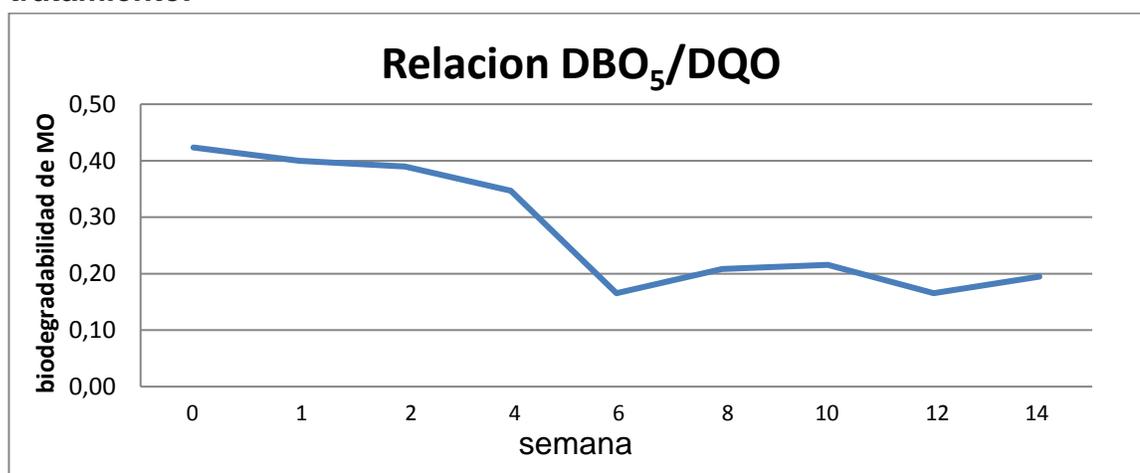
**Tabla 4. Valores medios del análisis fisicoquímico de las aguas mieles de café a la entrada (afluente) y la salida (efluente) del sistema en los distintos tratamientos implementados.**

Variable	Afluente	Efluente HAFSSH-J	Efluente HAFSSH-H	Efluente HAFSSH-C
----------	----------	----------------------	----------------------	----------------------

<b>Oxígeno Disuelto mg/L</b>	0	1,3	1,3	0,6
<b>Demanda Química de Oxígeno DQO mg/L</b>	2925	1356	1186	1392
<b>Demanda Biológica de Oxígeno DBO5 mg/L</b>	690	320	252	534
<b>Potencial de Hidrogeno (pH)</b>	6,3	6,2	6,2	6,8
<b>Nitratos NO3 mg/L</b>	19	20	16,	15
<b>Fosfatos PO4 mg/L</b>	2,3	1,0	0,8	2,1
<b>Turbidez NTU</b>	120	56	52	62
<b>Conductividad eléctrica S/cm</b>	1396	1156	740	765

En la (grafica 3) se presentan la relaciones de biodegradabilidad de materia orgánica durante el tiempo de desarrollo del tratamiento de aguas mieles de café, en donde la relación con valores de 0.15 indica que no hay biodegradabilidad, <0.3 baja porción biodegradable, y >0.5, son altamente biodegradables susceptibles a tratamientos biológicos. Esta relación es a partir de las concentraciones de DBO<sub>5</sub> y DQO a la entrada del sistema de humedales artificiales en las respectivas muestras recolectadas. Presentando variaciones atribuidas a los cambios en la concentración del vertimiento durante el estudio.

**Grafica 3. Biodegradabilidad de materia orgánica en el sistema de tratamiento.**

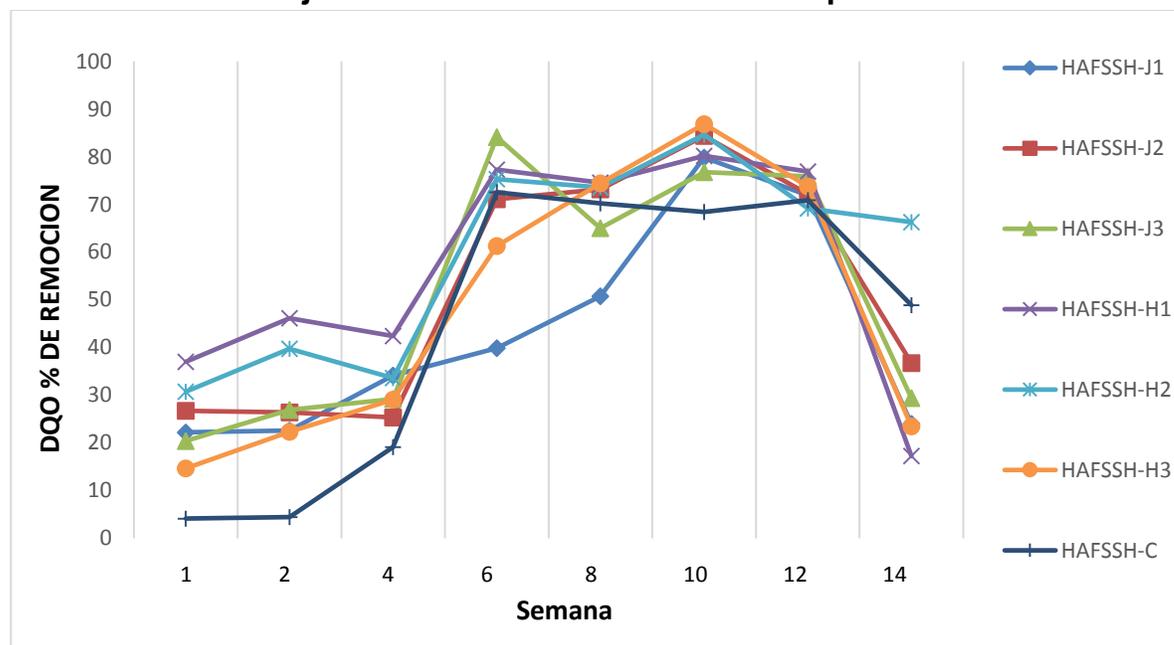


### 10.5.1. Demanda Química de Oxígeno DQO.

Teniendo en cuenta, que los procesos que conducen a la remoción de la DQO son básicamente de dos tipos: físicos (floculación, sedimentación, filtración) y biológicos (descomposición aeróbica y anaeróbica).<sup>67</sup> Los cambios de los porcentajes de remoción se le pueden atribuir, a la variabilidad en las concentraciones del lixiviado, la actividad metabólica o cometabolismo de las diferentes poblaciones microbianas al interior de los sistemas, a la composición del lecho de soporte (grava) que puede influir sobre otros mecanismos para la remoción, como son la adsorción, la precipitación, y también sobre las propias interacciones entre las variables fisicoquímicas de los humedales.<sup>68</sup> Además considerando el grado biodegradabilidad de la materia orgánica del agua miel de café, presentado anteriormente por medio de la relación DBO<sub>5</sub>/DQO.

En la (Grafica 4) se puede observar el comportamiento del porcentaje de remoción de DQO en los tratamientos estudiados, con las respectivas réplicas por especie durante el tiempo de estudio.

**Grafica 4. Porcentajes de remoción de DQO en el tiempo.**



Humedales con agua miel de café: HAFSSH-J= junco, HAFSSH-H= heliconia, HAFSSH-C= control.

Las variaciones pudieron estar influenciado por las condiciones climáticas, que cambian constantemente, y la capacidad depuradora puede variar.<sup>69</sup> Los

<sup>67</sup> Rodríguez, N. 2009 Op cit. P 162.

<sup>68</sup> Cortes y madera, 2013; arias 2004 citados por DELGADO, L., PINO, H. 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. Universidad Del Cauca Facultad De Ingeniería Civil Programa De Ingeniería Ambiental. Popayán 2015. P 71

<sup>69</sup> Delgadillo et al. Op. cit., P. 45

humedales reaccionan al microclima que los rodea, con una fuerte influencia del fenómeno de advección, en la que el aire seco relativamente caliente desde el entorno terrestre admite más vapor de agua que el aire frío y conduce a la pérdida de agua en exceso impulsada por la radiación solar.<sup>70</sup> Del mismo modo se pudo generar mayor actividad de los microorganismos, e interacciones entre las variables fisicoquímicas del agua miel de café, al entrar en contacto con la composición del sustrato, produciendo cambios en los mecanismos de remoción.

Para este estudio la principal variable que se controló fue la lluvia debido a que se aisló, evitando que se presentara dilución del vertimiento de agua miel de café y cambiara las concentraciones de los distintos parámetros medidos. Otra variable que influyó sobre el sistema fue presencia de especies vegetales, que proporcionan superficies para la formación de películas bacterianas, facilitando la filtración y la adsorción de los contaminantes del agua residual, permitiendo la transferencia de oxígeno a la columna de agua.<sup>71</sup>

Se resalta el cambio en las condiciones fisicoquímicas del agua miel de café, las cuales presentan fermentación por contener azúcares y pectinas,<sup>72</sup> generando mayor actividad microbiana. Y al agregar al tanque de almacenamiento mayor carga orgánica afecta las plantas ya aclimatadas al sistema, generando alteraciones al entrar en contacto con una contaminación más alta a la previamente tratada.

Los porcentajes de remoción más altos para los tratamientos de agua miel de café, con el junco, fueron encontrados en la semana 6 en el HAFSSH-J3 que alcanzó el 84% de remoción de DQO, siendo el más alto por esta especie. Con respecto a la heliconia se pudo analizar que alcanzó en la semana 10, una eficiencia de 87% en el HAFSSH-H3, estando por encima de la remoción de los demás humedales siendo la más eficiente.

En el humedal artificial control con agua miel de café (HAFSSH-C), se presentó un crecimiento tardío con tendencia al incremento de remoción con valores en las primeras dos semanas del 4%, para la cuarta semana ya hay un incremento significativo en la remoción con un 73% en donde nuevamente tiende a disminuir de forma gradual hasta la semana 14 con un porcentaje de remoción del 49%. Relacionado a un posible desprendimiento de la biopelícula formada por la actividad microbiana, la cual aumenta la DQO.<sup>73</sup> Y la posible saturación del sistema de tratamiento que a partir de la semana diez tiende a decaer la remoción en todos los tratamientos implementados.

En la (Gráfica 5) se observa el análisis estadístico, con el que se determinó que los tratamientos con agua miel de café no presentan diferencias significativas de

---

<sup>70</sup> Cortez S, Andrés E. 2014. Op. cit., P. 59

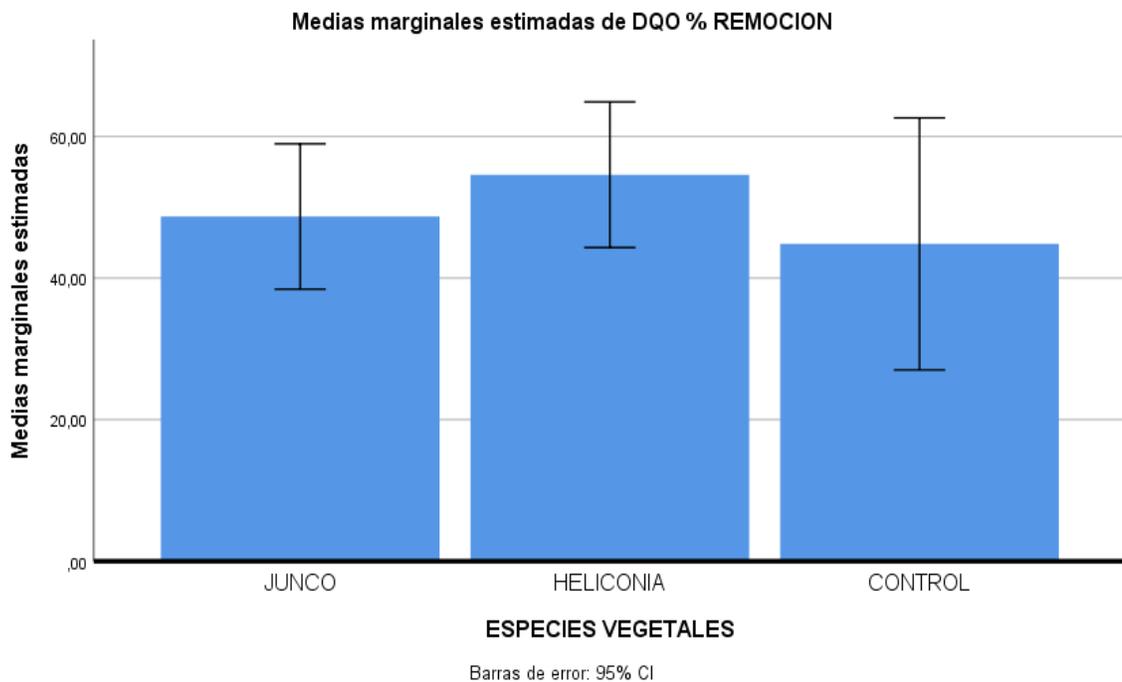
<sup>71</sup> Rodríguez, N. 2009 Op cit. P 57.

<sup>72</sup> Roa M., G.; et al. Beneficio Ecológico Del Café. Chinchiná (Colombia), CENICAFÉ, 1999

<sup>73</sup> Otálora R, Alejandra P., Evaluación Del Sistema De Tratamiento De Aguas Residuales Domesticas Mediante Humedales Artificiales De Alta Tasa En La Localización Petrolera De Caño Guandúl. Universidad Nacional De Colombia, Bogotá. 2011 capítulo 5. p 32.

remoción de materia orgánica en términos de DQO, obteniendo un valor de significancia de 0.561 (Anexo 3), lo cual indica que no hay diferencias entre los tratamientos con las especies vegetales y el control, con respecto al parámetro estudiado. Se presentan muy pocas variaciones, pero la de mayor eficiencia en el estudio a pesar de la poca diferencia es dada por la heliconia con un porcentaje medio de 54% de remoción, seguido por el junco con un valor de 48%, y se resalta la eficiencia que tiene el control en el sistema por alcanzar una remoción del 44%, a pesar de no tener macrófitas plantadas, con lo que se determinó que el sustrato influye mucho en el sistema de HA, teniendo muy buena eficiencia, al no presentar grandes diferencia de remoción con respecto al junco y la heliconia.

**Gráfica 5. Medias de DQO entre tratamientos.**

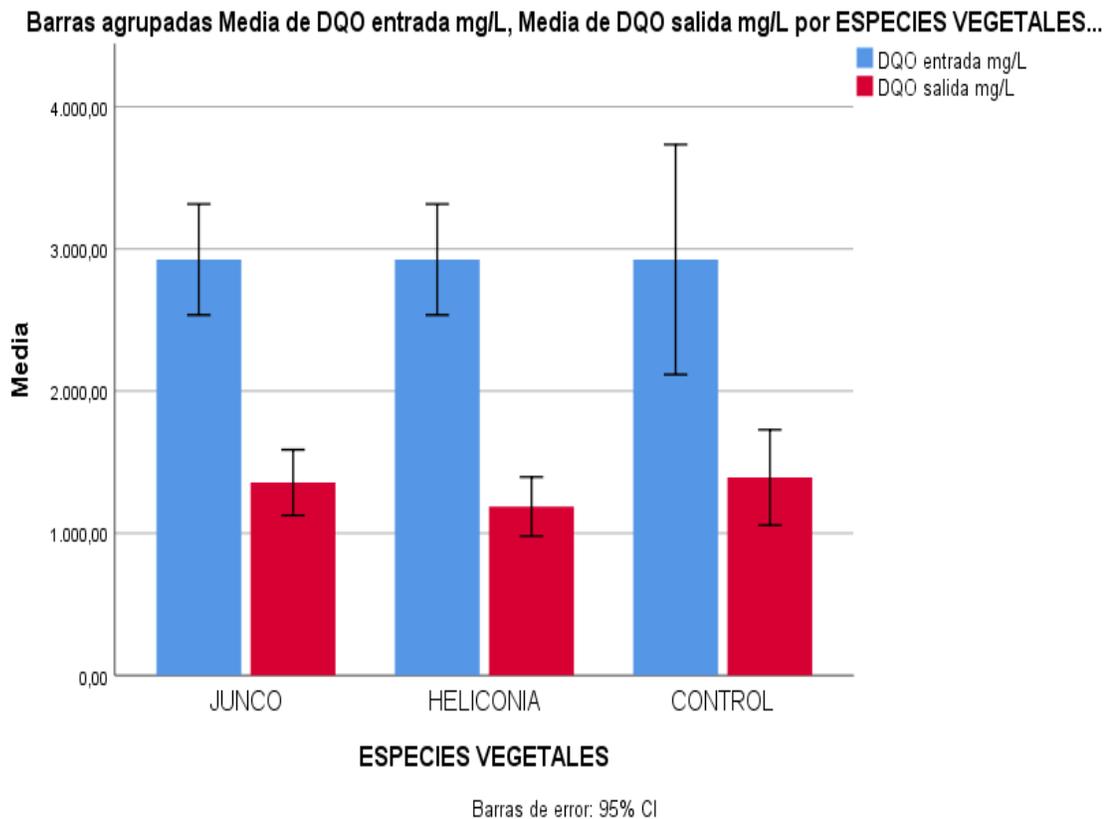


Al comparar los porcentajes de remoción del humedal control con agua miel de café, con respecto a los HA plantados con especies vegetales se obtiene que las plantas aportan una baja remoción, porque están en 10% para la heliconia y 4% para el junco por lo cual se determina que la eficiencia la esta generando el sustrato, debido a que el sustrato en primera medida genera procesos de adsorción y precipitación, además que brinda un medio de soporte para que se genere un desarrollo microbiológico que ayuda a degradar la materia orgánica.

En la (Gráfica 6), Se puede observar la media obtenida para la entrada y salida del sistema de tratamiento, en la que se observa la remoción de la DQO, que por medio de la prueba T (Anexo 4), se verifica que la significancia está por debajo de 0.05 lo cual indica que si hay diferencias con respecto a la concentración que

entra y la que sale, indicando que si esta disminuyendo la carga contaminante de las aguas mieles de café, al ser tratada por medio de los humedales artificiales.

