



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 2

Neiva, 20 de noviembre de 2018

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El suscrito:

Juan Carlos Barreto Zúñiga, con C.C. No. 7726009, autor de la tesis y/o trabajo de grado titulado VIABILIDAD DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS MIELES PRODUCTO DEL BENEFICIO DEL CAFÉ CON BASE EN EL BIOADSORBENTE *Moringa oleifera Lam*, presentado y aprobado en el año 2018 como requisito para optar al título de Magister en ingeniería y gestión ambiental;

Autorizo (amos) 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:

Firma:

Juan Carlos Barreto Z.

Vigilada Mineducación



**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS**



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 2

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional 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.



TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: VIABILIDAD DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS MIELES PRODUCTO DEL BENEFICIO DEL CAFÉ CON BASE EN EL BIOADSORBENTE MORINGA OLEIFERA LAM

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Barreto Zuñiga	Juan Carlos

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Dir, Tovar Lizcano	Pavel
Codirector Olaya Amaya	Alfredo

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Magister en ingeniería y gestión ambiental

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: posgrado

CIUDAD: Neiva – Huila **AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2018 **NÚMERO DE PÁGINAS:** 130

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas___ Fotografías_X__ Grabaciones en discos___ Ilustraciones en general___ Grabados___
Láminas___ Litografías___ Mapas___ Música impresa___ Planos_X__ Retratos___ Sin ilustraciones___
Tablas o Cuadros_X_

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento:

Vigilada mieducación



MATERIAL ANEXO:

PREMIO O DISTINCIÓN (*En caso de ser LAUREADAS o Meritoria*):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. Tratamiento de Aguas Mielles de Café	Honey wáter coffee treatment
2. Semilla de <i>Moringa oleifera</i> Lam	Moringa oleifera Lam seed
3. Bioadsorbente	Bio adsorbent
4. pequeño productor de café	small coffee grower

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

Se pretende desarrollar un sistema de tratamiento para aguas mieles producto del beneficio húmedo del café, con el uso de *Moringa oleifera* Lam como bioadsorbente. Teniendo como referencia el Sistema de Tratamiento Modular Anaerobio (STMA) desarrollado por Cenicafé, se diseña y construye un sistema *in situ* en una pequeña finca cafetera en un municipio del departamento del Huila, Colombia. A este sistema se le analiza su funcionalidad y efectividad en el cumplimiento de la normatividad existente a partir del análisis de variables físicas y químicas del agua. Los resultados indican importantes tasas de remoción de contaminantes, así como también, la posibilidad de establecer este tipo de sistemas en pequeñas fincas cafeteras.

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

It is intended to develop a system of treating for honey water resulting from the humid coffee growing, with the use of "*Moringa oleifera* Lam as a bio adsorbent. Taking as a reference the Modular Anaerobic Treatment System (MATS) developed by "Cenicafé", is designed and developed a in situ system in a small coffee farm in a municipality in the department of Huila, Colombia. The functionality and effectiveness of this system is analysed according to the compliance of existing regulations from the analysis of the physical and chemical variables of water. The results show important rates of removal of pollutants, as well as the possibility to establish these kinds of systems in small coffee farms.



APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado: MSc. Luz Marina Botero Rojas

Firma:

Nombre Jurado: MSc. Angela Goretty Garcia Gomez

Firma:

Nombre Jurado: MSc. Luz Marina Botero Rojas

Firma:

**VIABILIDAD DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
MIELES PRODUCTO DEL BENEFICIO DEL CAFÉ CON BASE EN EL
BIOADSORBENTE *Moringa oleifera* Lam**

JUAN CARLOS BARRETO ZÚÑIGA

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERIA
MAESTRIA EN INGENIERIA Y GESTION AMBIENTAL
NEIVA – 2018**

**VIABILIDAD DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS MIELES
PRODUCTO DEL BENEFICIO DEL CAFÉ CON BASE EN EL
BIOADSORBENTE *Moringa oleifera* Lam**

JUAN CARLOS BARRETO ZÚÑIGA

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE
Magíster en Ingeniería Y Gestión Ambiental**

DIRECTOR

M.Sc. PAVEL TOVAR LIZCANO

CODIRECTOR

ALFREDO OLAYA AMAYA, M. Sc.

Dr. En Ingeniería Área Recursos Hidráulicos

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERIA
MAESTRIA EN INGENIERIA Y GESTION AMBIENTAL
NEIVA – 2018**

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	i
LISTA DE FIGURAS	ii
LISTA DE ANEXOS	iv
RESUMEN.....	vii
SUMARY	x
1. INTRODUCCIÓN	13
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
1.2. OBJETIVOS	22
1.3. JUSTIFICACIÓN	23
2. MARCO CONCEPTUAL	27
2.1. LA CAFICULTURA COLOMBIANA	27
2.2. EL CAFÉ Y LA CONTAMINACIÓN HÍDRICA.....	28
2.3. AGUAS RESIDUALES DE CAFÉ	30
2.4. MANEJO DE AGUAS PRODUCTO DEL BENEFICIO HÚMEDO DEL CAFÉ.....	35
2.5. BIOADSORBENTES PARA LA PURIFICACIÓN DE AGUAS	48
2.5.1. Semilla de <i>Moringa oleifera</i> Lam como bioadsorbente	49
2.5.2. Uso de la <i>Moringa oleifera</i> Lam en plantas de tratamiento de aguas	57
2.6. LEGISLACIÓN AMBIENTAL COLOMBIANA RELACIONADA CON LAS AGUAS RESIDUALES Y EL USO EFICIENTE DEL AGUA.....	61
3. METODOLOGÍA.....	65
3.1. AREA DE ESTUDIO	66
3.2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS PROVENIENTES DEL BENEFICIO DEL CAFÉ CON BASE EN LA SEMILLA DE <i>Moringa oleifera</i> Lam.....	67
3.3. EVALUACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS DE LAS AGUAS PROVENIENTES DEL BENEFICIO DEL CAFÉ EN EL SISTEMA DE TRATAMIENTO A BASE DE BIOADSORBENTES	69
3.4. ANÁLISIS DE LOS ASPECTOS OPERATIVO, LEGAL Y ECONÓMICO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS USADAS EN EL PROCESO DEL BENEFICIO DEL CAFÉ MEDIANTE SEMILLA DE <i>Moringa oleifera</i> Lam COMO BIOADSORBENTE.....	70
3.5. DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN COSTO BENEFICIO DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS EMPLEANDO <i>Moringa oleifera</i> Lam CON REFERENCIA AL SMTA PARA EL PEQUEÑO CAFICULTOR COLOMBIANO	71

4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	72
4.1.	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS PROVENIENTES DEL BENEFICIO DEL CAFÉ CON BASE EN LA SEMILLA DE <i>Moringa oleifera</i> Lam.....	72
4.1.1	Preparación del bioadsorbente <i>Moringa oleifera</i> Lam.....	78
4.1.2	Toma de las muestras.....	81
4.2.	EVALUACIÓN DE LA ACCIÓN DE LA SEMILLA DE <i>Moringa oleifera</i> Lam COMO BIOADSORBENTE EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS MIELES PRODUCTO DEL BENEFICIO DEL CAFÉ.	82
4.3.	ANÁLISIS DE LOS ASPECTOS OPERATIVO, LEGAL Y ECONÓMICO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS USADAS EN EL PROCESO DEL BENEFICIO DEL CAFÉ MEDIANTE SEMILLA DE <i>Moringa oleifera</i> Lam COMO BIOADSORBENTE.....	91
4.3.1.	Aspectos Operativos.....	91
4.3.2.	Aspectos Legales.....	92
4.3.3.	Aspectos Económicos.....	93
4.3.	RELACIÓN COSTO BENEFICIO DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS EMPLEANDO <i>Moringa oleifera</i> Lam CON REFERENCIA AL SMTA PARA EL PEQUEÑO CAFICULTOR COLOMBIANO.....	95
4.3.1	costos directos.....	97
4.3.1.1	Aspecto Operativo.....	98
4.3.1.2	Aspecto legal.....	99
4.3.1.3	Aspectos económicos.....	99
4.3.2	costos indirectos.....	101
4.3.1.	Aspecto operativo.....	101
4.3.2.2	Aspecto legal.....	103
4.3.2.3	Aspectos económicos.....	104
4.3.3	RELACION COSTO – BENEFICIO EN LOS SISTEMAS.....	105
5.	CONCLUSIONES Y RESULTADOS.....	107
	BIBLIOGRAFÍA.....	111
	ANEXOS.....	119

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición química de la fracción hidrosoluble de un extracto de pulpa de café (1 parte de pulpa de café: 660 partes de agua).....	31
Tabla 2. Prototipos de SMTA y estimativo de capacidad de tanques para fermentar y lavar, de acuerdo con la cantidad máxima de café en cereza beneficiado en un día....	37
Tabla 3. Materiales y necesarios para la inoculación y arranque de los SMTA.....	38
Tabla 4. Desarrollo histórico de legislación del agua en Colombia.	60
Tabla 5. Parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y los sistemas de alcantarillado público..	62
Tabla 6. Parámetros Fisicoquímicos del agua en el beneficio del café.....	67
Tabla 7. Resultados parámetros de acuerdo a la resolución 0631 de 2015 en el sistema de tratamiento de aguas producto del beneficio del café con semilla de <i>Moringa oleifera lam.</i>	81
Tabla 8. Costo sistema de tratamiento de aguas con bioadsorbentes.	92
Tabla 9. Generalidades del SMTA y el sistema de tratamiento de agua a base de bioadsorbente <i>Moringa oleifera Lam.</i>	94
Tabla 10. Comparación de costos directos entre el SMTA y el Sistema de tratamiento con el bioadsorbente <i>Moringa oleifera Lam</i> en pesos colombianos.....	99
Tabla 11. Comparación de costos indirectos entre el SMTA y el Sistema de tratamiento con el bioadsorbente <i>Moringa oleifera Lam</i> en pesos colombianos	102

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Partes del fruto de café.....	28
<i>Figura 2.</i> Diagrama de flujo del beneficiadero convencional y ecológico del café empleando el módulo BELCOSUB.....	30
<i>Figura 3.</i> Identificación de La moringa (<i>Moringa oleifera</i> Lam).....	48
<i>Figura 4.</i> Finca los Alpes, Iquira – Huila.....	64
<i>Figura 5.</i> Diseño prototipo tratamiento de aguas usadas en el proceso del beneficio del café mediante el bioadsorbente <i>Moringa oleifera</i> Lam.....	70
<i>Figura 6.</i> Trampa de pulpas (TP). a. trampa de pulpas vista interior, b. trampa de pulpas vista exterior.....	71
<i>Figura 7.</i> Excavación de rebose (ER). a. excavación de rebose, b. arboles de soqueo para introducir a la recamara de rebose.....	72
<i>Figura 8.</i> Recamara dosificadora (RD). a. recamara de dosificación vista interna, b. instalación de la recamara de dosificación.....	73
<i>Figura 9.</i> Dispositivos de partículas a. disco perforado. b. malla secaflex. Fuente: (Zambrano et al., 2010). c. válvula de aireación vista externa.....	73
<i>Figura 10.</i> Recamaras de bioadsorbentes. a. recamara bioadsorbentes vista frontal, b. recamara de bioadsorbentes salida de agua del sistema, c. recamara de bioadsorbente vista superior.....	75
<i>Figura 11.</i> Tratamiento de la semilla de <i>Moringa oleifera</i> Lam. a) Semilla de moringa sin tratamiento, b) semilla de moringa pelada y lavada, c) semilla de moringa triturada y secada..	77
<i>Figura 12.</i> Ecuación 1 Cantidad de polvo de moringa según la cantidad de agua a tratar.....	78
<i>Figura 13.</i> Cantidad de semilla de moringa para el (TB) para 750 ml de capacidad de agua producto del beneficio del café.....	78
<i>Figura 14.</i> Agua producto del beneficio del café sin entrar al sistema de tratamiento a base de bioadsorbentes.....	79
<i>Figura 15.</i> Muestras de agua tratada por una misma dosis del bioadsorbente semilla de <i>Moringa oleifera</i> Lam. De derecha a izquierda primer agua a tratar, segunda agua a tratar y tercera agua a tratar.....	80
<i>Figura 16.</i> Ecuación 2 porcentaje de remoción de carga contaminante; Co es la carga contaminante inicial, C1 carga contaminante final. Fuente: (Barrado et al., 2016).....	82

Figura 17. Costos del sistema de tratamiento a base de la semilla de *Moringa oleifera* Lam como bioadsorbente.....93

Figura 18. Comparación de costos del SMTA y sistema a base de *Moringa*.....98

Figura 19. Comparación de costos totales del SMTA y sistema a base de *Moringa*.....103

LISTA DE ANEXOS

Anexo1. Cotización Cadefihuila SMTA 600.....	118
Anexo 2. Resultados análisis de agua AGUALINSU SAS.....	119

AGRADECIMIENTOS

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional. Gracias a mi esposa Claudia Vargas por entenderme en todo, gracias a ella porque en todo momento fue un apoyo incondicional en mi vida, fue la felicidad encajada en una sola persona, fue mi todo reflejado en otra persona a la cual yo amo demasiado, y por la cual estoy dispuesto a enfrentar todo y en todo momento. Gracias a mis hijos Felipe y Valeria por entender que mediante el proceso de elaboración de esta tesis, fue necesario realizar sacrificios como momentos a su lado, y otras situaciones que demandaban tiempo, tiempo del cual los dueños eran ellos.

A mi madre, por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional. A mi padre, a pesar de nuestra distancia física, siento que estás conmigo siempre y aunque nos faltaron muchas cosas por vivir juntos, sé que este momento hubiera sido tan especial para ti como lo es para mí. Asimismo, agradezco infinitamente a mis Hermanos Luz marina, Rafael y Johana que con sus palabras me hacían sentir orgulloso de lo que soy y de lo que les puedo enseñar. Ojala algún día yo me convierta en su fuerza para que puedan seguir avanzando en su camino. A mis compañeras, Julio y Lina porque sin sus consejos, no hubiera estudiado esta maestría.

