



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 1

Neiva, junio 20 de 2019

Señores

**CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN**  
UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
Neiva

Las suscritas:

LUZ ADRIANA ZUÑIGA ESPINOSA, con C.C. No. 1.083.902.561, y YESICA PAOLA LOPEZ ANACONA, con C.C. No. 1.083.904.568, autores del trabajo de grado titulado Eficiencia de remoción de DBO5 y SST con lecho filtrante para el tratamiento de aguas residuales del beneficio ecológico de café, presentado y aprobado en el año 2019 como requisito para optar al título de Ingeniero agrícola; Autorizo al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:  
**LUZ ADRIANA ZUÑIGA ESPINOSA**  
Firma:

EL AUTOR/ESTUDIANTE:  
**YESICA PAOLA LOPEZ ANACONA**  
Firma:

Vigilada Mineducación



Título completo del trabajo: EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DBO5 Y SST CON LECHO FILTRANTE PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL BENEFICIO ECOLÓGICO DE CAFÉ

**AUTOR O AUTORES:**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Zuñiga Espinosa	Luz Adriana
López Anacona	Yesica Paola

**DIRECTOR:**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Chavez Parra	Yony Arley

**JURADOS TRABAJO DE GRADO (Proyecto de grado):**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Sanabria Mendez	Nadia Brigitte
Beltran Diaz	Jhon Jairo

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE:** Ingeniero agrícola

**FACULTAD:** Ingeniería

**PROGRAMA O POSGRADO:** Ingeniería Agrícola

**CIUDAD:** Neiva

**AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2019

**NÚMERO DE PÁGINAS:** 101

**TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):**

Diagramas  Fotografías  Grabaciones en discos \_\_\_ Ilustraciones en general  Grabados \_\_\_ Láminas \_\_\_  
Litografías \_\_\_ Mapas  Música impresa \_\_\_ Planos  Retratos \_\_\_ Sin ilustraciones \_\_\_ Tablas o Cuadros

Vigilada mieducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional [www.usco.edu.co](http://www.usco.edu.co), link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



### PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

Español	Inglés
1. Caficultura	Coffee grewing
2. Contaminación hídrica	Water pollution
3. Análisis de agua	Water analysis
4. Filtro	Filter

### RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

Una de las principales problemáticas generadas por la actividad caficultora, es la contaminación por aguas residuales del beneficio húmedo del café. Por ello se propone un sistema de tratamiento mediante el uso de recursos de la zona como la guadua. El proyecto evaluó la eficiencia de remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) y solidos suspendidos totales (SST), utilizando un lecho filtrante de cascarilla de arroz como tratamiento preliminar, un filtro de flujo descendente como tratamiento primario, un filtro de flujo ascendente como tratamiento secundario y un filtro de grava con plantas como tratamiento terciario. Luego de realizar el diagnóstico, diseño e instalación del sistema se realizó la toma de muestras del afluente (aguas mieles) y del efluente (agua tratada) con el fin de calcular la eficiencia de remoción que se obtuvo mediante el paso del agua por el sistema de tratamiento de aguas residuales de café (STARC), obteniendo resultados favorables para el caso de remoción de SST y desfavorables en el caso de DBO5 ya que ésta última aumentó al final del sistema. Respecto a los valores establecidos por la resolución 631 de 2015 que rige los vertimientos de este tipo de aguas residuales en Colombia, se concluye que el sistema cumple con la norma en cuanto a concentración de SST que deber ser mínimo de 800 mg/l y cuyo valor obtenido fue 383 mg/l, mientras que la concentración de DBO5 estuvo muy por encima del máximo permisible para estos vertimientos.

### ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

One of the main problems generated by the coffee activity is the contamination by wastewater of the wet benefit of coffee. Therefore, a treatment system through the use of resources from the area such as guadua. The project evaluated the efficiency of removal of the biochemical oxygen demand (BOD5) and total suspended solids (TSS), using a filter bed of rice husk as a preliminary treatment, a downstream filter as primary treatment, a flow filter ascending as secondary treatment and a gravel filter with plants as tertiary treatment. After the diagnosis, design and installation of the system, the affluent samples (honey waters) and the effluent (treated water) were taken in order to calculate the removal efficiency obtained through the passage of water through the Coffee



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

<b>CÓDIGO</b>	<b>AP-BIB-FO-07</b>	<b>VERSIÓN</b>	<b>1</b>	<b>VIGENCIA</b>	<b>2014</b>	<b>PÁGINA</b>	<b>3 de 3</b>
---------------	---------------------	----------------	----------	-----------------	-------------	---------------	---------------

Wastewater Treatment System (STARC) obtaining favorable results for the case of removal of SST and unfavorable in the case of BOD5 since the latter increased at the end of the system. Regarding the values established by resolution 631 of 2015 that governs the discharges of this type of wastewater in Colombia, it is concluded that the system complies with the norm in terms of concentration of SST that should be at least 800 mg/l and whose value obtained was 383 mg/l, while the concentration of BOD5 was well above the maximum allowable for these discharges.

**APROBACION DEL TRABAJO DE GRADO (PASANTIAS)**

Nombre Jurado:  
NADIA BRIGITTE SANABRIA MENDEZ  
Firma:

NADIA BRIGITTE SANABRIA MENDEZ

Firma:

Nombre Jurado:  
JHON JAIRO BELTRAN DIAZ  
Firma:

JHON JAIRO BELTRAN DIAZ

Firma:

**EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DBO5 Y SST CON LECHO FILTRANTE  
PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL BENEFICIO  
ECOLÓGICO DE CAFÉ**

**LUZ ADRIANA ZUÑIGA ESPINOSA  
YESICA PAOLA LÓPEZ ANACONA**



**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERIA AGRÍCOLA  
PITALITO - HUILA  
2019**

**EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DBO5 Y SST CON LECHO FILTRANTE  
PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL BENEFICIO  
ECOLÓGICO DE CAFÉ**

**LUZ ADRIANA ZUÑIGA ESPINOSA  
YESICA PAOLA LÓPEZ ANACONA**

**Trabajo de grado para optar por el título de:  
INGENIERO AGRICOLA**

**DIRECTOR  
YONY ARLEY CHAVEZ PARRA  
Agrónomo, Magister en Agroecología y desarrollo rural.**

**CODIRECTOR  
EDINSON MUJICA RODRIGUEZ  
Magister en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERIA AGRÍCOLA  
PITALITO - HUILA  
2019**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

**Firma del Director  
YONY ARLEY CHAVEZ PARRA  
Magister en Agroecología y Desarrollo  
Rural.**

---

**Firma del Codirector  
EDINSON MUJICA RODRIGUEZ  
Magister en Ingeniería Agrícola y Uso  
Integral del Agua**

---

**Firma del Jurado  
NADIA BRIGITTE SANABRIA MENDEZ**

---

**Firma del Jurado  
JHON JAIRO BELTRAN DÍAZ**

Pitalito, Junio 2019

## DEDICATORIA

*Luz Adriana Zúñiga Espinosa*

A Dios y a la santísima Virgen por prestarme la vida, por permitirme despertar cada mañana y emprender un mundo de desafíos y aprendizaje continuo, por regalarme habilidades para cumplir mis objetivos y por las infinitas bendiciones que me han concedido.

A mi hija Sarah Isabella por ser el motorcito de mi vida, el motivo de mis sonrisas, la razón para ser cada día mejor y por enseñarme un amor sin límites con su existencia.

A mis padres Edilia y Alipio por apoyarme el día que decidí ser profesional y acompañarme en el rumbo que decidí emprender, por guiarme por el camino del bien, por enseñarme la responsabilidad, el respeto y el amor a Dios, por todos los valores que me inculcaron y por su amor y comprensión, gracias siempre.

A mi esposo Jose por su apoyo incondicional, por su amor, comprensión y por demostrarme que se debe soñar, que con perseverancia se logra lo que nos proponemos y por ser mi fuente de inspiración y admiración, por ser mi amigo, mi compañero y mi gran amor.

A mis hermanos Sergio y Daniela por hacer parte fundamental de mi vida, por ser incondicionales y por todos los momentos que hemos vivido juntos.

A Jessica, por su amistad, por su apoyo en los momentos que más lo necesité, por estar siempre ahí, por ser una persona leal e incondicional, gracias, éste logro y esta felicidad la compartimos.

*A todos, gracias infinitas, este logro es por ustedes y para ustedes.*

*Yesica Paola López Anacona*

A mi Dios, por su infinito amor, por darme vida, sabiduría, ánimo, voluntad, entendimiento, felicidad, por mostrarme el camino adecuado para la realización de mis propósitos, por permitirme culminar esta etapa, por poner en mi vida personas maravillosas que me han acompañado de una u otra forma.

A mis padres Eduardo y Marina, por su amor y apoyo incondicional, por su comprensión, compañía, por la educación que me han brindado, valores y principios que me han inculcado, por enseñarme a ser responsable, disciplinada y perseverante. Para ustedes mis amados padres es este logo.

A mis hermanos, en especial a mi hermana Claudia, por su amor, apoyo, consejos, por ser un gran ejemplo para mí, por motivarme a ser mejor, a crecer en todos los aspectos de mi vida. Para ti, con todo mi corazón.

A mi compañero de vida Carlos, por su amor, compañía, apoyo, comprensión, consejos, ánimo, sabiduría, por motivarme a ser una mejor persona a lo largo de estos años y en especial por demostrarme que los sueños si se cumplen. Para ti, con todo mi amor.

A mi amiga Adriana, por su amistad a lo largo de nuestra formación académica y fuera de ella, por ser mi compañera para la realización de este proyecto, por motivarme a aprender acerca de café y por todos los momentos que hemos aprendido y compartido juntas.

*Para ustedes con todo mi amor y gratitud.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Luz Adriana Zúñiga Espinosa y Yesica Paola López Anacona*

A la Universidad Surcolombiana por ser el espacio que durante cinco años nos abrió sus puertas para compartir, conocer y aprender sobre un mundo que ahora es nuestro proyecto de vida.

A los ingenieros, Yony Chavez por su disponibilidad, compromiso y colaboración como director en este proyecto de grado y Edinson Mujica por su colaboración como codirector, y por todos sus conocimientos aportados a lo largo de la carrera.

A todos los docentes que nos aportaron sus conocimientos durante estos años de estudio, por su motivación, exigencia y por su gran labor de formar profesionales.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN .....	14
ABSTRACT .....	15
INTRODUCCIÓN.....	16
OBJETIVOS.....	18
1. MARCO CONCEPTUAL.....	19
1.1 Generalidades del café.....	19
1.1.1 Origen e historia mundial .....	19
1.1.2 Introducción de café a Colombia .....	19
1.1.3 Botánica.....	20
1.1.4 Aspectos generales sobre el cultivo del café .....	23
1.2 Beneficio húmedo del café.....	24
1.3 Aguas residuales del beneficio húmedo de café .....	25
1.4 Cascarilla de arroz .....	25
1.4.1 Forma, tamaño y peso .....	26
1.4.2 Densidades.....	26
1.4.3 Porosidad.....	26
1.4.4 Composición química de la cascarilla de arroz.....	26
1.4.5 Uso de la cascarilla de arroz.....	26
1.5 Guadua .....	27
1.5.1 Clasificación botánica .....	27
1.5.2 Morfología general de la guadua .....	28
1.5.3 Propiedades físicas y mecánicas de la guadua.....	28
1.5.4 Usos de la guadua .....	29

1.6	Heliconias.....	29
1.7	Sistemas de tratamiento de aguas residuales en Colombia.....	30
1.7.1	Sistemas modulares de tratamiento anaerobio SMTA.....	30
1.8	Legislación ambiental colombiana.....	31
1.9	Antecedentes de tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica.....	32
2.	METODOLOGÍA.....	34
2.1	Localización.....	34
2.2	Fase uno. Identificación y concientización de la problemática con los productores.....	35
2.2.1	Elaboración de encuesta.....	35
2.2.2	Aplicación de encuesta.....	35
2.3	Fase dos. Propuesta de unidades para el STARC.....	35
2.3.1	Reconocimiento del área de trabajo.....	35
2.3.2	Selección de unidades.....	36
2.3.3	Caracterización de guadua y cascarilla de arroz.....	36
2.3.4	Caudal de diseño.....	38
2.3.5	Diseño conceptual.....	39
2.3.6	Diseño físico.....	39
2.4	Fase tres. Adecuación.....	39
2.5	Fase cuatro. Instalación.....	39
2.6	Fase cinco. Análisis de muestras del efluente del sistema.....	39
2.6.1	Muestreo y análisis de laboratorio.....	39

2.6.2	Análisis de resultados .....	40
3.	RESULTADOS Y ANALISIS .....	41
3.1	Identificación y concientización de la problemática con los productores ...	41
3.1.1	Selección de fincas cafeteras vereda La Palma .....	43
3.2	Propuesta de unidades para el STARC .....	47
3.2.1	Reconocimiento del área de trabajo.....	47
3.2.2	Selección de unidades .....	53
3.2.3	Caracterización de guadua y cisco de arroz .....	54
3.2.4	Caudal de diseño .....	57
3.2.5	Diseño conceptual.....	59
3.2.6	Diseño físico.....	63
3.3	Adecuación .....	69
3.4	Instalación .....	72
3.5	Análisis de muestras del efluente del sistema.....	75
3.5.1	Análisis fisicoquímicos .....	75
3.5.2	Análisis microbiológico.....	82
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	88
	BIBLIOGRAFÍA.....	89

## LISTA DE ABREVIATURAS

ARC	Aguas Residuales de Café
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
STAR	Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales
STARC	Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales de Café
SS	Sólidos Suspendidos
TARC	Tratamiento de Aguas Residuales de Café

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición del mucílago de café.....	23
Tabla 2. Estudio sobre alternativas de uso de la cascarilla de arroz. ....	27
Tabla 3. Partes y usos de la guadua. ....	29
Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos máximos permisibles. ....	31
Tabla 5. Distribución del área cafetera por regiones. ....	41
Tabla 6. Dimensiones promedio de los semicírculos y cuartos de círculo.....	54
Tabla 7. Porosidad de semicírculos y cuartos de círculos.....	55
Tabla 8. Propiedades físico-químicas del cisco. ....	56
Tabla 9. Concentración del agua residual del café – Finca La Esperanza. ....	61
Tabla 10. Remociones esperadas del sistema: rejilla, filtro de cisco, filtro de flujo vertical y filtro de flujo horizontal. ....	62
Tabla 11. Eficiencias teóricas del sistema: rejilla, filtro de cisco, filtro de flujo vertical y filtro de flujo horizontal. ....	62
Tabla 12. Caracterización del Efluente (Ef).....	62
Tabla 13. Presupuesto. ....	66
Tabla 14. Manual de operación. ....	68
Tabla 15. Manual de mantenimiento. EPP: elementos de protección personal. ....	68
Tabla 16. Concentración de SS de afluente vs. Efluente reportado según análisis de laboratorio. ....	79
Tabla 17. Concentración de DBO5 de afluente vs. efluente reportada según análisis de laboratorio.....	80
Tabla 18. Comparativo de valores obtenidos de los diferentes parámetros evaluados vs. valores máximos permisibles según legislación colombiana. ....	81
Tabla 19. Análisis microbiológico.....	82

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del proyecto. ....	34
Figura 2. Distribución porcentual de huella hídrica total del sector agrícola. Fuente: Arévalo (2011). ....	43
Figura 3. Fincas con sistemas de tratamientos de aguas residuales de café habilitado.....	44
Figura 4. Beneficio tradicional de café. Fuente: Rodríguez, Sanz, Oliveros & Ramírez, 2015. ....	45
Figura 5. Vertimiento directo de la finca El Retorno, extensión 3 hectáreas. ....	45
Figura 6. Vertimiento directo de la finca El Jardín, extensión 2 hectáreas. ....	45
Figura 7. Vertimiento directo de la finca Santo Domingo, extensión 5 hectáreas. ....	46
Figura 8. Vertimiento directo de la finca EL Porvenir, extensión 10 hectáreas. ....	46
Figura 9. Desnatador finca El Placer, 4 hectáreas.....	46
Figura 10. Tanques para filtro anaerobio sin funcionamiento, finca El Sinú, 12 hectáreas. ....	46
Figura 11. Sistema de tratamiento de aguas residuales de café implementado en la finca La Suiza, 8 hectáreas. ....	47
Figura 12. Área de recepción o tolva. ....	48
Figura 13. Área de despulpado.....	49
Figura 14. Área de almacenamiento de pulpa. ....	49
Figura 15. Área de fermentación. ....	50
Figura 16. Área de lavado.....	50
Figura 17. Área de secado.....	51
Figura 18. Almacenamiento. ....	51
Figura 19. Esquema general de unidades de operación finca La Esperanza. ....	52
Figura 20. Esquema general del sistema propuesto.....	60
Figura 21. Diagrama de unidades del sistema propuesto. ....	61
Figura 22. Rejilla.....	63
Figura 23. Vista transversal del tanque con cascarilla de arroz. A: borde libre, B: espacio para e agua residual, C: espacio para cascarilla de arroz, D: falso fondo. ....	65
Figura 24. Vista en planta del tanque con cascarilla de arroz. ....	65
Figura 25. . Nivelación del terreno. ....	70
Figura 26. Base de Guadua. ....	70
Figura 27. Tanque para filtro preliminar.....	70
Figura 28. Polisombra. ....	71
Figura 29. Estructura de esterilla de guadua. ....	71
Figura 30. Filtro con cascarilla de arroz.....	72

Figura 31. Conexión de filtro de cascarilla con filtro anaerobio 1. ....	72
Figura 32. Tapón para retrolavado. ....	73
Figura 33. Conexión de filtros anaerobios con guadua 1 y 2. ....	73
Figura 34. Filtro anaerobio de guadua 1 y 2 con semicírculos y cuartos de círculo de guadua. ....	74
Figura 35. Conexión desde tratamiento secundario hasta tratamiento terciario. ....	74
Figura 36. Gravilla media pulgada y platanillas. ....	75
Figura 37. Vista general del tratamiento primario, secundario y terciario. ....	75
Figura 38. Concentraciones SS de fluente y Efluente. ....	79
Figura 39. Eficiencia de remoción de SS. ....	79
Figura 40. Eficiencia de DBO5 de Afluente vs. Efluente. ....	80
Figura 41. Concentración de DBO5 de Afluente vs. Efluente. ....	80
Figura 42. Organismos presentes en los tanques con guadua. ....	81
Figura 43. Comportamiento - Recuento enterobacterias UFC/ml. ....	83
Figura 44. Comportamiento - Recuento E. Coli UFC/ml. ....	84
Figura 45. Comportamiento - Recuento coliformes totales UFC/ml. ....	85
Figura 46. Comportamiento - Mohos UFC/ml. ....	85
Figura 47. Comportamiento - Levaduras UFC/ml. ....	86
Figura 48. Comportamiento - Recuento Pseudomonas sp. UFC/ ml. ....	86

## RESUMEN

Una de las principales problemáticas generadas por la actividad caficultora, es la contaminación por aguas residuales del beneficio húmedo del café, ya que un gran porcentaje de los productores del grano no cuentan con ningún tipo de tratamiento para estas aguas. Por ello se propone un sistema de tratamiento que resulte asequible y de fácil manejo para los pequeños y medianos caficultores de la región, mediante el uso de recursos de la zona como la guadua. El proyecto evaluó la eficiencia de remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) y sólidos suspendidos totales (SST), utilizando un lecho filtrante de cascarilla de arroz como tratamiento preliminar, un filtro de flujo descendente como tratamiento primario, un filtro de flujo ascendente como tratamiento secundario y un filtro de grava con plantas como tratamiento terciario.

En la fase uno del proyecto se realizó un diagnóstico de la problemática en la zona aledaña a la finca donde se implementó el proyecto (Vereda La Palma, Acevedo-Huila), encontrándose evidencia de la poca y en algunos casos nula existencia de sistemas de descontaminación de aguas del beneficio de café en las fincas de la vereda, lo que conlleva a un deterioro de las fuentes hídricas aledañas a la zona y a la fauna acuática que pueda encontrarse en dichas fuentes. Luego del diseño e instalación del sistema se realizó la toma de muestras del afluente (aguas mieles) y del efluente (agua tratada) con el fin de calcular la eficiencia de remoción que se obtuvo mediante el paso del agua por el sistema de tratamiento de aguas residuales de café (STARC), obteniendo resultados favorables para el caso de remoción de SST y desfavorables en el caso de DBO5 ya que ésta última aumentó al final del sistema. Respecto a los valores establecidos por la resolución 631 de 2015 que rige los vertimientos de este tipo de aguas residuales en Colombia, se concluye que el sistema cumple con la norma en cuanto a concentración de SST que deber ser mínimo de 800 mg/l y cuyo valor obtenido fue 383 mg/l, mientras que la concentración de DBO5 estuvo muy por encima del máximo permisible para estos vertimientos.