**Grafica 6. Media de entra y salida de DQO en el sistema.**



### 10.5.2. Demanda Biológica de Oxígeno DBO<sub>5</sub>

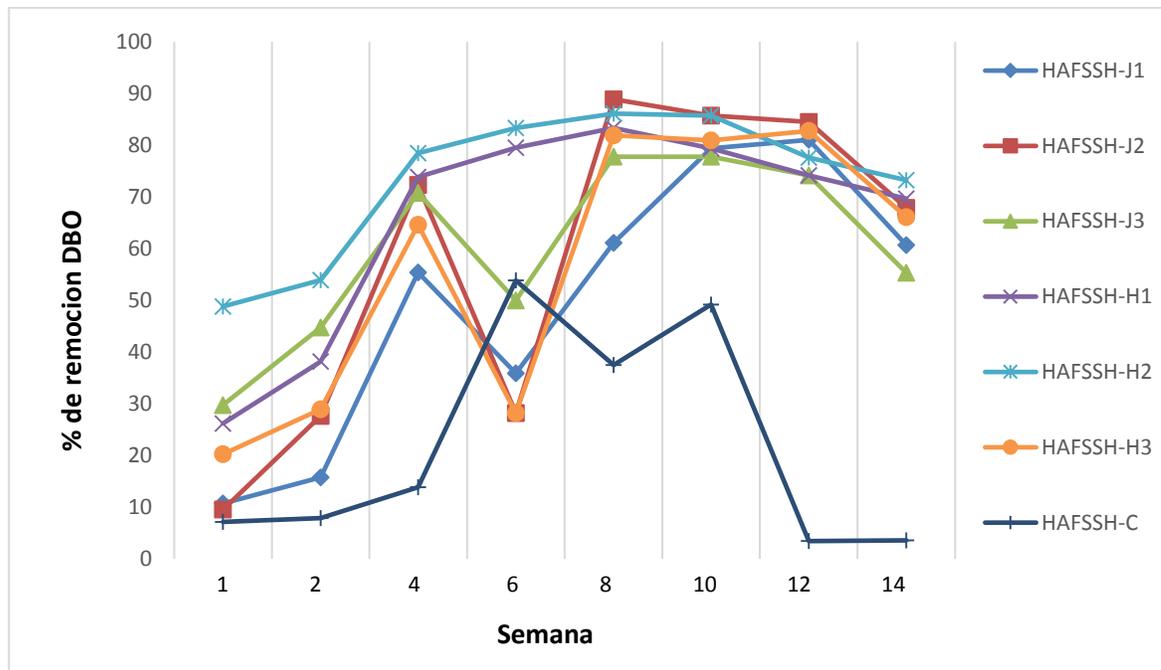
La materia orgánica se descompone aeróbica o anaeróbicamente, dependiendo de la disponibilidad de O<sub>2</sub> en el lugar de la deposición, por acción de los microorganismos. La materia orgánica restante, en estado coloidal o disuelto, se sigue removiendo a medida que el agua residual entra en contacto con el crecimiento microbiano en el sistema.<sup>74</sup>

A pesar que no se conto con una disponibilidad de oxigeno alta al pasar por el sistema de tratamiento, se pudo haber generado procesos microbiológicos asociados a la fijación de O<sub>2</sub> por las especies vegetales, contribuyendo con la degradación de materia orgánica en términos de DBO<sub>5</sub>, y como se puede observar en la (Grafica 7) en donde el porcentaje de remoción de DBO<sub>5</sub> en los tratamientos estudiados es mas efectivo con las plantas.

<sup>74</sup> Rodríguez, N. 2009 Op cit. P 164.

Los cambios en los porcentajes de remoción se asocian, a las características del vertimiento, en donde el tanque de almacenamiento, disminuyo el nivel y se realizó la carga con el vertimiento recién salido del beneficiadero, el cual presento niveles más altos de materia orgánica, disminuyendo la remoción de DBO<sub>5</sub>, ya que el sistema no estaba aclimatado a una carga tan alta, pero al asimilar este vertimiento tiende nuevamente a incrementar la remoción.

**Grafica 7. Porcentajes de remoción de DBO<sub>5</sub> a través del tiempo.**



Tratamientos implementados con agua miel de café: HAFSSH-J= junco, HAFSSH-H= heliconia, HAFSSH-C= control

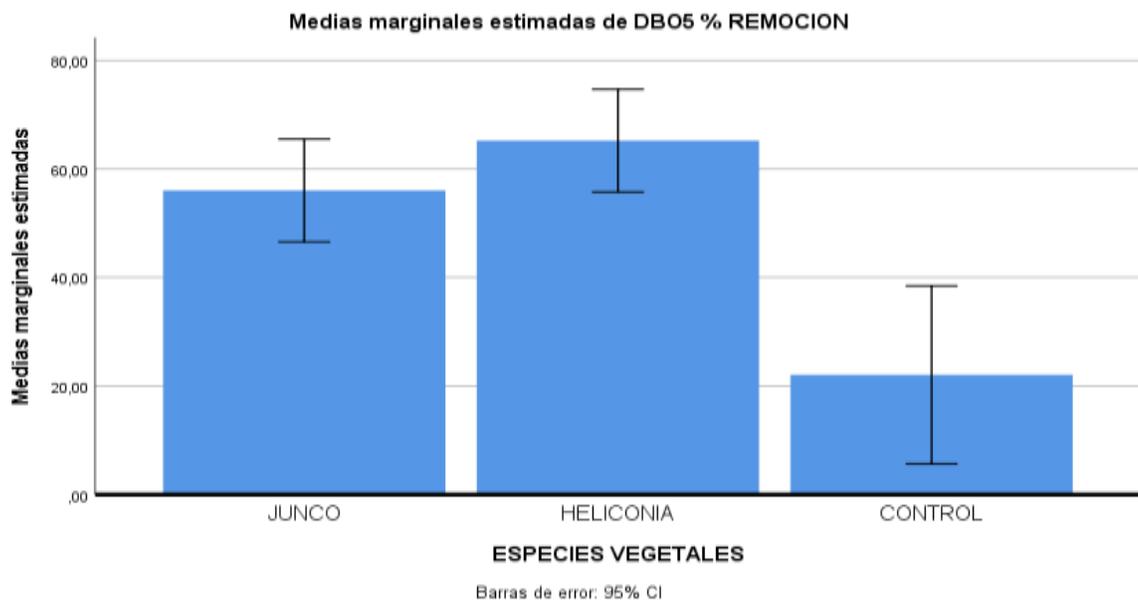
Los humedales plantados tienen un porcentaje de remoción bajo comprendido entre el 10 y el 50 % en las primeras semanas. Presentando variaciones en los distintos humedales, esto posiblemente asociado al poco tiempo de desarrollo de las plantas, la poca actividad microbiana asociada a la raíz y al sustrato<sup>75</sup>, que gradualmente fue mejorando tendiendo a aumentar, alcanzando porcentajes entre el 61 y el 89% en la semana 8, a partir de esta semana comienzan a disminuir los porcentajes de remoción gradualmente.

La remoción realizada por el junco en sus respectivas replicas mantuvo el mismo comportamiento durante el periodo de estudio, presentando variaciones notables en la eficiencia de remoción, desde niveles bajos en la primera semana, hasta alcanzar un pico de 71% en la cuarta semana. Al presentar el cambio de las características del vertimiento, disminuyo hasta el 28% de remoción en la semana 6, pero en la semana 8 nuevamente incrementa la remoción alcanzando el pico más alto con 89%, en donde tiende a disminuir lentamente la remoción.

<sup>75</sup> Otálora R, Alejandra P. Op. cit., p 31

La heliconia presentó una remoción estable durante el proceso, comenzando con el nivel más bajo de remoción del 26% en la primera semana, hasta alcanzar el 78% en la semana 4, tendiendo a estabilizarse con un promedio del 70 % hasta la última semana. Con respecto al humedal control (HAFSSH-C) con agua miel de café, se pudo determinar que tuvo un comportamiento tardío por la poca actividad microbiológica durante las primeras cuatro semanas, en donde alcanza la remoción del 14%, y a partir de este tiempo aumento hasta alcanzar un pico máximo del 54% en la semana 6, y nuevamente comenzó a disminuir hasta alcanzar el 4% de remoción en la última semana.

**Grafica 8. Media de remoción de DBO<sub>5</sub> entre tratamientos.**

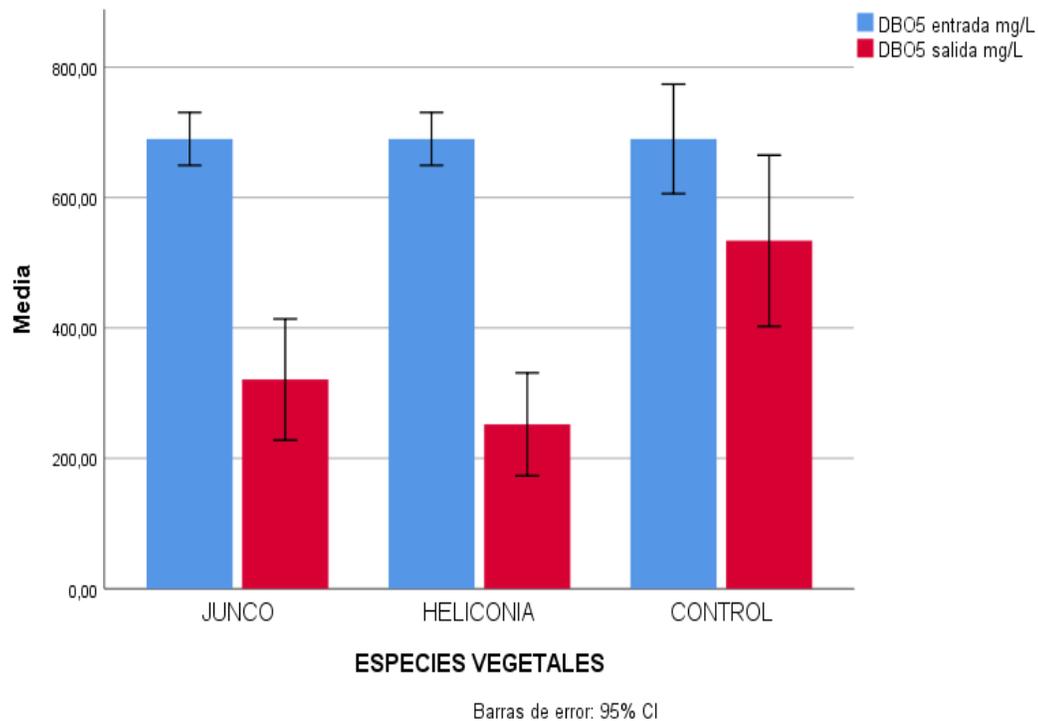


En la (Gráfica 8) se observa el análisis estadístico para mirar la eficiencia de remoción y las diferencias de los tratamientos implementados, y se pudo constatar que los porcentajes medios obtenidos en el estudio para los tratamientos, son significativos para la remoción de DBO<sub>5</sub>, porque están en unos valores por debajo de 0.05 (Anexo 3), lo cual indica que hay diferencias, entre tratamientos, y se puede verificar que para la remoción de DBO<sub>5</sub> la especie más eficiente es la heliconia presentando valores de remoción del 65%, seguida del junco con 56%, y el control que no alcanza valores muy altos y solamente llega hasta el 22%.

Comparando la eficiencia del HAFSSH-C con respecto a los otros tratamientos con especies vegetales, se determinó que al presentar niveles bajos de remoción de DBO<sub>5</sub>, el sustrato no está favoreciendo en gran medida la disminución de carga orgánica y que los microorganismos pueden realizar una mejor degradación asociados a especies vegetales, como se observa en los demás tratamientos estudiados

En la (Gráfica 9), Se puede observar la media obtenida para la entrada y salida del sistema, observando las diferencias en los distintos tratamientos para la remoción de DBO<sub>5</sub>, que por medio de la Prueba T (Anexo 4), se observa que la significancia, está por debajo de 0.05 determinando que el sistema de HA si es eficiente para tratar este vertimiento, pero plantado con especies vegetales se puede obtener una remoción mayor al 60%, con respecto al parámetro evaluado.

**Grafica 9. Media de entrada y salida de DBO entre tratamientos.**



### 10.5.3. Oxígeno Disuelto OD.

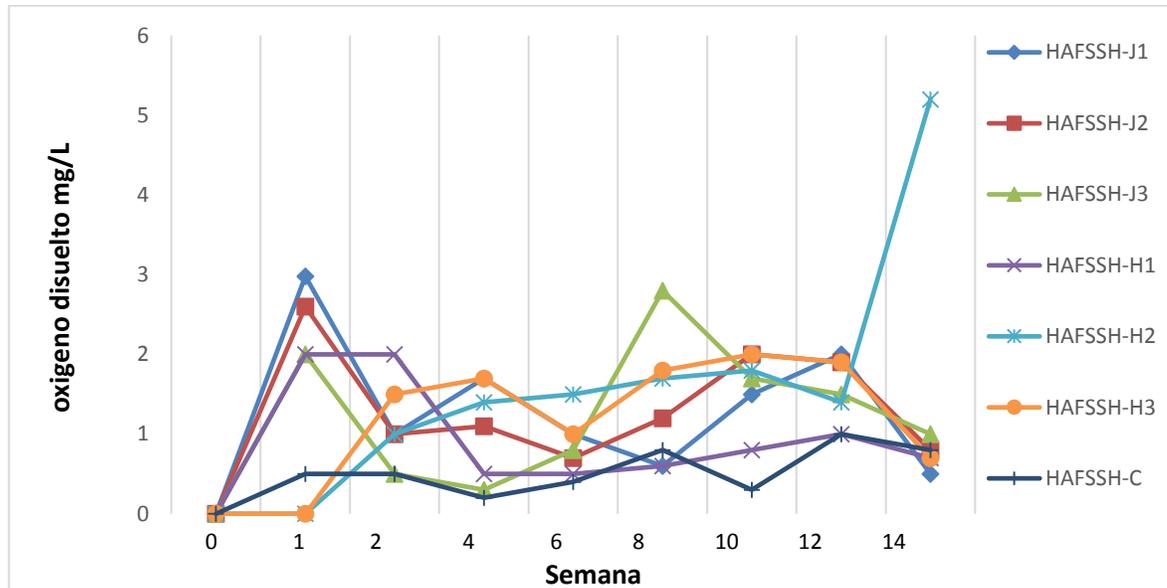
En la (Gráfica 10), se observa la concentración de oxígeno disuelto presente en el sistema, la cual es muy baja debido a la alta cantidad de materia orgánica presente en la entrada del sistema.

Para el efluente a partir de la segunda semana, los valores encontrados de O.D comenzaron a aumentar a lo largo del sistema, y se pudo observar la influencia de las especies vegetales para realizar la fijación de oxígeno por medio de sus actividades fotosintéticas, al transferir oxígeno desde la atmosfera por medio de las hojas y tallos logrando la oxigenación del sistema a través de las raíces<sup>76</sup>.

<sup>76</sup> Cortes y madera, 2013; arias 2004 citados por DELGADO, L., PINO, H. 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. Universidad Del Cauca Facultad De Ingeniería Civil Programa De Ingeniería Ambiental. Popayán 2015. P 41

Se presentaron variaciones durante todo el tiempo de estudio, debido principalmente a los procesos bioquímicos realizados por los microorganismos presentes en el vertimiento los cuales aprovechan parte del oxígeno disuelto para llevar a cabo la degradación de los contaminantes.<sup>77</sup>

**Grafica 10. Comportamiento Del Oxígeno Disuelto En El Tiempo.**



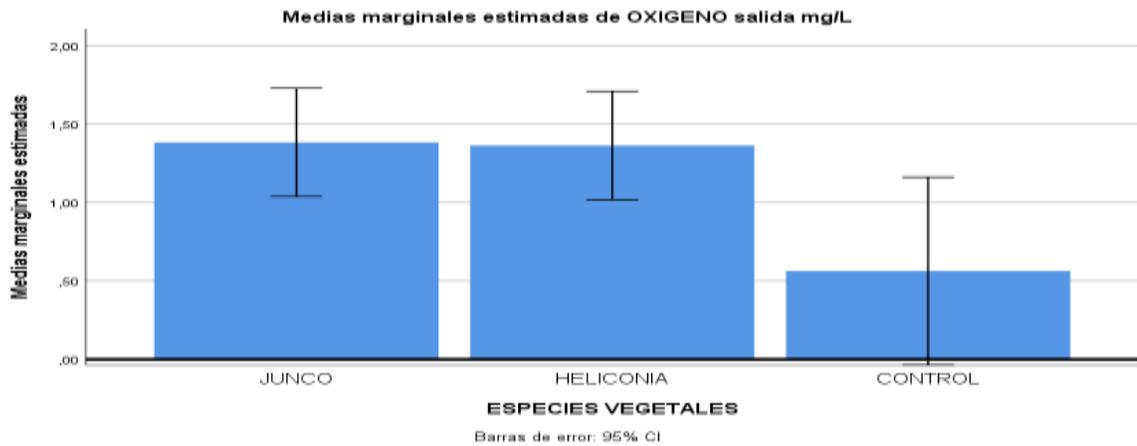
Tratamientos implementados con agua miel de café: HAFSSH-J= junco, HAFSSH-H= heliconia, HAFSSH-C= control

En el HAFSSH-C con agua miel de café, se observa un incremento de la concentración de O.D, en pequeñas cantidades, con respecto a la entrada del sistema de tratamiento, presentando algunas variaciones, pero se mantiene estable alcanzando un máximo de 1 mg/L de oxígeno durante todo el proceso, y se determina que la presencia de las plantas es fundamental para la fijación del oxígeno, obteniendo los mejores resultados con la heliconia.

En la (Gráfica 11) se observa la media obtenida respecto al oxígeno disuelto en la cual se puede analizar que el comportamiento presentado durante el tiempo de estudio en los distintos tratamientos, tiene una significancia de 0.05 (Anexo 3) lo cual indica que no hay diferencias significativas en la concentración de oxígeno disuelto. Los tratamientos presentan pocas variaciones, pero la presencia de las especies vegetales contribuye en el sistema porque ayudan a oxigenar por medio de las actividades fotosintéticas, y favorecen con esto que la actividad microbiana se desarrolle al tener la disponibilidad de O.D para degradar la materia orgánica aunque no se cuenten con altas concentraciones de O<sub>2</sub>.

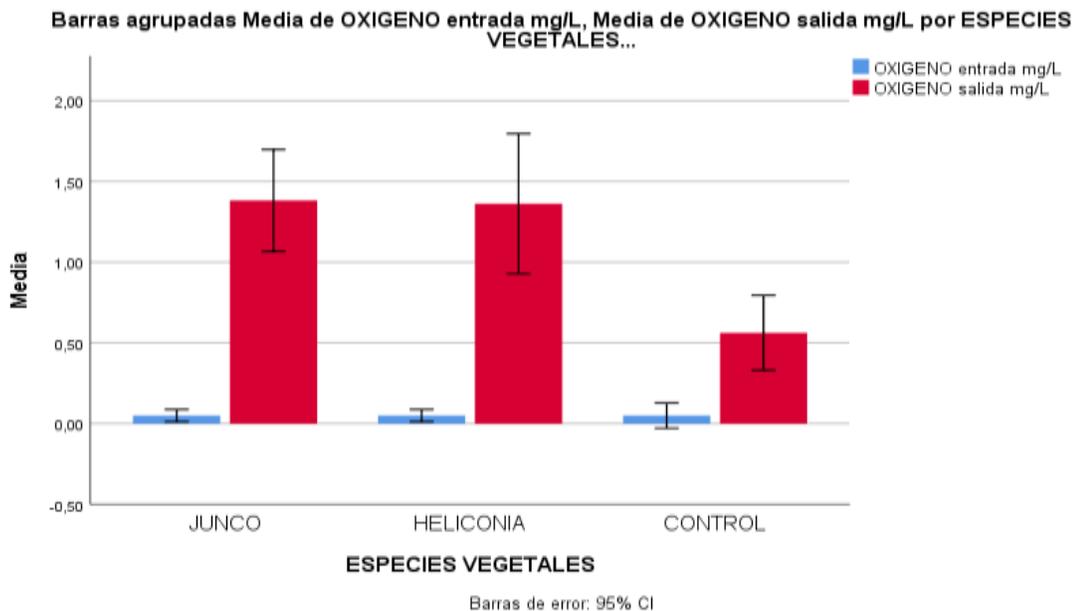
**Grafica 11. Medias O.D en la salida entre los distintos tratamientos.**

<sup>77</sup> Otálora R, Alejandra P., Op. cit., p. capítulo 5. p 30.