De igual forma, agradezco a mi Director de Tesis Pavel Tovar, que gracias a sus consejos y correcciones hoy puedo culminar este trabajo. A los Profesores que me han visto crecer como persona, y gracias a sus conocimientos hoy puedo sentirme dichoso y contento. A José Ricardo Caquimbo por creer en la propuesta de grado y por ultimo

gracias a la universidad Surcolombiana y a la maestría en ingeniería y gestión ambiental por formarme como el profesional que soy ahora.

RESUMEN

El cultivo de café en Colombia es uno de los principales rengones de la economía el cual representa el 36% del empleo agrícola asociado al más de un millón de empleos directos e indirectos, involucrando 360.000 familias de productores en 590 municipios del país.

De las familias productoras de café el 95% poseen unidades productivas menores a 2 hectáreas, es decir que gran parte de la explotación cafetera se encuentra en manos de minifundistas, aspecto que dificulta establecer procesos de inversión en tecnificación de la producción. Dentro de las dificultades que tiene la producción de café es precisamente el manejo adecuado de las aguas mieles generadas en el beneficio húmedo. Este proceso que aporta grandes cantidades de contaminantes a las fuentes hídricas en la región andina.

En este sentido se han desarrollado varios procesos que mitigan el problema de contaminación de las fuentes hídricas, sin embargo, se identifica que establecer dichos procesos en las fincas cafeteras requieren de montos de inversión económica , técnica y operativa que son difíciles de lograr en los predominantes minifundios cafeteros establecidos en Colombia. En consecuencia, el aporte conjunto de dichas unidades productivas a la contaminación de las fuentes hídricas es un problema relevante en el ámbito nacional.

La presente investigación evalúa la viabilidad económica, legal y operativa de un sistema de tratamiento de aguas mieles producto del beneficio de café para el pequeño caficultor colombiano, utilizando como bioadsorbente la semilla de *Moringa oleífera* Lam. Esta se desarrolló en la finca los Alpes ubicada a 3 kilómetros del área urbana del municipio de Iquira – Huila, Colombia.

En la elaboración del diseño se tuvo en cuenta la construcción y operación del SMTA e investigaciones realizadas sobre tratamientos de aguas producto del beneficio de café con *Moringa oleífera* Lam. También se realizaron análisis de aguas con el ánimo de evaluar el cumplimiento de la resolución 0631 del 2015 que establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales.

El aspecto operativo comparó el arranque, preparación y mantenimiento del sistema con el SMTA donde se evidenció menos procesos técnicos para preparación, arranque y mantenimiento del sistema.

El uso de la semilla de *Moringa oleífera* Lam como bioadsorbente aunque no logra a plenitud las exigencias requeridas en la legislación colombiana, si realiza importantes porcentajes de remoción de las cargas contaminantes del agua producto del beneficio del café, incluso para algunos parámetros denota mejores resultados que los mostrados por el sistema SMTA. El diseño elaborado en la presente investigación

se constituye en un aporte relevante para el abordaje de uno de los problemas que se le atribuyen al sector de la caficultura colombiana, en términos de ser un sistema de fácil implementación. De igual forma la operación del sistema con bioadsorbente no requiere experticia, requiere poco tiempo y emplea elementos propios de una finca cafetera. Todos estos aspectos facilitan su implementación para un pequeño caficultor.

Palabras Claves: Tratamiento de Aguas Mieles de Café, Semilla de *Moringa oleifera* Lam, Bioadsorbente, pequeño productor de café

SUMMARY

VIABILITY OF A SYSTEM OF TREATING HONEY WATER RESULTING FROM THE COFFEE GROWING BASED ON THE BIO ADSORVENT “*Moringa oleifera* Lam”

Coffee growing in Colombia is one of the most important lines of the economy which represent 36% of the agricultural employment associated to more than one million of direct and indirect employments, involving 360.000 families of growers in 590 municipalities in the country.

From the growers coffee families 95% possess production units smaller than 2 hectares, that means in a great portion of the coffee production is in the hands of the coffee agricultural smallholdings, which makes difficult the processes of investment in the modernization of production. Between the constraints of the coffee growing is, in fact, the proper management of honey water produced in the humid coffee processing. This process provides large amounts of pollutant products to water sources in the Andean region.

In this way it has developed several processes that mitigate the problem of pollution of water sources, however, it is identified that establishing the aforesaid processes in the coffee farms demands a large economical, technical and operative investment which are difficult to obtain in the predominant coffee agricultural smallholdings in Colombia. As a result, the join contribution of the aforesaid productive

units to the pollution of the water sources is a relevant problem in the national environment.

This research assesses the economic, legal and operative viability of a system of a honey water treatment as a final product of the coffee processing for the small Colombian coffee-grower using as a bio adsorbent the Moringa seed "*Moringa oleifera* Lam". It was developed in the farm "Los Alpes", located three kilometers away from the urban area in the municipality of Iquira (Huila, Colombia).

For the elaboration of the design it was taken into account the construction and operation of SMTA and some other researchers performed over water treatments as a final product from the coffee processing with "*Moringa oleifera* Lam". It was also performed water analysis with the purpose of assess the compliance of the resolution 0631 of 2015 which states the parameters and those maximum limit levels allowed in the punctual dumping to surface water sources.

The operative procedure compared the starting, preparation and maintenance of the system using SMTA where less technical processes were revealed.

The use of the seed of *Moringa oleifera* Lam as a bio absorbent, in spite that it did not reach the total requirements demanded by the Colombian laws, it in fact

performs relevant percentages of removal of pollutant loads of the water derived from the coffee growing, even for some parameters it states better results than those showed by the SMTA system. The design developed for this research is a relevant contribution to address one of the problems attached to the Colombian coffee growing area in the term of being a system of easy implementation. In the same way, the operation of the system using bio adsorbent does not demand expertise, it requires little time and uses the own resources of a coffee growing farm. All these issues facilitate its implementation for a smaller coffee grower.

KEY WORDS: Honey water coffee treatment, *Moringa oleifera* Lam seed, Bio adsorbent, small coffee grower.

1. INTRODUCCIÓN

La presente tesis de Maestría se enmarca en la línea de investigación de gestión ambiental de proyectos de ingeniería asociados al aprovechamiento de recursos hídricos, energéticos e industriales debido a que el trabajo de investigación se centra en el análisis de viabilidad de un sistema de tratamiento de aguas producto del beneficio de café a base del bioadsorbente *Moringa oleifera* Lam el cual se implementa como una tecnología aplicada en el contexto para el pequeño caficultor colombiano.

Debido a las necesidades presentadas por los pequeños caficultores para el tratamiento de aguas producto del beneficio de café y a la capacidad de la semilla de *Moringa oleifera* Lam para el tratamiento de diversos tipos de aguas se presenta como una alternativa para abordar la problemática planteada, en el presente estudio se diseñó y construyó un sistema de tratamiento de aguas residuales producto del beneficio de café, así como el estudio de viabilidad para el pequeño caficultor colombiano en los aspectos legal, económico y operativo y se determinó su relación costo beneficio en comparación del sistema modular de tratamiento anaerobio (STMA).

Es de destacar, que el trabajo de investigación es desarrollado “*insitu*” ajustándose a las necesidades reales de las pequeñas unidades productivas de café, lo cual permite la aplicabilidad y transferencia de procesos realizados a

comunidades productoras de café para propiciar el manejo integrado del recurso hídrico y permitirá fortalecer la gestión ambiental dentro de la región.

Este documento se ha estructurado en 4 capítulos. En el primer capítulo se presenta una revisión de los aspectos relacionados con la descripción de las necesidades de los pequeños caficultores colombianos en el aspecto de tratamiento de aguas y su posibles soluciones donde se formula la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es la viabilidad para el pequeño caficultor colombiano en la implementación de un sistema de tratamiento de aguas mieles producto del beneficio del café con base en la semilla de Moringa oleifera Lam?

En el segundo capítulo presenta los referentes teóricos del trabajo, enfocándose en un primer momento en la contaminación hídrica desarrollada por la caficultura, el manejo de esta contaminación, la definición de los bioadsorbentes y el uso de la semilla de moringa para el tratamiento de aguas en laboratorio como en plantas de tratamiento y la legislación colombiana en aguas.

En el tercer capítulo se describe la metodología a desarrollar en el estudio la cual propende ser secuencial debido a que tienen un orden cronológico en la ejecución y elaboración de los mismos iniciando por el diseño y construcción del sistema, análisis de viabilidad de los aspectos económicos, legales y operativos y finalizando por la relación costo beneficio del sistema en comparación de SMTA.

En el cuarto capítulo se evalúa los resultados obtenidos de la metodología propuesta realizando un análisis de cada uno de los objetivos desarrollados en la presente investigación.

Finalmente, se presentan las conclusiones generales del trabajo de investigación realizado, así como las recomendaciones y la producción científica asociada a la presente tesis de maestría.

1.1. **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

De acuerdo con la publicación realizada por Trejos *et al.* (2011) en la revista CENICAFÉ sobre las ventajas sociales y ambientales de la adopción de la norma de agricultura sostenible en dos regiones cafeteras de Colombia expone que “Entre los principales desafíos que enfrenta el sector rural en países Latinoamericanos, están el superar la pobreza y alcanzar la sostenibilidad de los sistemas de producción agropecuaria, lo que implica conciliar criterios de equidad, productividad y competitividad para el manejo sostenible de los recursos naturales.”

El cultivo del café aunque tiene un lado positivo de tipo económico y social, requiere procesos de fertilización y manejo de plagas que conlleva a modificar severamente el medio ambiente circundante causando variedad de problemas ambientales y fitosanitarios (Cenicafé, 2011).

Además, el procesado del fruto se realiza mediante el llamado “Beneficio Húmedo del Café”, donde se consume grandes cantidades de agua y casi el 80 % del fruto se considera de poco o nulo valor económico y por consiguiente es designado como desecho (Díaz *et al.*, 2013) de manera que, el agua con que se realiza el beneficio del café resulta seriamente contaminada puesto que en esta se puede encontrar azúcares, pectinas, cantidades pequeñas de cafeína, taninos, ácido clorogénico (estos dos últimos son los responsables del color del agua residual), poseen un pH ligeramente ácido y un nivel muy elevado de DQO (J. García, 2015).

Según resultados de investigaciones realizadas por CENICAFE, el 72% de la carga contaminante a las fuentes hídricas generada por Proceso de Beneficio Húmedo del Café (PBHC) correspondiente a un valor de DQO de 82.000 mg/kg de café cereza, se ocasiona al despulpar y transportar la pulpa con agua, y el 28% restante de la contaminación corresponden a un valor de DQO de 31.920 mg/kg de café cereza es ocasionada por las mieles de lavado. (Ramírez *et al.*, 2015).

Con las aguas producto del beneficio del café a nivel mundial se han implementado algunas metodologías para tratarlas, en Guatemala la Asociación Nacional del Café (Anacafé, 2012) desarrolló un tratamiento a través de procesos como: el tamizado de flujo de agua miel, la neutralización y homogenización, la floculación – decantación y la laguna de oxidación. Estos procesos dependen uno

de los otros y necesitan de bastante cuidado y manejo de las técnicas para no influir en los porcentajes de remoción en estos tipos de aguas.

Existen otros métodos para el tratamiento de las aguas producto del beneficio del café, puesto en práctica en Nicaragua, donde Bautista (2010) emplea biogestores para la producción de biogás a partir de la descomposición de la materia orgánica presente en el agua por medio de bacterias metanogénicas y los más comunes son el dosel flotante (indio) y el domo fijo (chino). En otros países como Honduras se usan biodigestores de polietileno tipo Taiwán, propuestos para el mismo fin.

En Colombia el centro nacional de investigaciones del café CENICAFÉ ha desarrollado una tecnología para el tratamiento de aguas producto del beneficio del café enfocada en las grandes y medianas haciendas mediante la instalación del Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio (SMTA) Zambrano *et al.* (1999), el cual cuenta con un reactor hidrolítico - acidogénico (RHA), una recámara dosificadora, un reactor metanogénico (RM) y un filtro opcional de postratamiento FOP; que muestra buenos resultados manteniendo una remoción de hasta un 80% de DQO en esta clase de aguas. Sin embargo debido a costos, a los grandes volúmenes de agua que maneja y el requerimiento de personal capacitado para este proceso es casi imposible su empleo por parte de los pequeños caficultores.

Otras tecnologías diseñadas por CENICAFÉ buscan la reducción del agua utilizada en el proceso del beneficio húmedo del café como la Tecnología De Bajo

Impacto Ambiental Para El Lavado Del Café (ECOMILL) y el Beneficio Ecológico Con Manejo De Subproductos (BELCOSUB), que consisten en lavar mecánicamente café con mucílago degradado en el proceso de fermentación natural o con aplicación de enzimas, con reducción notoria en el Volumen Específico de Agua (VEA) hasta valores entre 0,3 y 0,5 L.kg-1 de café pergamino seco (c.p.s.) debido al bajo VEA, las ARL altamente concentradas se pueden mezclar con la pulpa del café, reteniendo más del 95% del volumen adicionado y controlando hasta el 100% de la contaminación generada en el proceso (Oliveros *et al.*, 2013).

Otras acciones para mitigar este impacto ambiental expuestos por Alves *et al.* (2014), sobre la influencia de la cal hidratada, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, como agente coagulante y floculante para reducir los niveles de contaminación para una recirculación de agua en el proceso de producción de café mostraron una remoción del 70 a 80 % de la DQO presente en estas clases de agua. Otros autores utilizaron agentes químicos como lo son el sulfato de aluminio, sulfato ferroso clorado, cloruro férrico, comprobando que con concentraciones de 3g L-1 de coagulantes con intervalos de pH de 7,0 a 8,0 fueron los resultados que mayor remoción de sólidos en suspensión (SS) presentaron para el sulfato ferroso clorado (Metcalf, 1994).

Kadir *et al.* (2015) también diseño y utilizo biodigestores anaerobios (Upflow anaerobic sludge blanket UASB -upflow anaerobic filter UAF) para disminuir las características contaminantes de dichos efluentes mostrando buen rendimiento en

los procesos de remoción de carga contaminante en esta clase de aguas y cumpliendo con el Decreto Colombiano 1594 de 1984 sobre el uso del agua y vertimiento de los residuos líquidos. Es necesario señalar que los estudios anteriores se han realizado a nivel de laboratorio con la evidente necesidad de hacer una transferencia a campo.