**Palabras clave:** *Agua residual del beneficio de café, sólidos suspendidos, demanda bioquímica de Oxígeno, remoción, eficiencia.*

## ABSTRACT

One of the main problems generated by the coffee activity is the contamination by wastewater of the wet benefit of coffee, since a large percentage of the grain producers do not have any type of treatment for these waters. Therefore, a treatment system that is affordable and easy to use for small and medium coffee growers in the region is proposed, through the use of resources from the area such as guadua. The project evaluated the efficiency of removal of the biochemical oxygen demand (BOD5) and total suspended solids (TSS), using a filter bed of rice husk as a preliminary treatment, a downstream filter as primary treatment, a flow filter ascending as secondary treatment and a gravel filter with plants as tertiary treatment.

In phase one of the project a diagnosis of the problem was made in the area adjacent to the farm where the project was implemented (Vereda La Palma, Acevedo-Huila), finding evidence of the time and in some cases no decontamination systems exist of waters of the benefit of coffee in the farms of the vereda, which leads to a deterioration of the water sources bordering the area and the aquatic fauna that may be found in said sources. After the design and installation of the system, the affluent samples (honey waters) and the effluent (treated water) were taken in order to calculate the removal efficiency obtained through the passage of water through the Coffee Wastewater Treatment System (STARC) obtaining favorable results for the case of removal of SST and unfavorable in the case of BOD5 since the latter increased at the end of the system. Regarding the values established by resolution 631 of 2015 that governs the discharges of this type of wastewater in Colombia, it is concluded that the system complies with the norm in terms of concentration of SST that should be at least 800 mg/l and whose value obtained was 383 mg/l, while the concentration of BOD5 was well above the maximum allowable for these discharges.

**Keywords:** *Residual water from the coffee benefit, suspended solids, biochemical oxygen demand, removal, efficiency.*

## INTRODUCCIÓN

Colombia es uno de los países más ricos del mundo en agua dulce, un elemento esencial e insustituible para las especies de tierra firme incluyendo la vida humana. Su oferta hídrica superficial está estimada en 2084 km<sup>3</sup>/año y su riqueza hídrica representa el 1,96% de los recursos hídricos mundiales. No obstante, los problemas de contaminación hídrica han reducido en un 60% la disponibilidad del recurso, por afectación de su calidad (Cárdenas & Ortiz, 2014).

Uno de las actividades que más demanda el recurso hídrico es la producción agrícola, ya que es el principal usuario del agua dulce. En consecuencia a lo anterior, la agricultura genera contaminación de éste recurso, mediante la descarga de contaminantes y sedimentos en las aguas superficiales y/o subterráneas, por la pérdida neta de suelo como resultado de prácticas agrícolas desacertadas y por la salinización y anegamiento de las tierras de regadío (FAO, 1997).

La producción de café es considerada una de las principales actividades agrícolas del mundo, alrededor de 25 millones de personas, en 512 países, dependen económicamente de esta actividad (Semante, 2014). En Colombia la caficultura es un componente fundamental de la estructura económica y social (Ibid. P. 12). En el departamento del Huila, el cultivo del café es la actividad económica que más aporta en el valor de la producción agrícola, con una contribución del 57.52% (PNUD, 2010) y es uno de los más reconocidos cafés regionales de Colombia (FNC, 2013). Pitalito Huila es considerado como el primer municipio productor de café en Colombia (CNC, 2007). Por lo anterior, los caficultores se han preocupado por aumentar su producción y satisfacer la creciente demanda del grano colombiano (Arcila, Farfán, Moreno, Hincapié & Salazar 2007).

Tradicionalmente el café ha sido beneficiado por vía húmeda, dando origen a una bebida suave de alta calidad, pero generando problemas de contaminación del medio ambiente. De acuerdo con la distribución de los macrocomponentes del fruto fresco y maduro de café, sólo el 9,5% del peso es utilizado en la preparación de la bebida. El 90,5% restante lo constituyen el agua y los subproductos del proceso, de los cuales los principales son la pulpa y el mucílago (Calle, 1977).

En el beneficio húmedo tradicional, estos subproductos son removidos durante las etapas de despulpado y lavado, utilizando altas cantidades de agua: los consumos se ubican alrededor de los 40 litros por kilogramo de café pergamino seco,

distribuidos así: 12,5% en el despulpado, 37,5% en el lavado y transporte del grano y 50% para el transporte de la pulpa (Roa et al., 1999).

Investigaciones desarrolladas en Cenicafé han permitido calcular que la pulpa y el mucílago frescos, cuando no son utilizados en forma adecuada, representan el 72% y el 28%, respectivamente, del problema de contaminación generado en el proceso de beneficio húmedo del café (Zambrano & Zuluaga, 1993). Además, se generan residuos líquidos altamente contaminantes por sus valores de acidez, contenido de sólidos y Demanda Química de Oxígeno (DQO), lo cual genera graves desequilibrios en el ecosistema receptor y en sus componentes (Velasco, Puerta & Rodríguez, 1997).

De acuerdo a lo planteado, este proyecto quiso mitigar mediante la investigación una de las principales problemáticas generadas por la actividad caficultora, que es la contaminación por aguas residuales del beneficio húmedo del café, resaltando la pertinencia de este tipo de proyectos para la zona sur del departamento del Huila que se ve altamente afectada por esta labor agrícola. Para ello, se busca evaluar la eficiencia de remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) y sólidos suspendidos totales (SST), utilizando un lecho filtrante de cascarilla de arroz como tratamiento preliminar, un filtro de flujo descendente como tratamiento primario, un filtro de flujo ascendente como tratamiento secundario y un filtro de grava con plantas como tratamiento terciario, para el tratamiento de aguas residuales del beneficio ecológico de café, procurando que este sistema sea sencillo y eficiente, para la apropiación por parte de los caficultores.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Evaluar la eficiencia de un lecho filtrante con base en cascarilla de arroz, en la reducción de la DBO y la remoción de SS, en aguas residuales del beneficio húmedo del café.

### **Objetivos específicos**

Establecer los aspectos determinantes de los dos indicadores de calidad de agua que se abordarán (DBO, SS).

Implementar un sistema de filtrado mediante el uso de diferentes tipos de lechos.

Medir las variables a la entrada y salida del sistema filtrante.

Cuantificar la eficiencia del sistema en la remoción de DBO y SS

## **1. MARCO CONCEPTUAL**

### **1.1 Generalidades del café**

#### **1.1.1 Origen e historia mundial**

El café arábico se originó en las tierras altas de más de 1000 m.s.n.m. de Etiopía y Sudán, África. En los años 575 y 890, los persas y los árabes lo llevaron a Arabia y Yemen, en tanto que los nativos africanos lo extendieron a Mozambique y Madagascar. De aquí los holandeses y los portugueses, entre los años 1600 y 1700, lo trasladaron a Ceylán, posteriormente a Java y a la India, así como a otras regiones de Asia y África. El gobernador de Java, en el año 1708 llevó algunas plantas a Holanda y al Rey de Francia, quien la sembró en los invernaderos de París y se extendió a la Guayana Francesa, África ecuatorial, Haití y Santo Domingo. En 1727 fue trasladado a Brasil, luego paso a Perú y Paraguay y, en 1825, a Hawái. Luego se extendió a Puerto Rico y a El Salvador en 1740; a Guatemala, en 1750; a Bolivia, Ecuador y Panamá en 1784; por último, a Costa Rica, procedente de Cuba y Guatemala, entre 1796 y 1798 (Alvarado & Rojas, 1994).

#### **1.1.2 Introducción de café a Colombia**

No existe plena certeza sobre las condiciones en que llegó el café a Colombia, los indicios históricos señalan que los jesuitas trajeron semillas del grano a la Nueva Granada hacia 1730, pero existen distintas versiones al respecto; la tradición dice que las semillas de café llegaron por el oriente del país, portadas por algún viajero desde las Guyanas y a través de Venezuela (FNC, 2010).

El testimonio escrito más antiguo de la presencia del cafeto en Colombia se le atribuye al sacerdote jesuita José Gumilla, quién en 1730, en su libro El Orinoco Ilustrado, registro la presencia de café en la misión de Santa Teresa de Tabajé, próxima a la desembocadura del río Meta en el Orinoco. El segundo testimonio escrito pertenece al arzobispo- virrey Caballero y Góngora, quién en 1787, dio a conocer en un informe a las autoridades españolas la presencia del cultivo en regiones cercanas a Girón, Santander y a Muzo, Boyacá (Reina, Silva, Samper & Fernández, 2007).

### 1.1.3 Botánica

La planta de café es una dicotiledónea, proviene de un arbusto perenne que pertenece a la familia de las *Rubiaceae*, puede alcanzar 10 m de altura de forma silvestre y en una plantación de café controlada alcanza 3 m de altura lo cual facilita el cosechado. Esta familia comprende alrededor de 500 géneros y más de 6000 especies. La mayor parte son árboles y arbustos que crecen en el estrato más bajo de los bosques tropicales. Las ramas primarias se oponen, en sentido horizontal o caídos, y las hojas crecen en pares en tallos cortos. Son de alrededor de 15 cm de longitud, de color verde oscuro y brillante en apariencia (Temis, López & Sosa, 2011).

#### Raíces

El sistema radicular del cafeto está compuesto por una raíz pivotante o central, a menudo múltiple, que rara vez se extiende a más de 45 centímetros de profundidad, también de cuatro a ocho raíces axiales que crecen verticalmente hacia abajo hasta 2-3 metros de profundidad, de raíces laterales superficiales que crecen paralelas a la superficie hasta 1-1,5 metros del tronco, raíces laterales sub-superficiales que se ramifican en el suelo en todos los planos, raíces portadoras de raíces absorbentes que se distribuyen uniformemente a unos 2,5 cm de distancia sobre las permanentes y raíces absorbentes que nacen uniformemente sobre las anteriores, a todas las profundidades, siendo más numerosas en el suelo (Arcila, 1987).

#### Tallo

Normalmente el cafeto es una planta unicaule aunque en ciertas condiciones presenta tallos múltiples. En un cafeto adulto, la parte inferior del tronco es de forma cilíndrica y la superior o ápice tiende a ser cuadrangular con las esquinas redondeadas y salientes. El tronco y las raíces primarias constituyen el armazón o esqueleto del cafeto (INIAP, 1993).

## **Ramas**

Las ramas primarias son de gran importancia ya que cuando se pierden por cualquier causa o por enfermedad no llegan a renovarse. De esta forma, el cafeto pierde una parte de su zona de producción de frutos. Las ramas secundarias y el tronco se pueden renovar a partir de yemas vegetativas que se encuentran en estado latente en los nudos de las ramas localizadas cerca del punto de inserción de las hojas con las ramas principales (Ibid. p. 8).

## **Hojas**

Las hojas constituyen el órgano de la planta donde se lleva a cabo los procesos de fotosíntesis y respiración. La fotosíntesis es el proceso mediante el cual el gas carbónico del aire se combina con el agua absorbida del suelo y forma azúcares. Para que ocurra este fenómeno, es necesaria la presencia de la luz solar y de la clorofila de las hojas. Los azúcares producidos que se forman en las hojas son distribuidos al resto de la planta a través del floema, que es un conjunto de vasos de translocación localizados en la corteza. Estos azúcares sufren transformaciones y forman los almidones, celulosas, grasas, aceite, alcaloides (cafeína) proteínas y sustancias que componen los tejidos de las plantas y desde luego, los frutos de café. La lámina foliar generalmente mide de 12 a 24 cm de longitud con un ancho de 5 a 12 centímetros, posee una forma elíptica o lanceolada, variando no solamente entre las especies y variedades sino también bajo condiciones de sombra regulada ya plena exposición solar (Ibid. p. 3).

## **Flores**

Las primeras flores son producidas entre los 3 y 4 años de edad, estas son de color blanco cremoso y de aroma dulce, aparecen en racimos en las axilas de las hijas, la corola mide cerca de 20 mm de longitud, que en la parte más alta se divide en cinco pétalos (Carke & Macrae, 1985). Después de que las flores se marchitan, los ovarios poco a poco se convierten en drupas ovaladas de hasta 18 mm de longitud y 10-15 mm de diámetro, estos se convierten en lo que será más adelante el grano de café. Una flor forma un grano de café, que es la razón por lo que la planta florea en diferentes etapas durante el año (Temis *et al.*, 2011).

## **Fruto**

El fruto o también llamado cereza es un fruto fresco completo del árbol del café que consta de una serie de capas que envuelven generalmente a dos granos de café. Las capas se denominan como cascara o pericarpio que es la envoltura externa del fruto de café, pulpa o exocarpio que es la carne o tejido de la fruta que se encuentra por debajo de la cascara, mucilago o mesocarpio que es la sustancia viscosa y pegajosa que se encuentra adherida al endocarpio, pergamino o endocarpio que es el tejido duro o compacto que recubre a la semilla o grano del café individualmente, cutícula que es la membrana delgada de color blanquecino que se encuentra adherida a la semilla o grano de café y finalmente, grano de café que es la semilla contenida en la fruta del café (SAGARPA, 2004).

## **Composición química del café en grano**

El café verde sin procesar contiene agua, proteínas, cafeína, lípidos, diversos carbohidratos y ácidos (principalmente solubles y no volátiles), trigonelina y minerales. El café tostado contiene azúcares reductores, azúcares caramelizados, hemicelulosa, fibra, proteínas, ácidos no volátiles (cafeico, clorogenico, cítrico, málico, oxálico, quínico y tartárico), cafeína, lípidos, trigonelina y cenizas, en las cuales los principales elementos constituyentes son potasio, fosforo y magnesio (Op. Cit., p. 12).

## **El mucílago y su composición**

El mucílago o mesocarpio es una parte constitutiva del café, que queda expuesto cuando éste es despulpado, cuando se separa el epicarpio o cascara del resto. El mesocarpio o mucílago queda expuesto adherido al endocarpio. Este compuesto es un coloide con fuerte capacidad de retención de agua. Por esto su contenido de humedad es muy variable de acuerdo con las condiciones climáticas que prevalezcan durante la recolección. El mucílago está compuesto por sustancias pépticas, azúcares, celulosa y cenizas entre otros. Y representa cerca del 14,85% del peso fresco del fruto (Peñuela, 2010). En la tabla 1, se muestra la composición del mucílago.

Tabla 1. Composición del mucílago de café.

Item	Min	Promedio	Max
Humedad (%)	89,4	92,2	95,8
Azúcares Reductores*	49,14	63,74	84,47
Azúcares Totales*	60,24	79,74	99,81
Contenido de Pectina*	4,6	10,975	19,08
Totales (ppm)	37.708	79.984	104.460

%b.s.:%en base seca.

Fuente: Peñuela. Estudio de la remoción de mucílago de café a través de fermentación natural. Colombia 2010.

### Ciclo de producción

En las condiciones climáticas colombianas el ciclo de producción del cafeto, es decir, el tiempo transcurrido desde la formación de nudos nuevos, donde se formarán las flores y frutos, hasta la maduración de los frutos es de 17-20 meses aproximadamente (Arcila, 1987).

### Ciclo de vida

El ciclo de vida del cafeto en condiciones comerciales alcanza hasta 20-25 años dependiendo de las condiciones o sistema de cultivo. A libre crecimiento, la planta comienza a producir frutos en ramas de un año de edad, continúa su producción durante varios años y alcanza su máxima productividad entre los 6 y 8 años de edad. La planta puede seguir su actividad por muchos años pero con niveles de productividad bajos (Arcila *et al.*, 2007).

#### 1.1.4 Aspectos generales sobre el cultivo del café

Según la FNC (2010), las condiciones agroecológicas óptimas para el café son:

## **Altitud**

Las condiciones ideales para el cultivo de café se encuentran entre los 1200 y 1800 m.s.n.m, por encima de este nivel altitudinal se presentan fuertes limitaciones en relación con el desarrollo de la planta.

## **Precipitación**

La cantidad y distribución de las lluvias durante el año son aspectos muy importantes, para el buen desarrollo del cafeto. Las precipitaciones cercanas a los 2.000 milímetros anuales, distribuidas a lo largo del año son las ideales.

## **Temperatura**

La temperatura promedio anual favorable para el cafeto se ubica entre los 17 a 23 °C.

## **Humedad relativa**

Cuando alcanza niveles superiores al 85%, se propicia el ataque de enfermedades fungosas que se ven notablemente favorecidas.

### **1.2 Beneficio húmedo del café**

El beneficio de café consiste en el proceso de transformación del grano de café cereza en pergamino seco. En el proceso se separan las partes del fruto y se seca el grano para su conservación. Existen en el mundo principalmente dos métodos: beneficio por vía húmeda y beneficio por vía seca. En Colombia, Costa Rica, Guatemala, México, El Salvador y algunos países del centro del África como Kenia, se beneficia el café por vía húmeda. El beneficio seco (Secado de café cereza) se realiza en Brasil y en la mayoría de los países del África. Por medio del proceso de beneficio por vía húmeda se obtiene café con características más suaves en la bebida, que el obtenido utilizando el proceso por vía seca (Puerta, 2000).

### **1.3 Aguas residuales del beneficio húmedo de café**

En Colombia, el proceso de beneficio del café se ha hecho tradicionalmente por vía húmeda y éste es uno de los factores a los cuales se debe la excelente calidad del café colombiano; no obstante, en este proceso se consumen grandes volúmenes de agua limpia y se contaminan cantidades equivalentes (Zambrano & Zuluaga, 1993).

El 72% de la carga contaminante generada por el proceso de beneficio húmedo del Café (PBHC), correspondientes a un valor de DQO de 82.080 mg.kg-1 de café cereza (cc), se ocasionan al despulpar y transportar la pulpa con agua, y el 28% restante de la contaminación corresponden a un valor de DQO 31.920 mg.kg-1 de cc, y es ocasionada por las mieles de lavado. El menor consumo específico de agua en fermentación natural, de 4,17 L.kg-1 de café pergamino seco (CPS), se obtiene lavando el café en el tanque con cuatro enjuagues, generando efluentes con un promedio de contaminación cercana a 26.500 ppm de DQO por kilogramo de CPS (Ramírez, Oliveros, & Sanz, 2015).

Las aguas residuales del beneficiado húmedo del café, comúnmente conocida como agua miel se consideran como una de las mayores contaminaciones orgánica en el sector cafetero. El impacto ambiental que conlleva la producción de café se debe principalmente a la pulpa y mucílago, residuos que representan un 40% y entre 15.5-22% en peso del fruto fresco, respectivamente. El tratamiento de aguas residuales del beneficiado de café conlleva como primera condición la recirculación del agua utilizada en el beneficio húmedo. Posteriormente le siguen los siguientes pasos: tamizado, neutralización, homogenización, floculación, decantación y filtración (Varela, 2013).

### **1.4 Cascarilla de arroz**

El arroz es el tercer producto agrícola en extensión, después del café y el maíz. Representa el 13% del área cosechada en Colombia y el 30% de los cultivos transitorios. Su producción representa el 6% del valor de la producción agropecuaria y el 11% de la actividad agrícola Colombiana. El valor generado por este producto es equivalente al 63% del valor constituido por el cultivo del café. De él se obtienen los primeros dos subproductos: el arroz integral y la cascarilla del arroz. Esta última se considera como desecho, aunque en ocasiones es usada

como combustible para el proceso de secamiento, o en viveros y cultivos, pero aún en forma incipiente (Espinal, Martínez, & Acevedo, 2005).

#### **1.4.1 Forma, tamaño y peso**

La cascarilla de arroz tiene forma de canoa, superficie rugosa y presenta un color amarillento, su longitud depende de la variedad, y esta entre 8 a 10 mm de largo por 1 a 2 mm de ancho, corresponde del 30 al 40% de su longitud. De acuerdo con su tamaño una cascarilla pesa entre 2,5 y 4,8 mg (Quinceno & Mosquera, 2010).

#### **1.4.2 Densidades**

La cascarilla de arroz presenta una densidad aparente de  $124 \text{ Kg/m}^3$ , siendo esta el cociente entre la masa y el volumen de una sola cascarilla. La densidad específica es de  $1420 \text{ Kg/ m}^3$ , siendo esta el resultado de la resta de la densidad aparente menos el volumen de todos los poros contenidos en una cascarilla (Ibid. p. 18).

#### **1.4.3 Porosidad**

La porosidad consiste en distinguir entre el volumen de aire de un lecho de cascarilla y el volumen de aire o de los poros en sí. El volumen de porosidad de la cascarilla es del 54% (Cadena & Bula, 2002).

#### **1.4.4 Composición química de la cascarilla de arroz**

Según Varón (2005), la composición química de la cascarilla de arroz está dada por: carbono 39,1%, Hidrogeno 5,2%, Nitrógeno 0,6 %, Oxigeno 37,2% Azufre 0,1% y cenizas 17,8%.

#### **1.4.5 Uso de la cascarilla de arroz**

Los estudios más relevantes a nivel nacional, acerca del uso de la cascarilla de arroz se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Estudio sobre alternativas de uso de la cascarilla de arroz.

ITEM	DESCRIPCION
A.	Obtención de etanol por vía fermentativa.
B.	Tostado para su uso como sustrato en el cultivo de flores.
C.	Generación de energía (Ladrilleras, secado de arroz y cereales).
D.	Combustión controlada para uso como sustrato de cultivos hidropónicos.
E.	Obtención de concreto, cemento y cerámicas.
F.	Aprovechamiento de la cascarilla de arroz en compostaje y como lecho filtrante para aguas residuales.
G.	Obtención de materiales adsorbentes.
H.	Fuente de sustancias químicas (carboximetilvelulosa de sodio; dióxido de SiO <sub>2</sub> , Nitruro de silicio; furfural).
I.	Producción de aglomerados (tableros).
J.	Material aislante en construcción.
K.	Cama en avicultura, porcicultura y en transporte de ganado.
L.	Cenizas en cultivos (frutas).