La significancia obtenida por medio de la prueba T (Anexo 4) por cada tratamiento está por debajo de 0.05 con lo cual se determinó que si hay diferencias significativas al producirse la oxigenación al pasar por él HAFSSH. En la (Gráfica 12) se observan diferencias notables de la media obtenida de la entrada y la salida del O.D, con el cual se determino que el agua miel de café, al entrar con bajas concentraciones de oxígeno en el sistema de tratamiento con macrófitas y aumentar gradualmente, está favoreciendo el desarrollo de microorganismos que requieren del O<sub>2</sub> para realizar sus actividades metabólicas, por tal razón si son eficientes para tratar este tipo de vertimientos y que las plantas en los humedales si favorecen la fijación y la degradación del material contaminante.

**Gráfica 12 media de entrada y salida de O.D en mg/L**



#### 10.5.4. NITROGENO (Nitratos, Nitritos, Amonio).

Los nutrientes son elementos químicos necesarios para el normal desarrollo de la vida, son requeridos por los organismos como precursores o constituyentes del material celular, pero cuando se vierten aguas residuales con altas concentraciones de nutrientes principalmente el nitrógeno y el fósforo pueden causar eutrofización, en el medio receptor.<sup>78</sup>

El nitrógeno es un elemento presente tanto en aguas superficiales como en las aguas residuales. También se encuentra en la atmósfera y en el suelo, cumpliendo un ciclo. Esto puede ocasionar problemas, ya que es un elemento muy móvil que experimenta tres transformaciones en el suelo: la mineralización del nitrógeno orgánico a ión amonio, la nitrificación en la que se forma nitrato y por último la desnitrificación. En las aguas residuales, a excepción de unos pocos vertidos industriales, el nitrógeno es escaso: fundamentalmente como amonio, proteínas, aminas y escasas cantidades de nitratos.<sup>79</sup>

Para este tipo de aguas residuales (aguas mieles de café), las concentraciones de nitrógeno encontradas son el resultado de la descomposición de materia orgánica, en la cual se obtuvo un bajo contenido de este nutriente, y en la mayoría del tiempo de estudio estuvieron presentes como nitratos. Esto se relaciona directamente con el ciclo del nitrógeno, porque al manejar concentraciones de materia orgánica altas se puede realizar el proceso de mineralización generando amonio, y al haber concentraciones de amonio se puede realizar el proceso de nitrificación con los cuales se forman los nitritos, y seguidamente los nitratos los cuales son los nutrientes que pueden ser asimilados por las plantas.<sup>80</sup>

Las concentraciones de nitrógeno encontradas no representaron toxicidad para el sistema ya que las plantas no presentaron daños fisiológico por marchitez, muerte o inhibición en el crecimiento durante la experimentación esto demuestra que las plantas presentaron una buena adaptación al sustrato bajo las condiciones de operación.<sup>81</sup>

#### **Nitratos.**

En los distintos tratamientos realizados se encontró la presencia de nitratos, los cuales son los nutrientes asimilables por las plantas y estos pueden ser aprovechados por las macrófitas que lo utilizan principalmente para el crecimiento.

---

<sup>78</sup> Delgadillo et al. Op. cit., P. 74

<sup>79</sup> *Ibíd.* P. 75

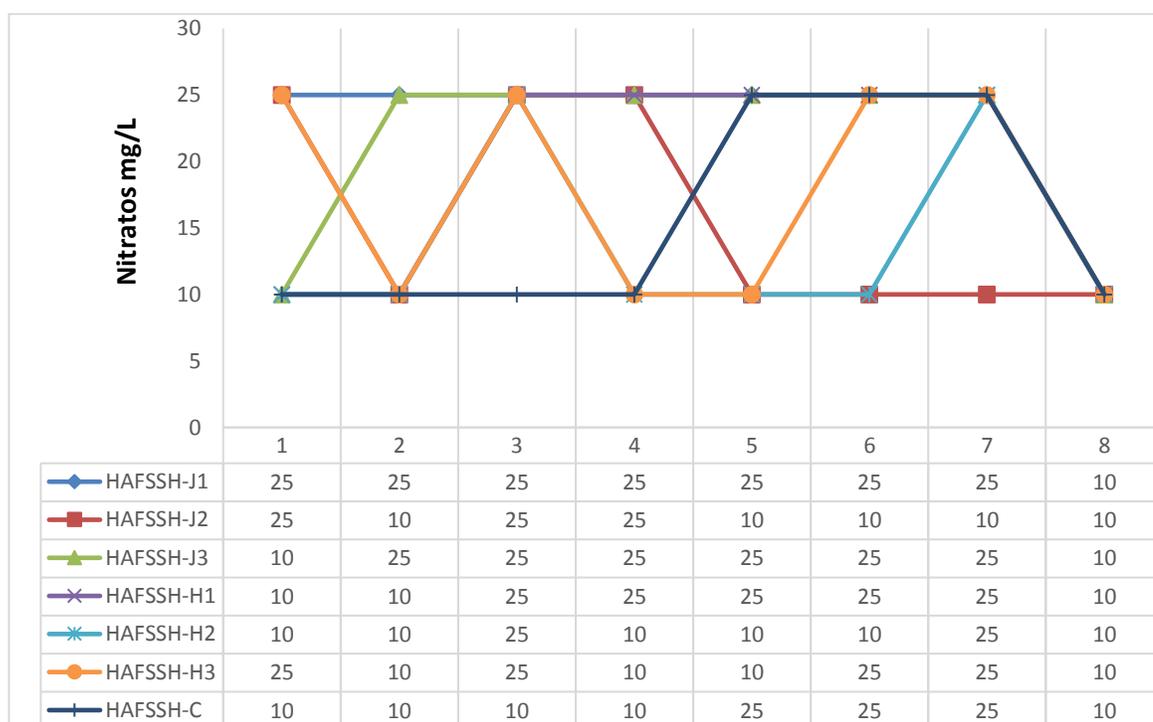
<sup>80</sup> Delgadillo et al. Op. cit., P. 76

<sup>81</sup> Cortés S, Andrés E. Evaluación Del Desempeño De Humedales Construidos Subsuperficial De Flujo Horizontal Sembrados Con Especies Nativas Tropicales Para La Eliminación De Cr (Vi) Y Cd (Ii) De Lixiviado De Relleno Sanitario. Escuela De Ingeniería De Recursos Naturales Y Del Ambiente Posgrado En Ingeniería Sanitaria Y Ambiental Universidad Del Valle Santiago De Cali. 2014. P 72.

En la (Grafica 13) se presentan los comportamientos de los tratamientos y se puede apreciar que hay valores bajos, posiblemente atribuido a transformaciones de las formas del nitrógeno, asociadas a la oxidación bacteriana de la materia orgánica presente en las aguas mieles de café.<sup>82</sup>

Los porcentajes de remoción no son claros, las variaciones se dan principalmente debido a procesos e interacciones en los HA, generados por los cambios en el ambiente que influye sobre la actividad fisicoquímica, biológica y microbiológica, los cuales interactúan entre el sustrato, las especies vegetales, y el vertimiento de agua miel de café al presentar cambios en la concentración de materia orgánica presente en el vertimiento. Por lo tanto la concentración de nitratos se encuentra bastante variada y se puede notar que hay puntos en los que se aumenta la concentración, esto posiblemente asociado al proceso de nitrificación, y la actividad microbiológica del sistema.<sup>83</sup>

**Grafica 13. Concentración de Nitratos (mg/L) en el tiempo.**



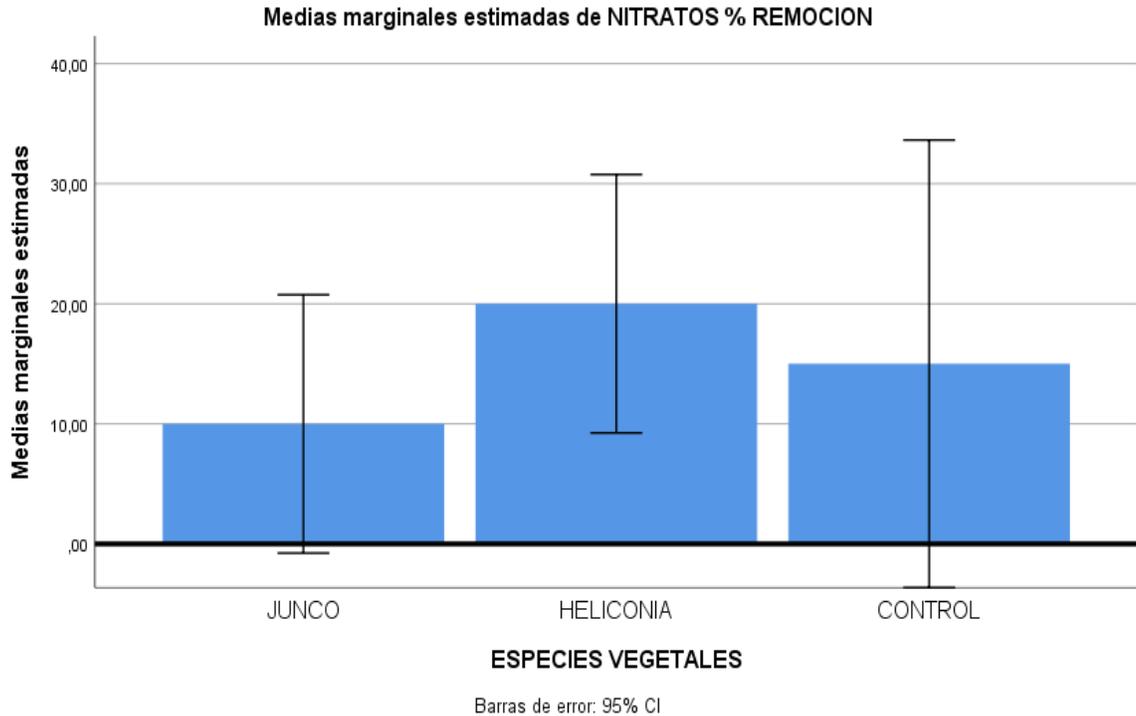
En la (Gráfica 14) se observan los promedios obtenidos por cada tratamiento con cada una de las especies vegetales durante el tiempo de estudio, obteniendo una significancia de 0.425, lo cual indica que no hay diferencias significativas en la remoción, pero las variaciones indican que la especie más eficiente para la eliminación y retención del nitrógeno es dada por la heliconia con el 20% de

<sup>82</sup> Delgadillo et al. Op. cit., P 78

<sup>83</sup> Ibíd., p. 74

remoción, lo cual se le atribuye al aprovechamiento de la disponibilidad de este componente para desarrollarse fisiológicamente.

**Gráfica 14. Media De Porcentaje De Remoción De Nitratos entre tratamientos.**

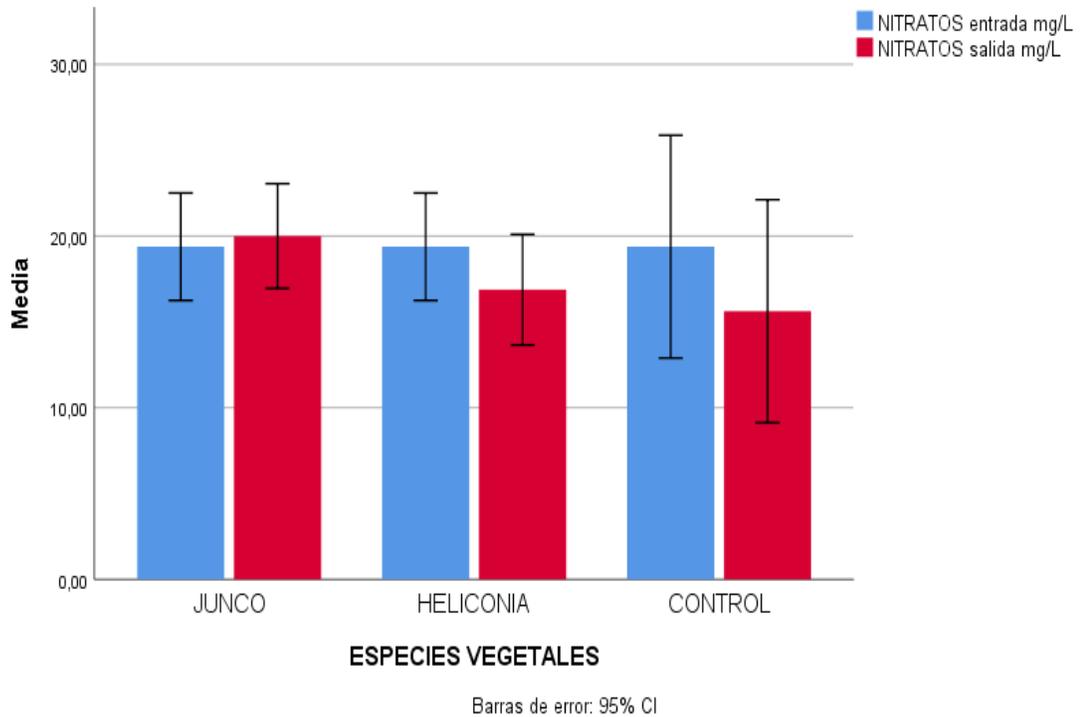


En la (Gráfica 15), se observa la concentración promedio de nitratos en el sistema con HA, y la eficiencia obtenida por cada uno de los tratamientos. Las variaciones en las entradas con respecto a las salidas del sistema se pueden asociar, principalmente por la asimilación por parte de la planta, la acumulación en el medio filtrante (asimilación microbial), nitrificación, desnitrificación, la cual por medio de la actividad fisicoquímica, biológica y microbiológica permite que se den estos procesos, y se evite la contaminación.<sup>84</sup>

Por medio de la prueba estadística prueba T (Anexo 5), se obtuvo que la significancia está por encima de 0.05 para los distintos tratamientos, lo cual indica que no hay diferencias significativas en los tratamientos con respecto a la entrada y la salida. Pero si se observa que una pequeña parte está siendo asimilada posiblemente por las plantas, y el sustrato al generar actividad microbiológica y fisicoquímica que favorece la remoción de este nutriente.

<sup>84</sup> Cortés S, Andrés E. Evaluación Del Desempeño De Humedales Construidos Subsuperficial De Flujo Horizontal Sembrados Con Especies Nativas Tropicales Para La Eliminación De Cr (Vi) Y Cd (Ii) De Lixiviado De Relleno Sanitario. Escuela De Ingeniería De Recursos Naturales Y Del Ambiente Posgrado En Ingeniería Sanitaria Y Ambiental Universidad Del Valle Santiago De Cali. 2014. P 32-33

**Grafica 15. Media de entrada y salida de nitratos mg/L.**



El junco tiene un comportamiento muy diferente con respecto a los demás tratamientos, el cual no remueve este tipo de nutriente, al contrario aumenta esta concentración como se puede observar en la media de entrada y la salida del sistema, posiblemente esta especie no está demandando gran cantidad de este nutriente, también se relaciona con los cambios de estado del nitrógeno que pudo haber influenciado, produciendo así un incremento del nutriente en los HA.

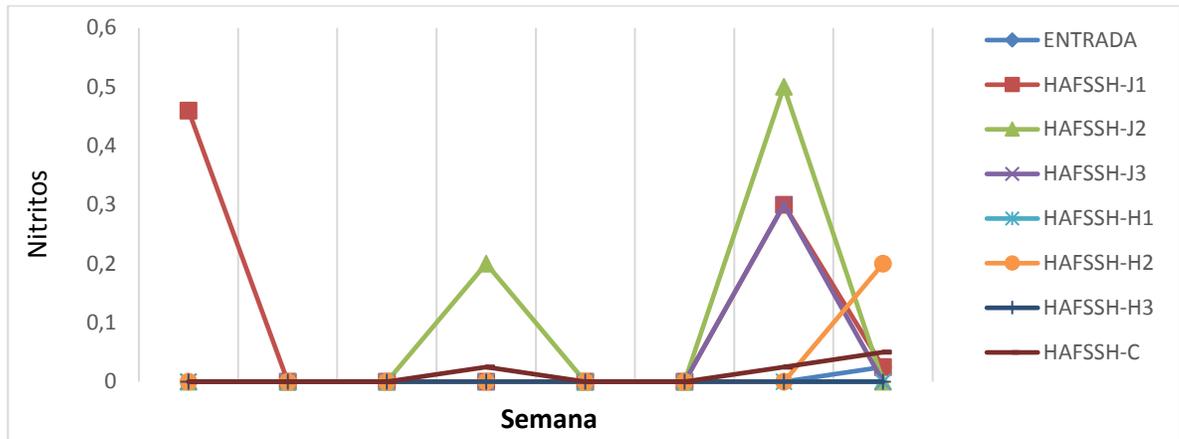
### **Nitritos**

Los nitritos se encuentran presentes en las aguas, por los procesos de oxidación del amoníaco o por la reducción de los nitratos, y la importancia de la determinación de los nitritos en las aguas residuales radica debido a que son altamente tóxicos para peces y otras especies acuáticas, aún en pequeñas cantidades<sup>85</sup>. En la (Grafica 16) se puede apreciar que los  $\text{NO}_2$  tienen concentraciones bajas y llegan a ser casi igual a cero, aunque esto también puede ser debido a que los nitritos son muy inestables en aguas residuales, y se pueden generar por la oxidación de los nitratos<sup>86</sup>.

<sup>85</sup> Delgadillo et al. Op. cit., P. 78

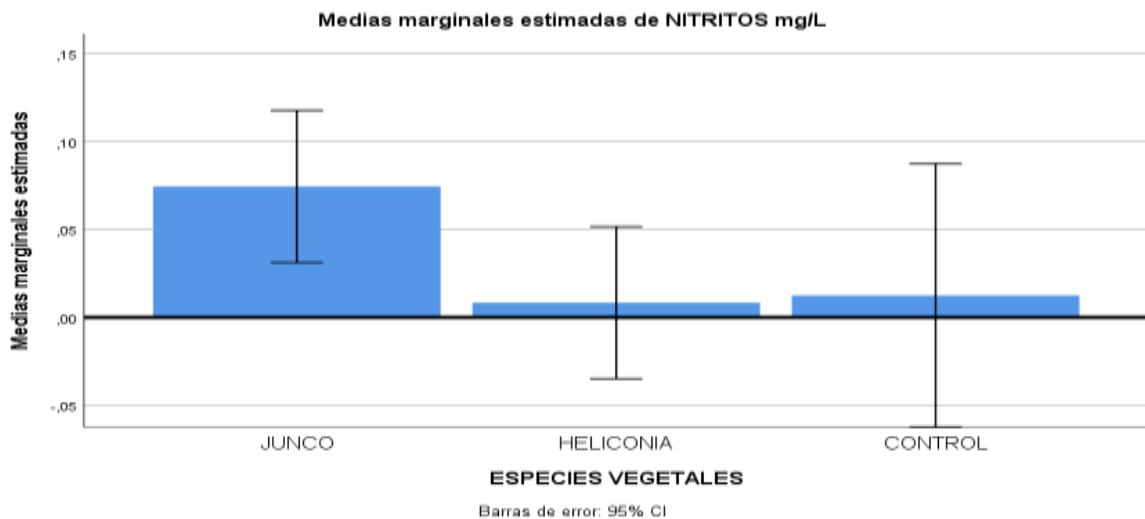
<sup>86</sup> Marín M. Jhoan P; Correa R. Juan C; Evaluación De La Remoción De Contaminantes En Aguas Residuales En Humedales Artificiales Utilizando La *Guadua Angustifolia Kunth*, Universidad Tecnológica De Pereira, Facultad De Tecnología, Escuela De Tecnología Química, Pereira 2010. P 59

**Grafica 16 Concentración De Nitritos En El Tiempo**



Se logra observar que los puntos en los cuales se encontró concentración de nitritos durante el tiempo de estudio, alcanzaron un pico máximo de 0.5 mg/L en la semana 12 en el HAFSSH-J2, esto se asocia a el proceso de reducción de los nitratos los cuales por la presencia de bacterias que influyen para realizar la transformación o eliminación del nitrógeno, y por los procesos de nitrificación. Por estos factores se pueden encontrar estas concentraciones con valores altos, principalmente en los HA con junco y tienen variaciones en el estudio al encontrar concentraciones en la semana 1-6-12, con lo que se asocia al cambio de las condiciones fisicoquímicas del vertimiento las cuales en esos puntos específicos se realizó la carga al tanque de almacenamiento, por este motivo se incrementó la concentración de nitritos, lo cual genera posibles alteraciones en el sistema de tratamiento.