Todos los tratamientos anteriormente relacionados han realizado aportes en pro de la mitigación del impacto ambiental generado por el beneficio húmedo del café. Sin embargo, existe una problemática que se cierne alrededor, que está relacionada con la producción del pequeño cafetero en Colombia, problemática que tiene las siguientes connotaciones:

En primer lugar en Colombia existen alrededor de 360000 familias productoras de café, de las cuales el 95% tienen minifundios que no superan 2 hectáreas en café (Federación Nacional de Cafeteros, 2016), por consiguiente el uso del agua por parte del pequeño productor en el beneficio del café es poco en comparación con una hacienda caficultora y en este sentido su potencial impacto ambiental sobre las fuentes hídricas es poco si se mira de manera individual. Pero dada la cantidad de pequeños cafeteros en Colombia (alrededor de 340000) su impacto sobre las fuentes hídricas es realmente grande, que de acuerdo al estudio nacional del agua 2014 la contaminación en términos de DQO es de 26.995 t/año. (IDEAM, 2015)

El segundo aspecto se deriva del anterior, y consiste en el hecho de que al ser productores de café a pequeña escala se dificulta que puedan hacer grandes inversiones económicas en procesos de tecnificación para el tratamiento de las aguas derivadas del beneficio del café, lo que deja latente el problema del impacto sobre las fuentes hídricas.

Dentro de las alternativas para esta problemática Sala *et al.* (2010) propone el uso de bioadsorbentes para el tratamiento de aguas debido a su fácil adquisición y economía en el manejo. Un estudio realizado por Arreola y Canepa, (2013) propone como alternativa realizar un tratamiento en aguas por medio de compuestos orgánicos como agente floculante, coagulante y propiedades adsorbentes es el uso de la semilla del fruto de *Moringa oleifera* Lam esta debido a los estudios recientes y la introducción dentro del mercado como planta medicinal hace fácil su adquisición para el caficultor Colombiano. Gupta *et al.* (2007) describen el uso de propiedades de adsorción de semillas de *Moringa oleifera* Lam en la eliminación de arsénico en las personas infectadas, también hay informes sobre el uso de las semillas en la eliminación de cadmio de agua contaminada (Meneghel, 2013), además de ser bien estudiada para el tratamiento de agua turbia (Ledo *et al.*, 2009).

Según lo anteriormente expuesto, se hace necesario proponer una alternativa “*in situ*” que aborde la problemática de la contaminación de las aguas provenientes del beneficio húmedo del café generada por los pequeños caficultores colombianos, dentro del marco del cumplimiento de la resolución 0631 del

Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (2015) sobre vertimientos de actividades productivas de agroindustria y ganadería. De manera que se considera importante realizar una investigación a partir del siguiente interrogante: ¿Cuál es la viabilidad para el pequeño caficultor colombiano en la implementación de un sistema de tratamiento de aguas mieles producto del beneficio del café con base en la semilla de *Moringa oleifera* Lam?

VIABILIDAD DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS MIELES
PRODUCTO DEL BENEFICIO DEL CAFÉ A BASE DEL BIOADSORBENTE
Moringa oleifera Lam

1.2. OBJETIVOS

Objetivo general.

Evaluar la viabilidad técnica y económica de un sistema de tratamiento de aguas mieles producto del beneficio del café con base en la semilla de *Moringa oleifera* Lam para el pequeño caficultor colombiano.

1.2.2 Objetivos específicos.

Diseñar y construir un sistema prototipo para el tratamiento de aguas usadas en el proceso del beneficio del café mediante bioadsorbentes.

Evaluar la acción de la semilla de *Moringa oleifera* Lam como bioadsorbente en el tratamiento de aguas mieles producto del beneficio del café en el sistema.

Analizar los aspectos económico, legal y operativo del sistema de tratamiento de aguas usadas en el proceso del beneficio del café mediante bioadsorbentes (semilla de *Moringa oleifera* Lam).

Determinar la relación costo beneficio del funcionamiento del sistema prototipo de tratamiento de aguas a base de bioadsorbentes con referencia al SMTA para el pequeño caficultor colombiano.

1.3. JUSTIFICACIÓN

A nivel mundial alrededor de 70% del agua dulce extraída es empleada en la agricultura y en algunas regiones esta cifra supera el 80% (Grajalez *et al.*, 2008). Dada esta circunstancia nace la necesidad de crear políticas públicas que regule y controle este recurso agua en las naciones.

En el año 2010 el estado Colombiano promulgo la Política Nacional para la gestión integral del recurso hídrico, con el propósito de resolver la actual problemática del recurso y promover un uso eficiente y sostenible para el bienestar de las generaciones futuras. (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010). De acuerdo con lo promulgado por el estado Colombiano Rendón (2014) expone que la ausencia de acciones para el manejo integrado del agua, genera problemas asociados con el exceso o el déficit del recurso, y en cualquiera de estos casos las consecuencias son graves sobre la calidad de vida de las personas y para el desarrollo económico y ambiental.

El café es un producto que para su beneficio de forma húmeda se utiliza hasta 40 litros de agua por kilogramo de café, haciendo de este un producto que consume grandes volúmenes de agua en su producción; que en su totalidad presenta una contaminación de materia orgánica medida o expresada como DQO muy elevada (Matuk *et al.*, 1997). Mirando hacia el futuro, si esta problemática no es mitigada puede traer grandes pérdidas de tipo económico, ambiental y social.

Hasta el momento para remediar la problemática planteada se ha generado sin número de investigaciones, dando origen a conocimientos y tecnologías para lograr el desarrollo sostenible que se busca para el sector caficultor Colombiano. Sin embargo el beneficio tradicional del café, sigue realizándose de manera generalizada y gran parte de estos aportes científicos no han sido adoptados por las pequeñas unidades productivas de café dado los costos derivados de estas tecnologías y la falta de conciencia ambiental por parte del productor (Cárdenas y Ortiz, 2014).

En este contexto, el desarrollo e implementación de tecnologías y procesos no convencionales en concordancia con las necesidades de los medianos y pequeños caficultores colombianos debe ser una prioridad de la investigación que se sustenta en la relevancia del café en la economía nacional.

Esta investigación propende plantear y construir un módulo para el tratamiento de aguas producto del beneficio del café que sea viable y eficiente a base de la semilla de *Moringa oleifera* Lam para que el pequeño productor de café lo adopte para un manejo integrado del recurso hídrico, lo cual permitirá fortalecer la gestión ambiental dentro de la región aledaña a la quebrada Ibirco que es de vital importancia para el municipio de Iquira – Huila debido a que esta fuente hídrica surte de agua potable a dicha población.

Adicionalmente la presente investigación contribuye a la línea de investigación de gestión ambiental de proyectos de ingeniería asociados al aprovechamiento de recursos hídricos, energéticos e industriales, ya que tiene como fines identificar, evaluar e implementar las tecnologías más apropiadas para desarrollarlas en el contexto, en este caso el sistema de tratamiento de aguas producto del beneficio del café a base de bioadsorbentes (Universidad Surcolombiana, 2016).

La investigación es de tipo experimental, debido a que esta se desarrolló “*in situ*” ya que existen diversos estudios sobre el tratamiento de aguas a nivel de laboratorio como es el caso del desarrollado por (Mera *et al.*,2015) sobre bioadsorbentes y aguas producto del beneficio de café los cuales funcionan en volúmenes de agua menores; esta aporta la implementación en el campo de una nueva tecnología en el tratamiento para este tipo de aguas, en la que se pretende establecer la eficacia y viabilidad del bioadsorbente semilla de la *Moringa oleifera* Lam para el tratamiento de aguas producto del beneficio del café. Lo que podría ser una buena alternativa posible para los pequeños y medianos productores de café y así puedan hacer tratamientos de las aguas empleadas en el beneficio húmedo del producto.

El desarrollo del conocimiento de este estudio generará un cambio en los procesos para el tratamiento de las aguas producto del beneficio del café ya que pretende reducir costos de instalación y mantenimiento de los tanques, dando

diferentes usos a los subproductos que provienen del sistema y así cumplir con la normatividad colombiana para el recurso agua. A demás de dar un punto de partida para la aplicación de otros tipos de bioadsorbentes que pueden ser implementados para este tipo de aguas en el sistema propuesto.

2. MARCO CONCEPTUAL

Para la investigación que se propone es necesario afirmar que la misma implica establecer conceptos que son determinantes y que son necesarios para entender la misma y como se puede establecer nuevas formas o metodologías que lleven a la protección del medio ambiente sobre todo en el sector cafetero.

2.1. LA CAFICULTURA COLOMBIANA

La (Federación Nacional de Cafeteros, 2010), expone que las regiones cafeteras se encuentran localizadas entre 1° y los 11° de latitud Norte, longitud Oeste 72° a 78° con una extensión de 3'050.141 hectáreas y rangos específicos de altitud que pueden superar los 2.000 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). La producción media registrada desde el año 2004 hasta el 2013 es de 10,2 millones de sacos de 60 kg de café verde.

Según el (Conpes, 2006) el cultivo de café genera más de un millón de empleos directos e indirectos, involucrando 563.000 familias de productores y es determinante en la vida rural y en el desarrollo económico de 590 municipios. Siendo una actividad de pequeños productores, donde el 73,7% de las fincas tiene un tamaño que varía entre 0,1 y 5,0 ha, representa el 36% del empleo agrícola, genera el 1,6% del PIB nacional, y el 12,5% del PIB agrícola nacional con una alta

dependencia regional. Haciendo de esta actividad agrícola de gran importancia para Colombia y su desarrollo económico y social.

El café colombiano cuenta con un buen reconocimiento en los mercados mundiales por su calidad y sus propiedades organolépticas haciendo de este un producto muy bien comercializado, solo el petróleo lo supera en su comercialización (Peralta, 2014). Por tal razón es de vital importancia buscar nuevos enfoques y afrontar los retos relacionados con las tendencias del consumo y la disponibilidad actual y potencial del recurso hídrico bajo los criterios de desarrollo sostenible.

2.2. EL CAFÉ Y LA CONTAMINACIÓN HÍDRICA

De acuerdo con Cárdenas *et al.* (2014) en el estudio sobre el 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. En la actualidad se viven los efectos de distintos problemas ambientales, los impactos combinados de estos problemas sobre el medio ambiente está generando una crisis ambiental. Esta situación afecta a los diferentes elementos de la naturaleza, tales como plantas y animales (elementos bióticos), agua, suelo y aire (elementos abióticos); y a todos los seres que habitan en el planeta.

Los mismos autores exponen que cuando la naturaleza es afectada, disminuyen los bienes y servicios que ella puede brindar a la sociedad. Uno de los indicadores de la crisis ambiental; es el daño a los recursos hídricos, ocasionado por la contaminación y la sobre explotación de los ríos, lagos y acuíferos; así como el inadecuado manejo y conservación del agua. Esta condición es conocida como crisis del agua. Este fenómeno de deterioro ambiental tiene impacto sobre los sistemas naturales y sobre las actividades humanas.

Dentro de dicha contaminación existe una relación entre los procesos productivos y la contaminación hídrica, un ejemplo de lo planteado anteriormente se evidencia en trabajos dirigidos por (Chapagain *et al.*, 2003) , en el cual expone los indicadores de la huella ecológica estimados para producir una taza de café (125 ml) en el cual se necesitan 120 L de agua.

A nivel mundial se midió cuánta agua virtual que movilizan 356 productos transados en el comercio internacional (1997-2001), estimando en conjunto que se mueven un 1,26 billones de m³ de agua y entre los productos, el café no tostado y no descafeinado ocupa el primer lugar aproximadamente con 80.000 millones de m³ . Esto equivale al 6,32% del volumen del intercambio de agua virtual en el mundo. En segundo lugar está el trigo con 75.000 millones de m³ de agua virtual al año (Cárdenas y Ortiz, 2014). De esta manera podemos decir que la relación producción de café y contaminación hídrica en las zonas cafeteras es directa afectando a estas regiones y de una u otra forma a toda la población mundial.

Concordando con lo planteado (Cadena y Jaramillo, 2009) son explícitos al citar que en Colombia no es ajeno a la problemática anterior y por lo tanto se debe fortalecer los programas de ahorro y uso eficiente del agua y la intensificación de los mecanismos limpios de producción.

2.3. AGUAS RESIDUALES DE CAFÉ

Según (Peralta, 2014) el procesamiento mediante el cual el café cereza (fruto) es transformado a café pergamino seco (semilla) se conoce como “beneficio”. Para obtener las semillas de color verde grisáceo es necesario retirar tres envolturas: la pulpa (exocarpio) que representa el 43,6% en peso del fruto; el mucílago (mesocarpio) material rico en pectinas y azúcares que representa el 14,9% del peso; y el pergamino y la película plateada (endocarpio) que cubren las almendras y representan el 4,2% (ver figura 1.).

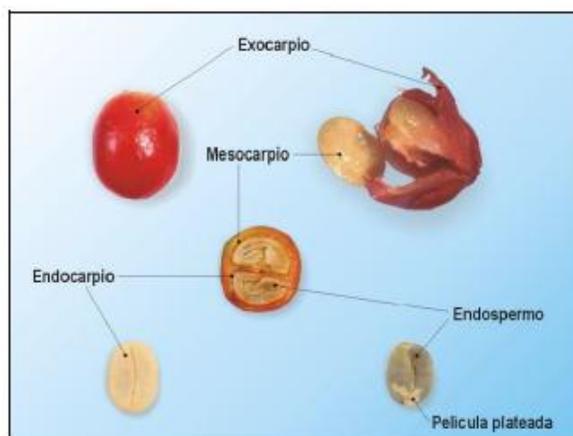


Figura 1. Partes del fruto de café fuente: (Peralta, 2014)

De acuerdo a lo planteado por (Arango, 2007) en el estudio de un biosistema integrado para el postratamiento de las aguas residuales del café utilizando macrófitas acuáticas, expone que en Colombia existen dos tipos de beneficio vía húmeda para el fruto de café, convencional y ecológico (Figura 2). El beneficio convencional utiliza agua en las etapas de despulpado y lavado del café fermentado (remoción del mucílago), con un consumo global de agua de 40 L/kg de café pergamino; en tanto que el ecológico emplea la tecnología BECOLSUB desarrollada por Cenicafé, realiza despulpado en seco, desmucilaginado mecánico y emplea agua en una proporción de 5 L/kg de café pergamino en la etapa de lavado (Vega y Martínez, 2011).