Fuente: Prada y Cortes (2010).

## 1.5 Guadua

### 1.5.1 Clasificación botánica

La guadua es una planta leñosa arborescente que pertenece a la familia del bambú, es una gramínea, un pasto gigante. En el mundo existen alrededor de 1300 especies de bambú leñosos y herbáceos distribuidos en Asia 63%, 32% en América y 5% en África y Oceanía. En América existen 440 especies de bambú, las más importantes del género Guadua son aproximadamente 16 especies. En Colombia se encuentran 5 formas gigantes denominadas guadua: Guadua Macana, Guadua Cebolla, Guadua Castilla, Guadua Cotuda y Guadua Amarilla (Perea, Villegas, Bahamon & Cortés, 2003).

La especie del género Guadua más importante en Colombia por sus características y propiedades es la *Angustifolia* Kunth, que se encuentra desde Panamá hasta Perú, es muy abundante y ampliamente usada en la construcción de vivienda en Colombia y en Ecuador. Tiene descrita una variedad *Guadua Angustifolia*, la variedad bicolor, y solo se ha encontrado en Colombia (Cely, Hernández & Gutiérrez, 2012).

### **1.5.2 Morfología general de la guadua**

Las partes principales de la guadua son: el rizoma, el tallo o culmo, las ramas y las hojas. El rizoma es el sistema de soporte de la guadua. Tiene una parte superficial y una parte subterránea donde se encuentran las raíces de la planta, las cuales se ramifican y propagan generando brotes de nuevas guaduas. El culmo del bambú guadua es su tallo y sale del rizoma. Se caracteriza por tener forma cilíndrica y hueca con segmentos formados por entrenudos, separados transversalmente por tabiques o nudos; la distancia entre los nudos puede variar entre 10cm y 40 cm de acuerdo a la variedad y posición en altura del culmo. El diámetro y el espesor de la pared del culmo disminuyen con la altura mientras la densidad, la concentración de fibras y la distancia entre nudos aumentan con ésta. Puede alcanzar alturas promedio de 18m a 20m y tener diámetros entre 5cm y 25cm (Takeuchi, 2014).

### **1.5.3 Propiedades físicas y mecánicas de la guadua**

#### **Propiedades físicas**

Las propiedades físicas más relevantes de la guadua, en relación con las características del material, sus propiedades mecánicas, y su incidencia en el comportamiento estructural, son la densidad y el contenido de humedad. La densidad hace referencia a la relación entre el peso anhidro y el volumen de un cuerpo. La gravedad específica del culmo es medida en función de las sustancias sólidas, es un indicador de las propiedades mecánicas, y sus valores dependen tanto de la estructura anatómica como de la cantidad y distribución de fibras y haces vasculares. La humedad corresponde al peso del agua contenida en la pared celular de la sección del culmo, y es de suma importancia porque incide en su resistencia (Osorio, Gonzales & Cortes, 2010).

#### **Propiedades mecánicas**

Dentro de las características de la guadua que se han analizado a través del tiempo, se encuentran diferentes tipos de resistencia como: resistencia a flexión, resistencia a compresión, resistencia a tracción y resistencia a cizalladura. (Ibid. p. 13).

#### 1.5.4 Usos de la guadua

Las partes que conforman la guadua pueden ser destinadas para distintos usos, como se muestra en la tabla 3.

*Tabla 3. Partes y usos de la guadua.*

Altura (m)	Partes	Usos
-3-0	Rizomas y raíces	Decoración y juegos, uniones en pórticos
0-3	Cepa (Parte inferior)	Columnas, vigas
3-11	Basa (Parte intermedia)	Paredes, casetones, vigas, etc.
11-18	Varillon (Parte superior)	Correas para techos de hojas o paja.
18-22	Copa	Se da como nutriente a suelos y animales.

*Fuente: Osorio, Gonzales y Cortes, (2010).*

#### 1.6 Heliconias

Las plantas emergentes, tienen las raíces sumergidas en el agua, pero parte de sus tallos y de sus hojas sobresalen del agua y se comportan como plantas en contacto con el aire. Estas plantas realizan a la transferencia del oxígeno hacia la zona radicular, donde se realiza el proceso de depuración. Las plantas degradan, absorben y asimilan en sus tejidos los contaminantes, pero también proporcionan una extensa superficie donde se posibilita el crecimiento bacteriano y se filtran los sólidos en suspensión (Arango, 2007).

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. Las Heliconias son plantas monocotiledóneas, con un crecimiento rizomatoso que emite brotes o vástagos. El rizoma es una estructura de tallo especializada, en la cual el eje principal de la planta crece horizontalmente, justo abajo de la superficie del suelo. Se pueden encontrar creciendo en áreas

húmedas, sub-húmedas, tropicales y subtropicales o con sistema de irrigación. El suelo a utilizar debe ser rico en materia orgánica, libre de piedras y terrones para facilitar un buen desarrollo radical. La proporción de tierra y materia orgánica descompuesta es de tres a uno (Sosa, 2013).

En el presente proyecto se utilizarán las plantas heliconias como agente Fito depurador para tratar el agua al final del sistema de aguas residuales de café, buscando que estén tomen los nutrientes que lleva el agua.

## **1.7 Sistemas de tratamiento de aguas residuales en Colombia**

Actualmente existe la tendencia de agrupar los métodos de tratamiento en dos grandes grupos e independientemente de la eficiencia remocional de la carga orgánica: operaciones unitarias y procesos unitarios. En el primer caso predomina la aplicación de principios físicos y en el segundo la actividad química o biológica. En el pasado, los procesos y las operaciones unitarias se agrupaban bajo la denominación de tratamiento primario, secundario y terciario. En el tratamiento primario se agrupaban las operaciones del tipo físico, en el secundario los procesos biológicos de asimilación de la materia orgánica y el término terciario o tratamiento avanzado se ha aplicado a las operaciones y procesos utilizados para eliminar contaminantes no removidos por el tratamiento primario o secundario (Rojas, 2002).

Según Lizarazo y Orjuela (2013), dentro de los sistemas de tratamiento de aguas contaminadas que se utilizan en Colombia se encuentran:

- Plantas de tratamiento
- Lagunas de oxidación o de estabilización
- Humedales
- Trampas de grasas
- Fosas sépticas

### **1.7.1 Sistemas modulares de tratamiento anaerobio SMTA**

El SMTA está compuesto por dos unidades que permiten la separación de fases de a digestión anaerobia: el reactor Hidrolítico/Acido génico (RHA) y el reactor

Metano génico (RM). En estudios realizados en los laboratorios de Cenicafé mediante separación de fases fue posible incrementar la carga orgánica por día desde 1,5 hasta 10kg de DQO por metro cubico de reactor metano génico, manteniendo una remoción de contaminación superior al 80% expresada como DQO (Zambrano, Isaza, Rodríguez & López, 1999).

### 1.8 Legislación ambiental colombiana

La normatividad colombiana vigente que establece los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales, es la resolución 631 de 2015 emitida por el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible.

En el capítulo VI de dicha resolución relacionado con los sectores de actividades productivas de agroindustria y ganadería se estipulan los parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos de aguas residuales no domesticas (ARND) a cuerpos de aguas superficiales de actividades productivas de agroindustria y ganadería. Puntualmente para el objeto de este proyecto se muestran en la siguiente tabla los parámetros estipulados para el beneficio del café con sus respectivos rangos permitidos.

*Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos máximos permisibles.*

PARAMETROS	UNIDADES	BENEFICIO DE CAFÉ PROCESO ECOLOGICO
		VALORES
Ph	Uds de pH	5.00 a 9.00
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L O <sub>2</sub>	3000
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/L O <sub>2</sub>	400
Solidos suspendidos totales (SST)	mg/L	800
Solidos sedimentables (SSED)	mg/L	10
Grasas y aceites	mg/L	30
Fosforo total	mg/L	Análisis y reporte
Nitrógeno total	mg/L	Análisis y reporte
Color real	m-1	Análisis y reporte

*Fuente: Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (2015).*

## 1.9 Antecedentes de tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica

En México Orozco y colaboradores (2005) evaluaron una planta piloto de tratamiento de aguas residuales del procesamiento del café, teniendo en cuenta parámetros como pH, DQO, cianuro, cadmio, zinc y níquel, que según los resultados obtenidos cumplían con las normas de dicho país.

En el Salvador una de las primeras investigaciones acerca del impacto ambiental de los Beneficios de Café se realizó en 1971 por Juan José Marengo Rivas para obtener el título de Ingeniero Químico de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura (FIA) de la Universidad de El Salvador (UES) el proyecto fue titulado como “Utilización de las Aguas Mielles del Café y el Extracto de la Pulpa” que estudia los posibles usos del agua miel sin tratar (Molina & Villatoro, 2006).

En Bolivia, una de las investigaciones relacionadas con el tratamiento de aguas residuales de café, fue realizada por Yacsik y Ramírez (2005), quienes definieron la metodología para el tratamiento de residuos generados en el beneficio del café en la planta de beneficio ecológico de ALEACAF.

En Guatemala la asociación nacional de café ANACAFE (2015) ha trabajado por varios años en la generación y transferencia de tecnología que permite un ahorro de hasta 90% en el volumen del agua que se utiliza en el proceso de beneficiado húmedo de café; este proceso ha requerido de la recirculación del agua, provocando una alta concentración de carga orgánica formada por el mucílago del fruto del café y algunas trazas de pulpa, por lo cual han realizado el tratamiento de aguas residuales del beneficiado húmedo de café mediante lagunas de oxidación.

En Cuba, Savigne y Romanovski (1998) realizaron un estudio acerca del impacto de los residuales del beneficio húmedo del café en la provincia Guantánamo Cuba, basados en los impactos ambientales potenciales en los cuerpos receptores de agua de la provincia Guantánamo, causado por un volumen de agua residual de 104000 m<sup>3</sup>/ año (1200 m<sup>3</sup>/día) y un aporte de carga orgánica de 416 000 kg DQO/año.

En lo relacionado con tratamientos de aguas residuales de café en Colombia se han realizado diferentes estudios sobre el impacto que general estos efluentes al medio ambiente, en donde se destacan los siguientes:

Matuk, Puente y Rodríguez (1997) realizaron un estudio de impacto biológico de los efluentes del beneficio húmedo del café, donde evaluaron el impacto biológico que generan los efluentes del beneficio húmedo de café tratados y sin tratar anaerobiamente, mediante pruebas de toxicidad en tres organismos pertenecientes a diferentes niveles tróficos y el efecto de los efluentes en el crecimiento del algas.

También, los autores Gutiérrez, Valencia y Aragón (2014), realizaron una investigación donde evaluaron la eficiencia de remoción de DBO y SS en sedimentador y lecho filtrante para el tratamiento de aguas residuales del beneficio del café que utilizan los pequeños cafeteros del sur del Huila, simulando el proceso de beneficio húmedo a nivel de laboratorio en un prototipo a escala 1:25.

La Federación Nacional de Cafeteros a través de sus diferentes dependencias (Cenicafé y Comités Departamentales de Cafeteros), ha realizado investigaciones, utilizando en algunos casos tratamientos físicos y en otros tratamientos químicos o biológicos para el tratamiento de las aguas residuales. Desde 1984, se han efectuado investigaciones relacionadas con el manejo eficiente del agua en el proceso de beneficio húmedo del café y con el tratamiento anaerobio de las aguas residuales generadas en el proceso, tendientes a encontrar la solución más económica para descontaminarlas. Dichas investigaciones se realizaron tanto a escala de laboratorio, de planta piloto y de campo, en las instalaciones de Cenicafé y en las fincas de productores de los departamentos de Caldas, Quindío, Risaralda y Valle (CENICAFÉ, 2011).

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Localización

El proyecto se ejecutó en la finca La Esperanza, ubicada en la vereda La Palma del municipio de Acevedo, al sur del departamento de Huila. La finca se encuentra a una altitud de 1600 m.s.n.m, con una temperatura promedio de 19° Celsius. Cuenta con un área de 7 hectáreas cultivadas en café de variedades caturra, castillo, gesha, catimore entre otros.

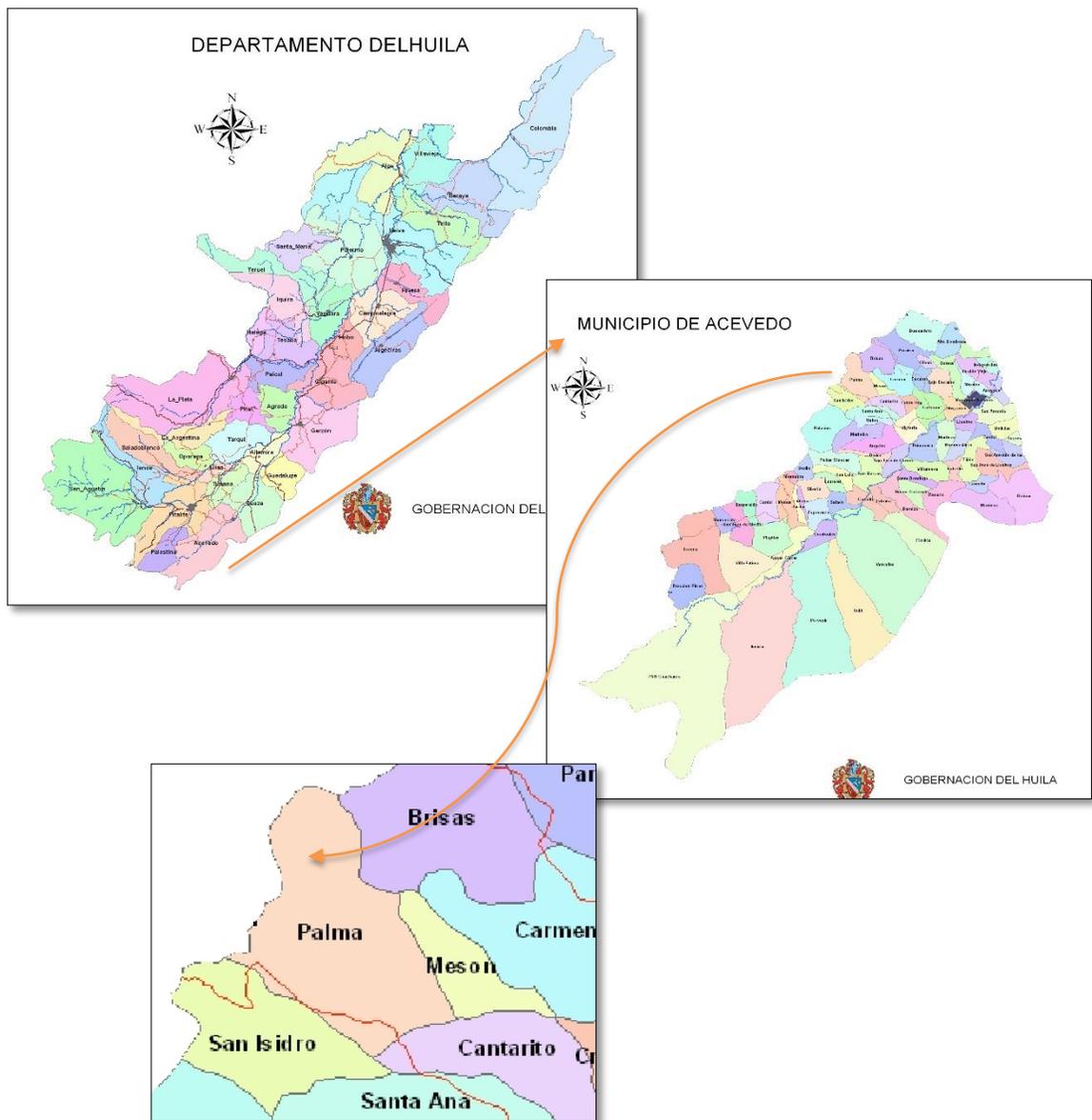


Figura 1. Localización del proyecto.

## **2.2 Fase uno. Identificación y concientización de la problemática con los productores**

### **2.2.1 Elaboración de encuesta**

Se realizó una recopilación de información en literatura acerca de los diferentes métodos de tratamiento de aguas residuales del café (TARC) registrados en el área de estudio. También, se realizaron visitas a fincas ubicadas en la vereda La Palma con el fin de obtener información sobre los sistemas de tratamiento de aguas residuales de café (STARC) que se tienen implementados en cada una de ellas y que actualmente se encuentran en funcionamiento. Con énfasis especial en la finca La Esperanza, lugar donde se desarrolló el proyecto. Con base a esta información se elaboró la encuesta (Anexo A).

### **2.2.2 Aplicación de encuesta**

Las encuestas se realizaron en 15 fincas de forma aleatoria, teniendo en cuenta que La vereda La Palma del municipio de Acevedo Huila, está constituida por aproximadamente 30 fincas cafeteras. Por lo tanto, con la información obtenida en cada una de las encuestas, se determinaron los tipos de sistemas de tratamiento de aguas residuales (STAR) utilizados normalmente, teniendo en cuenta los aspectos favorables y desfavorables de cada uno.

## **2.3 Fase dos. Propuesta de unidades para el STARC**

### **2.3.1 Reconocimiento del área de trabajo**

Se observó las condiciones del área de beneficio de café y disposición de aguas residuales existentes en la finca y se realizó un reconocimiento del terreno disponible para la construcción del sistema de aguas residuales planteado en el proyecto. Lo anterior, fue registrado mediante fotografías.

### **2.3.2 Selección de unidades**

Para la selección de las unidades del sistema de tratamiento de aguas residuales del beneficio del café (ARC), se tuvo en cuenta aspectos como: información referente al tema de estudio, necesidad de los caficultores de la región, bajo costo, facilidad de implementación, fácil operación y mantenimiento y eficiencia en remoción de demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), sólidos suspendidos totales (SST), el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS-2000 y la base teórica documentada en este trabajo.

Como tratamiento preliminar se propone una rejilla y un filtro con lecho de cascarilla de arroz, como tratamiento primario un tanque con semicírculos de guadua de flujo descendente, como tratamiento secundario un tanque con cuartos de guadua de flujo ascendente y para el tratamiento terciario un filtro de grava con plantas Helicones.

### **2.3.3 Caracterización de guadua y cascarilla de arroz**

Para la selección de la guadua que se utilizó, se realizaron mediciones de espesor y diámetro con el fin de determinar las propiedades físicas de los semicírculos y cuartos de círculos incorporados en los filtros anaerobios. De igual manera se realizó la caracterización del cisco teniendo en cuenta las variables anteriormente mencionadas.

Selección de guadua: se empleó guadua (*Angustifolia Kunth*) adquirida en la finca La Esperanza donde se realizó el proyecto. La guadua que se utilizó pertenece a la variedad Macana que se caracteriza por tener entrenudos cortos con distancias regulares, paredes gruesas y diámetros muy uniformes. Se escogieron 150 guaduas secas que median 6m de longitud cada una.

Corte: una vez seleccionada la guadua necesaria, se trasladó desde la finca hasta una ebanistería ubicada a las afueras de Pitalito, donde mediante el uso de una máquina cortadora se hicieron los cortes de los semicírculos y cuartos de círculo con un ancho de 2 cm.

Propiedades físicas de la guadua: para la determinación de las propiedades físicas de la guadua se tuvo en cuenta la metodología empleada por Torres y Claros (2017).

## **Determinación del volumen (cm<sup>3</sup>), método medición directa**

Para la determinación del volumen de los semicírculos y cuartos de círculos se emplearon 30 muestras de cada uno obtenidas de forma aleatoria. Se dimensionó cada pieza teniendo en cuenta las siguientes variables: longitud, diámetro externo y diámetro interno.

Los datos obtenidos del dimensionamiento de los semicírculos se emplearon para calcular el volumen promedio de las muestras seleccionadas mediante la siguiente fórmula:

$$Vp = \frac{\pi * (De - Di)^2}{2} * L$$

Dónde:

Vp= volumen promedio (cm<sup>3</sup>)

De= Diámetro externo promedio (cm)

Di= Diámetro interno promedio (cm)

L= Longitud(cm)

La fórmula empleada para la determinación del volumen promedio de los cuartos de círculos es la siguiente:

$$Vp = \frac{\pi * (De - Di)^2}{4} * L$$

## **Determinación de porosidad del lecho (%) mediante método volumétrico**

La porosidad se determinó mediante la utilización de un recipiente de volumen conocido (12 litros), también, teniendo en cuenta el volumen ocupado por los semicírculos y cuartos de círculos en el recipiente, y finalmente, el volumen real del total de semicírculos y cuartos de círculos que ocupan este volumen.

El volumen promedio que ocupa cada semicírculo y cuarto de círculo se determinó teniendo en cuenta las dimensiones de 30 piezas.