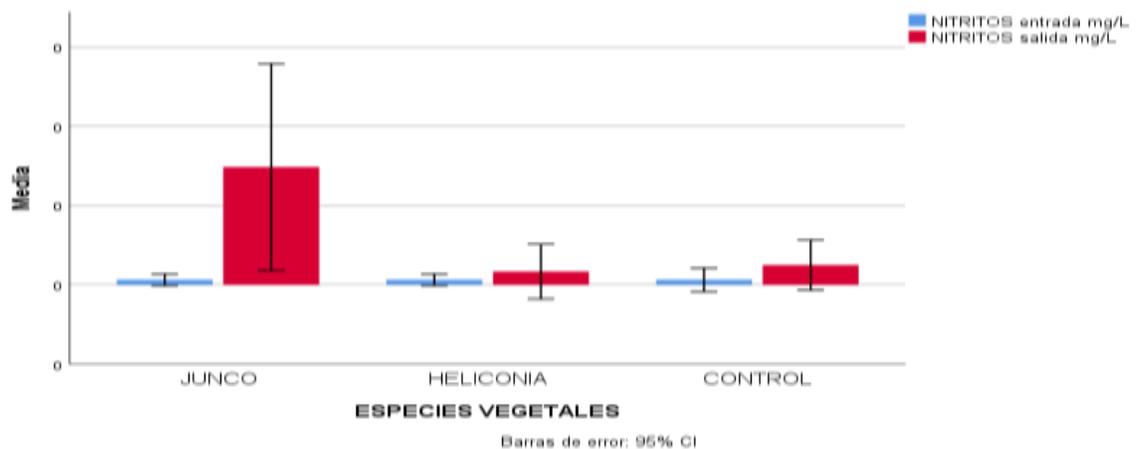
**Grafica 17. Media de nitritos entre los tratamientos.**



En la (Gráfica 17) se observa la media de nitritos obtenida con cada una de las especies vegetales, presentando una significancia de 0.083, lo cual indica que no hay diferencias significativas en la remoción de nitritos.

Como se puede observar en la (Gráfica 18), en la entrada y la salida del sistema las variaciones indican que el junco y el control presentaron las concentraciones mas altas de nitritos durante el tiempo de estudio y de acuerdo a la prueba T (Anexo 5) se tiene diferencias significativas. El comportamiento de este nutriente se relaciona con los cambios de estado, asociados al ciclo del nitrógeno, en los distintos tratamientos.

**Gráfica 18. Media de entrada y salida de NO<sub>2</sub> mg/L.**



### Amonio

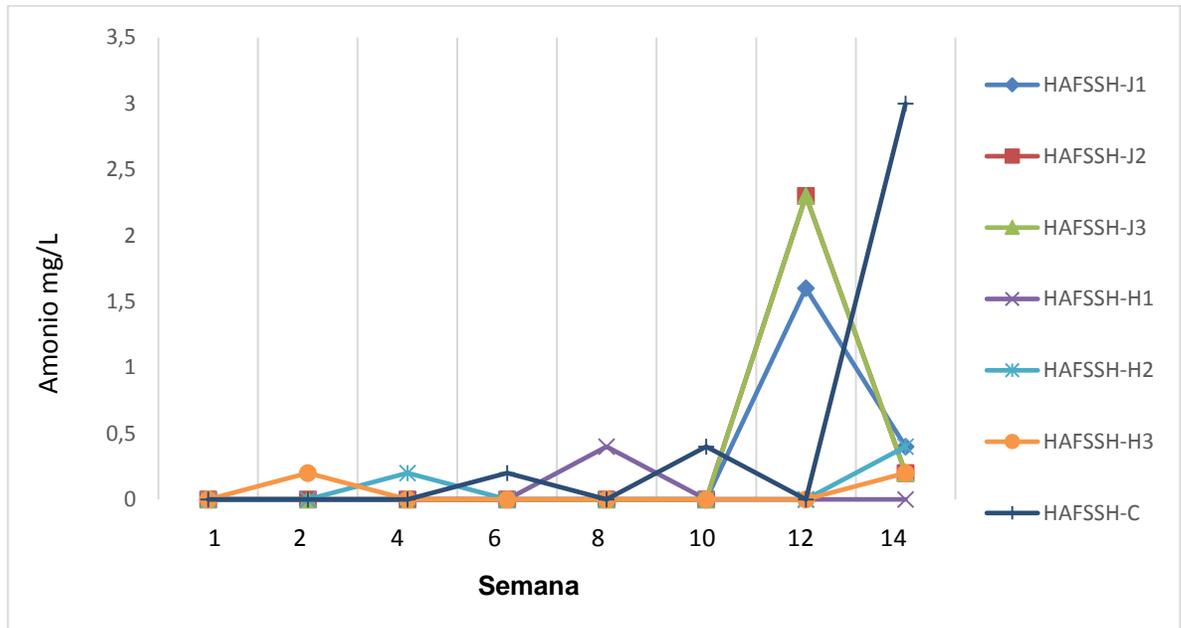
En la (Gráfica 19) se puede observar las semana en las que se encontraron concentraciones de amonio, los que alcanzaron los picos más altos fueron los del HAFSSH J1, J3, y el CONTROL. La presencia de este puede estar asociada a los procesos de reducción de nitratos de forma anaerobia, en donde interactúan bacterias para llevar a cabo este proceso.<sup>87</sup> Además en las aguas naturales y residuales va haber presencia del ion amonio con pH menor de 9.3 y el amoniaco a pH mayor de 9.3.<sup>88</sup>

Para este caso se encontró concentraciones de amonio en los humedales con junco y el máximo fue alcanzado por el control con agua miel de café, el cual al no tener ningún tipo de especie vegetal, se puede asociar directamente a procesos microbiológicos que alcanzaron condiciones óptimas para realizar el proceso de mineralización de la materia orgánica.

<sup>87</sup> DELGADILLO, Oscar, et al. Op. cit., p. 76

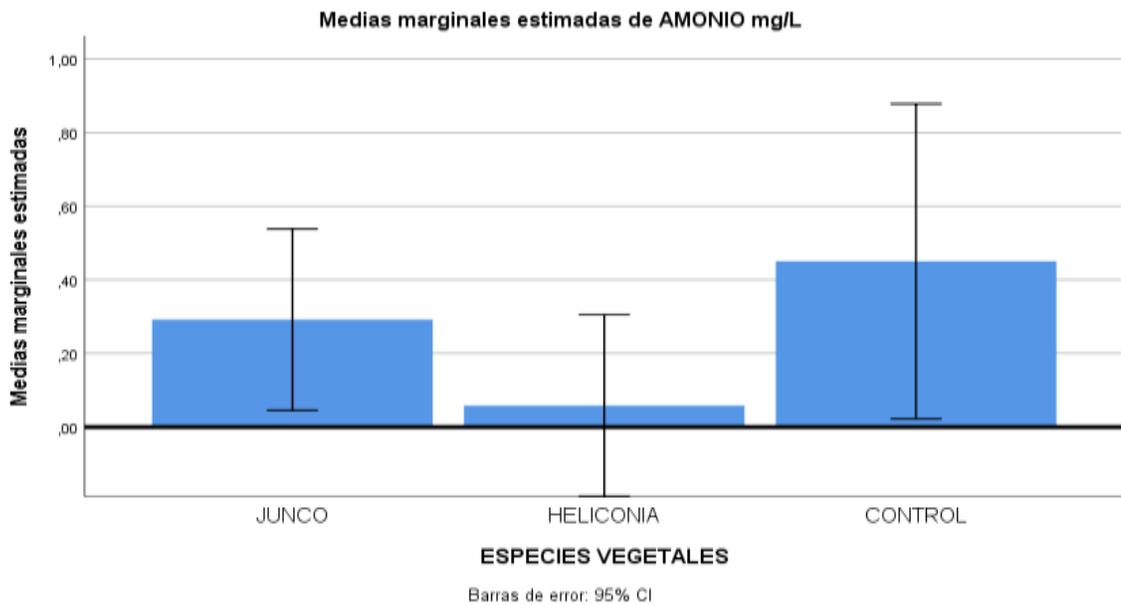
<sup>88</sup> Crites Tchobanoglous 2000. citato por: Delgadillo et al. P76

**Grafica 19 concentración de amonio en el tiempo**



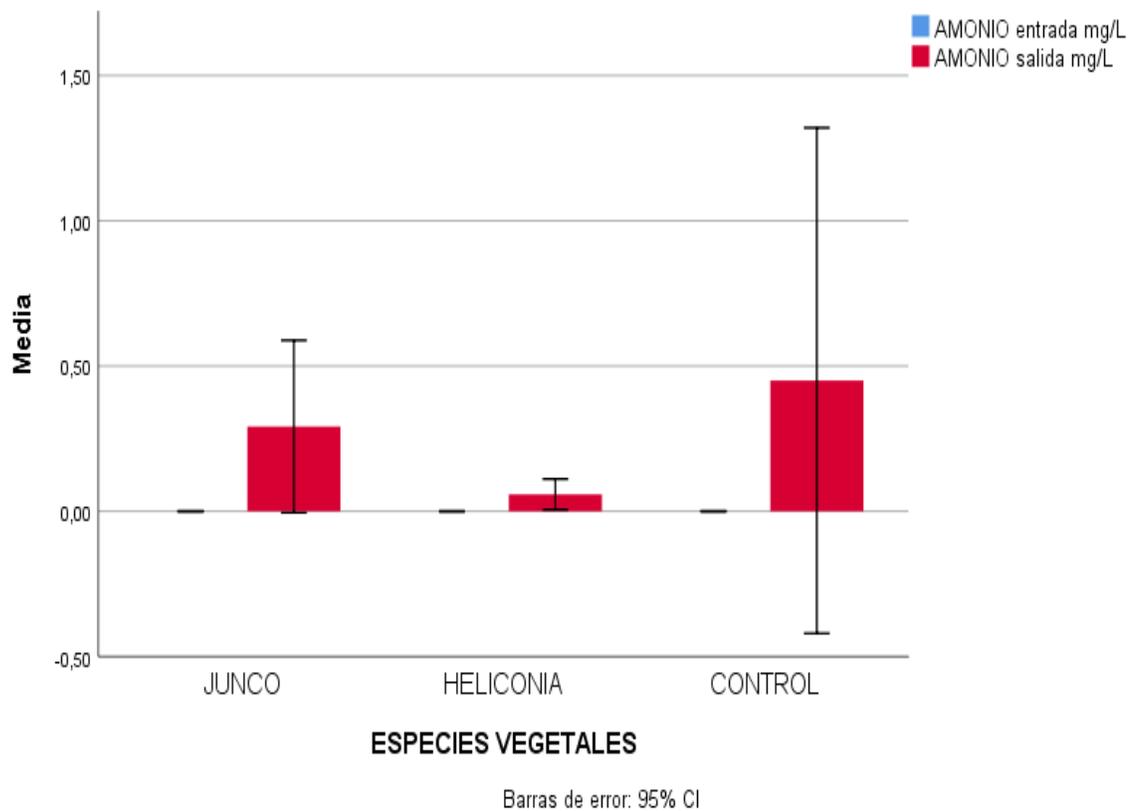
En la (Gráfica 20) se observa la media obtenida en los distintos tratamientos implementados, encontrando un valor mayor a 0.05 el cual quiere decir que no hay diferencias significativas en las concentraciones de amonio en el sistema de HA.

**Grafica 20. Media de amonio entre tratamientos.**



En la (Gráfica 21) se puede analizar los promedios de las concentraciones de amonio encontradas en los distintos tratamientos, con lo cual se pudo determinar que en el sistema se están generando las transformaciones del N, produciendo mayores concentraciones en la salida del sistema de los tres tratamientos, por los procesos de mineralización de la materia orgánica aportada por el agua miel de café.

**Grafica 21. Media de entrada y salida de amonio mg/L.**

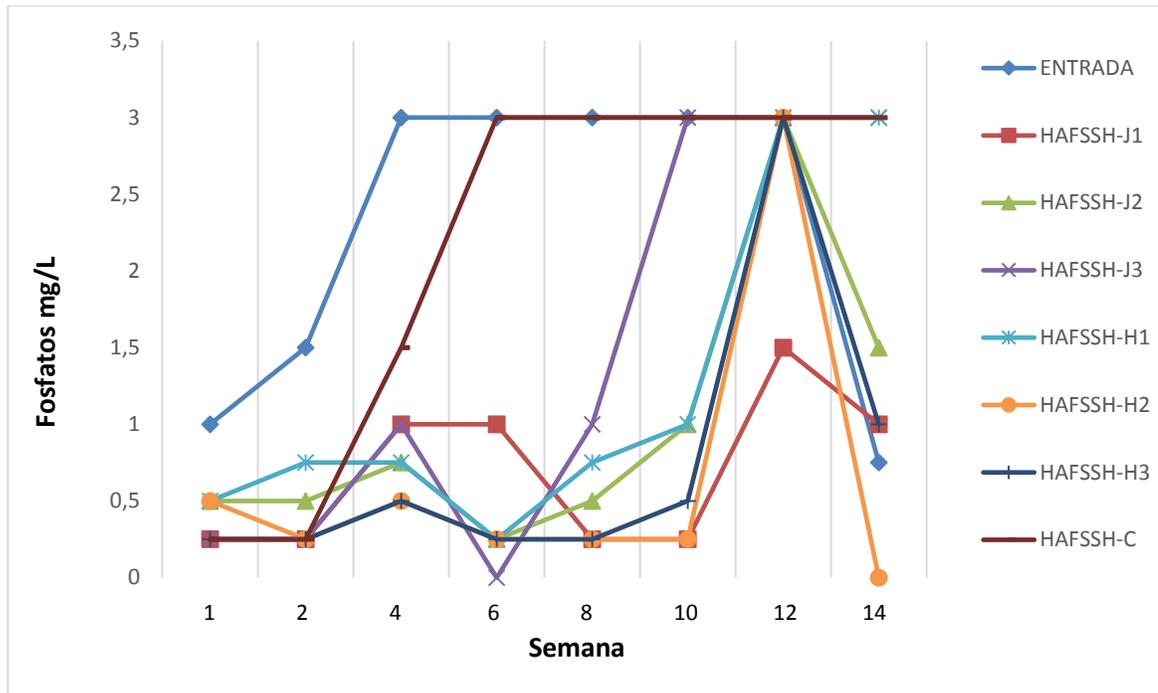


### 10.5.5. Fosfatos

Como se puede observar en la (Grafica 22), el estudio tiene variaciones muy notables en la concentración de fosfatos y se asocian a diversos factores, el fosforo es esencial para el desarrollo de diversos organismos, estimula el crecimiento principalmente de los organismos fotosintéticos que asimilan este nutriente, pero a la vez se puede generar eutrofización,<sup>89</sup> debido a los tejidos muertos de las plantas que contribuyen con el aumento del fósforo en el sistema

<sup>89</sup> DELGADILLO, Oscar, et al. Op. cit., p 79

**Grafica 22 Comportamiento De Los Fosfatos En El Tiempo.**

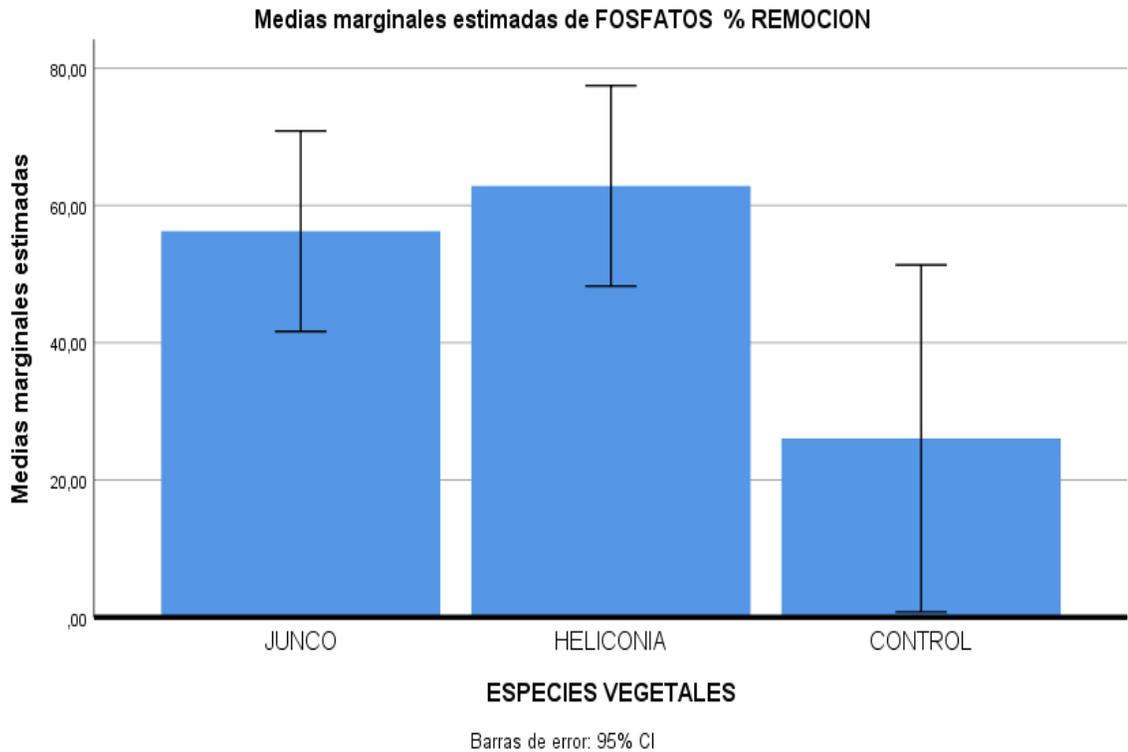


El sustrato también influye en este proceso debido a que al iniciar el tratamiento la capacidad de adsorción es alta y a medida que pasa el tiempo se puede saturar por la fijación de éste, al medio de soporte.<sup>90</sup> En donde el HAFSSH-C con agua miel de café, al no tener plantas que asimilen este nutriente para el desarrollo fisiológico, se satura mucho más rápido y este alcanzó el punto máximo en la semana 6, mientras que los demás humedales que están plantados con macrófitas demoraron más para llegar a saturarse, así mismo favoreciendo la eliminación. Por otra parte los microorganismos también utilizan parte de este en sus procesos de desarrollo contribuyendo en la remoción del nutriente.