Una de las desventajas del beneficio de café por vía húmeda es el empleo de elevados volúmenes de agua para el procesamiento, lo cual genera cantidades equivalentes de aguas residuales. Además estas aguas contienen una elevada carga orgánica contaminante en términos de sólidos y demanda química de oxígeno (DQO), así como una marcada acidez reflejada en los bajos valores de pH (Peralta, 2014).

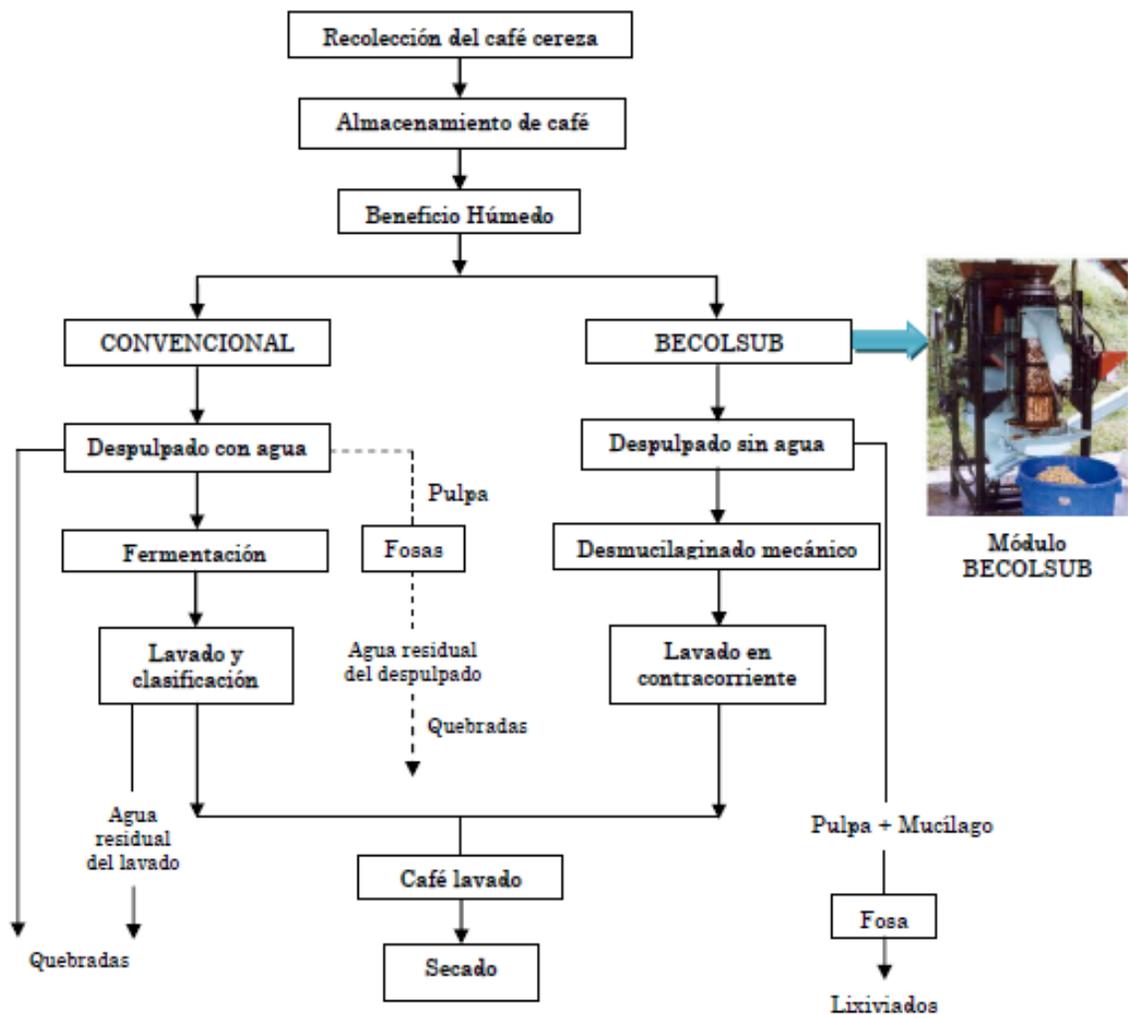


Figura 2. Diagrama de flujo del beneficiadero convencional y ecológico del café empleando el módulo BELCOSUB. Fuente: (Cárdenas, 2000).

Según lo expuesto por (J. García, 2015) la mayor parte de la contaminación del agua producto del beneficio del café se ve reflejada en la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y entre los componentes de la DQO del agua de pulpa son azúcares y proteínas, así como pequeñas cantidades de cafeína, taninos y ácido cloro génico (tabla 1). Los taninos y el ácido cloro génico son los responsables del

color del agua residual (cuando el pH es elevado). El aguamiel contiene básicamente ácidos orgánicos simples de pectina y azúcares, provenientes del mucílago.

Usualmente el agua residual del beneficio del café está parcialmente acidificada de forma natural. Una muestra fresca de jugo de pulpa se acidifica rápidamente convirtiéndose en ácidos grasos volátiles durante el almacenaje a 25 grados Celsius, a causa de las bacterias fermentativas presentes en la pulpa (J. García, 2015).

Tabla 1.

Composición química de la fracción hidrosoluble de un extracto de pulpa de café

Fracción identificada	Porcentaje de DQO
Grasas	4.2
Proteínas	24.4
Azúcares	44.2
Cafeína	7.9
Taninos	8.7
Acido clorogénico	10.8

Una parte de pulpa de café: 660 partes de agua. Fuente: (J. García, 2015).

La importancia de tratar las aguas de los beneficios radica en que la oxidación de la materia orgánica contenida en el agua se efectúa por medio de la microflora bacteriana que se alimentan de la materia consumiendo el oxígeno disuelto en el agua. En caso de una descarga importante de materia como es el caso del vertido del agua miel, se agota el oxígeno (anaerobiosis), y se destruye por asfixia la fauna y flora acuática (Cenicafé, 2011).

La información suministrada anteriormente muestra la dimensión del gasto hídrico producido y la problemática ambiental en el proceso de beneficio húmedo, así como la inadecuada disposición del agua. Razón por la cual el esfuerzo de entidades para generar iniciativas que promuevan el buen uso del recurso hídrico del proceso de beneficio húmedo del café, para generar impactos positivos en pro del desarrollo sostenible en las zonas cafeteras de Colombia.

Cárdenas *et al.* (2014) realizaron el estudio de un Manejo integrado del recurso agua, en el proceso de beneficio húmedo de café, para la asociación de productores de café especial ACAFETO en el municipio de Fresno - Tolima. En este estudio realizado se investigó sobre el estado de manejo del agua en el proceso del beneficio húmedo.

Dentro de las conclusiones se obtuvieron que los restrictores de caudal de agua en el lavado de los equipos; despulpadoras y desmucilaginador permitieron un ahorro medio del 33% y con el dispositivo tanque tina un ahorro medio del 39,66%; en lo que tiene que ver con las normas de vertimiento, el pH promedio del efluente para cosecha y mitaca fue 5,3 unidades, cumpliendo con lo establecido en el decreto 1594 de 1984.

Después de la sensibilización y educación en la gestión integral del recurso hídrico, de la adopción de tecnologías y buenas prácticas en el manejo del agua,

se encontró que el 36,6% implementó tanques plásticos con aristas redondeadas para el lavado del café. Muestra que el 58,5% adoptó la práctica de lavado en tanque tina controlando el nivel de agua. El 65,9% utilizó 3 enjuagues controlando el nivel de agua, mostrando que solo con la concientización y aplicando los procesos para el manejo hídrico del agua se puede reducir la carga contaminante de la región.

2.4. MANEJO DE AGUAS PRODUCTO DEL BENEFICIO HÚMEDO DEL CAFÉ

A nivel mundial se busca del desarrollo sostenible de las regiones y en esta búsqueda se han desarrollado tecnologías en pro de solucionar la problemática que conlleva el beneficio húmedo del café dentro de estas tecnologías se tiene:

ANACAFÉ (2012) propone un modelo de tratamiento el cual requiere de la recirculación del agua, lo que provoca una alta concentración de carga orgánica formada por el mucílago del fruto del café y algunas trazas de pulpa, por lo que se realiza el tratamiento de aguas residuales del beneficiado húmedo de café con técnicas como el tamizado de flujo de agua miel que consiste en la eliminación de partículas gruesas por medio de tamices con mallas atornilladas a un marco de hierro.

El agua tamizada es conducida al tanque de homogenización, previo a la adición de una solución con cal hidrata (hidróxido de calcio) con una relación de 3

a 4 gramos/litro de agua miel a tratar. Esta solución se vierte por pequeñas cantidades al tanque homogenizador, con el propósito de alcalinizar el flujo de agua miel. Esto permite dar inicio a la floculación y crear el medio adecuado para que las bacterias degraden con mayor eficiencia la materia orgánica en suspensión.

Para realizar el proceso de floculación y decantación se requiere de dos o más pilas colocadas en serie o paralelas, con un volumen de agua acorde al que se utiliza en una jornada del beneficio. En estas pilas el agua tendrá un Tiempo de Resistencia Hídrica (TRH) de 24 a 48 horas en total, es decir, de 12 a 24 horas en cada una. El propósito es que se obtenga la máxima floculación-decantación permitiendo, de esta manera, la recuperación de los lodos y la separación del agua clarificada.

Las pilas tendrán en el piso una pendiente del 10 a 12 %, para dar efecto de escorrentía y, así, vaciar los lodos a una pila específica y aledaña para recuperarlos. Cada una contará con dos tipos de drenajes. Uno de ellos para drenar los lodos, con una salida de 6 pulgadas de diámetro y el otro, que contará con un falso codo, con un diámetro de 3 a 4 pulgadas y servirá para trasladar las aguas clarificadas hacia el tanque situado a un plano más bajo. La esperanza de eficiencia de los tamices y de estas pilas será la de eliminar del 50 al 65% de los sólidos suspendidos y entre el 45 al 50% de Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Por último se utiliza la laguna de oxidación que para este estudio se requieren dos lagunas de oxidación. Una de ellas albergará los lodos y la otra el agua clarificada, sin evacuar éstas a ninguna fuente de agua limpia. Los lodos pueden utilizarse como abono orgánico combinándolos con la pulpa y luego, ya compostados, se utilizan como abono para las plantaciones o en los almácigos.

Las ventajas de este sistema radican en que no emana olores pestilentes, favorece la degradación de materia orgánica, no prolifera fauna nociva, es económico en comparación con otros sistemas, el agua tratada no se vierte a fuentes hídricas, los lodos se utilizan como abono orgánico y aporta su implementación para aplicar a los sellos y certificaciones para cafés especiales.

Zambrano *et al.* (2010) exponen la construcción y operación de un sistema modular de tratamiento anaerobio (SMTA) para las aguas mieles, estos han sido desarrollados por CENICAFE para reducir más del 80% de la contaminación presente en las aguas residuales de lavado del grano o “mieles del café”, las cuales se originan en beneficiaderos que tiran el mucílago o baba del café por el método convencional de fermentación natural, alcanzando remociones de demanda bioquímica de oxígeno DBO_5 acordes con lo exigido por la legislación colombiana en el decreto 1594 de 1984.

Los SMTA consta de módulos interconectados que permiten eliminar la carga contaminante en cuatro momentos, se inicia con la eliminación de las grasas gracias a su densidad, en un segundo instante se homogeniza la mezcla de aguas para luego pasar por un tercer momento donde el agua recorre un doble filtro mecánico utilizando una malla mosquitera y piedra caliza; en un último proceso gracias a la acción de bacterias metanogénicas es eliminada más de un 80% la carga contaminante de este tipo de aguas (Zambrano *et al.*, 2010).

En este estudio muestra los tipos de SMTA para cada unidad productiva dependiendo de la cantidad de café cereza a despulpar y el consumo de agua por parte de estos en la Tabla 2, se puede evidenciar el estimativo de capacidad de los tanques para fermentar y lavar, de acuerdo con la cantidad máxima de café en cereza beneficiado en un día, a partir de esta tabla en el estudio se suministra los planos, materiales y construcciones de cada uno de los SMTA.

Tabla 2. *Prototipos de SMTA y estimativo de capacidad de los tanques para fermentar y lavar.* Fuente (Zambrano *et al.*, 2010)

SMTA	Máxima cantidad de café cereza beneficiado (Kg/d)	Volumen estimado para lavado* (L)
SMTA 70	72	75
SMTA 120	126	131
SMTA 180	188	187
SMTA 300	313	325
SMTA 400	417	433
SMTA 600	625	649
SMTA 800	833	864
SMTA 1100	1110	1152
SMTA 1700	1710	1774

*el 70% del volumen corresponden al ocupado por el café en baba y el 30% al volumen libre para hacer el lavado.

En la parte operacional del sistema muestra el proceso de inoculación de las bacterias metanogénicas la cual tiene un tiempo de arranque de 2 meses y medio, donde en un tanque externo ocurre una preparación de una mezcla 1:1 de agua y estiércol pasando por la aplicación de una fuente de carbono que puede ser agua del primer y segundo lavado de café o miel de purga en diferentes concentraciones; además de la aplicación de una fuente de nitrógeno que puede ser urea u orina animal y por ultimo una solución buffer en este caso cal masilla blanca para controlar el pH según las recomendaciones de la Tabla 3.