Finalmente, la porosidad se determinó mediante la siguiente formula:

$$P\% = \left( \frac{Va - Vr}{Va} \right) * 100$$

Dónde:

P%= Porosidad del medio

Va= Volumen ocupado por los semicírculos y cuartos en el recipiente (ml)

Vr= Volumen real del número de semicírculos y cuartos de círculos utilizados (ml)

### **Caracterización de la cascarilla de arroz**

Para la determinación de las propiedades físicas del cisco se realizaron las mediciones necesarias para el cálculo de las diferentes variables como lo son volumen, densidad y porosidad.

Para el cálculo de la porosidad se utilizó la siguiente formula:

$$Porosidad = \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_r} \right) * 100$$

#### **2.3.4 Caudal de diseño**

Para el diseño de las unidades de tratamiento de las aguas residuales del café (TARC), se calculó el caudal correspondiente para el proyecto teniendo en cuenta los siguientes aspectos según Villanueva (2012):

La producción por hectárea de café cereza, el periodo pico más alto, el consumo de agua en el beneficio por unidad de café baba. Lo anterior, está expresado en la siguiente ecuación:

$$Q_b \left( \frac{\text{Litro}}{\text{hectaria} * \text{día}} \right) = \frac{\text{Producción Pico}}{\text{No. días pico}} * \frac{\text{Cantidad de agua}}{\text{Unidad de café baba}}$$

### **2.3.5 Diseño conceptual**

Se realizó la caracterización del afluente, la descripción del sistema presentado, y cada una de las unidades mediante un esquema general, se realizó el diagrama de procesos, se calcularon las remociones teóricas esperadas del sistema propuesto y la caracterización del efluente mediante concentraciones teóricas esperadas.

### **2.3.6 Diseño físico**

Se realizó el dimensionamiento de las unidades del sistema, el presupuesto correspondiente, los planos de sistema de tratamiento de aguas a implementar (Anexo B, C, D), el manejo de subproductos, la operación y mantenimiento de cada una de las unidades del sistema.

## **2.4 Fase tres. Adecuación**

Teniendo en cuenta las condiciones de las instalaciones de beneficio del café y la disposición de las aguas residuales en la finca La Esperanza; se adecuó el espacio disponible para la implementación del sistema. Lo anterior, se apoyó mediante registro fotográfico.

## **2.5 Fase cuatro. Instalación**

Después de realizada la adecuación correspondiente en cada uno de los espacios destinados para la implementación del sistema, se procedió a instalar cada unidad en los espacios previstos para cada una y con los materiales correspondientes. Lo anterior, se registró mediante fotografías.

## **2.6 Fase cinco. Análisis de muestras del efluente del sistema**

### **2.6.1 Muestreo y análisis de laboratorio.**

Para la realización del muestreo se tuvo en cuenta el protocolo de muestras del IDEAM (2007) para la toma de muestras de aguas residuales.

En los primeros días de instalación del sistema de tratamiento de aguas residuales de café, se tomaron tres muestras del agua miel a la salida del beneficio ecológico con que cuenta la finca, utilizando tres recipientes plásticos con capacidad de un litro cada uno, rotulado previamente con información del muestreo y fueron llevados al laboratorio AMBILAB, para análisis de DBO5 Y SST, con el fin de determinar las condiciones fisicoquímicas del agua antes de ingresar al sistema de tratamiento.

Para la determinación de la DBO5 se empleó la técnica de incubación 5 días luminiscencia con método SM 5210 B, ASTM D888-09 método C; para el análisis de SST se utilizó la técnica gravimetría secado a 103°C – 105°C, método SM 2540 D; para el análisis de pH se utilizó la técnica electrométrica, método SM 4500-H+B, para fósforo total la técnica digestión – colorimetría con ácido ascórbico método SM 4500-PB, E y finalmente para el nitrógeno amoniacal técnica colorimetría, método SM 4500 NH3-B, ASIAN JOURNAL OF APPLIED SCIENCES 2019.2, (4):363-371.

Al mes de funcionamiento del sistema, se tomaron tres muestras por cada unidad del sistema, con el fin de conocer la remoción de DBO5 y SST tras el paso del agua por cada uno de ellos. Para ello se utilizaron recipientes plásticos.

De este grupo de muestras, las primeras tres fueron tomadas a la salida del tratamiento preliminar (tanque de cascarilla de arroz), las siguientes tres muestras se tomaron a la salida del tanque anaerobio con guadua 2 y finalmente, tres muestras a la salida del tanque con plantas, con una muestra adicional para análisis de pH, fósforo total y nitrógeno amoniacal.

También, se realizó un análisis microbiológico del efluente en el laboratorio de microbiología del Tecnoparque Agroecológico Yamboró del SENA Pitalito, mediante muestras que fueron tomadas durante cuatro días consecutivos, con el fin de observar la dinámica poblacional de los microorganismos en diferentes tiempos. En total se tomaron 4 muestras en recipientes plásticos con capacidad de 600 mililitros, se preparó el material y los medios de cultivo diferenciales para las diferentes pruebas de incubación y crecimiento de bacterias.

### **2.6.2 Análisis de resultados**

Se realizó un análisis de los resultados obtenidos de cada muestra analizada por el laboratorio de microbiología ubicado en el tecnoparque Yamboro Sena y en el laboratorio AMBILAB ubicado en Pitalito Huila. De igual manera, se analizaron todos los aspectos relevantes para el desarrollo del proyecto.

### 3. RESULTADOS Y ANALISIS

#### 3.1 Identificación y concientización de la problemática con los productores

El café es el cultivo nacional por excelencia y se encuentra ubicado a lo largo de toda la geografía de montaña colombiana. El área sembrada es de 948 mil hectáreas, 19% del área agrícola, ubicadas en fincas que abarcan 3,1 millones de hectáreas. Visto de otra manera las fincas cafeteras ocupan el 66% del área cultivada en el país (5 millones de hectáreas aproximadamente) y es el producto con la mayor participación entre los diferentes cultivos registrados, lo que pone de presente la importancia del café en el sector agrícola colombiano (FNC, 2014).

Según la FNC (2014) en la distribución de las regiones cafeteras por departamento se observa su amplia presencia en 22 de ellos y en 590 municipios con una participación creciente en los departamentos del sur. Actualmente en Huila, Cauca y Nariño se localiza el 30% del área sembrada y de la producción (Tabla 5).

*Tabla 5. Distribución del área cafetera por regiones.*

Región	Fincas	Área Total (Hectáreas)	Área Café (Hectáreas)	Participación (%)
Norte	34.542	533.906	86.186	9
Centro Norte	203.696	958.774	237.572	25
Centro Sur	172.149	814.203	337.986	36
Sur	276.198	819.595	286.788	30
Total Nacional	686.585	3.126.479	948.533	100

*\*Agrupación de los departamentos en cuatro regiones de acuerdo con sus similitudes en las épocas de cosecha y las condiciones agroclimáticas. Región Norte: Cesar, Norte Santander, Magdalena, La Guajira, Bolívar. Centro Norte: Antioquia, Santander, Cundinamarca, Boyacá, Meta, Casanare, Choco. Centro Sur: Tolima, Caldas, Valle, Risaralda, Quindío. Sur: Huila, Cauca, Nariño, Caquetá, Putumayo.*

*Fuente: FNC (2014).*

La Caficultura del Departamento del Huila es desarrollada por más de 68 mil caficultores en 35 municipios cafeteros de los 37 que conforman el total del departamento, es decir el 94.6%; lo que se constituye en la principal fuente de ingreso para más de 274 mil personas en el sector rural. Por ser intensiva en mano de obra, es la actividad agropecuaria que más empleos genera en el departamento. La Caficultura es una actividad de pequeños propietarios. El 96% de los productores del Departamento, tienen cafetales inferiores a las 5 hectáreas; su tamaño promedio es de 1,4 hectáreas (FNC, 2011).

De los 37 municipios que hacen parte del departamento del Huila, Pitalito es reconocido por la Gobernación del Huila y por los 35 municipios cafeteros del departamento, como el primer municipio productor de café en Colombia (CDC; 2007).

Por lo anterior, en el Departamento del Huila, debido a la gran extensión del cultivo de café y a la generación de aguas miel de éste, se presenta un problema significativo de contaminación de las fuentes hídricas superficiales cercanas a las veredas, fincas y centros poblados (Villanueva, 2012).

Las aguas residuales del café o aguas miel, son aquellas que se generan del beneficio del café, donde utilizan grandes volúmenes de agua limpia, considerándose las aguas residuales que generan mayor impacto en contaminación ambiental. El sistema de tratamiento más común en el Departamento del Huila es el compuesto por un Desnatador y un Filtro (Villanueva, 2012).

El estudio de Huella Hídrica en Colombia según los productos agropecuarios más cultivados realizado por Arévalo (2011), muestra una alta necesidad de agua para el cultivo de café, a diferencia de los demás productos cultivados en el país (Figura 2).

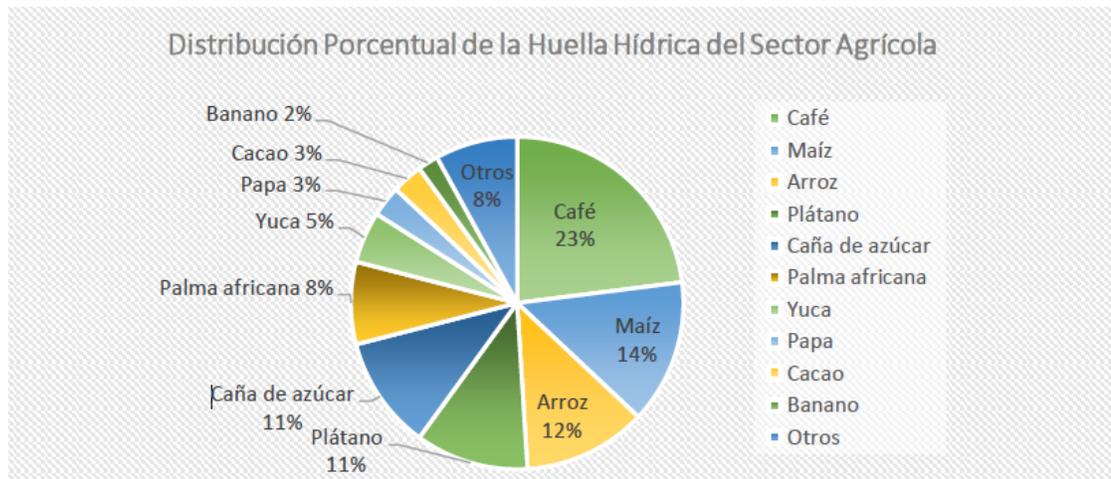


Figura 2. Distribución porcentual de huella hídrica total del sector agrícola. Fuente: Arévalo (2011).

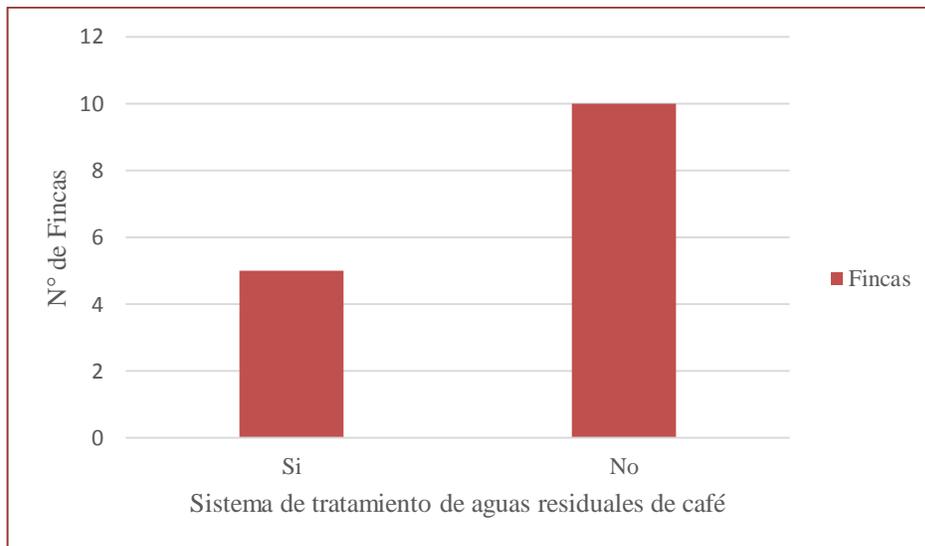
En la figura 2, se puede observar que la Huella Hídrica del Sector Agrícola mide el impacto de los cultivos y sus necesidades sobre la gestión del agua utilizada para su desarrollo.

Teniendo en cuenta las cifras anteriores se resalta la gran necesidad de que los pequeños y grandes productores de café implementen en sus fincas sistemas de descontaminación que mitiguen el gran impacto ambiental que generan los grandes volúmenes de agua producto del beneficio húmedo del café.

### 3.1.1 Selección de fincas cafeteras vereda La Palma

La vereda La Palma del municipio de Acevedo Huila, está constituida por aproximadamente 30 fincas cafeteras, de las cuales se caracterizaron de forma aleatoria 15 de ellas para determinar mediante aplicación de una encuesta el tipo de tratamiento de aguas residuales que tienen implementado.

De acuerdo con la información recopilada, de las 15 fincas cafeteras que participaron con la encuesta, 5 fincas cuentan con algún tipo de tratamiento de aguas residuales de café y 10 fincas no tienen actualmente ningún sistema implementado o en funcionamiento (Figura 3).



*Figura 3. Fincas con sistemas de tratamientos de aguas residuales de café habilitado.*

Por otra parte, los sistemas de tratamiento de aguas residuales de café que tienen en funcionamiento las 5 fincas objeto de este estudio son: desnatador, filtro de grava, lecho de secado y microorganismos. El beneficio de café lo realizan mediante lavado tradicional.

El lavado tradicional o convencional es el proceso que normalmente se ha utilizado en Colombia para transformar el fruto en semilla y en el cual se utiliza agua en las etapas de despulpado, lavado y transporte (del fruto, del café despulpado y del café lavado), con un consumo global cercano a los 40 litros de agua por cada kilogramo de beneficio tradicional de café pergamino seco (cps) y en el cual no se realiza manejo a los subproductos obtenidos (Rodríguez, Sanz, Oliveros & Ramírez, 2015).



*Figura 4. Beneficio tradicional de café. Fuente: Rodríguez, Sanz, Oliveros & Ramírez, 2015.*



*Figura 6. Vertimiento directo de la finca El Jardín, extensión 2 hectáreas.*



*Figura 5. Vertimiento directo de la finca El Retorno, extensión 3 hectáreas.*



*Figura 8. Vertimiento directo de la finca Santo Domingo, extensión 5 hectáreas.*



*Figura 7. Vertimiento directo de la finca EL Porvenir, extensión 10 hectáreas.*



*Figura 9. Desnatador finca El Placer, 4 hectáreas.*



*Figura 10. Tanques para filtro anaerobio sin funcionamiento, finca El Sinú, 12 hectáreas.*



*Figura 11. Sistema de tratamiento de aguas residuales de café implementado en la finca La Suiza, 8 hectáreas.*

Las fincas cafeteras objeto de este estudio, estuvieron de acuerdo con la implementación de un sistema de tratamiento de aguas residuales de café que sea práctico, eficiente y económico.

Con base en la información recopilada por medio de las encuestas en las fincas de la vereda La Palma se evidencia la poca y en algunos casos nula existencia de sistemas de descontaminación de aguas del beneficio de café, lo que conlleva a un deterioro de las fuentes hídricas aledañas a la zona y a la fauna acuática que pueda encontrarse en dichas fuentes.

### **3.2 Propuesta de unidades para el STARC**

#### **3.2.1 Reconocimiento del área de trabajo**

Se observaron las condiciones del área de beneficio de café y disposición de aguas residuales existentes en la finca y se realizó un reconocimiento del terreno disponible para la construcción del sistema de aguas residuales planteado en el proyecto, como se especifica a continuación:

La finca La Esperanza cuenta con una extensión de 7 hectáreas donde se encuentran cultivados aproximadamente 35.000 árboles de café de variedades como Caturra, Castillo, Colombia, Gesha y Catimor. Para el proceso de

postcosecha del café de esta finca se tiene implementado un beneficiadero que consta de las siguientes áreas de trabajo:

**Área de recepción o Tolva:** esta área se encuentra construida en concreto y en ella se realiza el recibo del café en cereza, donde cada uno de los recolectores pesa el café cosechado durante el día y posterior a esto, es depositado en la tolva que lo conduce hacia la despulpadora.



*Figura 12. Área de recepción o tolva.*

**Área de despulpado:** el café proveniente de la tolva es recibido por la máquina despulpadora marca Eterna que retira la cascara del grano y la expulsa hacia el

área de almacenamiento de la pulpa (fosa), y los granos de café son conducidos hacia el área de fermentación.



*Figura 13. Área de despulpado.*

**Área de almacenamiento de la pulpa:** esta área también es denominada “fosa” que cuenta con un sistema de escurrimiento de lixiviados y está construida con piso de cemento y paredes de guadua; en ella es almacenada la cascara del café para su adecuada descomposición y posterior utilización como abono para el cultivo.



*Figura 14. Área de almacenamiento de pulpa.*

**Área de fermentación:** los granos provenientes de la despulpadora son almacenados en un tanque de concreto recubierto en baldosa, en donde se lleva a cabo la fermentación de los granos hasta que lleguen al punto óptimo para su lavado, posterior a esto, los granos son conducidos a un desmucilagador mediante un tornillo sin fin.



*Figura 15. Área de fermentación.*

**Área de lavado:** esta área cuenta con un sistema de lavado diferente al tradicional ya que el café no es lavado directamente en el tanque sino que es conducido a un desmucilagador que retira el mucilago presente en el grano a través de una fricción mecánica y utilizando una pequeña cantidad de agua para realizar este proceso. Producto de este proceso resultan las aguas residuales de café conocidas como aguas mieles, que son vertidas a la fuente hídrica sin ningún tipo de tratamiento.



*Figura 16. Área de lavado.*

**Área de secado:** el café lavado es pesado para conocer la cantidad que se llevará al área de secado y en esta área se realiza el proceso de secado mediante dos modalidades que son secado solar y también secado mecánico. El objetivo de este proceso es retirar la humedad presente en el grano hasta que ésta llegue a un rango de 10% a 12% que es lo adecuado para comercializar el grano en pergamino seco.



*Figura 17. Área de secado*

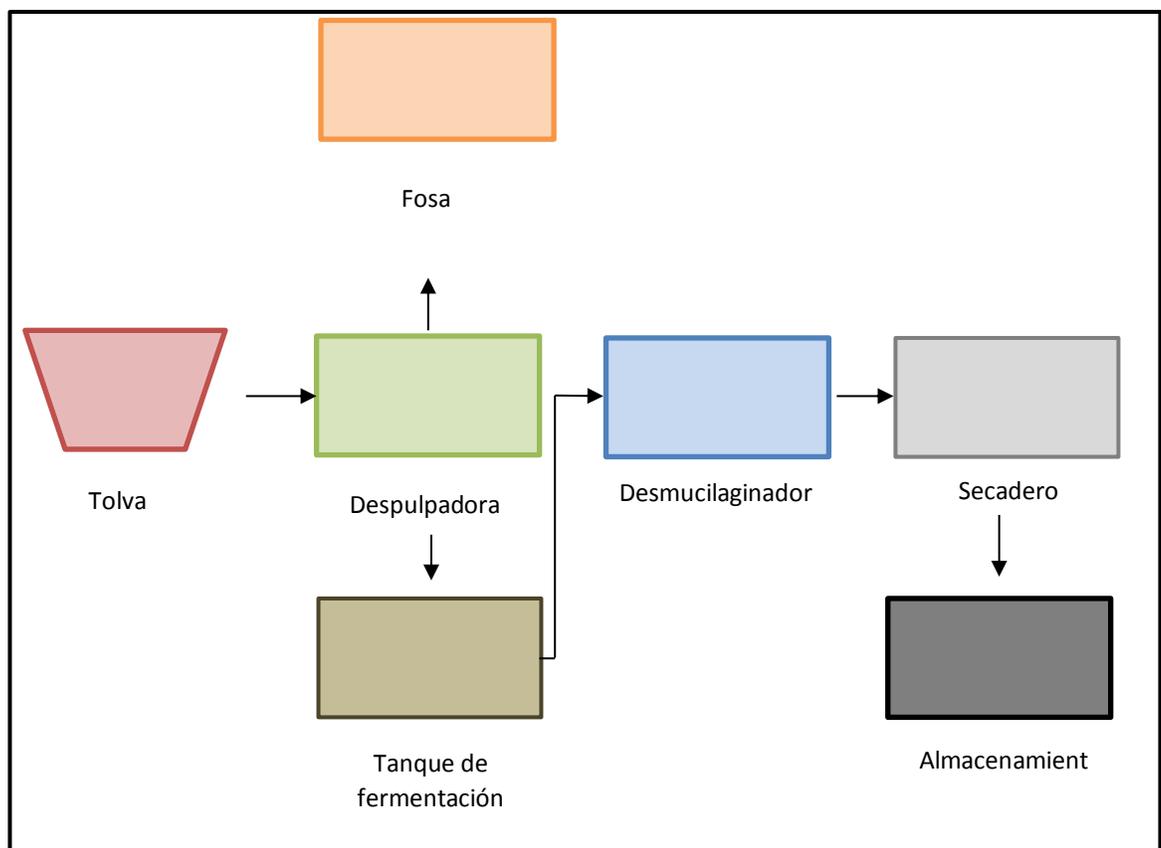
**Área de almacenamiento:** el café pergamino seco obtenido luego del proceso de secado es depositado en sacos de fique y almacenado en un área con buena ventilación destinada para dicho fin y posteriormente se realiza la comercialización.