En la (Gráfica 23) se observa los promedios obtenidos para cada tratamiento durante el tiempo de estudio, obteniendo una significancia de 0.047 lo cual indica que si hay diferencias de remoción en los tratamientos, y las variaciones indican que la especie más eficiente para la eliminación y remoción de fosfatos es dada por la heliconia que alcanza un 62% de remoción, la cual al estar asociada a microorganismos y al sustrato le favorece por asimilar este nutriente, seguida del junco que cuenta con una remoción del 56 % y el control con 22% de remoción el cual al no contar con macrófitas asociadas se satura muy rápido perdiendo la eficiencia.

<sup>90</sup> Otálora R, Alejandra P. Op. cit., p 41.

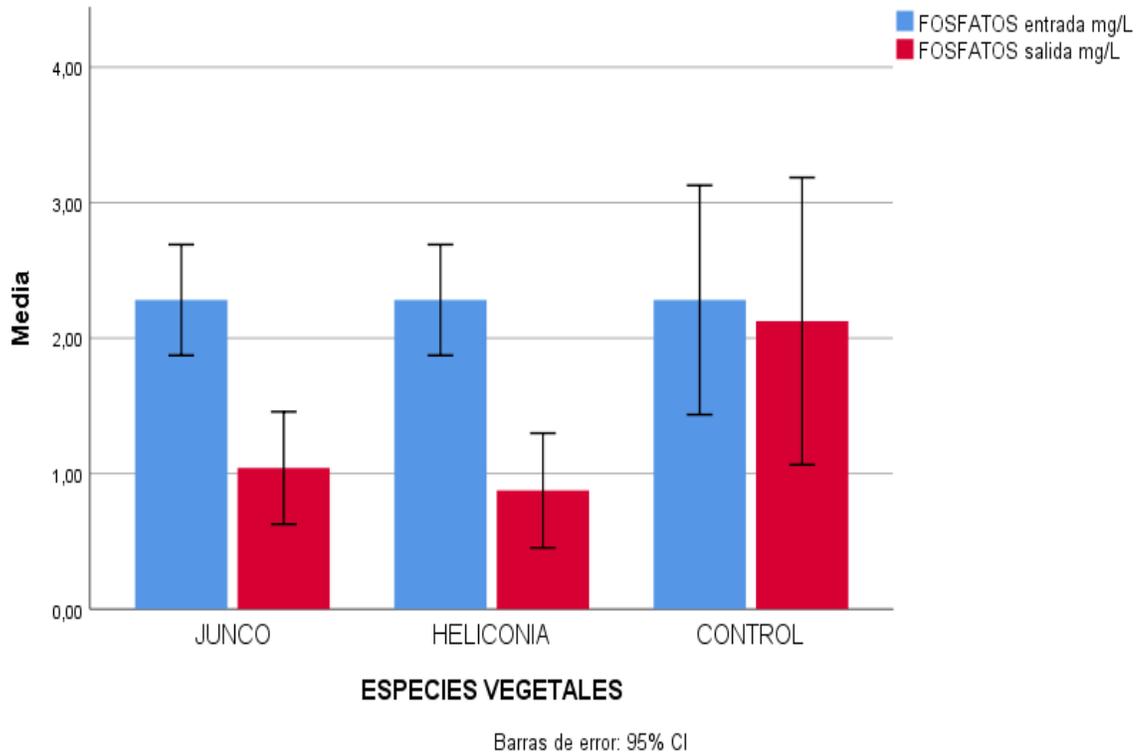
**Grafica 23. Media de porcentajes de remoción de fosfatos**



En la (Gráfica 24) se observa la media obtenida para la remoción de fosfatos y la eficiencia, con lo que puede analizar por medio de la prueba estadística prueba T (Anexo 4), en la que se obtuvo que la significancia está en 0.000 para los tratamientos con junco y heliconia con lo que se determina que si hay diferencia entre la concentración a la entrada y a la salida de los HA, por tal motivo si es eficiente para la remoción de fosfatos, y para el control no hay diferencias significativas.

De acuerdo a lo mencionado anteriormente en los estudios previos realizados, este nutriente es asimilado por las plantas, el sustrato y actividad microbológica, pero cabe resaltar que el sistema es más eficiente para la remoción al tener presencia de plantas, que el sustrato sea adecuado y cuente con una porosidad óptima, pero el sistema se satura muy rápido y se reduce la remoción a corto plazo.

**Grafica 24. Media de entrada y salida de fosfatos mg/L**



### 10.5.6. Turbidez

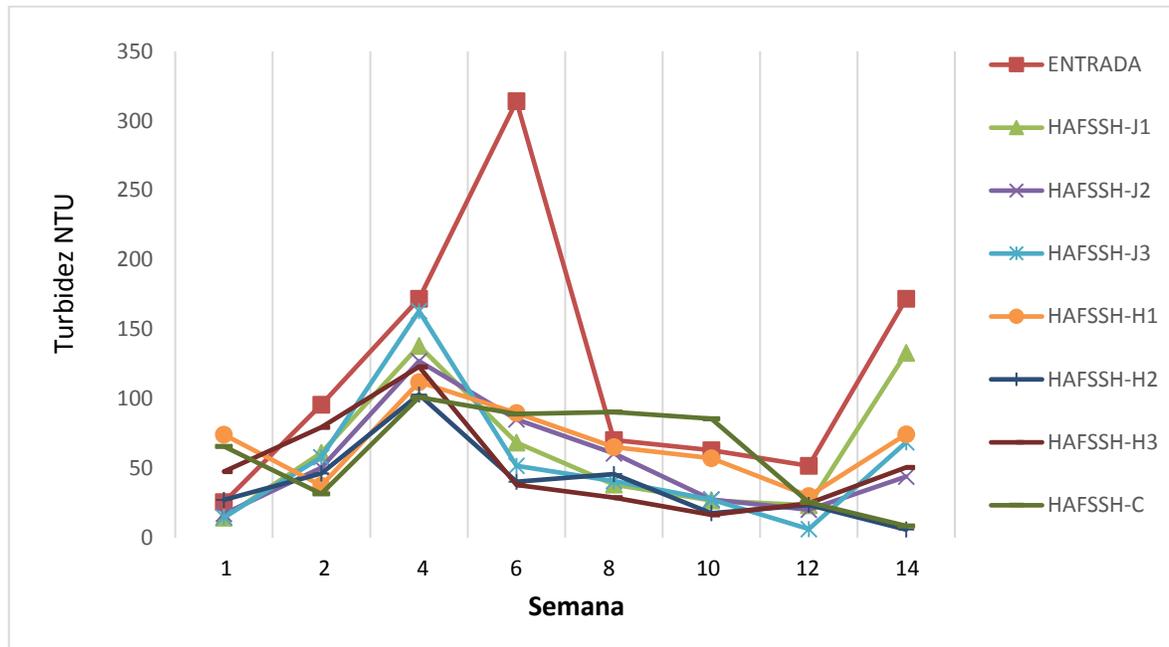
En la (Grafica 25) se puede observar el comportamiento que tiene la turbidez durante el tiempo de estudio, este parámetro presenta cambios notables en los que se observa el aumento y la disminución en cada uno de los muestreos, con picos altos en la semana cuatro y a partir de esta comienza a disminuir en las unidades experimentales. se puede asociar las variaciones principalmente al caudal manejado, el cual, es relativamente bajo manejando aproximadamente 1.5 L/día, y otros factores que intervienen en el proceso los cuales son la carga de materia orgánica, la actividad microbológica que descomponen las partes muerta de las especies vegetales presentes en el sistema, generando mayor cantidad de material suspendido<sup>91</sup>.

La evolución obtenida por los sistemas de tratamiento implementados permite determinar que la remoción es constante y eficiente hasta la semana 12, en donde

<sup>91</sup> Martínez R, Macol; et al. Evaluación De Un Sistema De Biorremediación De Aguas Residuales Porcícolas En La Finca El Porvenir, Vereda Suncunchoque, Sector La Laja, Ubaté, Cundinamarca, Y Su Reutilización Con Fines Agroambientales, Corporación Universitaria Minuto De Dios, Facultad De Ingeniería, Ingeniería Agroecológica Bogotá D.C., Colombia Junio De 2015 p 73

la turbidez aumenta, lo cual se relaciona a la saturación del sistema de tratamiento, por la mayor cantidad de materia orgánica en los HA.

**Gráfica 25. Comportamiento de la Turbidez en el tiempo.**

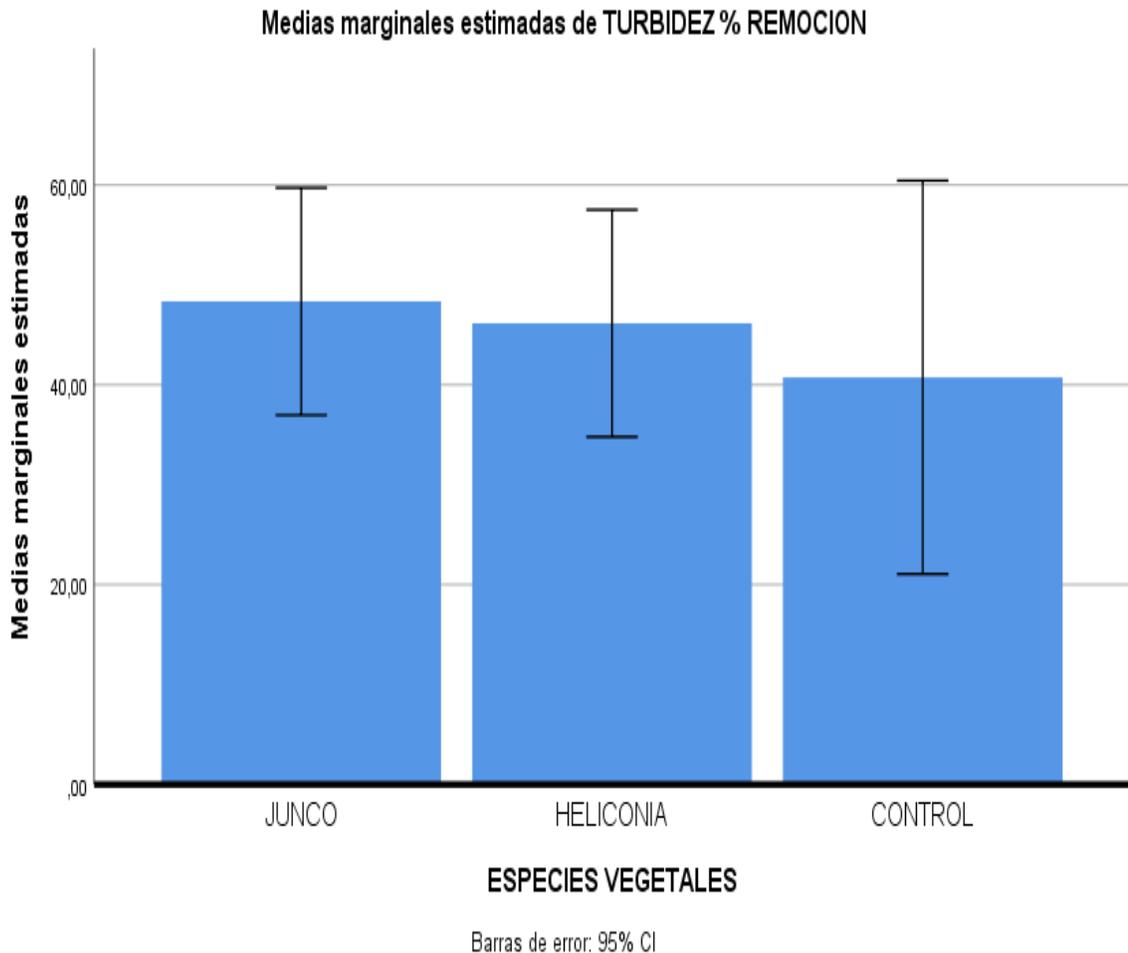


En la (Gráfica 26) se observa la eficiencia que tuvieron los distintos tratamientos con respecto a la turbidez la cual no tuvo diferencias significativas al estar en un valor por encima de 0.05, pero el mejor resultado fue encontrado asociado con especie vegetal junco la cual obtuvo el mayor porcentaje de remoción 48%, el cual con la fisiología de esta planta, que con la raíz cubre gran parte del sustrato generando mayor retención de las partículas presentes en el vertimiento, las cuales son transformadas por los microorganismos, que las utilizan en las actividades metabólicas como se mencionó anteriormente. La importancia de medir este parámetro es debido a que esta es tomada como indicador de calidad, y se utiliza para valorar las posibles afectaciones que se pueden causar a ecosistemas donde existen organismos acuáticos, generando pérdida de diversidad al alterar las condiciones de desarrollo de los organismos.<sup>92</sup>

Para este parámetro y de acuerdo a la media obtenida, se puede determinar que el factor principal que influye para reducir la turbidez, es el sustrato porque que retiene el 40%, de las partículas presentes en el agua miel, el junco remueve un 8% y la heliconia un 6%

<sup>92</sup> Martínez, M; et al. Op. cit., p 75

**Grafica 26 porcentajes medios de remoción de turbidez**

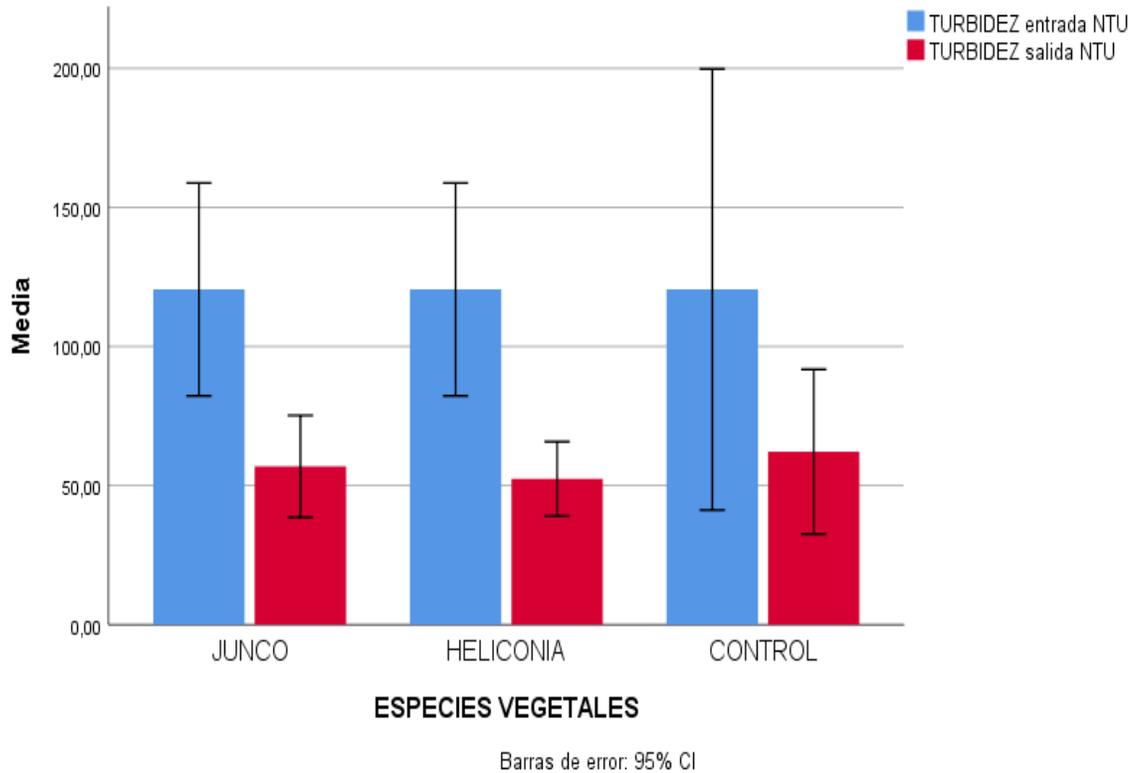


En comparación con la entrada y salida del sistema se puede verificar que si está generando la disminución de este parámetro en el paso del vertimiento por el sistema de tratamiento, con la disminución de los materiales contenidos se ayuda a mejorar el color del agua, factor que es fundamental para que los microorganismos y las plantas realicen sus diversos procesos metabólicos y genere confianza en la calidad de las aguas al ser reutilizadas.<sup>93</sup>

En la (Gráfica 27) se puede observar la tendencia que tuvo cada tratamiento en las entradas respecto las salidas y se determinó por medio de la prueba T (Anexo 4) que los valores están por debajo de 0.05, determinando que si hay diferencias significativas al haber una disminución de la turbidez del agua miel de café, al pasar por el sistema de HA con macrófitas emergentes y principalmente el sustrato es el que mas influye en esta reducción.