Tabla 3. *Materiales y necesarios para la inoculación y arranque de los SMTA.*

(Zambrano *et al.*, 2010)

REACTOR METANOGENICO			INOCULACIÓN				ARRANQUE		
Volumen (L)	Guadua (metros lineales)	Tercio de botella (numero)	Inoculo (bacterias)	Fuente de carbono Opción A	Opción B	Fuente de nitrógeno	Buffer de arranque	Día	Tiempo de alimentación diaria (hora min)
250	22	186	30 Kg de estiércol + 30L de agua	15 L, 1° enjuague + 15 L, 2° enjuague	2 kg de miel de purga en 60 L de agua	1,5 L orina animal o 25 g de urea disuelta en 1L de agua	0,5 kg de cal masilla blanca disuelta en 5 L de agua	1 a 24	00:06
								15 a 28	00:15
								29 a 42	00:35
								43 a 56	01:00
								57 a 70	01:30
71 en adelante	Continuo								
500	43	369	60 Kg de estiércol + 60L de agua	30 L, 1° enjuague + 30 L, 2° enjuague	4 kg de miel de purga en 120 L de agua	3 L orina animal o 50 g de urea disuelta en 2L de agua	1 kg de cal masilla blanca disuelta en 10 L de agua	1 a 24	00:13
								15 a 28	00:30
								29 a 42	01:10
								43 a 56	02:00
								57 a 70	03:00
71 en adelante	Continuo								
750	66	558	90 Kg de estiércol + 90L de agua	45 L, 1° enjuague + 45 L, 2° enjuague	6 kg de miel de purga en 180 L de agua	4,5 L orina animal o 75 g de urea disuelta en 3L de agua	1,5 kg de cal masilla blanca disuelta en 15 L de agua	1 a 24	00:20
								15 a 28	00:45
								29 a 42	01:45
								43 a 56	03:00
								57 a 70	04:30
71 en adelante	Continuo								
1000	85	735	120 Kg de estiércol + 120L de agua	60 L, 1° enjuague + 60 L, 2° enjuague	8 kg de miel de purga en 240 L de agua	6 L orina animal o 100 g de urea disuelta en 4L de agua	2 kg de cal masilla blanca disuelta en 20 L de agua	1 a 24	00:25
								15 a 28	01:00
								29 a 42	02:20
								43 a 56	04:00
								57 a 70	06:00
71 en adelante	Continuo								
2000	170	1470	240 Kg de estiércol + 240L de agua	120 L, 1° enjuague + 120 L, 2° enjuague	16 kg de miel de purga en 480 L de agua	12 L orina animal o 200 g de urea disuelta en 8L de agua	4 kg de cal masilla blanca disuelta en 40 L de agua	1 a 24	00:52
								15 a 28	02:00
								29 a 42	04:40
								43 a 56	08:00
								57 a 70	12:00
71 en adelante	Continuo								

En la publicación de Zambrano *et al.* (2010) ilustra paso a paso, el proceso para la instalación, arranque y operación de un SMTA en una finca, así como las recomendaciones para las posibles soluciones a las afectaciones en el sistema.

Zambrano *et al.* (2006) en el boletín técnico número 26 para el tratamiento de aguas mieles del café, mostro la tecnología de un Sistema Modular De Tratamiento Anaerobio SMTA con cada una de sus partes, cambios del antiguo SMTA , trabajo de concientización con una comunidad indígena de la Sierra Nevada de Santa Marta para el programa Sembradores de Paz y los costos para poner en marcha el sistema mostro que la aclimatación y el arranque del reactor se llevó a cabo en 256 días y se aplicaron cargas entre 0,3 y 8,75 Kg DQO/m³d. empleando como inóculo el estiércol de ganado vacuno.

Se encontró que las botellas plásticas no retornables BPNR presentan una porosidad de 98,7% y un área específica de contacto de 51,7 m²/m³ reactor. Las eficiencias de remoción promedio para el estado estable del reactor metanogénico fue 80; 83,4; 45,99 y 74,3% para la Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅), los Sólidos totales (ST) y los Solidos Suspendidos Totales (SST), respectivamente.

En el boletín técnico número 20 publicado por CENICAFE expuesto por Zambrano *et al.* (1999) sobre el tratamiento de aguas residuales del lavado del café expone la construcción de un sistema modular de tratamiento anaerobio

(SMTA), el cual consta de un reactor Hidrolítico – acidogénico, una recamara de dosificación y un reactor metanogénico, este estudio proporciona los procesos metodológicos para incluir este sistema en los beneficiaderos, los costos de construcción y las recomendaciones técnicas para el arranque del reactor metanogénico, como resultado de este estudio muestran que es posible con este sistema cumplir con la normatividad colombiana del decreto 1594 de 1984 en la reducción de la carga contaminante en los vertimientos puntuales.

En un documento expuesto por CENICAFÉ (2011) que recibe el nombre de Construyendo el Modelo Para La Gestión Integrada Del Recurso Hídrico en la Caficultura Colombiana donde abordar el manejo del agua como *“una estrategia de carácter nacional desde una perspectiva ambiental e integral que recoja las particularidades de la diversidad regional y las potencialidades de la participación de actores sociales e institucionales”* con el fin de garantizar la sostenibilidad del recurso.

En este estudio se evidencia la investigación permanente en todo lo relacionado con el ciclo hidrológico asociado al café, como por ejemplo, la evaluación de especies nativas para la reforestación de las microcuencas de la zona cafetera, el monitoreo de las variables climáticas de la zona cafetera y la cuantificación del balance hídrico en cafetales, con el fin de conocer la disponibilidad del agua en la zona, el manejo integrado del suelo para prevenir la erosión y los movimientos masales, la prevención de la contaminación de las

fuentes hídricas mediante un manejo integrado de plagas y enfermedades y la eliminación o racionalización del uso del agua en las diferentes etapas del proceso de beneficio húmedo.

Así también el control de la contaminación de las aguas residuales del café por medio de su tratamiento integral, en el cual se incluyen los tratamientos secundarios y terciarios, con el fin de evitar el impacto negativo en los recursos agua y suelo de la zona cafetera, y el monitoreo de la calidad del agua en algunos ecosistemas acuáticos de la zona cafetera, mediante análisis físico-químicos y la diversidad de macroinvertebrados acuáticos.

Como resultado de este estudio, Cenicafé recomienda el manejo racional e integrado de los recursos naturales, de acuerdo con las condiciones del entorno y con su aptitud de uso, con el fin de prevenir los problemas de degradación como la erosión hídrica, los movimientos en masa y la contaminación de aguas, contribuyendo así con la conservación de los suelos, aguas y biodiversidad, especialmente en las zonas de ladera.

También expone las estrategias para lograr el uso eficiente del agua que han permitido disminuir su consumo de 40 litros a menos de 5 litros por cada kilogramo de semilla obtenida, y abarcan el despulpado y transporte de la pulpa y el café despulpado por gravedad, sin la utilización de agua, y la racionalización en

el consumo de agua en la etapa de lavado, utilizando la práctica de cuatro enjuagues en el tanque tina, que tiene aplicabilidad para todos los productores.

Desarrollos tecnológicos como la tecnología Becolsub, que involucra el desmucilaginado mecánico, y que en Colombia se utilizan actualmente cerca de 20.000 equipos, siendo adoptada por productores de diferentes tamaños, permite disminuir los consumos de agua a menos de 1 litro por kilogramo de café pergamino seco; el separador hidráulico de tolva y tornillo sinfín utilizado para realizar la clasificación del fruto y mejorar la calidad de la semilla, permitió disminuir el consumo de agua en la etapa de clasificación de 4,7 litros (consumo del tradicional tanque sifón) a sólo 0,3 litros/kg de café pergamino seco (cps). Si el 20% de la producción de café (asumiendo una producción anual de 11 millones de sacos) se clasifica en cereza, utilizando el separador hidráulico de tolva y tornillo sinfín, en lugar del tanque sifón, el ahorro anual de agua sería del orden de 771.375 m³, suficiente para abastecer de agua a una población de 14.000 habitantes durante todo el año.

Se muestra también el diseño de un lavador mecánico (ECOLAV), y actualmente está evaluando su comportamiento, con el fin de disminuir el consumo de agua en la etapa de lavado de 4,12 litros (gastados en el tanque tina) a menos de 0,4 litros/kg de cps, lo que tendrá un impacto significativo en la reducción del consumo de agua y en los costos de tratamiento, por el menor volumen de aguas residuales generadas.

Si el 20% de la producción de café (asumiendo una producción anual de 11 millones de sacos) se lava en el ECOLAV, en lugar del método tradicional en canal de correteo, que utiliza 20 litros/kg de cps., el ahorro anual de agua sería del orden de 3,2 millones de m³, suficiente para abastecer de agua a una población de 58.000 habitantes durante todo el año.

Los SMTA se construyen utilizando tanques de polietileno como reactores, y trozos de botellas plásticas no retornables de polietilentereftalato (PET), como medio de soporte de microorganismos. Las eficiencias de remoción típica promedio para el estado estable del sistema oscilan alrededor del 80%, 83%, 46% y 74% para DQO, DBO5, ST y SST, respectivamente, con afluentes con concentraciones de DQO medias de 25.000 ppm.

En el área de postratamiento y con el fin de cumplir con la nueva normativa ambiental para vertimientos, condensada en el Decreto 3930 del 2010, Cenicafé está investigando en Sistemas de Tratamiento Natural, que involucran macrófitas y que se ubican en serie con los SMTA, permitiendo disminuir la DQO de las aguas mieles de 25.000 ppm (entrada al SMTA) a menos de 400 ppm (salida del sistema natural), reduciendo significativamente el impacto sobre el ecosistema cafetero.

De esta forma se muestra de manera detallada como se ha implementado en la caficultura cafetera diversas tecnologías que permite el desarrollo sostenible de las zonas cafeteras Colombianas.

Dentro de los avances técnicos publicados por CENICAFE realizado por Oliveros *et al.* (2013) exponen la tecnología ECOMILL que consiste en un tanque, donde se deposita el café despulpado y lleva a cabo el proceso de fermentación natural, para degradar el mucílago, o con aplicación de enzima pectinolítica, el tanque presenta forma cilíndrica con fondo en forma de cono truncado invertido, con 60° de inclinación con la horizontal, para permitir el flujo del café por gravedad hasta la tolva del alimentador del lavador, colocada en su base. La capacidad del tanque puede llegar hasta 2.000 ó 3.000 kg de café despulpado en el modelo ECOMILL 1.500 y hasta 6.000 kg de café despulpado en el modelo 3.000. De acuerdo con la capacidad requerida del equipo, pueden variar el número y los volúmenes de los tanques, pero conservando el ángulo de inclinación y el diámetro en la descarga.

Alimentador de café tiene como función entregar el café con mucílago degradado a un lavador húmedo mecánico, en el rango de flujo requerido según el modelo, con bajo daño mecánico. Para su accionamiento se requiere baja potencia (< 100W) y bajo torque o par motor (< 50 N.m), por lo cual se utiliza el motor del lavador, con una transmisión de potencia que permite operarlo a baja velocidad de giro, 23 a 36 rpm, según el modelo.

El manejo de los sub-productos en la tecnología ECOMILL consiste no solamente de equipos para lavar café en proceso con fermentación natural o utilizando enzimas pectinolíticas, sino también de estrategias para manejar la pulpa mediante la realización de abonos por medio de la lombriz roja californiana y las aguas residuales de lavado (ARL) con alta carga orgánica utilizando secadores solares para ser luego utilizados como abono orgánico para el mismo cultivo.

La tecnología ECOMILL se adapta fácilmente a la infraestructura existente en la finca, disminuyendo la inversión en equipos, es de fácil manejo y muy resistente a las difíciles condiciones que existen en los beneficiaderos de café. Adicionalmente, está diseñada para permitir el lavado diario de sus partes, con gran economía de agua y tiempo del operario.

Esta tecnología representa un gran avance para apoyar las labores de beneficio en la producción de café, empleando la fermentación natural, con el menor volumen específico de agua empleado en la actualidad, menor requerimiento de potencia por tonelada de café procesado, menor daño mecánico causado a los granos y la posibilidad de controlar el 100% de la contaminación generada en el proceso, permitiendo la valoración de los subproductos del proceso (mieles y pulpa) y la obtención de nuevos productos de importancia comercial.

2.5. BIOADSORBENTES PARA LA PURIFICACIÓN DE AGUAS

A nivel mundial se ha despertado un interés por el uso de los bioadsorbentes, sustancias de origen vegetal que ayudan a la eliminación de partículas contaminantes por la unión pasiva a la biomasa no viva a partir de soluciones acuosas utilizadas para abordar la creciente contaminación de aguas residuales urbanas, rurales e industriales por iones tóxicos de metales pesados y materia orgánica, aún a nivel de trazas. Siendo una buena alternativa para estos contaminantes orgánicos e inorgánicos de considerable interés, debido a que en algunos casos no son biodegradables y son altamente tóxicos (Kumar *et al.*, 2010).

La presencia de contaminantes en aguas residuales puede tener diferentes razones, pero generalmente se debe a los desechos originados por la industria metal-mecánica, minera, metalúrgica, de manufactura y la agricultura (Worch, 2012)

De acuerdo con lo planteado por Rentería *et al.* (2014) exponen que la bioadsorción es una tecnología de bajo costo para remover iones solubles con grupos químicos electronegativos. Esta permite a su vez la adsorción o retención de los iones metálicos disueltos por materiales con capacidad adsorbente. Los componentes estructurales de los materiales usados en la bioadsorción contienen

moléculas como proteínas, polisacáridos o nucleótidos con diversos grupos polares, como carboxílicos (COOH), aminos (NH), fosfatos (PO₄), tioles (SH), e hidroxilos (OH), con capacidad de enlazar al ion metálico por atracción de cargas opuestas (Asma, 2005).

La fuerza de unión del material bioadsorbente depende del pH, temperatura, fuerza iónica del medio, características químicas del metal, así como de la capacidad adsorbente, la cual se encuentra en función de su contenido de grupos funcionales, lo que a su vez depende de la especie, textura, período estival y zona geográfica (Zhexian, 2006).

2.5.1. Semilla de *Moringa oleifera* Lam como bioadsorbente

El estudio de este bioadsorbente es muy amplio ya que esta planta ha sido bien estudiada en el campo de la salud y suplemento alimenticio, como lo confirma (Olson *et al.*, 2011) en su estudio sobre la *Moringa oleifera*: un árbol multiusos para las zonas tropicales secas, donde expone que el árbol es objeto de gran atención por parte de los productores, en tanto que crece el número de proveedores que promueven la planta como panacea. Ante esta situación, es necesario separar los usos que están identificados y fundamentados por el conocimiento científico de aquellos que no lo están. Las características de la planta se muestran en la figura 3.