*Figura 18. Almacenamiento.*

El proceso de beneficio del café que se lleva a cabo en la finca La Esperanza reduce notablemente el gasto de agua respecto al sistema de lavado tradicional utilizado en la gran mayoría de pequeñas fincas cafeteras. A pesar de la mínima cantidad de agua utilizada es necesario un sistema de descontaminación de estas aguas ya que están siendo vertidas sin ningún tratamiento a la quebrada Cantarito, que a su vez recibe toda el agua residual proveniente de las fincas de la vereda.

La quebrada Cantarito desemboca en el río Suaza que nace en las estribaciones del Cerro Punta, en jurisdicción del municipio de Acevedo. Además de recibir el afluente de la quebrada Cantarito, por la izquierda recibe el río Riecito y los arroyos o quebradas del Salado, Cascajosa, La Calle, Los Ángeles, Atiguache, Carbona, Guache, Marajó, Cangrejo y El Queso; por la margen derecha, los arroyos de Aguas Claras, Quisayá, Danta, La Vargas, Barniza, Cusumbe Tijiñá y Anayaco (Alcaldía de Acevedo, 2016).



*Figura 19. Esquema general de unidades de operación finca La Esperanza.*

### 3.2.2 Selección de unidades

Como tratamiento preliminar se propone una rejilla y un filtro con lecho de cascarilla de arroz, como tratamiento primario un tanque de flujo descendente, como tratamiento secundario un tanque de flujo ascendente y para el tratamiento terciario un filtro con plantas acuáticas.

#### - Tratamiento preliminar

**Rejilla:** esta estructura cumple la función de retener sólidos y materiales extraños provenientes de las aguas mieles del café y del proceso de recolección del mismo. Está ubicada al inicio del STARC y después del canal de salida del desmucilagador; la rejilla está construida con polisombra y un marco de guadua.

**Filtro con cascarilla de arroz:** este filtro de flujo descendente tiene la función de remover sólidos suspendidos totales con el objetivo de separar estos del agua y obtener un agua menos densa que la inicial para su posterior tratamiento. Está ubicado después de la rejilla retenedora de sólidos y construido con un tanque de paredes y piso de concreto, cuenta con un falso fondo seguido de una base de guadua recubierta de polisombra como soporte de la capa de cisco que actúa como lecho filtrante y finalmente cuenta con un borde libre.

#### - Tratamiento primario

**Filtro anaerobio con guadua 1:** esta unidad está conformada por un tanque de polietileno con capacidad de 1000 litros que recibe un flujo descendente y en su interior parte de su volumen está ocupado con semicírculos de guadua que sirven como cama hospedera de los microorganismos que reducen la DBO5. El agua tratada en este filtro es conducida hacia la siguiente unidad por medio de una tubería de pvc instalada en la parte inferior del tanque.

### - Tratamiento secundario

**Filtro anaerobio con guadua 2:** es un tanque cilíndrico de flujo ascendente fabricado en polietileno, presenta una capacidad de 1000 litros y en su interior se encuentran cuartos de círculo de guadua. Este filtro se instaló con el objetivo de reducir la DBO5. El agua residual obtenida es conducida al tratamiento terciario mediante tubería de pvc.

### - Tratamiento terciario

**Filtro con plantas acuáticas:** esta unidad está conformada por un tanque fabricado de polietileno, con capacidad de 250 litros, en su interior se encuentra depositada grava y plantas (*Heliconia L.*) que ayudan en la depuración de materia orgánica presente en el agua residual tratada.

### 3.2.3 Caracterización de guadua y cisco de arroz

#### Determinación del volumen (cm<sup>3</sup>), método medición directa

La tabla 6, muestra las dimensiones promedio obtenidas después de realizar los cálculos correspondientes para la determinación del volumen.

*Tabla 6. Dimensiones promedio de los semicírculos y cuartos de círculo.*

<b>Cama hospedera</b>	<b>Espesor (cm)</b>	<b>Perímetro (cm)</b>	<b>Diámetro ext (cm)</b>	<b>Diámetro int (cm)</b>	<b>Volumen (cm<sup>3</sup>)</b>
Semicírculos	0,8	43,1	13,7	12,1	9,1
Cuartos de círculo	1,1	21,5	6,9	4,8	7,3

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos se puede evidenciar que la guadua empleada no presenta características físicas (espesor, perímetro, diámetro y volumen) homogéneas que generen un valor estandarizado en cuanto a su volumen. Además, se observó que los cuartos de círculo requieren menos

espacio, por lo tanto, es necesaria mayor cantidad de materia prima para ocupar un mismo volumen.

### **Determinación de porosidad del lecho (%) mediante método volumétrico**

En la tabla 7, se describe la porosidad correspondiente a semicírculos y cuartos de círculos, siendo esta de 90,8 y 81,7, respectivamente.

*Tabla 7. Porosidad de semicírculos y cuartos de círculos.*

Item	Semicírculos	Cuartos de círculos
Va (ml)	12000	12000
Vr (ml)	1101,1	2197,3
P(%)	90,8	81,7

*\*P%= Porosidad del medio*

*\*Va= Volumen ocupado por los semicírculos y cuartos en el recipiente (ml)*

*\*Vr= Volumen real del número de semicírculos y cuartos de círculos utilizados (ml)*

### **Caracterización de la cascarilla de arroz**

Para la determinación de las propiedades físicas del cisco se realizaron las mediciones necesarias para el cálculo de las diferentes variables como lo son volumen, densidad y porosidad.

Para el cálculo de la porosidad se utilizó la siguiente formula:

$$Porosidad = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_r}\right) * 100$$

Para obtener el dato de la densidad aparente ( $\rho_a$ ) se tomaron los valores del peso del cisco, obtenido al llenar un recipiente con volumen conocido de 6 litros, y para obtener el dato de la densidad real ( $\rho_r$ ) se realizó el volumen de las partículas presentes en la masa conocida, todo lo anterior como se muestra a continuación:

$$\rho_a = \frac{m}{v}$$

$$\rho_a = \frac{493.6 \text{ gr}}{6 \text{ litros}}$$

$$\rho_a = 82.3 \text{ gr/lt}$$

$$\rho_r = \frac{m_{real}}{v_{real}}$$

$$\rho_r = \frac{493.6 \text{ gr}}{0.9872 \text{ lt}}$$

$$\rho_r = 500 \text{ gr/lt}$$

Teniendo el dato de ( $\rho_a$ ) se procedió a calcular la porosidad:

$$Porosidad = \left(1 - \frac{82.3 \text{ gr/lt}}{500 \text{ gr/lt}}\right) * 100$$

$$Porosidad = 83.54 \%$$

En comparación de los datos calculados con los datos teóricos (tabla8), se puede observar que respecto a la porosidad el valor teórico es de 92.7% mientras el valor calculado es 83.54%.

*Tabla 8. Propiedades físico-químicas del cisco.*

VARIABLE	VALOR
Humedad (%)	8,7
Densidad real (g/cm <sup>3</sup> )	1,57
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	0,115
Espacio poroso total (%vol)	92,7
Capacidad de aireación (%vol)	79,5
Volumen de agua* (%vol)	13,2
Capacidad de retención total de agua (g/l material)	13
Contracción (%.vol)	No apreciable
Materia orgánica total (%)	83
Relación C/N	48,2

*Fuente: Universidad politécnica de Valencia.*

### 3.2.4 Caudal de diseño

En la finca La Esperanza objeto de este estudio se llevan registros diarios de recolección y otras labores, de los cuales se tomaron los datos de producción anual en el año 2017 que reportó una producción de café en cereza de 72.293 kg/año para una extensión de 6 hectáreas. Para el cálculo del caudal de diseño se tuvo en cuenta la producción anual de café en cereza, café en baba y el consumo de agua promedio en el beneficio.

El cálculo del caudal de diseño se realizó mediante las siguientes ecuaciones:

Producción de café baba por hectárea (Pr**cb**): en este paso se tomó la cantidad de café en cereza producida por hectárea y se multiplicó por el factor de conversión que según Montilla *et al.*, (2008) para conversión de café cereza a café baba es 0.55.

$$Pr_{cb} = \frac{P_{cc}}{ha} * 0.55$$

$$Pr_{cb} = \frac{12049kg}{ha * año} * 0.55$$

$$Pr_{cb} = 6626.95 \frac{kg}{ha} * año$$

Producción de café baba durante la cosecha (Pr**cbc**): para determinar cuánto es el café en baba producido durante la época de cosecha, según Villanueva (2012), el 66% de la producción de café cereza en el año corresponde a la época de cosecha y el 33% para el resto del año.

$$Pr_{cbc} = Pr_{cb} * 0.66$$

$$Pr_{cbc} = 6626.95 \frac{kg}{ha} * año * 0.66$$

$$Pr_{cbc} = 4373.78 \frac{kg}{ha} * año$$

Producción de café baba en la época pico (Pr**cbep**): la producción de café baba en la época pico se calcula multiplicando por 0.5 ya que de la totalidad de café recolectado al año un 50% corresponde al producido en la época pico de cosecha y de la totalidad del tiempo de cosecha se estima que son 15 días los días pico.

$$Prcebep = Prcbc * 0.5$$

$$Prcebep = \frac{4373.78kg}{ha} * año * 0.5$$

$$Prcebcep = 2186.89 \frac{kg}{ha}$$

Producción de café baba durante el día pico (Prcbd<sub>p</sub>):

$$Prcbd_p = \frac{Prcebep}{15d}$$

$$Prcbd_p = \frac{2186.89}{15d}$$

$$Prcbd_p = \frac{145.8kg}{ha} * dia$$

Caudal del agua de beneficio (Q<sub>b</sub>):

Con base en los cálculos realizados para determinar el caudal utilizado en la finca La Esperanza para el lavado del café mediante el sistema de beneficio utilizando desmucilaginador, se obtuvo un caudal de 0.76 litros por kilogramos de café en baba, como se muestra a continuación:

- Caudal de entrada aforado (Q<sub>a</sub>)= 0.37 litros/segundos
- Kilogramos de café baba (P<sub>CB</sub>)= 875 Kg de café baba
- Tiempo total de lavado (T<sub>I</sub>)= 30 minutos = 1800 segundos

Para determinar el gasto de agua (G<sub>a</sub>) durante el tiempo que permanecen encendidos los equipos de lavado, se planteó la siguiente fórmula.

$$G_a = T_l * Q_a$$

$$G_a = 1800 \text{ seg} * 0.37 \frac{lt}{seg}$$

$$G_a = 666 \text{ litros}$$

Con base en el dato anterior, se determinó el caudal (Ql) utilizado en la finca para el lavado de cada kilogramo de café en baba.

$$Ql = \frac{Ga}{P_{CB}}$$

$$Ql = \frac{666 \text{ litros}}{875 \text{ kilogramos Cafe baba}}$$

$$Ql = 0.76 \text{ Lt/Kg}_{CB}$$

Teniendo el dato del gasto de agua por kilogramo de café baba, fue aplicado en la siguiente formula:

$$Qb = Prcbdp * L/kgcb$$

$$Qb = \frac{145.8kg}{ha} * dia * 0.76 \text{ L/kgcb}$$

$$Qb = 110,8 \frac{L}{ha * día}$$

Para el cálculo del caudal de agua residual del café, se utiliza el área de café en producción en la finca (Af), que es de 6 hectáreas y se procede como se muestra a continuación:

$$Q_{ARC} = Q_b * A_f$$

$$Q_{ARC} = 110,8 \frac{L}{ha * día} * 6ha$$

$$Q_{ARC} = 664,8 \text{ L/d}$$

### 3.2.5 Diseño conceptual

Las aguas residuales provenientes del beneficio húmedo del café pasan inicialmente por una rejilla que cumple la función de retener sólidos y cuerpos extraños de diámetro 5 milímetros, después el agua ingresa a un filtro con lecho

de cascarilla de arroz que tiene como función remover solidos suspendidos totales (SST) presentes en el agua.

El efluente del filtro con lecho de cascarilla de arroz pasa al filtro anaerobio de guadua 1 de flujo descendente, después pasa al filtro de guadua 2 de flujo ascendente los cuales tienen en su interior semi círculos y cuartos de círculos de guadua, respectivamente. El uso de los trozos de guadua fue con el fin de brindar una cama hospedera a los microorganismos que se pueden desarrollar en este ambiente para la remoción de DBO5. Finalmente, el efluente del filtro ascendente es conducido a un filtro de flujo horizontal que en su interior tiene grava y en la superficie una capa de plantas que aumentan la remoción de DBO5 y adicionalmente remueven Nitrógeno (N) y fosforo (P).

El efluente del sistema será vertido a la quebrada Cantarito, siendo esta la fuente hídrica más cercana a la finca La Esperanza. La figura 20 ilustra el esquema del sistema propuesto.

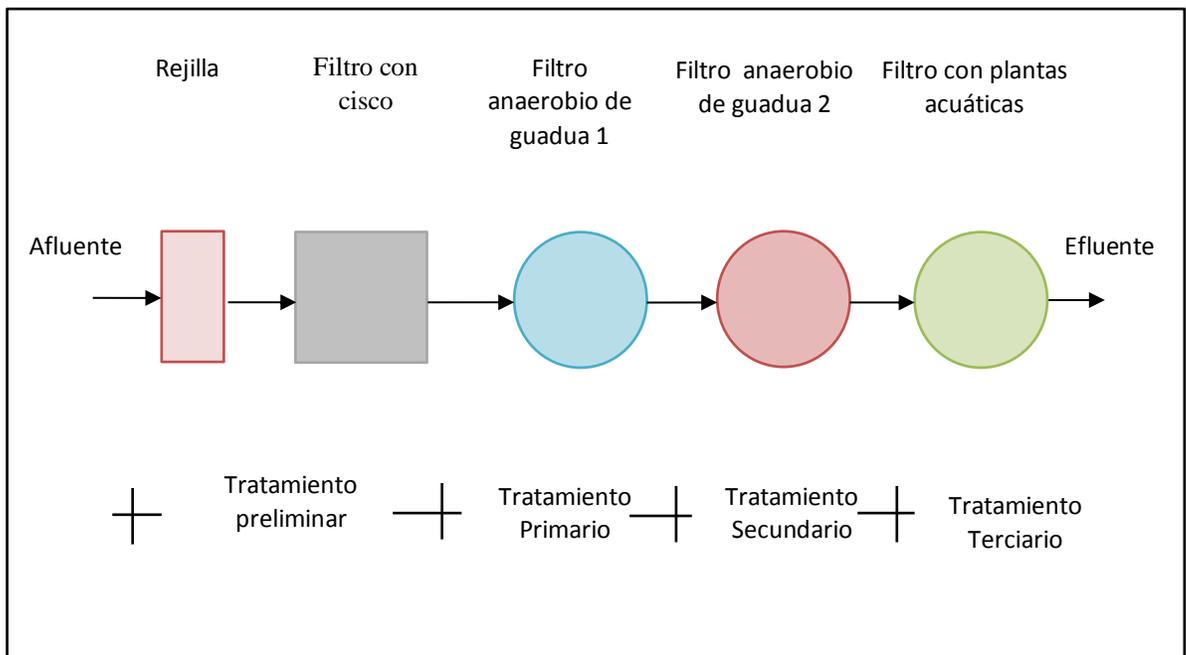


Figura 20. Esquema general del sistema propuesto.

- **Diagrama de Unidades – Procesos**

En la figura 21, se ilustra cada una de las unidades que componen el sistema propuesto, los procesos principales y secundarios que se espera deben ocurrir en cada uno.

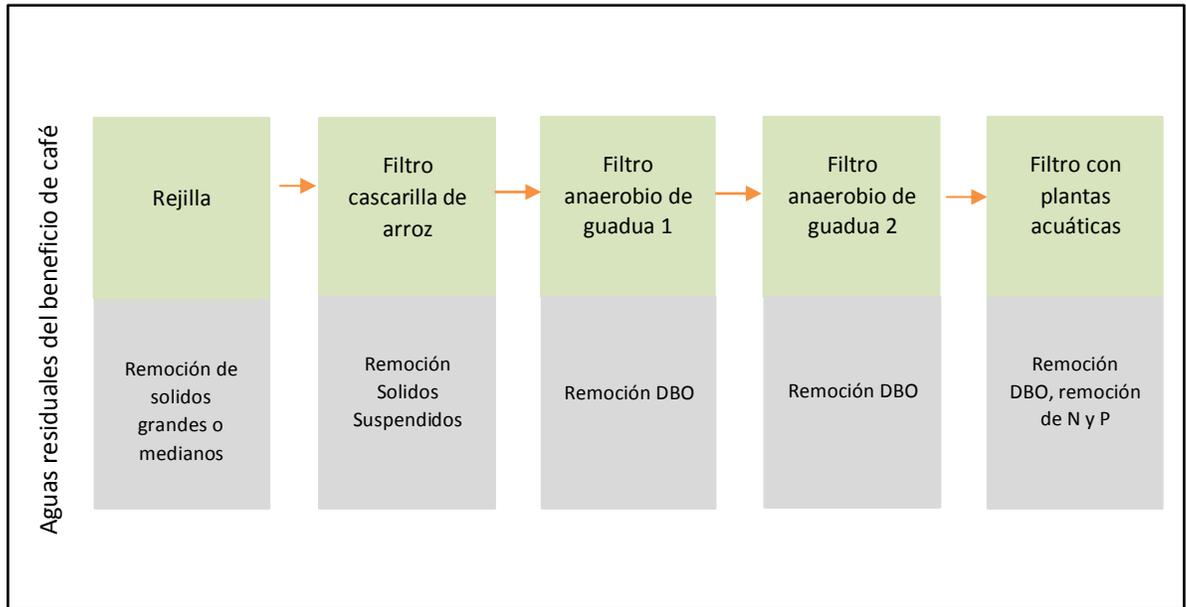


Figura 21. Diagrama de unidades del sistema propuesto.

### Caracterización del afluente (Af)

En la tabla 9, se puede observar la caracterización de las aguas residuales del beneficio húmedo del café de la finca La Esperanza. Las concentraciones de DBO5 y SST fueron obtenidos mediante un análisis de tres muestras de aguas residuales de café analizadas en el laboratorio ambiental AMBILAB. Por lo tanto, se realizó un promedio de los resultados reportados por el laboratorio en mención.

Tabla 9. Concentración del agua residual del café – Finca La Esperanza.

Parámetro	Unidad	Concentración
DBO5	mg/L	23318
SST	mg/L	10366

### Remociones teóricas esperadas del sistema propuesto

La tabla 10, describe las remociones teóricas esperadas del sistema: rejilla, filtro de cascarilla de arroz (IDEAM, 2013), filtro anaerobio de flujo descendente (López & Leal, 2013), filtro anaerobio de flujo ascendente (Parra, 2006) y filtro flujo

horizontal con plantas. En la tabla 11, se muestran las eficiencias teóricas del sistema: rejilla, filtro de cisco, filtro de flujo vertical y filtro de flujo horizontal y en la tabla 12, se describe caracterización del Efluente (Ef).

*Tabla 10. Remociones esperadas del sistema: rejilla, filtro de cisco, filtro de flujo vertical y filtro de flujo horizontal.*

PARAMETRO	DBO5 (mg/l)			SST (mg/l)		
	Af	%	Ef	Af	%	Ef
Rejilla	23318	0	23318	10366	0	10366
Filtro de cisco	23318	30	16322,6	10366	70	3109,8
Filtro flujo descendente	16322,6	70	4896,8	3109,8	70	932,9
Filtro flujo ascendente	4896,8	80	979,4	932,9	70	279,8
Filtro flujo horizontal- plantas acuáticas	932,4	70	293,8	279,8	0	279,8

*Tabla 11. Eficiencias teóricas del sistema: rejilla, filtro de cisco, filtro de flujo vertical y filtro de flujo horizontal.*

PARAMETRO	Af	Ef	% Remoción
DBO (mg/l)	23318	293,8	98,7
SS (mg/l)	10366	279,8	97,3

*Tabla 12. Caracterización del Efluente (Ef).*

PARÁMETRO	EF
DBO5 (mg/l)	293,8
SST (mg/l)	279,8

### 3.2.6 Diseño físico

#### Dimensionamiento de unidades

Teniendo en cuenta las unidades seleccionadas del sistema de tratamiento de aguas residuales, se determinaron las dimensiones correspondientes para cada una de ellas.

La rejilla se fabricó con un marco de guadua recubierto con polisombra, con un espesor de 5 milímetros, ancho de 30 centímetros y largo de 40 centímetros. Estas dimensiones dependieron de una conexión ya existente entre la salida del agua proveniente del desmucilaginizador y una tubería que se encontraba ya instalada antes del inicio del proyecto que se aprovechó para conducir el agua al tanque de cisco.