<sup>93</sup> Martínez R, Macol; et al. Op. cit., P 74

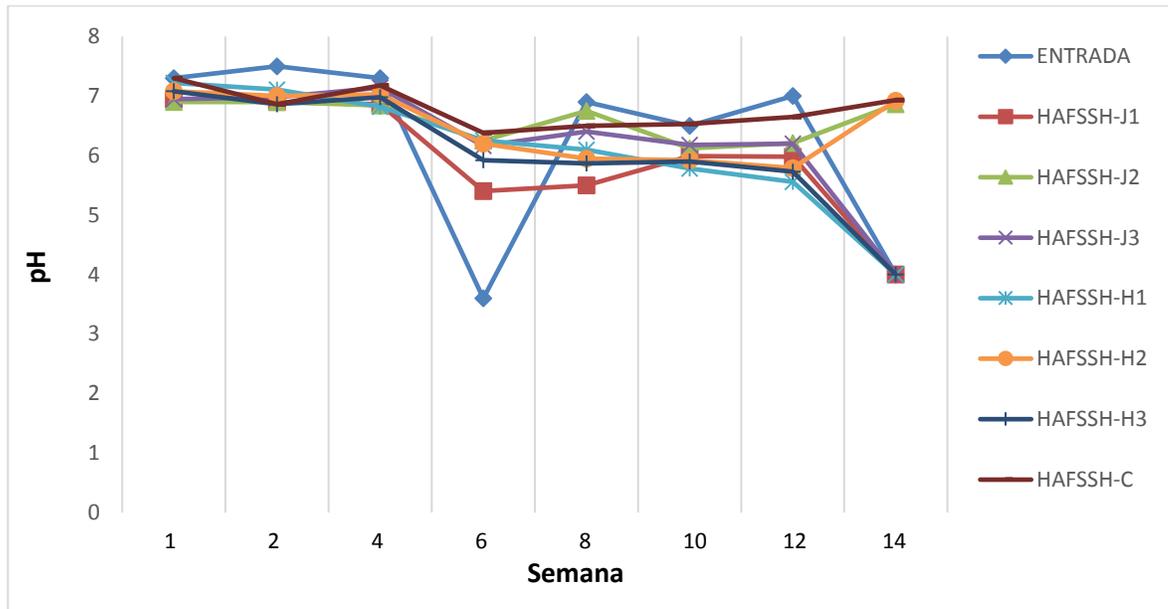
**Grafica 27. Media de entrada y salida de turbidez.**



### 10.5.7. pH

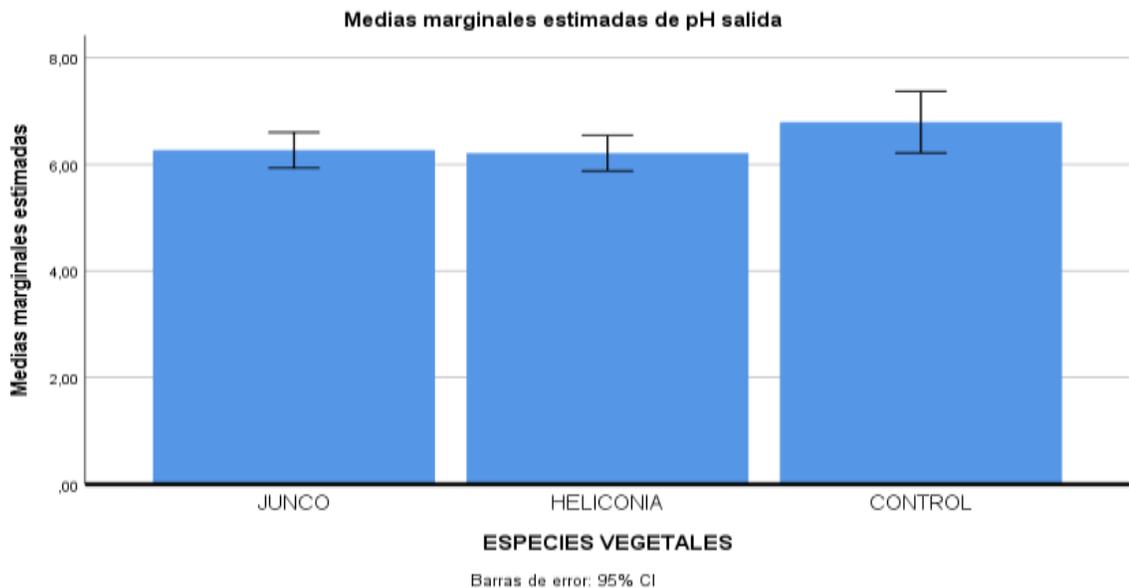
En la (Gráfica 28) se puede observar la tendencia de pH en el sistema de tratamiento el cual se mantuvo estable durante el estudio, desde el inicio hasta la semana 12, manteniéndose en los niveles permitidos por la resolución 0631 del 2015 los cuales están estipulados entre valores de 5-9. Se presentaron algunas variaciones en la semana 14 en donde el pH desciende a 4 el cual no es permitido por la normatividad vigente, pero este se asocia al cambio de la condición del vertimiento el cual entra con mayor carga contaminante, y además de que el sistema ya presenta un comportamiento que tiende a la saturación.

**Gráfica 28. Comportamiento del PH en el tiempo.**

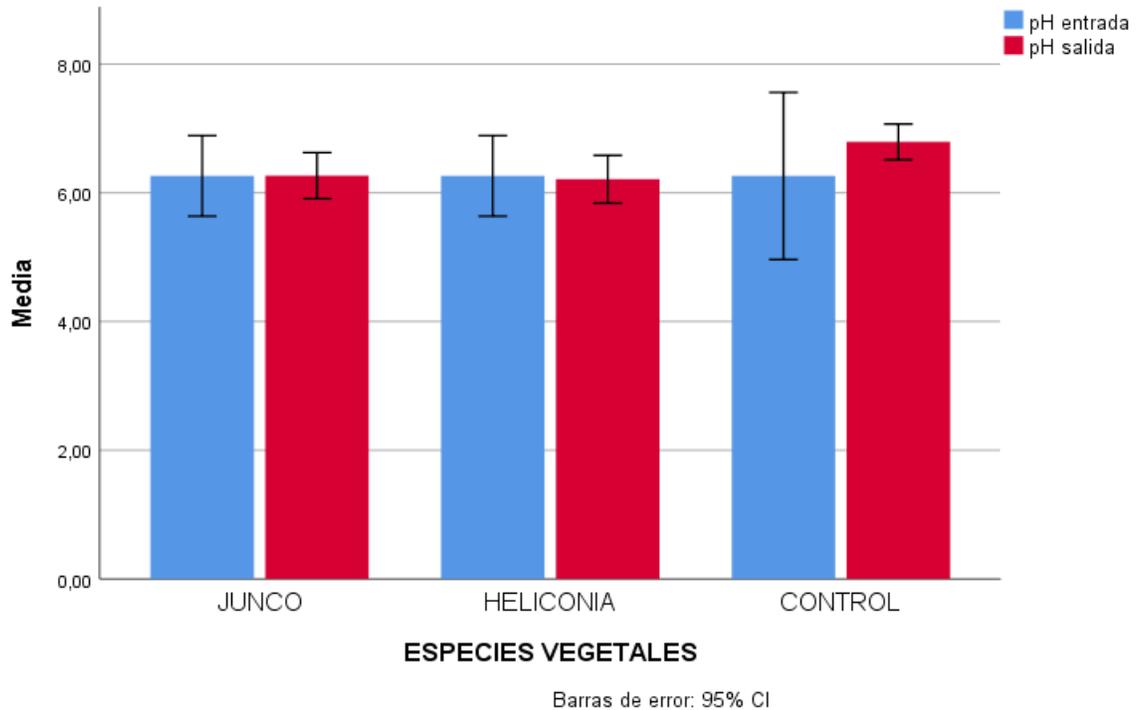


En la (Gráfica 29) se observa el pH en los distintos tratamientos y el comportamiento de este no tiene grandes variaciones obteniendo un valor de 0.210 el cual indica que no hay diferencias significativas entre los tratamientos. El comportamiento del pH en la entrada respecto la salida del HA no es significativo al no presentar grandes variaciones y mantenerse constante durante todo el proceso. (Gráfica 30)

**Gráfica 29. Media de pH entre tratamientos.**



**Grafica 30. Media de entrada y salida del pH.**



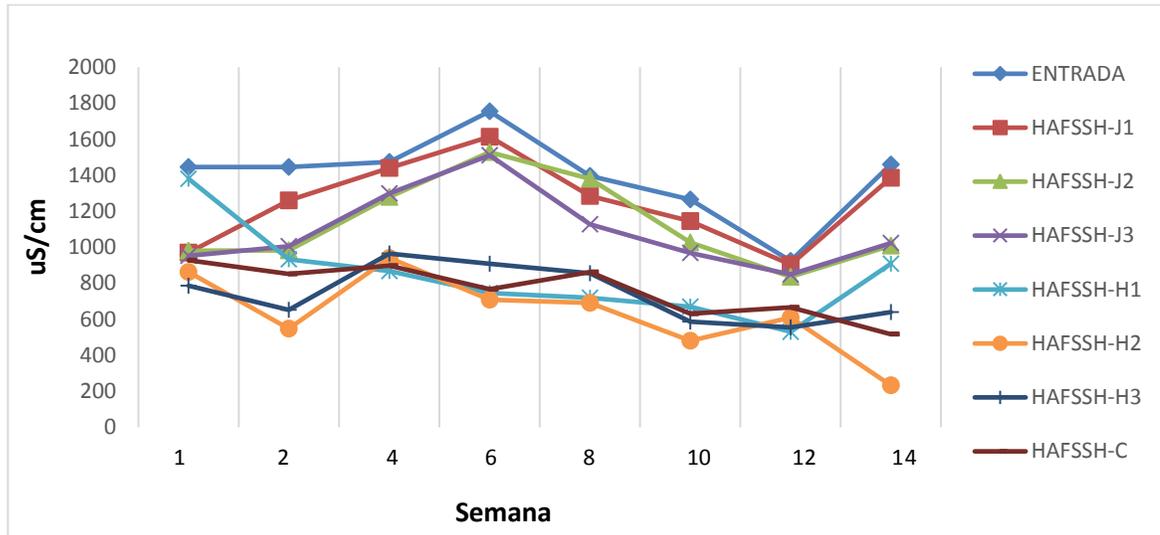
### 10.5.8. CONDUCTIVIDAD

En la (Gráfica 31) se observa el comportamiento de la conductividad en el sistema, la cual fue disminuyendo con respecto al tiempo presentando variaciones hasta la semana 12 en donde tomo una tendencia a incrementar.

Los valores del junco se mantuvieron entre los 850 y 1500 uS/cm, mientras que la heliconia y el control presentaron una mayor disminución durante el tiempo de estudio alcanzando valores comprendidos entre los 950 y 250 uS/cm, las variaciones se pueden asociar a diferentes factores, debido a que la conductividad se le considera una medida indirecta de los sólidos y sales disueltas que se transportan en la masa de agua, y los datos obtenidos indican que hubo una acumulación en el sistema lo cual puede ser debido a fenómenos como adsorción en el medio de soporte y en las raíces de las plantas.<sup>94</sup>

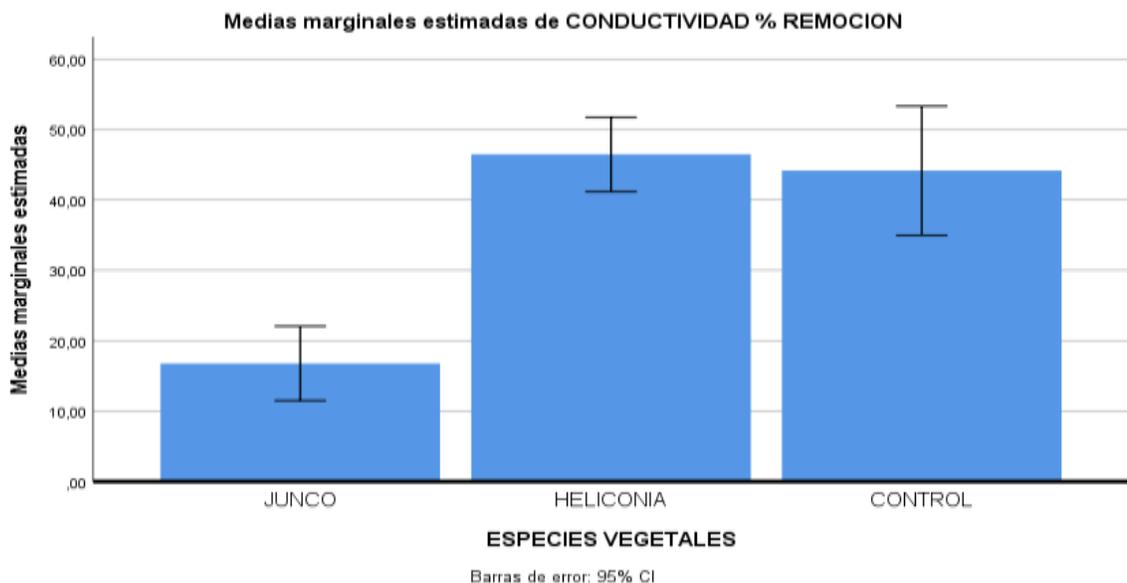
<sup>94</sup> Cortés S, Andrés E. Op. cit., p. 66

**Gráfica 31. Comportamiento de la conductividad en el tiempo.**



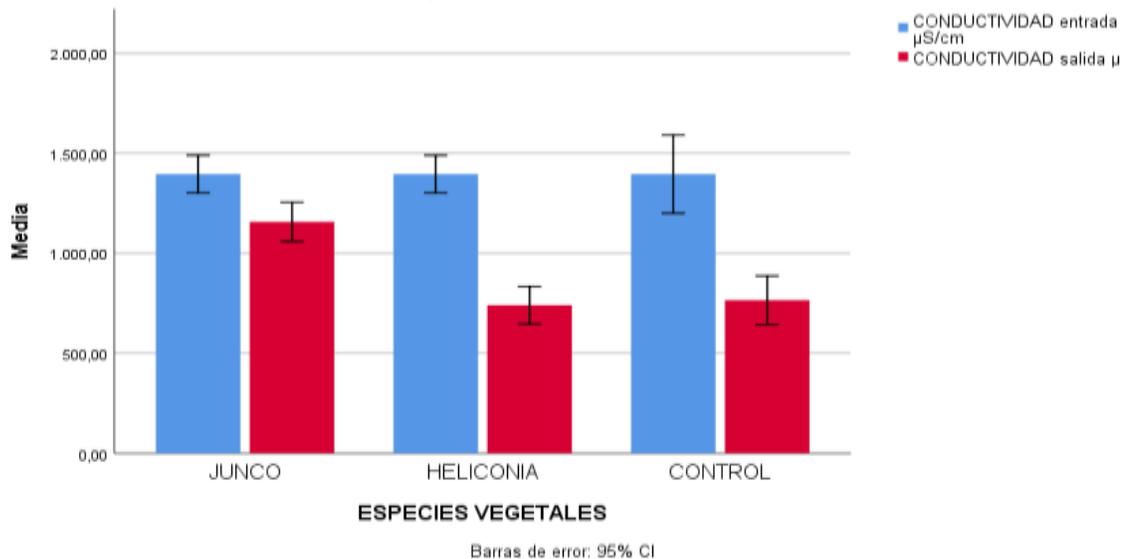
El comportamiento en la reducción de la conductividad en los tratamientos, estadísticamente presentó diferencias significativas como se pudo observar en la (Gráfica 32), con unos valores promedio para los HAFSSH con heliconia y control, alcanzando una reducción cercana al 50 %, y el junco disminuye la conductividad al pasar por el sistema pero no alcanza a llegar al 20 %. Se pudo determinar que el sustrato es el que influye directamente sobre la reducción de la conductividad asociado al proceso de adsorción y este reduce el 44% de la conductividad total.

**Gráfica 32. Media de porcentaje de remoción entre tratamientos.**



En general comparando los valores del sistema de tratamiento se evidencia que si se está disminuyendo la conductividad a la entrada respecto la salida, obteniendo por medio de la prueba T (Anexo 4) una significancia menor de 0.05 lo cual indica que si hay diferencias notables como se puede observar en la (Gráfica 33), en donde los mejores resultados son dados por la heliconia.

**Gráfica 33. Media de entrada y salida de conductividad.**



En este estudio, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas, para la eficiencia de remoción de DQO, pH,  $\text{NO}_2$  y turbidez, fueron pocas las variaciones presentadas. En cuanto  $\text{DBO}_5$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{PO}_4$  y conductividad, si se encontraron diferencias significativas ( $< 0.05$ ), siendo mas evidente la remoción de estos parámetros entre los tratamiento, y con respecto a la entrada y la salida si se logro determinar que para todos los parámetros fisicoquímicos, en los tres tratamiento, si hay diferencias significativas, si se están generando procesos de remoción de materia orgánica y nutrientes.

De acuerdo a los resultados obtenidos con HAFSSH para el tratamiento de aguas mieles de café, se determino, el humedal control con agua miel de café es el que presenta lo mayores porcentajes de remoción 40% en la mayoría de los parámetros fisicoquímicos, pero asociado con la *Heliconia wagneriana*, se incrementan los porcentajes, seguido por el junco, con el que se obtuvo los resultados mas bajos. Con esto se concluye, que un HA es mucho mas eficiente combinado con especies vegetales, para disminuir la contaminación generada a partir de los subproductos de la agroindustria cafetera.

## 11. CONCLUSIONES

Con este estudio se pudo determinar que los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal, si son eficientes para tratar aguas mieles de café. En la mayoría de los parámetros fisicoquímicos evaluados, se logro disminuir la carga contaminante, que entra al sistema de tratamiento, y al pasar por las unidades experimentales se alcanzaron altos porcentajes de remoción, mejorando así las condiciones fisicoquímicas de este tipo de vertimientos. Con lo que se logro determinar que el sistema de humedales es eficiente para el tratamiento primario de aguas mieles de café.

La eficiencia de remoción de MO en HA alcanzo valores promedio del 70%, siendo viable para tratar uno de los subproductos del café como lo es el agua miel (mucilago). Aunque no se logro cumplir con los niveles establecidos en la normatividad, en este estudio a escala piloto, se hace viable la implementación a escala real, utilizando el sistema en serie, lo que permite que se pueda alcanzar la remoción cercana al 100%.

La especie más eficiente para la eliminación y remoción de fosfatos es dada por la heliconia que alcanza un 62% de remoción, la cual al estar asociada a microorganismos y al sustrato le favorece para asimilar este nutriente, seguida del junco que cuenta con una remoción del 56 % y el control con 22% de remoción el cual al no contar con macrófitas asociadas se satura muy rápido perdiendo la eficiencia.

En los tres estados del nitrógeno se pudo observar que las concentraciones más altas estuvieron presentes en los humedales plantados con junco, los cuales tuvieron un incremento durante el tiempo de estudio y no removieron gran cantidad de este nutriente, debido a los cambios de estado por las acciones fisicoquímicas, biológicas y microbiológicas influenciadas por la carga de materia orgánica, que fue aportada al sistema de tratamiento y la especie vegetal no requirió de gran demanda de este nutriente para desarrollarse.

La especie *Heliconia wagneriana* fue la que presento las mejores eficiencias de remoción de carga contaminante durante todo el tiempo de estudio alcanzando los promedios más altos, aunque al inicio presento unas pequeñas dificultades para adaptarse al sistema se logró desarrollar bajo las condiciones del vertimiento, alcanzando la mejor eficiencia debido a las características fisiológicas con las que cuenta esta especie.

Los HAFSSH con vegetación asociada al sistema son muy eficientes, se obtuvo buena respuesta fisiológica y se puede decir que presentó una adecuada aclimatación a las condiciones del medio. A demás el tipo de humedal implementado fue muy eficiente debido a que durante el proceso de muestreo, no presento malos olores ni propagación de vectores.

Se pudo determinar que si existe una alternativa viable a implementar en las zonas cafeteras que no cuentan con un tratamiento para aguas residuales, estableciendo el sistema de humedales construidos sembrado con macrófitas emergentes encontradas en el área de estudio, por ser un sistema que no requiere de grandes gastos de energía, y es relativamente económico para el funcionamiento.

## **12.RECOMENDACIONES**

Se deben realizar investigaciones complementarias implementando sistemas en serie o paralelo y la posible combinación de especies para determinar la eficiencia del sistema de humedal artificial.

Para poder determinar el comportamiento de las eficiencias de remoción respecto al tiempo, se requiere un mayor tiempo de operación del sistema, de mediciones con diferentes tiempos de retención, bajo condiciones naturales.

Se recomienda tener en cuenta la evaluación con otro tipo de sustrato para determinar la influencia en el tratamiento de aguas mieles de café.

### 13. BIBLIOGRAFÍA

ARIAS, O. Estudio de la biodegradación de la materia orgánica en humedales construidos de flujo subsuperficial. Trabajo de grado. Catalunya: universidad politécnica de Catalunya. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. 2004.