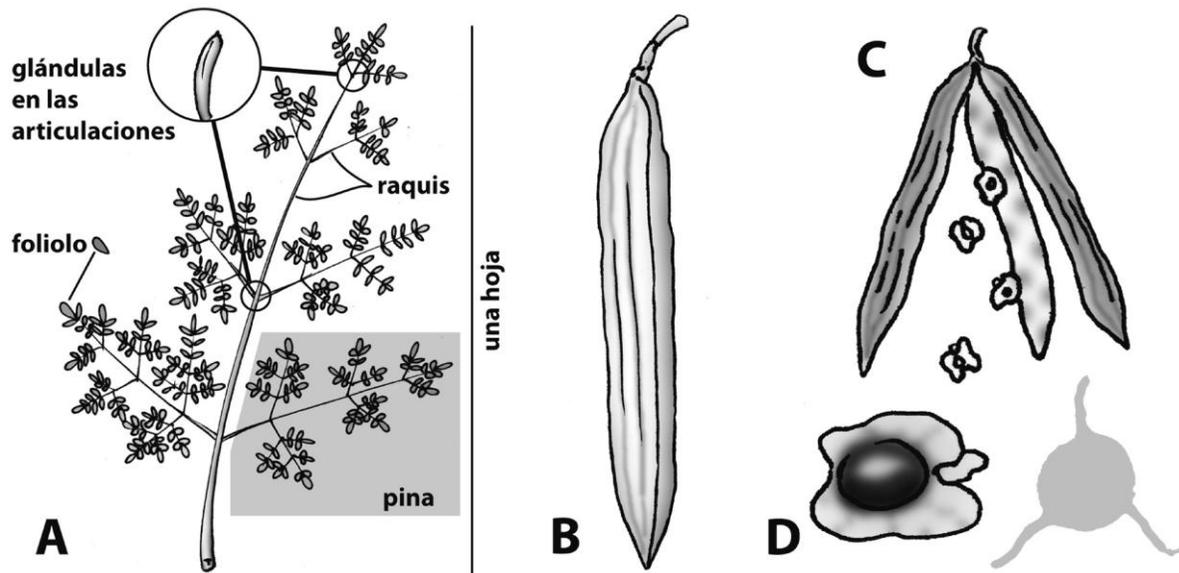


Figura 3. Identificación de La Moringa (*Moringa oleifera* Lam). Fuente: Olson *et al.* (2011)

En la anterior figura se pueden identificar las siguientes estructuras: A, hojas grandes, pinnadas, que pueden alcanzar unos 60 cm de longitud; están divididas en folíolos dispuestos sobre un raquis. En la articulación de cada raquis se encuentran pequeñas glándulas de 1 mm de longitud. B-D. Frutos y semillas. B, fruto, una cápsula ligera, leñosa y seca, que en la madurez mide de 10 a 30 o hasta 50 cm; C, el fruto se abre en 3 partes o valvas; D, semillas de 1.5-3 cm de diámetro con un centro de color café oscuro y 3 alas de color beige; la silueta muestra la configuración de las 3 alas. Hojas pinnadas con glándulas en las articulaciones, frutos con 3 valvas y semillas con 3 alas. Olson *et al.* (2011)

Con base en el presente estudio y en la literatura, se presenta un resumen de las bases científicas que sustentan algunos de los beneficios de la moringa, en la medida de lo que hasta hoy se conoce. Los análisis comprueban que la harina de hoja de la moringa se compara favorablemente con la leche en polvo en cuanto a sus componentes de proteína y de calcio y tiene, adicionalmente, un alto contenido de vitamina A. Además de su valor nutritivo, las hojas son ricas en antioxidantes, entre los cuales destacan los isotiocianatos, los cuales parecen presentar propiedades anticancerígenas, hipotensoras, hipoglucemiantes y antibióticas.

Las concentraciones de factores antinutritivos en las hojas, tales como inhibidores de proteasas, taninos, saponinas y lectinas, son insignificantes. La mayoría de los estudios sobre las cualidades benéficas de la moringa se han llevado a cabo *in vitro* o en animales; por lo tanto, se desconocen las dosis necesarias para producir algún efecto benéfico en humanos. Los beneficios potenciales son muchos (purificación de aguas) y los niveles de sustancias antinutricionales bajísimos, en este estudio no se encontró argumentos en contra del consumo de la planta.

En la bibliografía consultada para el tratamiento de aguas a base de *Moringa oleifera* Lam encontramos el estudio realizado por (Sandoval *et al.*, 2013) sobre *Moringa oleifera* una alternativa para sustituir coagulantes metálicos en el tratamiento de aguas superficiales en el cual compara la eficiencia de coagulación

entre tres tipos de soluciones obtenidas de las semillas de *Moringa oleifera* (solución de moringa en agua destilada, solución de moringa y cloruro de sodio 1N y solución moringa y agua de mar) con el sulfato de aluminio mediante prueba de jarras.

Se parte de la dosis óptima del sulfato de aluminio, como parámetro de comparación para determinar la eficiencia de remoción de los coagulantes naturales así como la influencia de los mismos en las propiedades del agua tratada. La muestra de agua fue tomada del río Samaria que alimenta la planta de tratamiento el Manguito, ubicada en Nacajuca, Tabasco, México.

El tratamiento del agua con sulfato de aluminio proporcionó los valores más altos de remoción de turbiedad (95.60%) y color (98.32%), seguida del tratamiento de la solución de *Moringa* en cloruro de sodio. Por otro lado, los tratamientos con *Moringa oleifera* no cambiaron las propiedades químicas del agua tratada. La eficiencia de eliminación de turbidez fue mayor cuando se utilizaron soluciones de moringa con cloruro de sodio (92.03%) y agua de mar (90.72%) que cuando se usó agua destilada como disolvente (56.02%), debido a que la presencia de iones promueve una mayor separación de proteínas solubles, responsables de la coagulación. Aun cuando, el sulfato de aluminio coagula mejor, las soluciones salinas con *Moringa* mantienen la turbiedad y el color en valores cercanos a los establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

Como conclusión del estudio se tiene que la eficiencia de remoción utilizando *Moringa oleifera* constituye un método de tratamiento competitivo con las sales metálicas de sulfato de aluminio. Con ello se abre una posibilidad de sustitución del sulfato de aluminio por los efectos adversos a la salud que se le atribuyen.

Haq *et al.* (2007) realizaron un estudio sobre la eliminación de iones de Zn (II) de una solución acuosa usando *Moringa oleifera* Lam, donde realizó una bioadsorción de este metal con el tratamiento de la biomasa de moringa en soluciones de hidróxido de sodio, ácido sulfúrico, hidróxido de calcio, ácido fosfórico, hidróxido de aluminio y ácido clorhídrico; en la que se evaluó la dosis bioadsorbente y tamaño de partícula bioadsorbente, que eran 0,5 g / L, <0,255 mm, respectivamente.

El pretratamiento de la *Moringa oleifera* Lam afectó la capacidad de absorción (mg / g) de biomasa para el Zn (II) en el orden siguiente: NaOH (45,76)> H₂SO₄ (45,00)> Ca (OH)₂ (42,60)> H₃PO₄ (41,22)> Al (OH)₃ (41,06)> HCl (37,00)> biomasa no tratada (36,07). Este sugiere que la afinidad entre el metal y adsorbente se puede aumentar después de algún tipo de tratamiento previo.

Los estudios cinéticos revelaron que la absorción de Zn (II) fue de 90% luego de 40 minutos de tiempo de contacto y el equilibrio se alcanzó en 50

minutos de tiempo de contacto. Se concluyó que el pretratamiento de la *Moringa oleifera* Lam puede lograr una superior capacidad de captación del Zn (II) comparación con la biomasa no pretratada.

Barrado *et al.* (2016) realizó la eliminación de microalgas con *Moringa oleifera* Lam teniendo en cuenta que las semillas de este árbol tienen un alto nivel de proteínas que funcionan como polielectrolitos catiónicos, una vez que se añaden al agua sin tratar. Las proteínas que causan coloides de desestabilización y eliminación por sedimentación actúan como polielectrolito catiónico y neutralizan materiales en suspensión, ya que la mayoría de ellos están cargados negativamente, como las algas, que tienen una carga eléctrica negativa en sus paredes celulares.

En este estudio se utilizaron las especies de algas *Chlorella*, *Microcystis*, *Oocystis* y *Scenedesmus*; mediante el test de jarras se comprobó que el extracto de semilla de la *Moringa oleifera* Lam es un muy eficaz en la remoción de algas por coagulación / floculación de las aguas. La dosis y la concentración inicial de algas afectan positivamente el porcentaje de eliminación. El pH no afecta significativamente a este proceso. En un tiempo de 30 minutos, se logra el equilibrio algas y la moringa.

João *et al.* (2014) realizó un estudio sobre el efecto del extracto de la semilla de *Moringa oleifera* Lam en la adsorción de la carga contaminante del agua residual de la cría del ganado lechero. El objetivo del estudio era evaluar el efecto de *Moringa oleifera* Lam en la remoción de sólidos totales (ST), sólidos suspendidos totales (SST) y demanda química de oxígeno (DQO), en diferentes medios de filtro para el tratamiento de aguas residuales de la cría de ganado lechero.

El extracto de semilla de moringa se obtuvo por molienda 50 g de semillas en un litro de agua destilada y después de pasar la solución a través de un filtro de papel cuantitativo de 25 micras, se añadieron 60 ml del extracto a las aguas residuales de la cría de ganado, antes de que el proceso de filtración pase por los filtros orgánicos hechos de carbón fino, hojas de bambú, hojas de eucalipto, ramas gliricidia y serrín.

Esto fue seguido por el diseño experimental completamente al azar, la adopción de un factorial de 5 x 2. Las alícuotas del efluente filtrado se tuvieron en cuenta las concentraciones los sólidos totales (ST), sólidos suspendidos totales (SST) y la demanda química de oxígeno (DQO). Se encontró que el aumento de la eficacia de la eliminación de la DQO y sólidos totales se puede atribuir a la fuente de coagulación de la extracto de semilla de moringa, en el que el medio de filtro con hojas de bambú presentó el mejor rendimiento, que muestra potencial

para su uso como material de filtro alternativo en el tratamiento primario de aguas residuales de la cría de ganado lechero.

Un trabajo de gran importancia para la investigación es el realizado por Mera *et al.*(2016) en el cual analizaron efecto de la *Moringa oleifera* Lam en el tratamiento de aguas residuales en el Cauca, Colombia. Donde se utilizaron aguas resultantes del proceso de beneficio de café con turbidez mayor a 2000 Unidades Nefelométricas de turbidez (UNT) y aguas provenientes del pelado químico de vegetales con 91,5 UNT.

Los tratamientos se realizaron empleando el test de jarras a 130 revoluciones/minuto a temperatura de 21,5°C con tiempo de agitación de 30 minutos para aguas residuales de beneficio de café y 15 minutos para aguas de pelado químico de vegetales. Para determinar calidad del agua se evaluó: turbidez, pH, conductividad eléctrica, cloruros, sólidos suspendidos, coliformes totales y fecales del sobrenadante; se efectuó la comparación con sulfato de aluminio utilizando la misma dosificación.

Los resultados indican que empleando 4 g/600 mL de agua residual de beneficio de café se obtuvo una eficiencia del 80,9% y 73,5% con polvo de semilla de moringa y sulfato de aluminio respectivamente y empleando 0,15 g/600 mL de agua del pelado químico de vegetales se tuvo una eficiencia del 66,75% con

moringa y con el sulfato de aluminio de 63,5%; estableciendo que el polvo de semilla de moringa es más efectivo en mejorar los diferentes parámetros establecidos en la investigación.

Como conclusión del estudio se tiene que el polvo de semilla de *Moringa oleifera* Lam es efectivo como floculante y coagulante natural en el tratamiento de aguas residuales provenientes del proceso de beneficio de café y del proceso de pelado químico de vegetales mejorando parámetros físicos, químicos y microbiológicos en un 80,9%, igualmente el sulfato de aluminio pero solo en un 73,56%. La dosis apropiada de polvo de semilla de moringa (*Moringa oleifera*) para aguas residuales del proceso de beneficio de café es de 4 g/600 mL y para aguas resultantes del pelado químico de vegetales es de 0,15 g/600 mL.

2.5.2. Uso de la *Moringa oleifera* Lam en plantas de tratamiento de aguas

(Muyibi *et al.*, 2004) realizaron un estudio sobre el tratamiento convencional de las aguas superficiales con el uso de semillas de *Moringa oleifera* como un coagulante primario en el cual dispuso de una planta de tratamiento de aguas escala modelo piloto para el tratamiento de las aguas superficiales de una corriente turbia utilizando semillas de *Moringa oleifera* al 25% w / w como coagulante primario. La planta de tratamiento de agua se compone de cuatro unidades de operación: coagulación, floculación, sedimentación y filtración (filtro de arena rápido).

Los recorridos de ensayo se llevaron a cabo durante tres horas en cada procesamiento, durante un período de tres meses con turbiedades de 18 a 261 NTU. La turbidez, pH, y la alcalinidad, así como la pérdida de carga del filtro se midieron cada 30 minutos durante los ensayos experimentales. La remoción de turbiedad promedio fue de hasta el 96% a una dosis efectivas de 20 y 30 mg / l de *Moringa oleifera* para la baja (<50 NTU) y moderada turbidez (<100 NTU) de agua, respectivamente, las dosis se observó 50 - 80 mg / l de agua (> 100 NTU) de alta turbidez. Se encontró que el extracto de semilla *Moringa oleifera* no tiene ningún efecto significativo en el pH o la alcalinidad del agua. Las turbiedades residuales medidas durante la mayor parte de las pistas de ensayo que deben cumplir con la Directriz de Malasia para el agua potable.

En otro estudio realizado por (Katayon *et al.*, 2006) sobre la eficacia de *Moringa oleifera* como coagulante primario a escala piloto de la planta de tratamiento de agua en la universidad de Putra en Malaysia, puso a prueba la planta piloto para evaluar la eficacia de la alta tasa del módulo de una solución para el tratamiento de agua turbia sintética usando alumbre. El porcentaje de remoción de turbiedad utilizando el módulo de sedimentación de alta tasa fue de aproximadamente un 20% mejor que la remoción de turbiedad sin módulo de sedimentación de alta tasa. Además, la eficacia de la coagulación de granos de semillas trituradas de *Moringa oleifera* Lam. Se examinó el uso de alta tarifa del plan piloto del módulo de sedimentación.