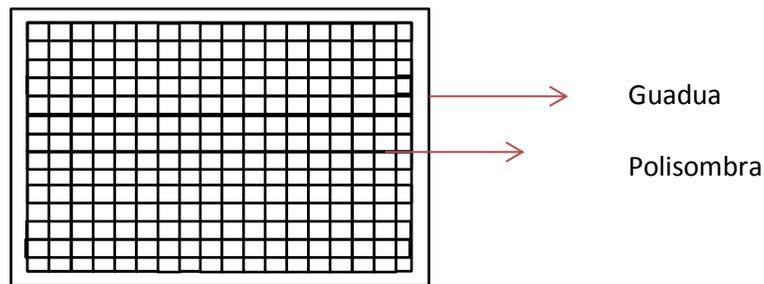


Figura 22. Rejilla.

Las dimensiones del tanque de cisco se determinaron teniendo en cuenta el siguiente procedimiento:

Se determinó el volumen máximo, teniendo en cuenta el caudal previamente calculado:

$$Q_{ARC} = 664,8 \text{ L/d}$$

$$Q_{ARC} = 664,8 \frac{\text{L}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ horas}} * \frac{0,001 \text{ m}^3}{1 \text{ litro}}$$

$$Q_{ARC} = 0,0277 \text{ m}^3/\text{horas}$$

Se determinó el volumen máximo requerido, asumiendo un tiempo de retención hidráulica de 24 horas.

$$V_{max} = Caudal * Tiempo$$

$$V_{max} = Q * t$$

$$V_{max} = 0,0277 \frac{m^3}{horas} * 24 horas$$

$$V_{max} = 0,6648 m^3$$

Teniendo en cuenta que el tanque requerido es de 0,6648 m<sup>3</sup>, y que se definió un falso fondo de 0,2 m, un espesor de 0,15 m para la capa de cisco y un borde libre de 0,05 m (Figura 23 y 24), se calcularon las dimensiones:

Se determina H:

$$H = 0,2 m + 0,15 m + 0,05 m + 0,1 m = 0,5 m$$

El área del tanque se determinó con el fin de obtener un volumen por encima del volumen máximo requerido. Por lo tanto,

$$A = l * a$$

$$A = 5 m * 2 m$$

$$A = 10 m^2$$

El volumen es:

$$V \text{ del tanque} = H * A$$

$$V \text{ del tanque} = 0,5 m * 10 m^2$$

$$V \text{ del tanque} = 5 m^3$$

El volumen total del tanque es de 5 m<sup>3</sup>, de los cuales el falso fondo ocupa 2 m<sup>3</sup>, la capa de cisco 1,5 m<sup>3</sup> y el agua residual 1 m<sup>3</sup>.

Los tanques empleados para el tratamiento primario y secundario tienen una capacidad de 1000 litros, por lo tanto el tiempo de retención hidráulica (TRH) para cada uno de ellos es:

$$T_{RH} = \frac{Volumen}{Caudal}$$

$$T_{RH} = \frac{1000 l}{664,8 L/d}$$

$$T_{RH} = 1,5 dias = 36 horas$$

El tanque empleado para el tratamiento terciario cuenta con una capacidad de 500 litros, por lo tanto el TRH:

$$T_{RH} = \frac{500 \text{ l}}{664,8 \text{ L/d}}$$

$$T_{RH} = 0,75 \text{ dias} = 18,05 \text{ horas}$$

En el interior del tanque se depositó gravilla de media pulgada. Según Sanders (1998), la grava de media pulgada presenta una porosidad de 25 a 40%.

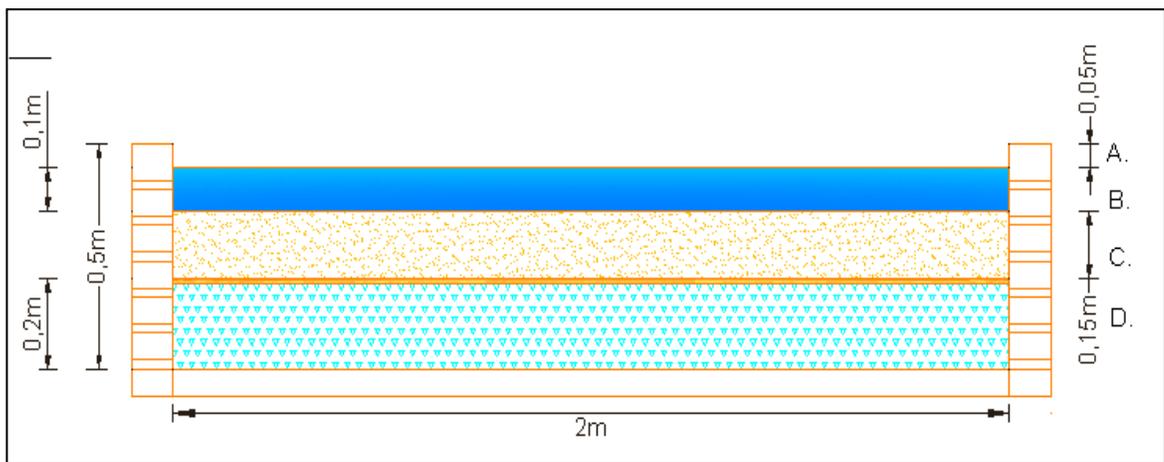


Figura 23. Vista transversal del tanque con cascarilla de arroz. A: borde libre, B: espacio para e agua residual, C: espacio para cascarilla de arroz, D: falso fondo.

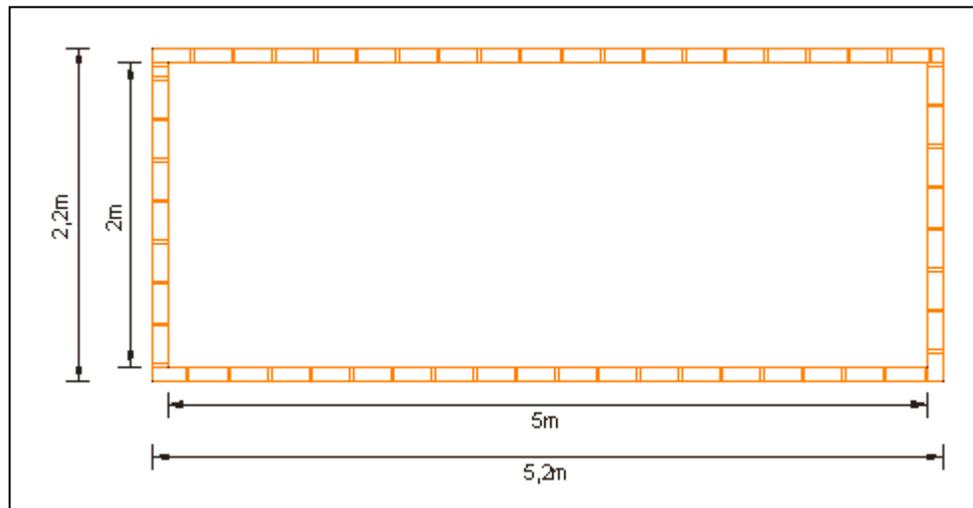


Figura 24. Vista en planta del tanque con cascarilla de arroz.

## Manejo de subproductos

Los subproductos generados del presente sistema de tratamiento de aguas residuales, se obtienen del tratamiento preliminar (tanque de cisco de arroz), en donde después de 15 días de utilización del filtro, es necesario retirar la cascarilla de forma manual, ya que ésta se satura de sólidos y no cumple su funcionamiento de manera óptima.

Después de cumplir con el propósito de filtrar el agua residual, la capa de cascarilla se seca con los sólidos retenidos y se compacta, lo que facilita el retiro y traslado hasta la fosa, donde es mezclada con la cascara de café y se descompone para su posterior utilización como abono por parte del propietario de la finca objeto de estudio.

## Presupuesto

El presupuesto para la construcción del sistema de tratamiento de aguas residuales se describe en la tabla a continuación:

Tabla 13. Presupuesto.

ITEM	PRODUCTO	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
1.0	<b>REPLANTEO Y TRAZADO</b>				
1.1	Replanteo y trazado manual	m2	10	\$ 5.500	\$ 55.000
2.0	<b>T. PRELIMINAR - REJILLA-TANQUE DE CISCO</b>				
2.1	Excavación a mano	m3	0,25	\$ 11.000	\$ 2.750
	Concreto de 3000 psi	m3	0,216	\$ 404.000	\$ 87.264
2.2	Ladrillos	UND	260	\$ 400	\$ 104.000
2.3	Tubería 1 1/2"	M	8	\$ 2.900	\$ 23.200
2.4	Codo 1 ½	UND	2	\$ 1.000	\$ 2.000
2.5	Polisombra	m2	22	\$ 2.600	\$ 57.200
2.6	Guadua	UND	5	\$ -	\$ -
2.7	Cisco	PACA	1	\$ 12.000	\$ 12.000

Continuación Tabla 13. Presupuesto

ITEM	PRODUCTO	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
3.0	<b>T. PRIMARIO - TANQUE ANAEROBIO CON GUADUA 1</b>				
3.1	Tubería 1 1/2"	m	4	\$ 2.900	\$ 11.600
3.2	Codos 1 1/2	UND	3	\$ 1.000	\$ 3.000
3.3	Tanque polietileno 1000 L	UND	1	\$ 350.000	\$ 350.000
3.4	Guadua	UND	60	\$ 6.000	\$ 360.000
4.0	<b>T. SECUNDARIO - TANQUE ANAEROBIO CON GUADUA 2</b>				
4.1	Tubería 1 1/2"	m	3	\$ 2.900	\$ 8.700
4.2	Codos	UND	5	\$ 1.000	\$ 5.000
4.3	Tanque polietileno 1000 L	UND	1	\$ 350.000	\$ 350.000
4.4	Guadua	UND	90	\$ 6.000	\$ 540.000
5.0	<b>T. TERCARIO - TANQUE PLANTAS ACUATICAS</b>				
5.1	Tubería 1/2	m	1	\$ 2.900	\$ 2.900
5.2	Codos 1/2	UND	3	\$ 1.000	\$ 3.000
5.3	Tanque polietileno 250 L	UND	1	\$ 100.000	\$ 100.000
5.4	Grava	BUGGUIS	3	\$ 12.000	\$ 36.000
<b>TOTAL</b>					<b>\$ 2.113.614</b>

### Protocolo de mantenimiento operacional del sistema

La tabla 14, describe las actividades necesarias para que el sistema funcione de forma eficiente y la tabla 15, describe el mantenimiento preventivo correspondiente a cada una de las unidades del sistema. El manual de operación y mantenimiento se realizó teniendo en cuenta las sugerencias de Villanueva, 2012.

Tabla 14. Manual de operación.

UNIDAD	ACTIVIDAD	FRECUENCIA
Rejillas	Extracción de residuos solidos	Cada que se realice lavado
Tanque cisco de arroz	Extracción de capa de cisco con solidos	Quincenal, en tiempo de cosecha
Filtro anaerobio con guadua 1	Retrolavados	Mensual, en tiempo de cosecha
Filtro anaerobio con guadua 2	Retrolavados	Mensual en tiempo de cosecha
Filtro con plantas acuáticas	Verificación de funcionamiento	Quincenal

Tabla 15. Manual de mantenimiento. EPP: elementos de protección personal.

Unidad	Actividad y descripción	Herramientas e insumos	EPP	Periodo
Rejilla	<p><b>Limpieza</b></p> <p>*Remover los residuos sólidos retenidos</p> <p><b>Mantenimiento</b></p> <p>*Verificar el buen estado de la polisombra y guadua</p>	Balde	Guantes	Diario
Tanque cascarilla de arroz	<p><b>Limpieza</b></p> <p>* Suspender el ingreso del agua al sistema</p> <p>*Lavar superficies para eliminar residuos</p> <p><b>Mantenimiento</b></p> <p>*Verificar el buen estado del tanque</p> <p>*Cambiar capa de cisco</p>	Cepillos o escobas, baldes o recipientes necesarios	Guantes, tapa bocas, botas de caucho	Quincenal

Continuación Tabla15. Manual de mantenimiento. EPP: elementos de protección personal.

Unidad	Actividad y descripción	Herramientas e insumos	EPP	Periodo
Filtro anaerobio de guadua 1	<p><b>Limpieza</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* Suspender el ingreso del agua</li> <li>*Realizar retro lavado</li> <li>*Lavar superficie de paredes</li> </ul> <p><b>Mantenimiento</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>*Verificar el buen estado del tanque y tuberías</li> </ul>	Cepillos o escobas	Guantes, tapa bocas, botas de caucho	Mensual
Filtro anaerobio de guadua 2	<p><b>Limpieza</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* Suspender el ingreso del agua</li> <li>*Realizar retro lavado</li> <li>*Lavar superficie de paredes</li> </ul> <p><b>Mantenimiento</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>*Verificar el buen estado del tanque</li> </ul>	Cepillos o escobas	Guantes, tapa bocas, botas de caucho	Mensual
Tanque de plantas acuáticas	<p><b>Limpieza</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* Lavar conexión de tuberías</li> </ul> <p><b>Mantenimiento</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>*Verificar el libre paso de entrada y salida del agua</li> </ul>	Cepillos, baldes o recipientes necesarios	Guantes, tapa bocas, botas de caucho	Mensual

### 3.3 Adecuación

Teniendo en cuenta las condiciones de las instalaciones de beneficio del café y la disposición de las aguas residuales en la finca La Esperanza; se adecuo el espacio disponible para la implementación del sistema.

El espacio disponible para la implementación del sistema en la finca, se encuentra situado en la parte trasera del beneficiadero de café y fosa, con una extensión aproximada de 25m por 15m con pendiente moderada. Se inició haciendo la nivelación del terreno para la posterior construcción del filtro con lecho de cisco como se muestra en la figura 25.



*Figura 25. Nivelación del terreno.*

Seguido a la nivelación del terreno se inició con la construcción del tanque que se utilizará como lecho filtrante en la fase preliminar del sistema. Los materiales con los que se realizó dicho tanque son ladrillo farol, cemento, arena y gravilla (figura 26) dejando las paredes recubiertas en cemento rugoso, y después de una semana de fraguado se instaló una base de guadua a 20 cm del piso del tanque (figura 27) recubriéndola con una polisombra (figura 28) que evita el paso de las partículas de cisco pero permite el paso del líquido filtrado.



*Figura 27. Tanque para filtro preliminar.*



*Figura 26. Base de Guadua.*



*Figura 28. Polisombra.*

Para evitar que el agua lluvia esté en contacto con las ARC se instaló un techo con estructura de esterilla de guadua y cubierta de plástico transparente (figura 29), que a su vez sirve como lecho de secado para el cisco que utilizado que se retira de la unidad.



*Figura 29. Estructura de esterilla de guadua.*

### 3.4 Instalación

Después de realizada la adecuación correspondiente en cada uno de los espacios destinados para la implementación del sistema, se procedió a instalar cada unidad.

La instalación se inició después de adecuado el tanque para el filtro de cascarilla donde después de puesta la polisombra sobre la base de guadua, se depositó una capa de cascarilla de arroz de 15 cm de espesor (figura 30), que cumple la función de retener gran parte de los sólidos existentes en las aguas mieles provenientes del área de lavado con desmucilagador.



*Figura 30. Filtro con cascarilla de arroz.*

A partir del tanque con cascarilla de arroz, se realizó una conducción para el efluente utilizando tubería de PVC de 2 pulgadas, que conecta con el filtro del tratamiento primario generando un flujo descendente del agua (figura 31).



*Figura 31. Conexión de filtro de cascarilla con filtro anaerobio 1.*

El filtro anaerobio con guadua 1 se perforó en la parte inferior para instalar un tapón de retrolavado del tanque con el fin de realizar periódicamente operaciones de mantenimiento y retirar sedimentos (figura 32).



*Figura 32. Tapón para retrolavado.*

Desde el filtro anaerobio con guadua 1 se realizó una conexión en PVC hacia el filtro anaerobio con guadua 2, tomando el agua a una altura de 50cm del fondo e ingresando al siguiente tanque en forma descendente (figura 33). También al FAG2 se le instaló un tapón de retrolavado.



*Figura 33. Conexión de filtros anaerobios con guadua 1 y 2.*

A los filtros anaerobios 1 y 2 se les incorporó semicírculos y cuartos de círculo de guadua respectivamente, con el fin de crear una cama hospedera para los microorganismos que se desarrollan en el agua residual del café (figura 34).



*Figura 34. Filtro anaerobio de guadua 1 y 2 con semicírculos y cuartos de círculo de guadua.*

Se realizó una conexión en PVC de 2 pulgadas desde el tanque del tratamiento secundario hasta el tanque del tratamiento terciario para conducir el efluente resultante del segundo tratamiento (figura 35).



*Figura 35. Conexión desde tratamiento secundario hasta tratamiento terciario.*

El tanque del tratamiento terciario fue llenado con gravilla de media pulgada y se sembraron plantas conocidas popularmente como platanillas (*Heliconia L.*).



*Figura 36. Gravilla media pulgada y platanillas.*



*Figura 37. Vista general del tratamiento primario, secundario y terciario.*

### **3.5 Análisis de muestras del efluente del sistema**

#### **3.5.1 Análisis fisicoquímicos**

Los análisis fisicoquímicos se desarrollaron en el laboratorio ambiental AMBILAB acreditado por la IDEAM mediante resolución 2597 del 31 de octubre de 2017, ubicado en el municipio de Pitalito Huila, teniendo en cuenta el protocolo para la

toma, conservación y transporte de dichas muestras (IDEAM, 2007), empleando para ello recipientes de plásticos con capacidad de un litro para el análisis de DBO5, 500 mililitros para el análisis de SST y 2 litros para el análisis de pH, fósforo total y nitrógeno amoniacal.

Para el transporte de las muestras desde la finca hasta el municipio de Pitalito, se tuvo en cuenta conservar una temperatura cerca a los 4° Celsius mediante el uso de un termo de icopor con bolsas de hielo para refrigerarlas.

### **Potencial de hidrogeno (pH)**

El término pH es una forma de expresar la concentración de ión hidrógeno o, más exactamente, la actividad del ión hidrógeno. En general se usa para expresar la intensidad de la condición ácida o alcalina de una solución, sin que esto quiera decir que mida la acidez total o la alcalinidad total. En el suministro de aguas es un factor que debe considerarse con respecto a la coagulación química, la desinfección, el ablandamiento y el control de corrosión. En las plantas de tratamiento de aguas residuales que emplean procesos biológicos, el pH debe controlarse dentro de un intervalo favorable a los organismos. Tanto por estos factores como por la relaciones que existen entre pH, alcalinidad y acidez es importante entender los aspectos teóricos y prácticos del pH (IDEAM, 2007).

El pH es controlado por el balance entre el dióxido de carbono, los iones bicarbonato y carbonato, así como los ácidos húmicos y fúlvicos. La mayoría de las aguas naturales tienen un pH en el ámbito de 6,5 a 8,0 y es controlado principalmente por el sistema carbonato – bicarbonato (Stumm & Morgan, citado por Beita, 2008).

El análisis de pH dio como resultado 3,99 a 18,3°C lo que indica que el efluente del sistema presenta un pH por debajo del rango óptimo para aguas superficiales no contaminadas, generando limitaciones en el desarrollo y supervivencia de organismos acuáticos presentes en fuentes hídricas receptoras del efluente.

### **Fosforo total**

El fósforo es un macronutriente esencial; es acumulado por amplia variedad de seres vivos. Tiene un papel importante en la construcción de los ácidos nucleicos y en el almacenamiento y uso energético en las células. En aguas no impactadas,

es fácilmente utilizado por las plantas y convertido a las estructuras celulares por acción fotosintética (Holmes, 1996).

El fósforo es considerado como el principal nutrimento a tenerse en cuenta en el control del grado de eutrofización de un ecosistema acuático, ya que influye directamente en el crecimiento de las algas y por tanto puede afectar la actividad productiva primaria del agua (Iqbal et al., 2006).

El resultado que arrojó el análisis de laboratorio respecto a la cantidad de fósforo encontrado en el efluente del sistema fue de 0,631 mg/L, lo que indica una reducción notable de este elemento, ya que según Martínez (2002) el contenido de este elemento es de 21-30 mg/L para aguas residuales del beneficio húmedo del café sin ningún tipo de tratamiento.

### **Nitrógeno amoniacal**

Las descargas de aguas residuales incrementan las concentraciones de nitrógeno amoniacal en las aguas superficiales y subterráneas, afectando la calidad de las mismas. En condiciones normales la fuente de nitrógeno amoniacal en aguas superficiales proviene de la degradación natural de la materia orgánica presente en la naturaleza. Es uno de los componentes transitorios en el agua, porque es parte del ciclo del nitrógeno, y se ve influenciado por la actividad biológica. En ambos casos el nitrógeno amoniacal, se origina de la degradación del nitrógeno orgánico y, este a su vez, por acción bacteriana, se va oxidando gradualmente a nitritos y finalmente a nitratos (Gonzales, 2013).