CARDENAS, A. Evaluación del desempeño de humedales construidos con plantas nativas tropicales para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios. Proyecto fin de Master. Sevilla: Universidad de Sevilla. 2012.

CÁRDENAS, R; Ortiz, J. Manejo Integrado Del Recurso Agua, En El Proceso De Beneficio Húmedo Del Café, Para La Asociación De Productores De Café Especial "ACAFETO" En El Municipio De Fresno, Departamento Del Tolima. Tesis De Grado Para Optar Por El Título De Magister En Desarrollo Sostenible Y Medio Ambiente. Universidad De Manizales 2014. P. 11.

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ (CENICAFÉ). "Construyendo el modelo para la gestión integrada del recurso hídrico en la caficultura colombiana". Chinchiná 2011. P. 3 - 50 - 51

CORTÉS S, ANDRÉS E. Evaluación Del Desempeño De Humedales Construidos Subsuperficial De Flujo Horizontal Sembrados Con Especies Nativas Tropicales Para La Eliminación De Cr (Vi) Y Cd (Ii) De Lixiviado De Relleno Sanitario. Escuela De Ingeniería De Recursos Naturales Y Del Ambiente Posgrado En Ingeniería Sanitaria Y Ambiental Universidad Del Valle Santiago De Cali. 2014. P 21-32-33-39-41-66-71-72-74.

DELGADILLO, Oscar. et al. Depuración De Aguas Residuales Por Medio De Humedales Artificiales. Cochabamba – Bolivia.: Universidad Mayor De San Simón, 2010. P 7-9-10-11-13-32-33-76-78-79.

DELGADO CALVACHE, Laura Isabel. PINO ALEGRIA, Huber 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. Para Obtener El Título De Ingeniero Ambiental. Popayán.: Universidad Del Cauca Facultad De Ingeniería Civil Programa De Ingeniería Ambiental . 2015. P 30-31-32-41

DÍAZ, A, Carlos, A. Magister en ingeniería civil. Tratamiento de agua residual a través de humedales, Universidad Santo Tomás Seccional Tunja 2014. Pag 3 - 4

ESCOBAR, Jorge. Plantas acuáticas en los humedales de Bogotá.2012

Federación Nacional De Cafeteros. 2015. Disponible en internet: <https://cauca.federaciondecafeteros.org>

FERNÁNDEZ, J. et al. Manual de fitodepuración, Ayuntamiento de Lorca, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid. 2004 P. 7

GARCÍA J., CORZO H. Sistemas naturales de depuración. En: Depuración con humedales construidos: guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. Catalunya: Universidad Politécnica De Catalunya, 2008.

HARO GONZÁLEZ, María Eugenia. APONTE HERNÁNDEZ, Nidya Olivia. Evaluación De Un Humedal Artificial Como Tratamiento De Agua Residual En Un Asentamiento Irregular. Trabajo De Grado Para Obtener El Título De Ingeniero Industrial. Ciudad Universitaria.: Universidad Nacional Autónoma De México Facultad De Ingeniería División De Ingeniería Mecánica E Industrial. 2010. P.17

LARA Borrero Jaime. Implantación y Evolución de un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial en Cogua, Cundinamarca, Colombia 2004.

MARÍN M. Jhoan P; Correa R. Juan C; Evaluación De La Remoción De Contaminantes En Aguas Residuales En Humedales Artificiales Utilizando La *Guadua Angustifolia Kunth*, Universidad Tecnológica De Pereira, Facultad De Tecnología, Escuela De Tecnología Química, Pereira 2010. P 59

MARTÍNEZ R, Macol; et al. Trabajo De Grado Para Optar Al Título De Ingeniero En Agroecología, Evaluación De Un Sistema De Biorremediación De Aguas Residuales Porcícolas En La Finca El Porvenir, Vereda Suncunchoque, Sector La Laja, Ubaté, Cundinamarca, Y Su Reutilización Con Fines Agroambientales, Corporación Universitaria Minuto De Dios, Facultad De Ingeniería, Ingeniería Agroecológica Bogotá D.C., Colombia Junio De 2015 P. 73-74-75

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. RESOLUCIÓN 0631 DE 2015. De las normas de vertimiento. Bogotá, 2015. Pag 8.

OSNAYA Maricarmen. Propuesta de Diseño de un Humedal Artificial para el Tratamiento de Aguas Residuales en la Universidad de la Sierra Juárez. Universidad del Sierra Juárez. México 2012

OTÁLORA R, Alejandra P., Evaluación Del Sistema De Tratamiento De Aguas Residuales Domesticas Mediante Humedales Artificiales De Alta Tasa En La Localización Petrolera De Caño Guandúl. Trabajo final para optar el título de Magister en ingeniería ambiental. Universidad Nacional De Colombia, Facultad De Ingeniería, Departamento De Ingeniería Química, Bogotá. 2011 capítulo 5. P. 2-6-30-31-32-41.

OROZCO, C. et al. Evaluación de una planta piloto de tratamiento de aguas residuales del procesamiento del café: características químicas. 2005

PASTRANA, I. SUÁREZ, I., Producción De Plantas De Caña Flecha (*Gynerium Sagittatum*) “Criolla” A Través De Micro propagación. Universidad de Córdoba. 2009

Peña, E. et al. Bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediación, caso *Heliconia psittacorum* (heliconiaceae). Rev. Acad. Colomb. Cienc. **37** (145): 469-481, 2013. ISSN 0370-3908.

RAMÍREZ GÓMEZ, César Augusto. OLIVEROS TASCÓN, Carlos Eugenio. Y Sanz Uribe, Juan Rodrigo. Manejo De Lixiviados Y Aguas De Lavado En El Proceso De Beneficio Húmedo Del Café. 2015. Vol. revista CENICAFÉ. No. 66.,

ROA M., G.; et al. Beneficio Ecológico del Café. Chinchiná (Colombia), CENICAFÉ, 1999. P. 30

Rodríguez, N. Estudio De Un Biosistema Integrado Para El Postratamiento De Las Aguas Residuales Del Café Utilizando Macrófitas Acuáticas. Tesis doctoral, universidad politécnica de valencia. Departamento de ingeniería hidráulica y medio ambiente. Valencia 2009 P. 27-57

TURRIAGO, Karen. Flórez R. Víctor J; heliconias, Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, disponible en [https://encolombia.com/economia/agroindustria/floricultura/floriculturandina\\_heliconias](https://encolombia.com/economia/agroindustria/floricultura/floriculturandina_heliconias)

U.S.EPA., 2000, Folleto informativo de tecnología de aguas residuales, Humedales de flujo subsuperficial. Office of Wáter, Washington, DC. USA.

ZAPATA, A; Humedales Artificiales; Una Propuesta Para La Mitigación de La Contaminación Hídrica De La Quebrada La Nutria, De Los Cerros Orientales De Bogotá D.C, Universidad De Manizales, Facultad De Ciencias Contables Económicas Y Administrativas, Maestría En Desarrollo Sostenible Y Medio Ambiente, Manizales, Colombia 2014. P. 20

## 14. GLOSARIO.

**Absorción.** En química, es un proceso físico o químico en el cual átomos, moléculas o iones pasan de una primera fase a otra incorporándose al volumen de la segunda fase. Esta segunda fase puede ser líquida, gaseosa o sólida.

**Adsorción.** Es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapados o retenidos en la superficie de un material. En química, la adsorción de una sustancia es su acumulación en una determinada superficie. El resultado es la formación de una película líquida o gaseosa en la superficie de un cuerpo sólido o líquido.

**Aerobios.** Se denomina aerobios a los organismos que necesitan del oxígeno diatómico para vivir o a los procesos que lo necesitan para poder desarrollarse. El adjetivo aerobio se aplica no sólo a organismos sino también a los procesos implicados (metabolismo aerobio) y a los ambientes donde se realizan.

**Anaerobios.** Se llama anaerobios a los organismos que no necesitan oxígeno (O<sub>2</sub>) para desarrollarse, a diferencia de los organismos aerobios.

**Afluyente.** Aguas residuales crudas o brutas que proceden de la red de alcantarillado e ingresan a la planta de tratamiento.

**DQO.** La demanda química de oxígeno es la cantidad de oxígeno necesario para descomponer químicamente, la materia orgánica degradable y biodegradable en un periodo de dos horas.

**DBO<sub>5</sub>.** Demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días. Medida de la cantidad de oxígeno consumida en la oxidación del material carbonoso de una muestra de agua, por la población microbiana, a lo largo de cinco días de incubación y a una temperatura de 20 °C.

**Degradación.** Es la transformación de sustancias complejas en otras sustancias más sencillas.

**Dilución.** Disminuir la concentración de una solución añadiendo un disolvente, el disolvente universal es el agua.

**Efluyente.** Aguas residuales procedentes de la planta de tratamiento de aguas residuales.

**Eutrofización.** Es el crecimiento desmesurado de algas y hierbas sobre la superficie del agua originando un excesivo consumo del oxígeno ocasionando que muchos otros microorganismos no puedan desarrollarse.

**Filtración.** Proceso de separación de un sólido suspendido en un líquido al hacerlo pasar a través de un medio poroso con un tamaño de poro adecuado.

**Fotosíntesis.** Proceso en el cual los organismos con clorofila, como las plantas verdes, las algas y algunas bacterias, capturan energía en forma de luz y la transforman en energía química. Durante el día, los organismos toman dióxido de carbono del aire y, en presencia de agua y la luz solar, lo convierten en oxígeno e hidratos de carbono, que se usan para producir más plantas.

**Oxígeno disuelto.** Es la cantidad de oxígeno existente en el agua, se expresa en partes por millón o mg/l; este parámetro es muy importante para la respiración de las bacterias aerobias durante el proceso de depuración de aguas residuales..

**Sedimentación.** La sedimentación es el proceso por el cual el material sólido, transportado por una corriente de agua, se deposita en el fondo del río, embalse, canal artificial, o dispositivo construido especialmente para tal fin.

**Aguas mieles:** Nombre que reciben las aguas residuales del lavado del café, cuando al fruto se le retira el mucílago por fermentación natural. cuales los compradores están dispuestos a pagar precios superiores.

## 15. ANEXOS

### Anexo 1. Resultados de laboratorio

	ENTRADA	UNIDADES EXPERIMENTALES HAFSSH								
		J1	J2	J3	H1	H2	H3	C	CJ	CH
<b>O.D</b>	0	2,98	2,6	2	2	0	0	0,5	5,5	5
	0,2	1	1	0,5	2	1	1,5	0,5	4	7,5
	0	1,7	1,1	0,3	0,5	1,4	1,7	0,2	5,8	6,3
	0	1	0,7	0,8	0,5	1,5	1	0,4	5	5,2
	0,2	0,6	1,2	2,8	0,6	1,7	1,8	0,8	6	5
	0	1,5	2	1,7	0,8	1,8	2	0,3	5,5	5
	0	2	1,9	1,5	1	1,4	1,9	1	5,9	5,7
	0	0,5	0,8	1	0,7	5,2	0,7	0,8	6	5,5
<b>DQO</b>	2102	1635	1540	1673	1325	1456	1794	2015	205	120
	1950	1510	1435	1425	1050	1175	1515	1863	120	140
	1875	1235	1400	1328	1080	1245	1330	1517	0	0
	4715	2835	1365	750	1070	1165	1825	1295	0	0
	3460	1705	930	1210	880	915	885	1030	205	195
	2925	590	458	680	580	450	385	925	0	0
	3500	985	975	845	810	1080	920	1020	305	150
	2875	2185	1820	2030	2380	970	2200	1470	240	130
<b>DBO5</b>	840	750	760	590	620	430	670	780	180	160
	760	640	550	420	470	350	540	700	120	140
	650	290	180	190	170	140	230	560	110	140
	780	500	560	390	160	130	560	360	80	120
	720	280	80	160	120	100	130	450	100	130
	630	130	90	140	130	90	120	320	20	100
	580	110	90	150	150	130	100	560	10	30
	560	220	180	250	170	150	190	540	30	40
<b>pH</b>	7,3	6,94	6,9	6,95	7,22	7,08	7,08	7,3	5,98	5,5
	7,5	6,9	6,9	6,98	7,11	7	6,86	6,86	7,4	7,9
	7,3	6,86	6,84	7,14	6,82	7,03	6,98	7,18	6,4	6,53
	3,6	5,4	6,25	6,16	6,25	6,2	5,92	6,38	6,5	6,3
	6,9	5,5	6,75	6,4	6,1	5,95	5,87	6,5	5,45	5,8
	6,5	5,99	6,12	6,18	5,78	5,92	5,9	6,53	5,49	5,57
	7	5,98	6,21	6,2	5,56	5,79	5,73	6,65	6,1	6,49
	4	4	6,86	4	4	6,92	4	6,93	5,58	5,95
<b>NO3</b>	10	25	25	10	10	10	25	10	10	10
	25	25	10	25	10	10	10	10	10	10

	10	25	25	25	25	25	25	10	10	10
	25	25	25	25	25	10	10	10	25	25
	25	25	10	25	25	10	10	25	25	25
	25	25	10	25	25	10	25	25	25	25
	25	25	10	25	25	25	25	25	25	25
	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
NO2	0	0,46	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0,2	0	0	0	0	0,025	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0,3	0,5	0,3	0	0	0	0,025	0	0
	0,025	0,025	0	0	0	0,2	0	0,05	0	0
PO4	1	0,25	0,5	0,25	0,5	0,5	0,25	0,25	0	0
	1,5	0,25	0,5	0,25	0,75	0,25	0,25	0,25	0	0
	3	1	0,75	1	0,75	0,5	0,5	1,5	0	0
	3	1	0,25	0	0,25	0,25	0,25	3	0	0
	3	0,25	0,5	1	0,75	0,25	0,25	3	0	0
	3	0,25	1	3	1	0,25	0,5	3	0	0
	3	1,5	3	3	3	3	3	3	0	0
		0,75	1	1,5	3	3	0	1	3	0
NH3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0,2	0	0	0
	0	0	0	0	0	0,2	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0	0
	0	0	0	0	0,4	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0,4	0	0
	0	1,6	2,3	2,3	0	0	0	0	0	0
	0	0,4	0,2	0,2	0	0,4	0,2	3	1	1
Turbidez	25,5	14,4	17,1	14,7	74,1	27,2	47,5	65,7	2,7	3,38
	95,6	61	50,4	57,9	37,6	46,3	79,3	31,6	2,4	5,08
	172	138	127	163	112	103	123	101	3,04	1,83
	314	68,4	85	51,7	89,6	40,3	37,9	89,1	1,02	1,08
	70,2	38,2	60,5	40,8	65,3	45,8	28,7	90,4	1	1,02
	62,8	26,8	27,3	27,5	57,2	17,6	16,4	85,6	0,92	1,16
	51,7	23,3	20,1	6,2	30	23,6	24,6	25,3	2,31	0,96
	172	133	43,9	68,7	74,4	5,78	50,5	8,45	1,31	0,45
du cti vi	1446	970	980	952	1380	862	786	928	75,1	50,4

	1446	1260	983	1006	934	548	653	851	72	19,52
	1474	1441	1279	1299	867	941	965	897	71,6	29,3
	1755	1614	1528	1511	745	708	908	767	56	37,6
	1396	1285	1380	1127	719	691	856	863	57,3	35,8
	1265	1146	1026	969	670	480	587	631	62,4	26,2
	924	904	836	849	531	609	555	666	44,8	19,52
	1459	1386	1009	1024	908	233	640	517	78	76,8

## Anexo 2. Resultados eficiencia de remoción %

	UNIDADES EXPERIMENTALES HAFSSH						
	J1	J2	J3	H1	H2	H3	C
<b>DQO</b>	22	27	20	37	31	15	4
	23	26	27	46	40	22	4
	34	25	29	42	34	29	19
	40	71	84	77	75	61	73
	51	73	65	75	74	74	70
	80	84	77	80	85	87	68
	72	72	76	77	69	74	71
	24	37	29	17	66	23	49
<b>DBO5</b>	11	10	30	26	49	20	7
	16	28	45	38	54	29	8
	55	72	71	74	78	65	14
	36	28	50	79	83	28	54
	61	89	78	83	86	82	38
	79	86	78	79	86	81	49
	81	84	74	74	78	83	3
	61	68	55	70	73	66	4
<b>NO3</b>	0	0	0	0	0	0	0
	0	60	0	60	60	60	60
	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	60	60	60
	0	60	0	0	60	60	0
	0	60	0	0	60	0	0
	0	60	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0
<b>PO4</b>	75	50	75	50	50	75	75
	83	67	83	50	83	83	83
	67	75	67	75	83	83	50
	67	92	100	92	92	92	0
	92	83	67	75	92	92	0

	92	67	0	67	92	83	0
	50	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	100	0	0
<b>Turbidez</b>	44	33	42	0	0	0	0
	36	47	39	61	52	17	67
	20	26	5	35	40	28	41
	78	73	84	71	87	88	72
	46	14	42	7	35	59	0
	57	57	56	9	72	74	0
	55	61	88	42	54	52	51
	23	74	60	57	97	71	95
<b>Conductividad</b>	33	32	34	5	40	46	36
	13	32	30	35	62	55	41
	2	13	12	41	36	35	39
	8	13	14	58	60	48	56
	8	1	19	48	51	39	38
	9	19	23	47	62	54	50
	2	10	8	43	34	40	28
	5	31	30	38	84	56	65

### Anexo 3. Análisis estadístico (significancia), media de remoción.

- DQO.