Las semillas de *Moringa oleifera* se mostraron prometedoras como coagulantes para el tratamiento del agua. La turbidez después de la filtración era muy por debajo del valor de referencia de la Organización Mundial de la Salud de <5 NTU para el agua potable a partir del agua turbia sintética de 200 NTU.

(Beltrán *et al.*, 2009) publicó un estudio sobre la mejora de la planta piloto de tratamiento de agua con extracto de *Moringa oleifera* como agente floculante donde mostro un estudio completo de una instalación de planta piloto para dicho proceso. Demostrando que la turbidez residual que se produjo en la planta piloto (alrededor de 30 NTU), no puede reducirse simplemente por un proceso de coagulación-floculación-sedimentación. Debido a esta limitación, la planta piloto (excluyendo la filtración) alcanzó una turbidez eliminación hasta 70%. Por tal razón se construyó un filtro lento de arena de acuerdo a la hipótesis hidráulica de Carman-Kozeny. De este se encontró el parámetro k de Kozeny que fue de 4,18. A través de las etapas de ensuciamiento, se encontró que este parámetro k pasa a ser de hasta 6,36. Dando como resultado que los datos obtenidos de esta hipótesis son relevantes para el diseño de un filtro real en una planta piloto de alimentación continua.

Como conclusión del estudio se tiene que la filtración lenta es muy recomendable debido a su bajo costo, fácil manejo y bajo mantenimiento, por lo que es un muy buen complemento para el tratamiento del agua de moringa en los países en desarrollo.

De Paula *et al.* (2014) proponen un tratamiento complementario para las aguas residuales de una planta de hormigón, el cual tiene un sistema de tratamiento convencional compuesta por tanques de sedimentación. El proceso propuesto utiliza $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y *Moringa oleifera* (MO) como coagulantes. Con esta combinación de coagulantes, se eliminó más del 90% de la turbidez, y una relación de 20:80 (w / w) se obtuvo de MO y $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. Después del tratamiento, el agua residual era adecuada para su reutilización en el lavado de vehículos o inodoros.

Otro estudio realizado por Muyibi *et al.* (2003) en el cual realizó el estudio comparativo sobre el tratamiento de agua superficial con extracto de semilla de *Moringa oleifera* y alumbre, usando una planta de tratamiento de agua a escala piloto, en el cual la baja turbidez inicial del 21,5 a 49,3 NTU, se lograron una turbidez residual de 2,7; 1,8 y 1,4 NTU después del tratamiento usando *Moringa oleifera*, alumbre, alumbre y con *Moringa oleifera* como coagulante auxilios, respectivamente. Para turbiedades medianas que varían desde 51,8 hasta 114 NTU, se lograron turbiedades residuales de 2,9; 1,2 y 1,4 después del tratamiento usando *Moringa oleifera*, alumbre, alumbre y con *Moringa oleifera* como coagulante auxilios, respectivamente.

Para la alta turbidez que varía de 163 a 494 NTU, se lograron los residuos mínimos de 1,4; 1,9 y 0,9 NTU después del tratamiento usando *Moringa oleifera*,

alumbre, alumbre y con *Moringa oleifera* como coagulante auxilios, respectivamente. El mecanismo propuesto para la eliminación de la turbidez por semilla *Moringa oleifera* en este estudio es una combinación de neutralización de carga parcial y micro-puente o un mecanismo de parche electrostática sobre la base de los resultados de las mediciones de potencial zeta.

2.6. LEGISLACIÓN AMBIENTAL COLOMBIANA RELACIONADA CON LAS AGUAS RESIDUALES Y EL USO EFICIENTE DEL AGUA

En primer lugar cabe denotar que para hablar de normatividad Colombiana se debe hacer referencia a la constitución política en sus artículos 79 y 80 en los cuales establece que es deber del estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica como también garantizar la calidad del agua para consumo humano y, en general, para las demás actividades en que su uso es necesario, además fijar su destinación y posibilidad de aprovechamiento, estableciendo la calidad de la misma y ejerciendo control sobre los vertimientos (Constitución Política de Colombia, 1991).

Según lo planteado anteriormente y para el buen desarrollo del proceso investigativo desarrollado en este estudio se tendrá en cuenta una lista de decretos y resoluciones que son las metas mínimas que se plantean para poder demostrar la viabilidad del modelo para tratar las aguas producto del beneficio del café a base de bioadsorbentes.

En cuanto a la formulación de políticas ambientales, por medio de la ley 99 de 1993 se establecen entre otras las funciones del Ministerio del Medio Ambiente entre las que se tiene la formulación de la Política Nacional con relación al medio ambiente y los recursos naturales renovables (Congreso de Colombia, 1993).

La normativa vigente a nivel nacional en materia de recursos hídricos se presenta en el Tabla 4, en ella se muestra la dinámica y evolución de la legislación para la protección y el manejo del agua.

Tabla 4. *Desarrollo histórico de legislación del agua en Colombia.* Fuente: (Rendón, 2014)

Normatividad	Estipulado
Decreto 0953 de 2013	Por el cual se reglamenta el artículo 111 de la Ley 99 de 1993, modificado por el artículo 210 de la Ley 1450 de 2011.
Decreto 2667 de 2012	Por el cual se reglamenta la tasa retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales, y se toman otras determinaciones.
Decreto 1640 de 2012	Por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones.
Decreto 303 de 2012	Por el cual se reglamenta parcialmente el artículo 64 del Decreto -Ley 2811 de 1974 en relación con el Registro de Usuarios del Recurso Hídrico y se dictan otras disposiciones.
Resolución 075 de 2011	Por el cual se adopta el formato de reporte sobre el estado de cumplimiento de la norma de vertimientos puntual al alcantarillado público.
Decreto 4728 de 2010	Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 3930 de 2010.
Decreto 3930 de 2010	Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI-Parte III- Libro II del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a Usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.
Resolución 2115 de 2007	Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.
Decreto 1575 de 2007	Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la calidad del agua para consumo humano.
Ley 1151 de 2007	Plan Nacional de Desarrollo. Modifica los artículos 42, 44, 46, 111 de la Ley 99 de 1993.
Decreto 1323 de 2007	Por el cual se crea el Sistema de Información del Recurso Hídrico - SIRH.

Continuación tabla 4. *Desarrollo histórico de legislación del agua en Colombia.*

Fuente: (Rendón, 2014)

Normatividad	Estipulado
Decreto 1324 de 2007	Por el cual se crea el Registro de Usuarios del Recurso Hídrico y se dictan otras disposiciones.
Decreto 1480 de 2007	Por el cual se priorizan a nivel nacional el ordenamiento y la intervención de algunas cuencas hidrográficas y se dictan otras disposiciones.
Resolución 872 de 2006	Por la cual se establece la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas subterráneas a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones.
Decreto 1900 de 2006	Por el cual se reglamenta el parágrafo del artículo 43 de la ley 99 de 1993 y se dictan otras disposiciones.
Decreto 2570 de 2006	Por el cual se adiciona el Decreto 1600 de 1994 y se dictan otras disposiciones.
Resolución 2145 de 2005	Por la cual se modifica parcialmente la Resolución 1433 de 2004 sobre Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos, PSMV.
Decreto 4742 de 2005	Por el cual se modifica el artículo 12 del Decreto 155 de 2004 y se reglamenta el artículo 43 de la Ley 99 de 1993 sobre tasas por utilización de aguas.
Resolución 865 de 2004	Por la cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones.
Resolución 240 de 2004	Por la cual se definen las bases para el cálculo de la depreciación y se establece la tarifa mínima de la tasa por utilización de aguas.
Decreto 1443 de 2004	Por el cual se reglamenta parcialmente el Decreto-Ley 2811 de 1974, la Ley 253 de 1996, y la Ley 430 de 1998 en relación con la prevención y control de la contaminación ambiental por el manejo de plaguicidas y desechos o residuos peligrosos provenientes de los mismos y se toman otras determinaciones.
Decreto 155 de 2004	Por el cual se reglamenta el artículo 43 de la Ley 99 de 1993 sobre tasas por utilización de aguas y se adoptan otras disposiciones.
Decreto 3440 de 2004	Por el cual se modifica el Decreto 3100 de 2003 en aspectos de la implementación de la tasa retributiva.
Resolución 104 de 2003	Por la que se establecen los criterios y parámetros para la clasificación y priorización de cuencas hidrográficas.
Decreto 3100 de 2003	Por medio del cual se reglamentan las tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se toman otras determinaciones.
Decreto 1604 de 2002	Por el cual se reglamenta el parágrafo 3o. del artículo 33 de la Ley 99 de 1993 de las comisiones conjuntas.
Decreto 1729 de 2002	Por el cual se reglamenta la Parte XIII <sic>, Título 2, Capítulo III del Decreto-ley 2811 de 1974 sobre cuencas hidrográficas, parcialmente el numeral 12 del artículo 5° de la Ley 99 de 1993 y se dictan otras disposiciones.
Ley 373 de 1997	Por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua.
Decreto 1933 de 1994	Por el cual se reglamenta el artículo 45 de la Ley 99 de 1993 relacionado con energía hidroeléctrica o termoeléctrica.
Decreto 1600 de 1994 Ley 99 de 1993	Por el cual se reglamenta parcialmente el Sistema Nacional Ambiental -SINA- en relación con los Sistemas Nacionales de Investigación Ambiental y de Información Ambiental Por la cual se crea el MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, se reordena el Sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental - SINA- y se dictan otras disposiciones.
Decreto 1594 de 1984	Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II y el Título III de la Parte III -Libro I- del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. Parcialmente Vigente.

Continuación tabla 4. *Desarrollo histórico de legislación del agua en Colombia.*

Fuente: (Rendón, 2014)

Normatividad	Estipulado
Decreto 1875 de 1979	Por el cual se dictan normas sobre la prevención de la contaminación del medio marino y otras disposiciones.
Decreto 1541 de 1978	Por el cual se reglamenta la Parte III del Libro II del Decreto - Ley 2811 de 1974: "De las aguas no marítimas" y parcialmente la Ley 23 de 1973.
Ley 10 de 1978	Por medio de la cual se dictan normas sobre mar territorial, zona económica exclusiva, plataforma continental, y se dictan otras disposiciones.
Decreto 1449 de 1977	Por el cual se reglamentan parcialmente el [Inciso 1 del Numeral 5 del Artículo 56 de la Ley 135 de 1961] y el [Decreto Ley No. 2811 de 1974], parcialmente derogado Ley 79 de 1986, ley 373 de 1997 y el decreto 1791 de 1996.
Decreto Ley 2811 de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.
Ley 23 de 1973	Plantea la necesidad de proteger los recursos naturales renovables, fija límites mínimos de contaminación y establece sanciones por violación de las normas. Se faculta al Presidente de la República para expedir el Código de los Recursos Naturales y de Protección al Medio Ambiente.

La resolución 0631 del 17 de marzo del 2015 establece los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. Para el presente estudio siendo puntuales en las aguas mieles de café se expresa en el Tabla 5.

Tabla 5. *Parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.* Fuente: (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015)

PARÁMETRO	UNIDADES	BENEFICIO DEL CAFÉ (CLASIFICACIÓN DE LA FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS – FNC/CENICAFÉ)	
		PROCESO ECOLÓGICO	PROCESO TRADICIONAL
pH	Unid de pH	5,00 a 9,00	5,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	3000.00	650.00
Demanda bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂		400.00
Sólidos suspendidos Totales (SST)	mg/L	800.00	400.00
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	10.00	10.00
Grasas y Aceites	mg/L	30.00	10.00
Fosforo total (F)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitrógeno Total (N)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Color Real (Medidas de absorbancia con longitudes de onda: 346 nm y 620 nm).	m ⁻¹	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte

3. METODOLOGÍA

De acuerdo con (Sampieri *et al.*, 2010) la metodología propuesta tiene un enfoque cuantitativo ya que medió la viabilidad del sistema de purificación de aguas a base de bioadsorbentes con el SMTA, fue empleado estadística para realizar las gráficas correspondientes para identificar si el sistema es viable para el pequeño caficultor en los aspectos económico y legal. El proceso metodológico fue secuencial y probatorio que permitió tener un control sobre los volúmenes de agua a tratar, tiempo de contacto del bioadsorbente con el agua en los diversos tratamientos con la misma dosis de este, preparación y dosis de bioadsorbente para poder dar respuesta a la pregunta de investigación en lo que concierne a la viabilidad para el pequeño caficultor Colombiano.

La documentación se focalizó en los procesos de purificación de aguas del producto del café a nivel mundial y nacional enfocándose en los trabajos realizados por CENICAFE que es la máxima autoridad en investigación de los procesos que conciernen a la producción del café en Colombia, así como en las alternativas de solución a la problemática planteada enfocada a la recolección de información sobre la capacidad de bioadsorción de ciertos productos agropecuarios como la semilla de la *Moringa oleifera* Lam y la construcción de módulos para tratamientos de aguas productos del beneficio de café y purificación de aguas a partir de bioadsorbentes.

3.1. AREA DE ESTUDIO

La pequeña unidad productiva para poner en marcha el sistema de tratamiento de aguas a base de bioadsorbentes es la finca los Alpes ubicada en a 3 kilómetros del municipio de Iquira – Huila en la vereda Ibirco a 1320 msnm en las coordenadas $2^{\circ} 40' 7.158''$ N $75^{\circ} 39' 1.091''$ W. La selección de la finca se hizo teniendo en cuenta los siguientes criterios: su ubicación con respecto al Nevado del Huila (zona protegida por su importancia hídrica para los departamentos del Huila), por el vertimiento de sus aguas a la quebrada Ibirco que es la fuente hídrica donde se abastece el acueducto del área urbana del municipio de IQUIRA, por su tamaño siendo una pequeña unidad productiva de café que no supera las tres hectáreas cultivadas de café ajustándose al objetivo de este estudio y porque cuenta con beneficiadero propio para poder adecuar el sistema para el tratamiento de aguas (ver figura 4).