Los tres principales problemas ambientales generados por la presencia de compuestos de N en el sistema acuático son: el aumento de la acidez, el desarrollo de eutrofización y el aumento de las concentraciones hasta niveles tóxicos tanto en aguas superficiales como subterráneas que limitan su uso principalmente como fuentes de agua para consumo humano o en acuicultura, donde la acumulación de N orgánico suele impedir la operación exitosa de sistemas de reúso (Cárdenas & Sánchez, 2013).

Las muestras de agua tomadas del efluente del sistema arrojaron valores de 124 mgN/L lo que indica que hay una alta concentración de nitrógeno que puede ser la causante de la acidez que presenta el agua según análisis del potencial de Hidrogeno detallados anteriormente.

En el caso colombiano, no existe norma específica para valores permisibles de Nitrógeno amoniacal, ya que en la resolución 631 de 2015 por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales, se indica para este parámetro analizar y reportar.

Por otro lado, según el DANE (2011), la Resolución 2115 de 2007, establece que los nitritos y nitratos, tienen implicaciones sobre la salud humana, por lo tanto, la concentración de nitritos debe ser menor o igual a 0.1 mg/L de NO-2 y la concentración de nitratos debe ser menor o igual a 10 mg/L de NO-3.

### **Evaluación de la eficiencia del sistema**

El cálculo de la eficiencia de remoción de DBO5 y SS en el sistema de tratamiento de aguas residuales del beneficio húmedo del café, se realizó mediante el uso de la fórmula de disminución de unidades logarítmicas entre el afluente y el efluente del sistema, como lo muestra la siguiente expresión:

$$Ef = CAf - \frac{CEf}{CAf} * 100$$

Ef = Eficiencia de remoción del Sistema (%)

CAf = Concentración del afluente

CEf = Concentración del efluente

### **Eficiencia de remoción de SS en el STARC**

La remoción de sólidos suspendidos a través del paso del agua residual del café por las diferentes unidades del sistema, se obtuvo realizando un cálculo del porcentaje de eficiencia, relacionando la concentración de SS que presentó el afluente cuando se analizó luego del lavado del café sin ningún tipo de tratamiento y la concentración de SS que mostró el análisis del afluente luego de pasar por el sistema de tratamiento, obteniendo los siguientes valores:

Tabla 16. Concentración de SS de afluente vs. Efluente reportado según análisis de laboratorio.

MUESTRA	Af (mg/l)	Ef (mg/l)	% Remoción
1	22500	455	97,98
2	5000	350	93
3	3600	345	90,42

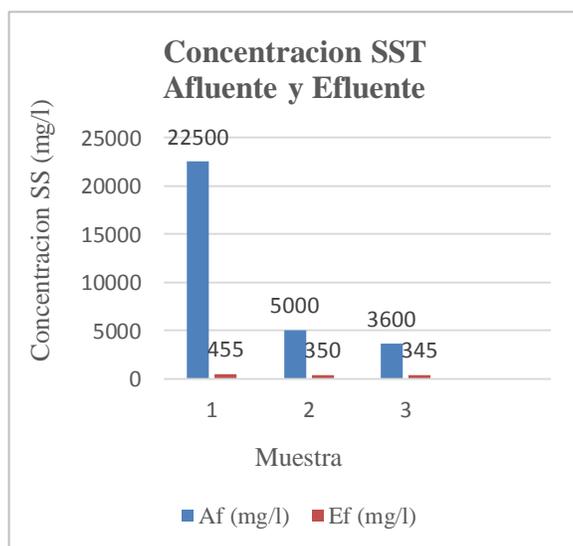


Figura 38. Concentraciones SS de fluyente y Efluente.

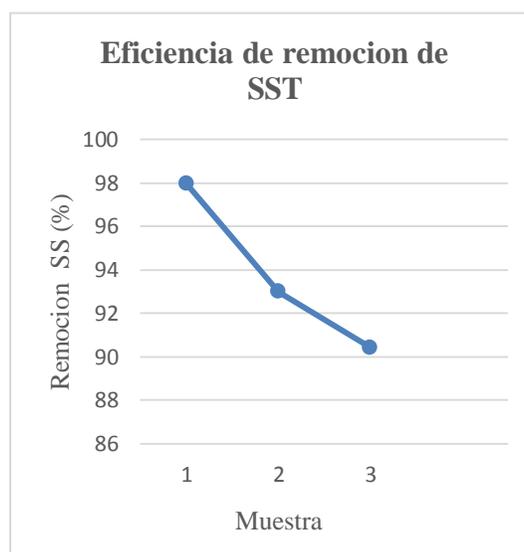


Figura 39. Eficiencia de remoción de SS.

Teniendo en cuenta los resultados descritos en la figura 38 y 39, se puede observar una remoción significativa de sólidos suspendidos con respecto a los valores iniciales del afluente. La eficiencia obtenida en las diferentes muestras se dio en un rango de 90 a 97%, encontrándose una diferencia menor al 10% con respecto a las remociones teóricas.

La muestra 1, fue tomada a los 31 días de funcionamiento del sistema, las muestras 2 y 3, fueron tomadas a los 32 y 33 días, respectivamente, y en ellas se observa una eficiencia positiva, con tendencia a estabilizar la remoción de SST.

El valor máximo permisible de SS establecido en la resolución 631 de 2015 para vertimiento de aguas residuales del beneficio ecológico del café es de 800 mg/l

mientras que el análisis del efluente del STARC propuesto, reportó un valor de 383 mg/l de SS lo que indica que el sistema cumple con la normatividad vigente para estos vertimientos.

### Eficiencia de remoción de DBO5 en el STARC

En la tabla 17, se describen los valores obtenidos de DBO5 para las muestras analizadas correspondientes al afluente y efluente.

Tabla 17. Concentración de DBO5 de afluente vs. Efluente reportado según análisis de laboratorio.

MUESTRA	Af (mg/l)	Ef (mg/l)	% Remoción
1	23295	30300	-23,12
2	23280	29760	-21,77
3	23280	28740	-19

En la figura 40 y 41, se puede observar que el sistema no generó una eficiencia ya que la DBO5 aumentó hasta un 23% por encima de la DBO5 inicial debido posiblemente a que se incrementó la cantidad de organismos consumidores de oxígeno como los gusanos que se observan en la figura 42, organismos que se generaron en gran cantidad en los tanques con guadua.

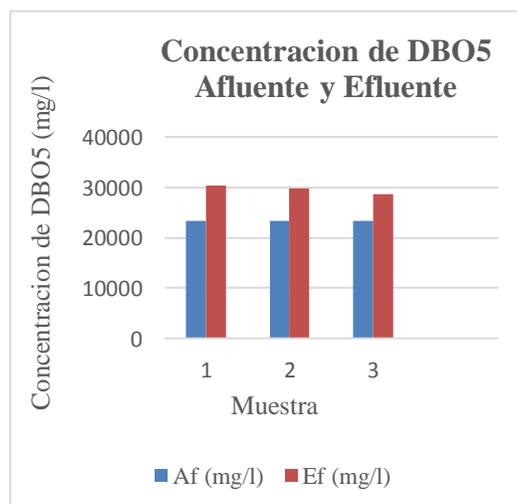


Figura 41. Concentración de DBO5 de Afluente y Efluente.

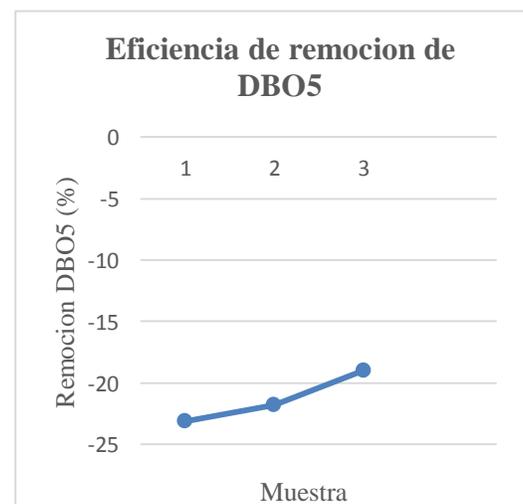


Figura 40. Eficiencia de DBO5



Figura 42. Organismos presentes en los tanques con guadua.

Tabla 18. Comparativo de valores obtenidos de los diferentes parámetros evaluados vs. valores máximos permisibles según legislación colombiana.

PARAMETRO	UNIDADES	VALOR (prom) REPORTADO SEGÚN ANALISIS DE EFLUENTE DEL SISTEMA	VALOR MAX. PERMISIBLES SEGÚN LA RES. 631 del 2015
Sólidos suspendidos totales (SST)	(mg/l)	383	800
Demanda bioquímica de Oxígeno (DBO5)	(mg/l)	29600	400
pH	Unidades de Ph	3.99	5-9
Fosforo total	mg/l	0.631	Reporte y análisis
Nitrógeno amoniacal	mg/l	124	Reporte y análisis

Fuente. Elaboración propia con adaptación del Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (2015).

En la tabla 18, se resumen los parámetros establecidos en la resolución de 631 de 2015 con sus respectivos valores máximos permisibles y los resultados obtenidos del análisis del efluente del sistema, donde se puede observar que la DBO5 y pH no cumplen con la resolución y se encuentran muy lejos de alcanzar el valor ideal. Al contrario, los SS cumplen el valor máximo permisible y se encuentran por debajo de este, generando un óptimo resultado del STARC desarrollado en cuanto a este parámetro.

### 3.5.2 Análisis microbiológico

Los análisis microbiológicos del agua se realizaron en el laboratorio de microbiología del Tecnoparque Agroecológico Yamboró del SENA Pitalito.

Las muestras fueron tomadas del efluente del sistema durante cuatro días consecutivos, con el fin de observar el comportamiento de los microorganismos con el paso de las horas. En total se tomaron 4 muestras en recipientes plásticos con capacidad de 600 mililitros. Los microorganismos que se encontraron en cada muestra fueron enterobacterias, E. Coli, Salmonella, coliformes, Clostridium sp, coliformes fecales, mohos, levaduras y pseudomonas. Los resultados del análisis de las 4 muestras se detallan en la siguiente tabla:

*Tabla 19. Análisis microbiológico.*

M	Recuento Enterobacterias UFC/ml	Recuento E. Coli UFC/ml	Recuento de Salmonella sp. UFC/ml	Recuento coliformes totales	Recuento Clostridium sp. UFC/ml	Recuento Coliformes fecales UFC/ml	Mohos y levaduras UFC/ml	Recuento Pseudomonas sp. UFC/ml
M 1	1,3x10 <sup>2</sup>	2,8x10 <sup>3</sup>	<10	2,8X10 <sup>3</sup>	<10	<10	M:0,6X10 <sup>5</sup> L:4,7X10 <sup>3</sup>	0,6X10 <sup>6</sup>
M 2	1,15x10 <sup>2</sup>	1,1x10 <sup>2</sup>	<10	1,4X10 <sup>2</sup>	<10	<10	M:0,9X10 <sup>3</sup> L:5,2X10 <sup>2</sup>	1,8X10 <sup>3</sup>
M 3	1,2x10 <sup>2</sup>	1,5x10 <sup>2</sup>	<10	1,6X10 <sup>2</sup>	<10	<10	M:0,3X10 <sup>3</sup> L:3,6X10 <sup>2</sup>	3,1X10 <sup>3</sup>
M 4	<10	1,7x10 <sup>2</sup>	<10	2,4X10 <sup>2</sup>	<10	<10	M:1X10 <sup>4</sup> L:4,6X10 <sup>3</sup>	2,2X10 <sup>3</sup>

*M: muestra, M 1: cero horas, M2: 24 horas, M3:36 horas, M4: 72 horas.*

Fuente: Laboratorio microbiológico, SENA Tecnoparque Yamboro.

Las enterobacterias o Enterobacteriaceae son las más importantes dentro de los anaeróbicos facultativos y su presencia en agua está asociada a contaminación fecal. Este grupo de bacterias habita naturalmente el intestino de los animales. Son bacilos no esporulados, no móviles y si lo son es por flagelos de inserción períttrica, con requerimientos nutricionales relativamente simples. Generalmente se identifican por su capacidad para fermentar glucosa por vía glucolítica dando ácidos como producto final (Apella & Araujo, 2003).

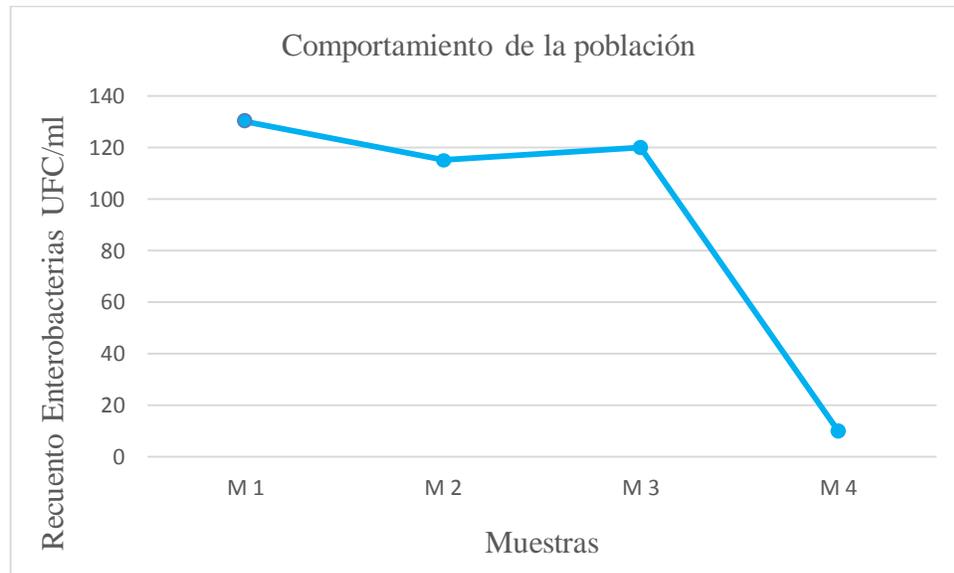


Figura 43. Comportamiento - Recuento enterobacterias UFC/ml.

En la figura 43, se observa el comportamiento de la población de enterobacterias de cuatro muestras tomadas en diferentes tiempos. La muestra inicial 1, arroja una población de 130 UFC/ml, en la muestra 2 la población es de 115 UDC/ml en un tiempo de 24 horas; en el transcurso de 48 horas la población de la muestra 3 se incrementa hasta 120 UFC/ml. Finalmente, en la muestra 4 se reduce significativamente (92%), la población de enterobacterias transcurridas 72 horas, ya que esta población es inferior a 10 UFC/ml.

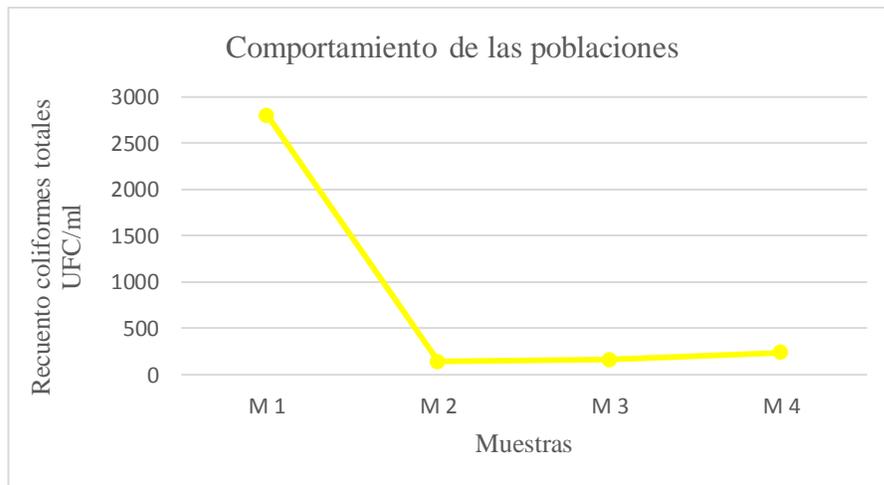
*Escherichia coli*, habitante normal del intestino humano, es utilizada como indicador de contaminación fecal de aguas. Las cepas patógenas de *E. coli* causan infecciones del tracto intestinal, generalmente agudas y no presentan mayores complicaciones, excepto en niños y adultos con deficiencias nutricionales (Apella & Araujo, 2003).



*Figura 44. Comportamiento - Recuento E. Coli UFC/ml.*

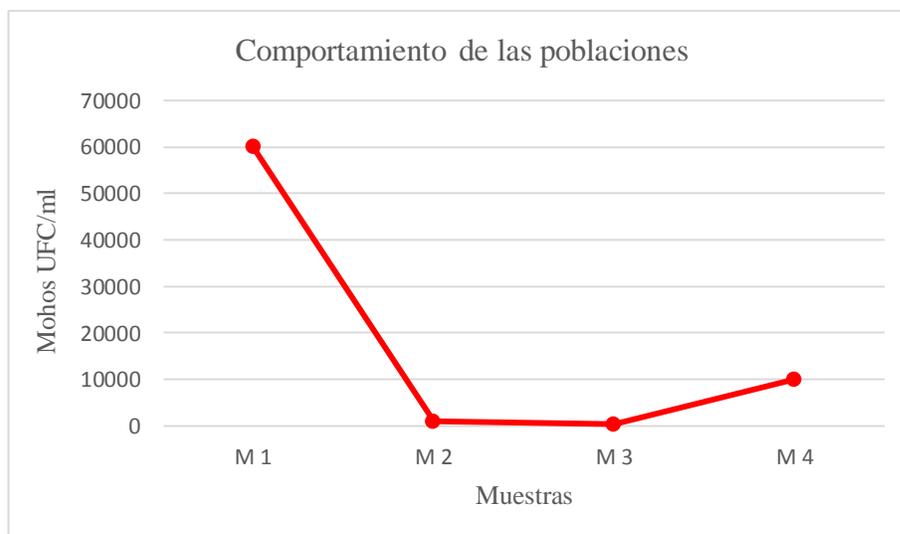
Como se muestra en la figura 44, el comportamiento de la población de E. Coli con el transcurso de las horas se redujo un 93% con respecto a la muestra inicial (muestra 1), siendo este un resultado significativo y positivo.

Los coliformes son bacterias gram negativas aerobias y anaerobias facultativas de la familia Enterobacteriaceae que no forman endosporas, poseen forma de bacilo y crecen a temperaturas entre 31 y 37°C. Los coliformes totales se encuentran en suelos, vegetales, aguas, alcantarillas, tracto intestinal y comprenden los géneros Escherichia, Enterobacter, Citrobacter, Serratia, Hafnia, Klebsiella y Proteus, entre otras (Puerta, Marín, Osorio, 2012).



*Figura 45. Comportamiento - Recuento coliformes totales UFC/ml.*

En cuanto al comportamiento de los coliformes totales, la población se redujo un 91% con respecto a la muestra inicial (muestra 1) en el transcurso de 72 horas, siendo ésta una reducción significativa de la población. (Figura 45).



*Figura 46. Comportamiento - Mohos UFC/ml.*

En la figura 46, se muestra como la población de mohos disminuyó un 99% en el transcurso de 48 horas con respecto a la muestra inicial, pero al completar 72

horas la población aumento. Finalmente, la población de mohos disminuyo un 83% con respecto a la muestra inicial.



*Figura 47. Comportamiento - Levaduras UFC/ml.*

El comportamiento de las poblaciones de levaduras se puede observar en la figura 50, donde se muestra una reducción significativa de la población en el transcurso de 24 a 48 horas con respecto a la muestra inicial, pero al completar 72 horas esta población aumento de forma significativa igualando la población inicial (muestra 1).



*Figura 48. Comportamiento - Recuento Pseudomonas sp. UFC/ ml.*

En la figura 48, se observa una reducción significativa de la población de *Pseudomonas* sp, entre la muestra 1 y 2, cuyo tiempo transcurrido entre cada una es de 24 horas. Entre la muestra 2, 3 y 4 se puede observar una estabilización de la población en el transcurso de 36 y 72 horas.

En aguas residuales los microorganismos especialmente bacterias aerobias o anaerobias facultativas (*Pseudomonas*, *Escherichia*, *Aerobacter*, *Bacillus*), son las que intervienen en el aumento de la DBO5, debido a su alto consumo de oxígeno en la degradación de las sustancias orgánicas presentes en estas aguas (Cárdenas & Ortiz, 2014).

#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El sistema planteado para el tratamiento de aguas residuales del beneficio de café, se considera eficiente en la remoción de sólidos suspendidos totales ya que superó el 90% y alcanzó un valor por debajo del máximo admisible para vertimientos puntuales de aguas producto del beneficio ecológico del café, según lo establece la norma colombiana para dichos vertimientos.

La eficiencia del sistema planteado en cuanto a la remoción de la demanda bioquímica de Oxígeno no cumple con lo esperado ya que este valor no disminuyó sino que al contrario aumentó, lo que indica que pudo haber falta de control de los organismos que se desarrollaron en las diferentes unidades y que requieren de oxígenos para sus procesos biológicos.

Las unidades del sistema de tratamiento planteado son de bajo costo, en comparación con otros sistemas y se pueden aprovechar recursos de la región como la guadua, y los tanques que otorgan algunos proyectos de la federación nacional de cafeteros. Estas unidades también son de fácil operación y mantenimiento lo que hace que sean más asequibles para los cafeteros de bajos recursos.