<b>Estadísticos descriptivos</b>					
Variable dependiente: DQO % REMOCION					
ESPECIES VEGETALES	Media	Desv. Desviación	N		
JUNCO	48,6940	24,18375	24		
HELICONIA	54,5980	24,10191	24		
CONTROL	44,8203	30,72611	8		
Total	50,6709	24,92126	56		
<b>Pruebas de efectos inter-sujetos</b>					
Variable dependiente: DQO % REMOCION					
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	737,763 <sup>a</sup>	2	368,882	,585	,561
Intersección	105298,772	1	105298,772	166,986	,000
planta	737,763	2	368,882	,585	,561

Error	33421,053	53	630,586		
Total	177941,018	56			
Total corregido	34158,816	55			
a. R al cuadrado = ,022 (R al cuadrado ajustada = -,015)					
<b>DQO % REMOCION</b>					
				Subconjunto	
	ESPECIES VEGETALES	N		1	
HSD Tukey <sup>a,b,c</sup>	CONTROL	8		44,8203	
	JUNCO	24		48,6940	
	HELICONIA	24		54,5980	
	Sig.			,552	

- **DBO**

<b>Estadísticos descriptivos</b>					
Variable dependiente: DBO5 % REMOCION					
ESPECIES VEGETALES	Media	Desv. Desviación	N		
JUNCO	56,0392	25,16060	24		
HELICONIA	65,2113	21,54779	24		
CONTROL	22,0570	21,26212	8		
Total	55,1155	26,83739	56		
<b>Pruebas de efectos inter-sujetos</b>					
Variable dependiente: DBO5 % REMOCION					
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	11209,604 <sup>a</sup>	2	5604,802	10,458	,000
Intersección	98577,786	1	98577,786	183,940	,000
planta	11209,604	2	5604,802	10,458	,000
Error	28403,893	53	535,923		
Total	209725,727	56			
Total corregido	39613,497	55			
a. R al cuadrado = ,283 (R al cuadrado ajustada = ,256)					
<b>DBO5 % REMOCION</b>					
				Subconjunto	
	ESPECIES VEGETALES	N		1	2
HSD Tukey <sup>a,b,c</sup>	CONTROL	8		22,0570	
	JUNCO	24			56,0392

	HELICONIA	24		65,2113
	Sig.		1,000	,541

- **O.D.**

<b>Estadísticos descriptivos</b>			
Variable dependiente: OXIGENO salida mg/L			
ESPECIES VEGETALES	Media	Desv. Desviación	N
JUNCO	1,3825	,74801	24
HELICONIA	1,3625	1,02695	24
CONTROL	,5625	,27742	8
Total	1,2568	,87561	56

<b>Pruebas de efectos inter-sujetos</b>					
Variable dependiente: OXIGENO salida mg/L					
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	4,504 <sup>a</sup>	2	2,252	3,169	,050
Intersección planta	52,510	1	52,510	73,891	,000
Error	4,504	2	2,252	3,169	,050
Total	37,664	53	,711		
Total corregido	130,620	56			
	42,168	55			

a. R al cuadrado = ,107 (R al cuadrado ajustada = ,073)

<b>OXIGENO salida mg/L</b>				
	ESPECIES VEGETALES	N	Subconjunto	
			1	2
HSD Tukey <sup>a,b,c</sup>	CONTROL	8	,5625	
	HELICONIA	24		1,3625
	JUNCO	24		1,3825
	Sig.		1,000	,998

- **Nitratos**

<b>Estadísticos descriptivos</b>			
Variable dependiente: NITRATOS % REMOCION			
ESPECIES VEGETALES	Media	Desv. Desviación	N

JUNCO	10,0000	22,84161	24
HELICONIA	20,0000	28,89260	24
CONTROL	15,0000	27,77460	8
Total	15,0000	26,21589	56

Pruebas de efectos inter-sujetos					
Variable dependiente: NITRATOS % REMOCION					
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	1200,000 <sup>a</sup>	2	600,000	,869	,425
Intersección planta	9720,000	1	9720,000	14,075	,000
Error	1200,000	2	600,000	,869	,425
Total	36600,000	53	690,566		
Total corregido	50400,000	56			
	37800,000	55			

a. R al cuadrado = ,032 (R al cuadrado ajustada = -,005)

NITRATOS % REMOCION			
	ESPECIES VEGETALES	N	Subconjunto
			1
HSD Tukey <sup>a,b,c</sup>	JUNCO	24	10,0000
	CONTROL	8	15,0000
	HELICONIA	24	20,0000
	Sig.		,567

- **Nitritos**

Estadísticos descriptivos			
Variable dependiente: NITRITOS mg/L			
ESPECIES VEGETALES	Media	Desv. Desviación	N
JUNCO	,0744	,15456	24
HELICONIA	,0083	,04082	24
CONTROL	,0125	,01890	8
Total	,0372	,10857	56

Pruebas de efectos inter-sujetos			
Variable dependiente: NITRITOS mg/L			

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	,058 <sup>a</sup>	2	,029	2,606	,083
Intersección	,044	1	,044	3,907	,053
planta	,058	2	,029	2,606	,083
Error	,590	53	,011		
Total	,726	56			
Total corregido	,648	55			

a. R al cuadrado = ,090 (R al cuadrado ajustada = ,055)

**NITRITOS mg/L**

	ESPECIES VEGETALES	N	Subconjunto
			1
HSD Tukey <sup>a,b,c</sup>	HELICONIA	24	,0083
	CONTROL	8	,0125
	JUNCO	24	,0744
	Sig.		,223

- **Fosfatos**

<b>Estadísticos descriptivos</b>					
Variable dependiente: FOSFATOS % REMOCION					
ESPECIES VEGETALES	Media	Desv. Desviación	N		
JUNCO	56,2500	35,29123	24		
HELICONIA	62,8472	35,60885	24		
CONTROL	26,0417	37,11776	8		
Total	54,7619	37,09315	56		
<b>Pruebas de efectos inter-sujetos</b>					
Variable dependiente: FOSFATOS % REMOCION					
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	8220,899 <sup>a</sup>	2	4110,450	3,230	,047
Intersección	101113,426	1	101113,426	79,447	,000
planta	8220,899	2	4110,450	3,230	,047
Error	67453,704	53	1272,711		
Total	243611,111	56			
Total corregido	75674,603	55			

a. R al cuadrado = ,109 (R al cuadrado ajustada = ,075)				
<b>FOSFATOS % REMOCION</b>				
			Subconjunto	
	ESPECIES VEGETALES	N	1	2
HSD Tukey <sup>a,b,c</sup>	CONTROL	8	26,0417	
	JUNCO	24	56,2500	56,2500
	HELICONIA	24		62,8472
	Sig.		,069	,873

- **Turbidez**

<b>Estadísticos descriptivos</b>					
Variable dependiente: TURBIDEZ % REMOCION					
ESPECIES VEGETALES	Media	Desv. Desviación	N		
JUNCO	48,3414	22,00483	24		
HELICONIA	46,1556	29,53275	24		
CONTROL	40,7500	37,18737	8		
Total	46,3201	27,37760	56		
<b>Pruebas de efectos inter-sujetos</b>					
Variable dependiente: TURBIDEZ % REMOCION					
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	346,910 <sup>a</sup>	2	173,455	,225	,799
Intersección planta	87800,397	1	87800,397	113,838	,000
Error	346,910	2	173,455	,225	,799
Total	40877,413	53	771,272		
Total corregido	161375,440	56			
Total corregido	41224,323	55			
a. R al cuadrado = ,008 (R al cuadrado ajustada = -,029)					
<b>TURBIDEZ % REMOCION</b>					
			Subconjunto		
	ESPECIES VEGETALES	N	1		
HSD Tukey <sup>a,b,c</sup>	CONTROL	8	40,7500		
	HELICONIA	24	46,1556		
	JUNCO	24	48,3414		
	Sig.		,745		

- **Conductividad**

<b>Estadísticos descriptivos</b>					
Variable dependiente: CONDUCTIVIDAD % REMOCION					
ESPECIES VEGETALES	Media	Desv. Desviación	N		
JUNCO	16,7652	11,15438	24		
HELICONIA	46,4643	14,70534	24		
CONTROL	44,1498	11,96602	8		
Total	33,4055	19,30593	56		
<b>Pruebas de efectos inter-sujetos</b>					
Variable dependiente: CONDUCTIVIDAD % REMOCION					
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	11661,897 <sup>a</sup>	2	5830,949	34,969	,000
Intersección planta	55345,545	1	55345,545	331,911	,000
Error	11661,897	2	5830,949	34,969	,000
Total	8837,644	53	166,748		
Total corregido	82991,432	56			
Total corregido	20499,541	55			
a. R al cuadrado = ,569 (R al cuadrado ajustada = ,553)					
<b>CONDUCTIVIDAD % REMOCION</b>					
	ESPECIES VEGETALES	N	Subconjunto		
			1	2	
HSD Tukey <sup>a,b,c</sup>	JUNCO	24	16,7652		
	CONTROL	8		44,1498	
	HELICONIA	24		46,4643	
	Sig.		1,000	,881	

- **pH**

<b>Estadísticos descriptivos</b>			
Variable dependiente: pH salida			
ESPECIES VEGETALES	Media	Desv. Desviación	N
JUNCO	6,2671	,84701	24
HELICONIA	6,2113	,87912	24
CONTROL	6,7913	,33297	8
Total	6,3180	,82219	56
<b>Pruebas de efectos inter-sujetos</b>			

Variable dependiente: pH salida					
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	2,127 <sup>a</sup>	2	1,064	1,608	,210
Intersección	1782,321	1	1782,321	2694,889	,000
planta	2,127	2	1,064	1,608	,210
Error	35,053	53	,661		
Total	2272,564	56			
Total corregido	37,180	55			

a. R al cuadrado = ,057 (R al cuadrado ajustada = ,022)

pH salida			
	ESPECIES VEGETALES	N	Subconjunto
			1
HSD Tukey <sup>a,b,c</sup>	HELICONIA	24	6,2113
	JUNCO	24	6,2671
	CONTROL	8	6,7913
	Sig.		,145

- **Amonio**

Estadísticos descriptivos			
Variable dependiente: AMONIO mg/L			
ESPECIES VEGETALES	Media	Desv. Desviación	N
JUNCO	,2917	,70212	24
HELICONIA	,0583	,12482	24
CONTROL	,4500	1,04060	8
Total	,2143	,60975	56

Pruebas de efectos inter-sujetos					
Variable dependiente: AMONIO mg/L					
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	1,172 <sup>a</sup>	2	,586	1,611	,209
Intersección	3,072	1	3,072	8,446	,005
planta	1,172	2	,586	1,611	,209
Error	19,277	53	,364		
Total	23,020	56			

Total corregido	20,449	55		
a. R al cuadrado = ,057 (R al cuadrado ajustada = ,022)				
<b>AMONIO mg/L</b>				
	ESPECIES VEGETALES	N	Subconjunto	
			1	
HSD Tukey <sup>a,b,c</sup>	HELICONIA	24	,0583	
	JUNCO	24	,2917	
	CONTROL	8	,4500	
	Sig.		,199	

#### Anexo 4. Prueba T para muestras relacionadas.

- JUNCO

Prueba de muestras emparejadas									
Diferencias emparejadas									
95% de intervalo									
Desv. Error de confianza de									
la diferencia									
Superior									
Inferior									
Sig. g (bilateral)									
Media	Desviación	Desviación	promedio	Superior	Inferior	t	df	Sig.	
P	DQO	1569,25	1082,24	220,91	1112,25	2026,24	7,10	2	,000
ar	entrada	000	160	164	945	055	4	3	
1	mg/L - DQO								
	salida mg/L								
P	DBO5	369,166	150,619	30,745	305,565	432,767	12,0	2	,000
ar	entrada	67	49	08	63	70	07	3	
2	mg/L - DBO5								
	salida mg/L								
P	OXIGENO	-	,76690	,15654	-	-	-	2	,000
ar	entrada	1,33250			1,65633	1,00867	8,51	3	
3	mg/L -							2	
	OXIGENO								
	salida mg/L								

P ar 4	<b>NITRATOS</b> entrada mg/L - <b>NITRATOS</b> salida mg/L	- ,62500	9,36140	1,9108	-	3,32797	- 2	,747
				9	4,57797		,327 3	
P ar 5	<b>NITRITOS</b> entrada mg/L - <b>NITRITOS</b> salida mg/L	- ,071250	,156179	,03188	-	-	- 2	,035
				0	,137199	,005301	2,23 3	
							5	
P ar 6	<b>FOSFATOS</b> entrada mg/L - <b>FOSFATOS</b> salida mg/L	1,23958	1,31149	,26771	,68579	1,79338	4,63 2	,000
							0 3	
P ar 7	<b>TURBIDEZ</b> entrada NTU - <b>TURBIDEZ</b> salida NTU	63,6041	75,4595	15,403	31,7403	95,4679	4,12 2	,000
		7	9	12	8	6	9 3	
P ar 8	<b>CONDUCTIV</b> IDAD entrada $\mu$ S/cm - <b>CONDUCTIV</b> IDAD salida $\mu$ S/cm	238,791	163,808	33,437	169,621	307,961	7,14 2	,000
		67	21	21	53	81	1 3	
P ar 9	<b>pH</b> entrada - <b>pH</b> salida	- ,00458	1,17718	,24029	- ,50166	,49250	- 2	,985
							,019 3	
P ar 10	<b>AMONIO</b> entrada mg/L - <b>AMONIO</b> salida mg/L	- ,29167	,70212	,14332	- ,58815	,00481	- 2	,054
							2,03 3	
							5	

- HELICONIA

Prueba de muestras emparejadas									
Diferencias emparejadas									
95% de intervalo									
Desv. Error de confianza de									
la diferencia									
Superior									
Sig.									
g (bilateral)									
Media									
Desv. Desviación									
Promedio									
Inferior									
Superior									
t									
l									
r									
3									
P	DQO	1738,37	1096,92	223,90	1275,18	2201,56	7,76	2	,000
ar	entrada	500	189	824	551	449	4	3	
1	mg/L - DQO								
	salida mg/L								
P	DBO5	437,916	137,492	28,065	379,858	495,974	15,6	2	,000
ar	entrada	67	42	52	71	63	03	3	
2	mg/L - DBO5								
	salida mg/L								
P	OXIGENO	-	1,02716	,20967	-	-,87877	-	2	,000
ar	entrada	1,31250			1,74623		6,26	3	
3	mg/L -						0		
	OXIGENO								
	salida mg/L								
P	NITRATOS	2,50000	10,5294	2,1493	-	6,94620	1,16	2	,257
ar	entrada		6	2	1,94620		3	3	
4	mg/L -								
	NITRATOS								
	salida mg/L								
P	NITRITOS	-	,036845	,00752	-	,010350	-	2	,496
ar	entrada	,005208		1	,020767		,693	3	
5	mg/L -								
	NITRITOS								
	salida mg/L								
P	FOSFATOS	1,40625	1,33883	,27329	,84091	1,97159	5,14	2	,000
ar	entrada						6	3	
6	mg/L -								
	FOSFATOS								
	salida mg/L								
P	TURBIDEZ	68,0716	86,0839	17,571	31,7216	104,421	3,87	2	,001
ar	entrada NTU	7	4	81	1	73	4	3	
7	- TURBIDEZ								
	salida NTU								

P ar 8	<b>CONDUCTIV IDAD entrada μS/cm - CONDUCTIV IDAD salida μS/cm</b>	654,958 33	253,035 22	51,650 60	548,110 93	761,805 74	12,6 81	2 3	,000
P ar 9	<b>pH entrada - pH salida</b>	,05125	1,28398	,26209	-,49093	,59343	,196 3	2	,847
P ar 1 0	<b>AMONIO entrada mg/L - AMONIO salida mg/L</b>	-,05833	,12482	,02548	-,11104	-,00563	2,29 3 0	2	,032

- CONTROL

Prueba de muestras emparejadas									
Diferencias emparejadas									
95% de intervalo									
de confianza de									
la diferencia									
Superio									
r									
t									
g (bilate									
ral)									
Sig.									
g (bilate									
ral)									
Media	Desv. Desviac ión	Desv. Error prome dio	Inferior	Superio	r	t	g (bilate	ral)	Sig.
P ar 1	<b>DQO entrada mg/L - DQO salida mg/L</b>	1533,37 500	1256,93 027	444,39 196	482,55 500	2584,19 500	3,4 51	7	,011
P ar 2	<b>DBO5 entrada mg/L - DBO5 salida mg/L</b>	156,250 00	154,081 38	54,475 99	27,434 74	285,065 26	2,8 68	7	,024
P ar 3	<b>OXIGENO entrada mg/L - OXIGENO salida mg/L</b>	-,51250	,27484	,09717	-,74227	-,28273	5,2 74	7	,001

P	NITRATOS	3,75000	6,94365	2,4549	-	9,55504	1,5 7	,170
ar	entrada mg/L			5	2,0550		28	
4	- NITRATOS				4			
	salida mg/L							
P	NITRITOS	-	,012939	,00457	-	,001442	- 7	,080
ar	entrada mg/L	,009375		5	,02019		2,0	
5	- NITRITOS				2		49	
	salida mg/L							
P	FOSFATOS	,15625	1,14905	,40625	-,80438	1,11688	,38 7	,712
ar	entrada mg/L						5	
6	- FOSFATOS							
	salida mg/L							
P	TURBIDEZ	58,3312	94,4807	33,403	-	137,319	1,7 7	,124
ar	entrada NTU	5	0	97	20,656	09	46	
7	- TURBIDEZ				59			
	salida NTU							
P	CONDUCTIVI	630,625	236,006	83,440	433,31	827,930	7,5 7	,000
ar	DAD entrada	00	02	73	903	97	58	
8	μS/cm -							
	CONDUCTIVI							
	DAD salida							
	μS/cm							
P	pH entrada -	-,52875	1,45328	,51381	-	,68622	- 7	,338
ar	pH salida				1,7437		1,0	
9					2		29	
P	AMONIO	-,45000	1,04060	,36791	-	,41997	- 7	,261
ar	entrada mg/L				1,3199		1,2	
10	- AMONIO				7		23	
	salida mg/L							

#### Anexo 5 Análisis estadístico de crecimiento.

Estadísticos descriptivos			
Variable dependiente: CRECIMIENTO Cm			
especies vegetales	Media	Desv. Desviación	N
junco agua miel	45,6077	28,99547	13
junco agua potable	26,4385	13,58152	13
heliconia agua miel	21,5154	12,63519	13

heliconia agua potable	18,8308	11,23279	13		
Total	28,0981	20,50033	52		
<b>Pruebas de efectos inter-sujetos</b>					
Variable dependiente: CRECIMIENTO Cm					
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	5701,225 <sup>a</sup>	3	1900,408	5,798	,002
Intersección	41054,100	1	41054,100	125,259	,000
planta	5701,225	3	1900,408	5,798	,002
Error	15732,225	48	327,755		
Total	62487,550	52			
Total corregido	21433,450	51			
<b>CRECIMIENTO Cm</b>					
HSD Tukey <sup>a,b</sup>			Subconjunto		
	especies vegetales	N	1	2	
	heliconia agua potable	13	18,8308		
	heliconia agua miel	13	21,5154		
	junco agua potable	13	26,4385		
	junco agua miel	13			45,6077
	Sig.			,708	1,000

## Anexo 6. Informe de caracterización del vertimiento.



Regional Cauca

Centro de teleinformática y producción industrial

laboratorio de análisis ambientales.

### Informe Caracterización De Agua Miel De Café

El 20 de septiembre del 2017 se realizó el análisis de calidad fisicoquímica del agua miel resultante del proceso de beneficio húmedo de café requerido por el estudio, Implementación De Un Sistema De Humedal Artificial De Flujo Subsuperficial Horizontal Para La Biorremediación De Aguas Miel De Café, En La Finca La Clanera, Vereda La Chorrera Del Municipio De Timbio, Cauca. En donde se midieron los parámetros (sólidos totales, pH, DBO<sub>5</sub>, DQO, turbidez, conductividad, oxígeno disuelto, nitratos, nitritos, amonio, fosfatos) y se determinó la concentración de cada uno de estos, para verificar con los límites permitidos para este tipo de vertimientos establecidos en la resolución 0631 del 2015.

Caracterización de Agua miel de café laboratorio de análisis ambientales del CTPI del SENA.		
Parámetro	unidades	
pH		5.05
Demanda química de oxígeno.(DQO)	mg/L O <sub>2</sub>	2102
Demanda bioquímica de oxígeno(DBO <sub>5</sub> )	mg/L O <sub>2</sub>	890
Sólidos suspendidos totales(SST)	mg/L	0.099
Fosfatos	mg/L	0.75
Nitratos	mg/L	10
Nitritos	mg/L	0.025
Amonio	mg/L	0
Turbidez	NTU	172
Conductividad	uS/cm	1082
Oxígeno O <sub>2</sub>	mg/L O <sub>2</sub>	0

**Victoria Eugenia Pizo Perafan**

Química

Instructora Servicio Nacional de Aprendizaje SENA.

Anexo 7. Fotos