Se recomienda para futuros estudios relacionados con el tema, realizar un análisis previo del agua que se utiliza para el proceso de lavado del café, ya que normalmente en las fincas cafeteras no se cuenta con agua potable y ésta puede contener contaminantes como hongos, levaduras, bacterias entre otros, que pueden alterar los resultados finales del análisis del efluente. También es de importancia realizar un análisis detallado de las características físico-químicas del efluente con el fin de tener bases para la determinación del reúso más conveniente que se le puede dar al agua tratada en el sistema.

Se recomienda que para el filtro con plantas se utilice una especie con mayor resistencia a la humedad y que se realicen análisis físico-químicos y microbiológicos a la entrada y salida de éste para determinar la viabilidad de su construcción.

También se recomienda que los trozos de guadua vayan sujetos firmemente sobre las paredes del tanque de modo que no floten y así se tenga una capa más estable de ellos y sirvan como percolador y sostén de microorganismos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alcaldía de Acevedo. (2016). *Ecología*. Recuperado de: <http://www.acevedo-huila.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Ecologia.aspx>
- Apella, M., Araujo, P. (2003). *Microbiología de agua. Conceptos básicos*. Universidad Nacional de Tucuman. Argentina.
- Arango, A. (2007). *Biosistema integral de tratamiento de aguas residuales domésticas. Diseño, construcción y evaluación*. Universidad de Manizales.
- Arcila, J., Farfán, F., Moreno, A., Salazar, L., Hincapié, E., (2007). *Sistemas de producción de café en Colombia*. Cenicafé. 11-22.
- Arcila, J. (1987). *Aspectos fisiológicos de la producción del café Coffea arabica L. Centro nacional de investigación de café*. Cenicafé. Chinchina, Colombia. Tecnología del cultivo del café. Chinchiná, Cenicafé. 73.
- Área de Paz, desarrollo y reconciliación. PNUD . (2010). *Huila: análisis de la conflictividad*. Huila. Impresol. 24.
- Alvarado, M.; Rojas, G. (1994). *El cultivo y beneficio del café*. Costa rica. 3.
- Asociación nacional del café ANACAFE. (2015). *Tratamiento de aguas residuales del beneficio húmedo del café*. Guatemala.
- Beita, W. (2008). *Caracterización fisicoquímica de las aguas superficiales de la cuenca del río Rincón en la Península de Osa, Puntarenas, Costa Rica*. Universidad de Costa de Rica.

- Cadena, C., Bula, A. (2002). *Estudio de la variación en la conductividad térmica de la cascarilla de arroz aglomerada con fibras vegetales*. Universidad del Norte. 2.
- Federación nacional de cafeteros – FNC. (2013). *Café de Colombia: Café del Huila es ahora una denominación de origen protegida*.
- Calle, H. (1977). *Subproductos del café, Chinchiná: CENICAFÉ*. 84p. (Boletín técnico No 6).
- Cárdenas, L., Sánchez, I. (2013). *Nitrógeno en aguas residuales: orígenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el ambiente y la salud pública*. Revista Scielo. Vol 15.
- Cárdenas, R., & Ortiz, J. (2014). *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*. Universidad de Manizales. Colombia.
- Cenicafé. (2011). *Construyendo el modelo para la gestión integrada del recurso hídrico en la caficultura colombiana*.
- Cely, L. Hernández, W. & Gutiérrez, O. (2012). *Caracterización de la Guadua Angustifolia Kunth cultivada en Miraflores (Boyacá) de acuerdo con la NSR - 10*
- Comité departamental de cafeteros de Huila. (2007). *Informe comité departamentales*. 77.
- Clarke, R., Macrae, R. (1985). *Coffee*. Volume 1: Chemistry. Eds. Clarke, R., Macrae, RELSEVIER, EUA. 306.

- FAO. (1997). *Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos*. Capítulo I.
- Federación Nacional de Cafeteros (FNC). (2010). *El café de Colombia: Una bonita historia*.
- Federación Nacional de Cafeteros (FNC). (2010). *Nuestras regiones cafeteras*.
- Federación Nacional de Cafeteros (FNC). (2011). *Proyecto de apoto a la reconversión productiva de la caficultura del departamento del Huila*.
- Federación Nacional de Cafeteros (FNC). (2014). *Ensayos sobre economía cafetera*. Número 30. 13-14.
- Gonzales, L. 2013. *Nitrógeno amoniacal, importancia de su determinación*. Revistas Universidad tecnológica de Panamá.
- Holmes, S. 1996. *South African Water Quality Guidelines*. Volume 7: Aquatic Ecosystems. Departamento de Asuntos Hídricos y Forestales, Pretoria, Gauteng, Sudáfrica.
- Iqbal, M.Z., E.J. Brown & M. E. Clayton. 2006. *Distribution of phosphorus in a biologically restricted lake in Iowa, USA*. J. Hydrol. 326: 349 - 366.
- Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales- IDEAM- (2007). *Instructivo para la toma de muestras de aguas residuales*.
- Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales- IDEAM- (2007). *pH en agua por electrometría*.

Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales- IDEAM- (2013). *Aguas residuales*.

Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias – INIAP. (1993). *Manual del cultivo del café*. Quevedo. Ecuador. 21-24.

Espinal, C., Martínez, H., Acevedo, X. (2005). *La cadena del arroz en Colombia. Una mirada global de su estructura y dinámica, 1991-2005*. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural Observatorio Agrocadenas Colombia.

Lizarazo, J. Orjuela, M. (2013). *Sistemas de plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia*. Universidad nacional de Colombia. Bogotá.

López, L. Leal, M. (2013). *Evaluación del Diseño de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Propuesta para la Localidad de Cosautlán de Carvajal, Veracruz*. Universidad Veracruzana. Veracruz.

Martínez, F. (2002). *Aguas Residuales en Beneficios Húmedos de Café*. Instituto Superior de Ciencias y Tecnología. La Habana.

Matuk, V.; Puerta, G.; Rodríguez, N. (1997). *Impacto biológico de los efluentes del beneficio húmedo del café*. Cenicafé. Colombia.

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2015). *Resolución 631 de 2015*.

Molina, A.; Villatoro, R. (2006). *Propuesta de tratamientos de aguas residuales en beneficios húmedos de café*. Universidad El Salvador. El Salvador. 2.

- Montilla, Arcila, Aristizabal, Montoya, Puerta, Oliveros & Cadena, (2008). *Propiedades físicas y factores de conversión del café en el proceso de beneficio*. Cenicafé. Colombia.
- Osorio, J. Gonzáles E. Cortés, E. (2010). *La guadua fundamentos para el diseño de estructuras agropecuarias*. Universidad nacional de Colombia.
- Orozco, C., Barrientos, H.; López, A.; Cruz, J.; Selvas, C.; Osorio, El.; Osorio, Ed.; Chávez, R.; Miranda, J.; Arellano, B. (2005). *Evaluación de una planta piloto de tratamiento de aguas residuales del procesamiento del café: características químicas*. México.
- Parra, L. (2006). Operación de un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) hasta alcanzar el estado estable. Universidad nacional de Colombia. Manizales.
- Peñuela, A. (2010). *Estudio de la remoción del mucilago de café a través de fermentación natural*. Universidad de Manizales. Caldas. 19-20.
- Perea, J. Villegas, J. Bahamon, Y. Cortés, M. (2003). *Evaluación y documentación de prácticas sobresalientes sobre el sobre el manejo de la cosecha y maduración de la guadua en el departamento del Huila*. Ministerio de agricultura y desarrollo rural. Neiva.
- Puerta, G., Marín, J., Osorio, G. (2012). *Microbiología de la fermentación del mucilago de café según su madurez y selección*. Cenicafé.
- Puerta, G. (2000). *Beneficie correctamente su café y conserve la calidad de la bebida*. Cenicafé. Chinchiná. Colombia. 2.

- Prada, A., Cortes, C. (2010). *La descomposición térmica de la cascarilla de arroz: una alternativa de aprovechamiento integral*. Universidad de los Llanos. Villavicencio. Colombia. Scielo. 157.
- Quinceno, D., Mosquera, M. (2010). *Alternativas tecnológicas para el uso de la cascarilla de arroz como combustible*. Universidad Autónoma de Occidente. Santiago de Cali. 34.
- Ramírez, C., Oliveros, C., Sanz, J. (2015). *Manejo de lixiviados y aguas de lavado en el proceso de beneficio húmedo del café*. Cenicafé. 47.
- Reina, M., Silva, G., Samper, L., Fernández, M. (2007). *Juan Valdez, la estrategia detrás de la marca*.
- Roa, G.; Oliveros, C.; Álvarez, J.; Ramírez, C.; Sanz, R.; Álvarez, J.; Dávila, M.; Zambrano, D.; Puerta, G.; Rodríguez, V. (1999). *Beneficio ecológico del café. Chinchiná Colombia, Cenicafé*.
- Rodríguez, N. Sanz, J. Oliveros, C. Ramírez, C. (2015). *Beneficio del café en Colombia*. Cenicafé.
- Rojas, R. (2002). *Sistemas de tratamiento de aguas residuales*. Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente. OMS.
- Sanders (1998). *Valores estimados de la porosidad*.
- Savigne, D.; Romanovski, O. (1998). *Impacto de los residuales del beneficio húmedo del café en la provincia de Guantánamo Cuba*.

- Secretaria de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación – SAGARPA. (2004). *Pliego de condiciones para el uso de la marca oficial México calidad selectiva en café verde*. PC-010.
- Semanate, H. (2014). *Producción de café de alta calidad por comuneros de la comunidad indígena yanacona en el sur del Huila-Colombia. Un análisis de aglomeración espacial*. 43-48.
- Sosa, F. (2013). *Revisión bibliográfica Cultivo del genero Heliconia*. Scielo.
- Temis, A., López, A., Sosa, M. (2011). *Producción de café (Coffea arabica L.): cultivo, beneficio, plagas y enfermedades*. 56.
- Takeuchi, C. (2014). *Caracterización mecánica del bambú guadua laminado para uso estructural*. Universidad nacional de Colombia. Bogotá.
- Varela, L. (2013). *Diseño de la investigación para la evaluación de agua miel para riego en plantillas de café en el beneficio húmedo cooperativa nuevo sendero en la aldea chapas, nueva santa rosa, Guatemala, C.A. Guatemala*. 2-21
- Varón, J. (2005). *Diseño, construcción y puesta a punto de un prototipo de quemador para la combustión continua y eficiente de la cascarilla de arroz*. El hombre y la maquina No. 25. Redalyc. 130.
- Velasco, V., Puerta, G., & Rodríguez, N. (1997). *Impacto biológico de los efluentes del beneficio húmedo del Café*. Cenicafé. Colombia. 235 p.
- Villanueva, A. (2012). *Sistemas de tratamiento descentralizados de aguas residuales para pequeñas explotaciones agropecuarias en el departamento de Huila*. Universidad Surcolombiana. Neiva. 34.

Yaksic, R.; Ramírez, R. (2005). *Tratamiento de residuos de la planta de beneficio de ALEACAF*. Bolivia.

Zambrano, D. & Zuluaga, J. (1993). *Balance de materia en un proceso de beneficio húmedo del café*. Cenicafé.

Zambrano, D. Isaza, J. Rodríguez, N. López, U. (1999). *Tratamiento de aguas residuales del lavado del café*. Cenicafé.

**Anexo A.**  
**SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE CAFÉ**  
**ENCUESTA**

Nombre: \_\_\_\_\_

Finca: \_\_\_\_\_

Extensión del terreno: \_\_\_\_\_

¿Cuenta con algún tipo de tratamiento de aguas residuales de café en la finca?

SI \_\_\_\_\_ NO \_\_\_\_\_

¿Cuál es el sistema de tratamiento de aguas residuales de café implementado en su finca?

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

¿Le gustaría implementar alguno de los siguientes tratamientos de aguas residuales de café?

Filtros anaerobios \_\_\_\_\_

Filtros percoladores \_\_\_\_\_

Lagunas de estabilización \_\_\_\_\_

Humedales \_\_\_\_\_

Otra \_\_\_\_\_

Cuál? \_\_\_\_\_

VISTA TRANSVERSAL DEL TANQUE  
CON CASCARILLA DE ARROZ

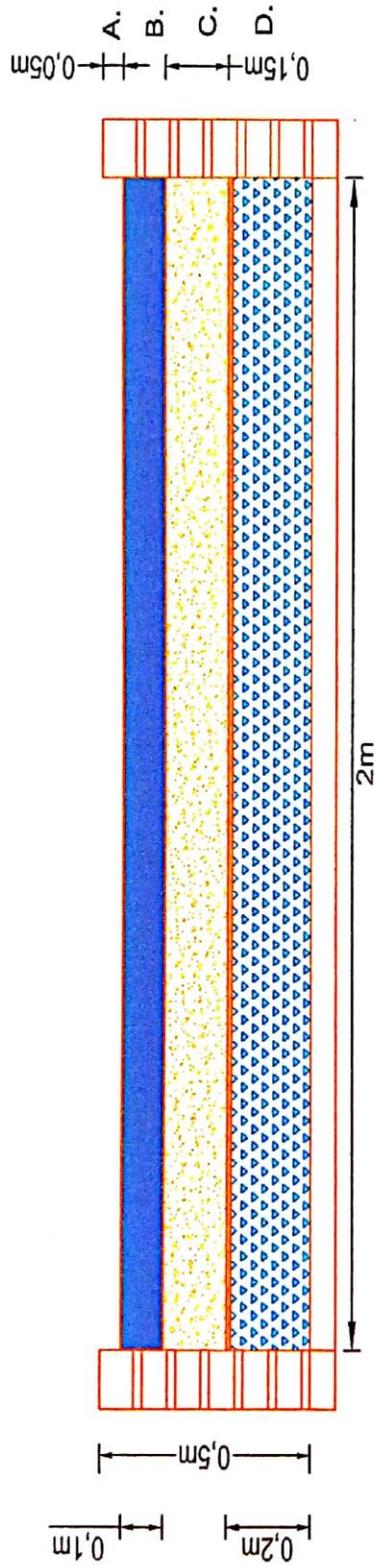


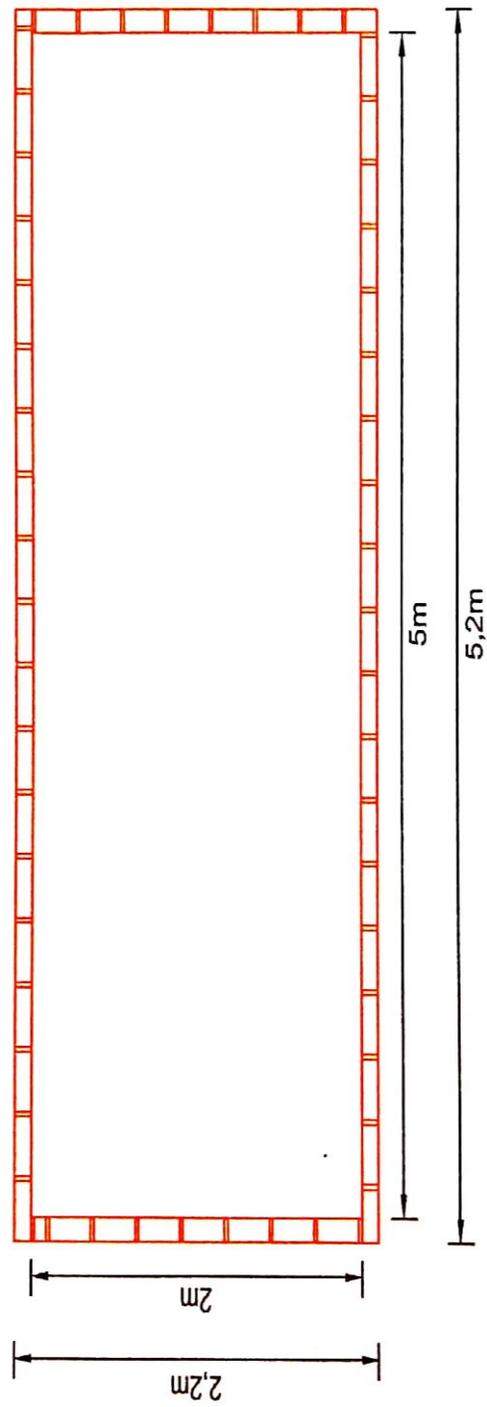
Tabla de convenciones

A.	Borde libre
B.	Espacio para agua residual
C.	Espacio para casarilla de arroz
D.	Falso fondo



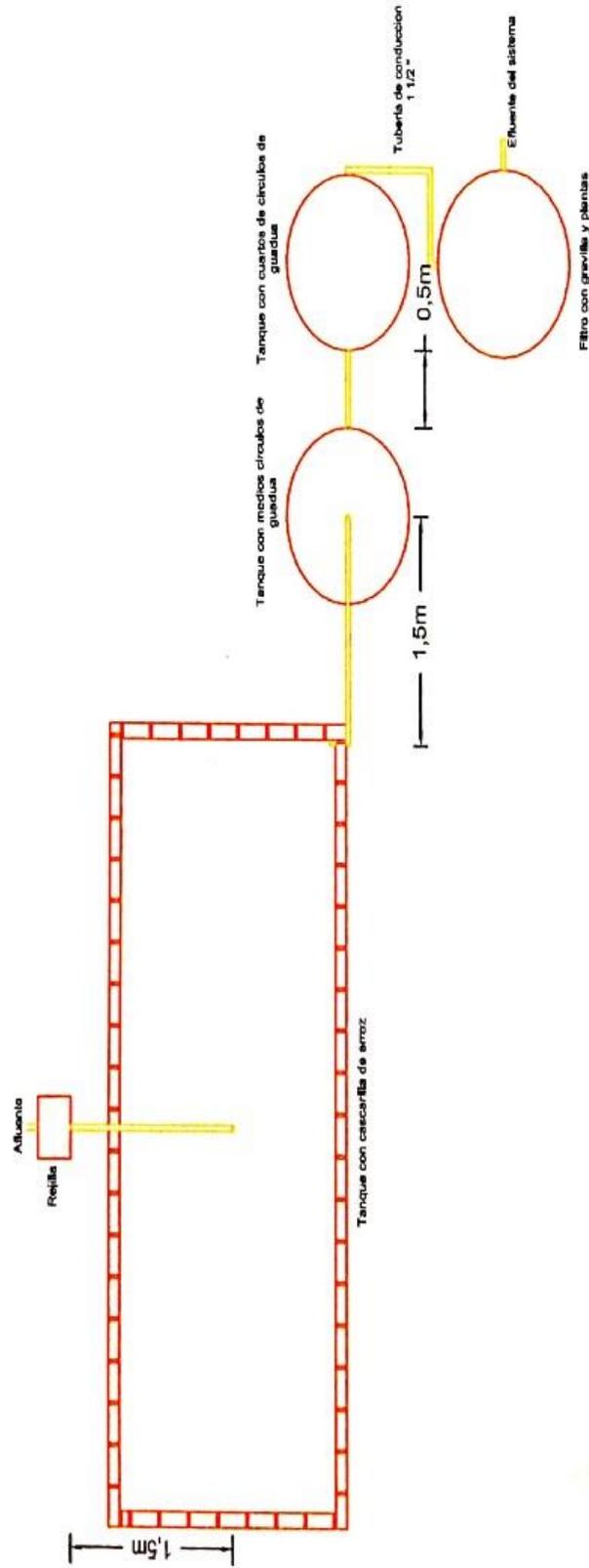
PROYECTO: SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE CAFE	CONTIENE: VISTA TRANSVERSAL FILTRO 1 TRATAMIENTO PRELIMINAR	REALIZADO POR: YESICA PAOLA LOPEZ LUZ ADRIANA ZUÑIGA	UBICACIÓN: FINCA LA ESPERANZA VEREDA LA PALMA ACEVEDO-HUILA	FECHA: 01 DE MARZO DE 2019	PLANO: 1 DE 3
				ESCALA: 1:12	

VISTA EN PLANTA DE TANQUE CON CASCARILLA DE ARROZ



		PROYECTO:	CONTIENE:	REALIZADO POR:	UBICACIÓN:	FECHA:	PLANO: 2 DE 3
		SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE CAFE	VISTA EN PLANTA FILTRO 1 TRATAMIENTO PRELIMINAR	YESICA PAOLA LOPEZ LUZ ADRIANA ZUÑIGA	FINCA LA ESPERANZA VEREDA LA PALMA ACEVEDO-HUILA	01 DE MARZO DE 2019	ESCALA: 1:30

# VISTA EN PLANTA DE SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE CAFE



		<b>PROYECTO:</b> SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE CAFE	<b>CONTIENE:</b> VISTA EN PLANTA SISTEMA DE TRATAMIENTO DE A.R. DE CAFE	<b>REALIZADO POR:</b> YESICA PAOLA LOPEZ LUZ ADRIANA ZUÑIGA	<b>UBICACIÓN:</b> FINCA LA ESPERANZA VEREDA LA PALMA ACEVEDO-HUILA	<b>FECHA:</b> 01 DE MARZO DE 2019	<b>PLANO:</b> 3 DE 3
		<b>ESCALA:</b> 1:45					