Figura 4. Finca los Alpes, Iquira - Huila

3.2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS PROVENIENTES DEL BENEFICIO DEL CAFÉ CON BASE EN LA SEMILLA DE *Moringa oleifera* Lam

Para la elaboración del diseño del sistema para el tratamiento de aguas producto del beneficio del café tuvo en cuenta los volúmenes de agua a tratar, tiempo de contacto del bioadsorbente con el agua en los diversos tratamientos con la misma dosis de este, preparación y dosis de bioadsorbente a partir de trabajos desarrollados por (Zambrano *et al.*, 2010) con los cuales diseñaron el Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio (SMTA); donde su diseño cuenta con una trampa de pulpas, un reactor Hidrolítico – Acidogénico, una Recamara de Dosificación y un Reactor Metanogénico; aportando además las características de la unidad productiva en términos de volúmenes de agua que manejan en el beneficio de café por cantidad de café en su día de máxima producción que para el presente estudio se asemeja a un SMTA 600 .

Con referencia a lo anterior, se calcula la cantidad y capacidad de los tanques que fueron empleados, así como también el tratamiento primario del sistema. Pero además, es necesario resaltar que en el uso del bioadsorbente semilla de *Moringa oleifera* Lam tiene en cuenta la carga contaminante en un volumen de agua y no el caudal como es manejado por el SMTA, El reactor metanogénico debe su existencia a que es un proceso que usa bacterias y el

presente sistema no requiere este tratamiento razón por la cual el diseño planteado no lo incluye y en este tanque se puede incluir el bioadsorbente.

Un estudio de Zambrano *et al.* (2010) ayudó a determinar los criterios para el control de volúmenes de agua, tipo de tanques para incluir en el sistema y la adecuación del sistema en la zona. De esta forma diseñar el sistema de tratamiento en el punto de cantidad de tanques para un volumen determinado en aguas producto del beneficio del café a base de bioadsorbentes. Además se realizó una prueba de fugas del sistema antes de iniciar el tratamiento de las aguas.

Para el tratamiento del bioadsorbente se tuvo en cuenta los trabajos realizados por Kumar *et al.* (2010) en la semilla de *Moringa oleifera* Lam, donde la semilla es pelada, triturada, lavada y secada. Para calcular la cantidad de bioadsorbente a utilizar por volumen de agua para el sistema de tratamiento de aguas producto del beneficio del café a base de bioadsorbentes se incluirán los referentes sobre la purificación de las aguas producto del beneficio de café con *Moringa oleifera* Lam realizado por Mera *et al.* (2016) a nivel de laboratorio donde exponen como dosis optima de 4 gr de polvo de semilla por cada 600 ml de agua a tratar y un tiempo de acción en el agua de la semilla de *Moringa oleifera* Lam de 48 horas.

3.3. EVALUACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICO QUÍMICOS DE LAS AGUAS PROVENIENTES DEL BENEFICIO DEL CAFÉ EN EL SISTEMA DE TRATAMIENTO A BASE DE BIOADSORBENTES

El procedimiento de toma, preservación y transporte de la muestra de agua se realizó teniendo en cuenta los estándares sugeridos por el manual de instrucciones para la toma, preservación y transporte de muestras de aguas de consumo humano para el análisis de laboratorio expuesto por Instituto Nacional de Salud (2011). Los parámetros físico – químicos a medir son los requeridos en la resolución 0631 del 17 de marzo del 2015 para vertimientos puntuales de aguas residuales no domesticas a cuerpos de aguas superficiales para la agroindustria detallados en la Tabla 6 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015). Los métodos analíticos para realizar los análisis físicos químicos a las muestras de aguas son los recomendados por (IDEAM, 2014).

Tabla 6. *Parámetros Fisicoquímicos del agua en el beneficio del café para el presente estudio.*

Parámetro	Sigla	Método analítico	Unidades de medida
Demanda química de oxígeno	DQO	SM 5220 D	mg.L ⁻¹
Demanda Bioquímica de Oxígeno	DBO ₅	SM 5210 B	mg.L ⁻¹
Solidos totales	ST	SM 2540 D	mg.L ⁻¹
pH	pH	SM 4500 H ⁺ B	Unidad de pH
Solidos Sedimentables	(SSED)	SM 2540 F	mL/L
Grasas y Aceites	(G y A)	SM 5520 D	mg/L
Fosforo total	(F)	SM 4500P,E	mg/L
Nitrógeno Total	(N)	SM 4500NH ₃ B,C	mg/L
Color Real (Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 346 nm y 620 nm).	(C)	ISO 7887	m ⁻¹

El procedimiento para el análisis de aguas se inicia tomando una muestra testigo del agua a trabajar para incluirla como muestra testigo de los parámetros físico químicos sin introducirla al sistema de tratamiento de aguas producto del café a base de bioadsorbentes, subsecuentemente el agua producto del beneficio del café realizara el recorrido por el sistema en donde se realizara una muestra del agua en la salida del prototipo para tener referencia de la cantidad de carga contaminante removida por el sistema. Se aplica una misma dosis (4327 g de polvo de semilla de *Moringa oleifera* Lam para 649 L de agua) a tres tratamientos los cuales se les realizara los análisis de agua con su respectiva replica para poder interpretar los datos.

3.4. ANÁLISIS DE LOS ASPECTOS OPERATIVO, LEGAL Y ECONÓMICO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS USADAS EN EL PROCESO DEL BENEFICIO DEL CAFÉ MEDIANTE SEMILLA DE *Moringa oleifera* Lam COMO BIOADSORBENTE

El análisis del aspecto operativo se tuvo en cuenta el tiempo de preparación del bioadsorbente, remoción de la carga contaminante del agua en el tanque que posea el bioadsorbente y el uso de una misma cantidad de bioadsorbente por número de procesos para purificar el agua producto del beneficio del café. También se tendrá en cuenta la complejidad en su mantenimiento.

En el aspecto económico del sistema incluye el presupuesto de inversión, costos y gastos de la construcción y operación del sistema, de tal forma que se puedan efectúan las comparaciones con otro tipo de tratamientos para nuestro

caso el de SMTA según las recomendaciones de (Estupiñán, 2006) en su libro “Análisis financiero y de gestión”.

Para el aspecto legal tuvo en cuenta si el sistema cumple con los parámetros exigidos en la resolución 0631 del 2015 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015) por medio del análisis de la evaluación de parámetros físico químicos de las aguas provenientes del beneficio del café en el sistema de tratamiento a base de bioadsorbentes.

3.5. DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN COSTO BENEFICIO DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS EMPLEANDO *Moringa oleifera* Lam CON REFERENCIA AL SMTA PARA EL PEQUEÑO CAFICULTOR COLOMBIANO

Para inferir si el sistema prototipo de tratamiento de aguas producto del beneficio del café es viable para el pequeño caficultor colombiano se tuvo el análisis de costo – beneficio utilizado por (García *et al.*, 2013) para el análisis de costo – beneficio de energías renovables no convencionales en Colombia, tomando de esta manera los costos directos e indirectos y sus beneficios en los tres aspectos económico, legal y operativo en el SMTA para la purificación de aguas de café y luego realizar un estudio comparativo de estos factores .

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados del presente estudio son secuenciales debido a que tienen un orden cronológico en la ejecución y elaboración de los mismos iniciando por el diseño y construcción del sistema, análisis de viabilidad de los aspectos económicos, legales y operativos y finalizando por la relación costo beneficio del sistema en comparación de SMTA.

4.1. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS PROVENIENTES DEL BENEFICIO DEL CAFÉ CON BASE EN LA SEMILLA DE *Moringa oleifera* Lam

El diseño elaborado en la figura 5. Es una adaptación de Zambrano *et al.* (2010) para la construcción y operación de un sistema modular de tratamiento anaerobio (SMTA), este se realiza teniendo en cuenta las características de la unidad productiva, el bioadsorbente y el tiempo de acción de este para remover la carga contaminante.

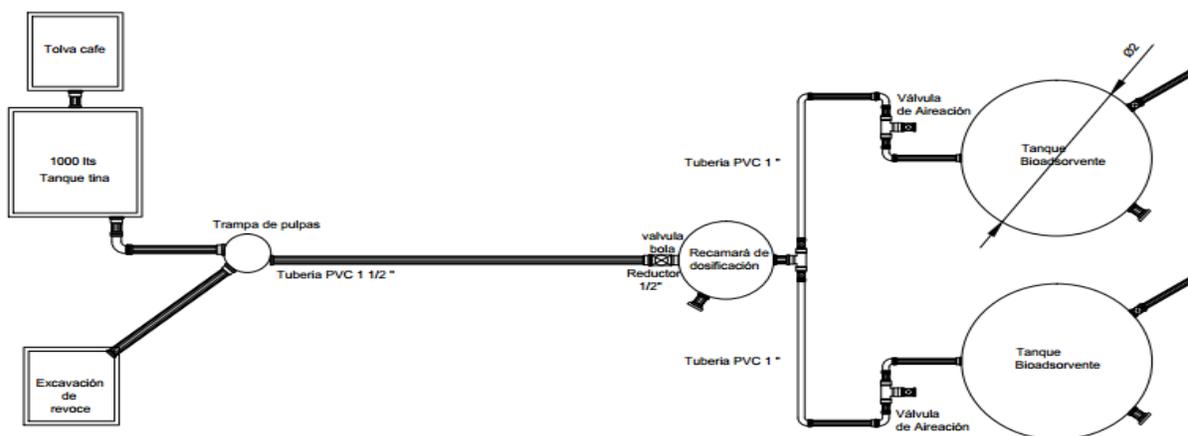


Figura 5. Diseño prototipo tratamiento de aguas usadas en el proceso del beneficio del café mediante el bioadsorbente *Moringa oleifera* Lam

Según como se evidencia en la figura 5 el sistema cuenta con las siguientes partes:

- A. La trampa de pulpas (TP): es un tanque de 105 litros (L) que como su nombre lo indica tiene la función de realizar la separación por densidad de las pulpas provenientes de la fermentación del café cereza y permite la separación de material de gran peso molecular por medio de un tubo con perforaciones de 7/32 pulgadas (”), posee una salida de control de rebose del sistema. en la figura 6, se puede observar cada uno de sus componentes según las directrices de (Zambrano *et al.*, 2010).



Figura 6. Trampa de pulpas (TP). a. trampa de pulpas vista interior, b. trampa de pulpas vista exterior.

- B. Excavación de rebose (ER): Es una excavación de medidas 100 x 100 x 100 centímetros (cm) rellena con tallos de soqueo de café, que permite el tratamiento natural del agua que se sale del prototipo por los reboses de seguridad (ver figura 7).



Figura 7. Excavación de rebose (ER). a. excavación de rebose, b. arboles de soqueo para introducir a la recamara de rebose.

C. La recamara de dosificación (RD): Es un tanque de 250 L de 60 cm de alto con una llave de paso en la entrada al tanque, una válvula flotador para bebedero de ganado que permite la entrada secuencial del agua a la RD, un cuadrado en PVC con perforaciones para la salida de agua en el fondo de la RD unida a un tubo con salida hacia dos tanques con una llave de paso en cada uno de sus extremos. En su interior tiene una malla mosquitero sujeta a una manguera de polietileno de 1" y de rocas con piedra gravilla de 10 cm en el fondo y en la parte superior de 2cm (ver figura 8). la función de la RD es actuar como un doble filtro, donde la malla mosquitera actúa como un tamiz y las rocas como un filtro de arena. Los dos filtros tienen como objetivo eliminar en su totalidad moléculas de gran tamaño que persisten en el agua a tratar (Zambrano *et al.*, 2006).

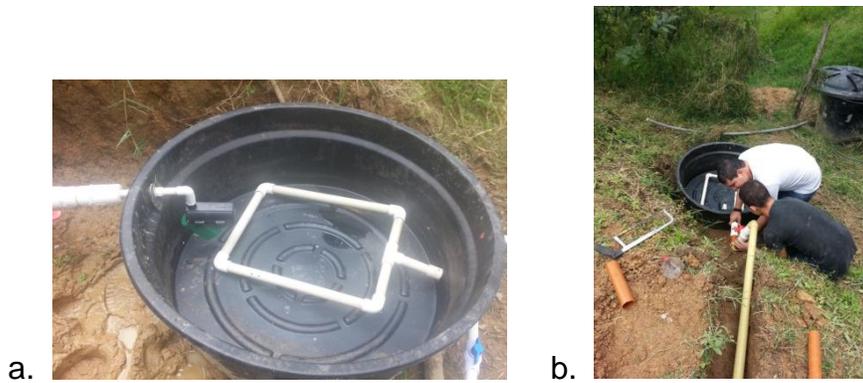


Figura 8. Recamara dosificadora (RD). a. recamara de dosificación vista interna, b. instalación de la recamara de dosificación.

D. Válvula de aireación con disco perforado (VA): es una válvula en tubo PVC en forma de T que dentro de esta trae en medio un disco perforado o malla secaflex 4x4 y cumple la función de retención de partículas de mayor tamaño (ver figura 9). Propuesta por (Zambrano *et al.*, 2010).

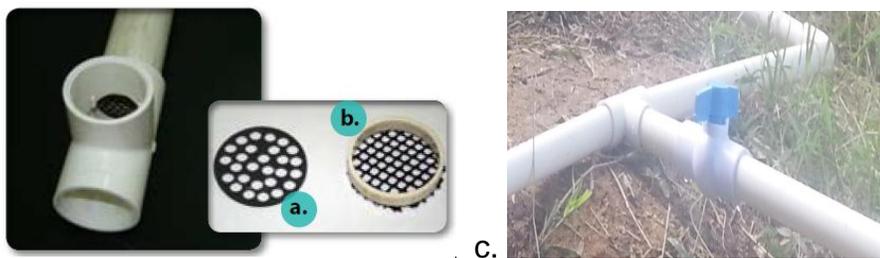


Figura 9. Dispositivos de partículas a. disco perforado. b. malla secaflex. Fuente: (Zambrano *et al.*, 2010). c. válvula de aireación vista externa.

E. Tanque de Bioadsorbente (TB): es un tanque de 750 L en el cual se almacena el polvo de *Moringa oleifera* Lam y la totalidad del agua a tratar del beneficio de café. Tiene la función de permitir la mezcla del agua con el bioadsorbente mediante la entrada del agua en caída por el extremo superior del TB y de forma mecánica con ayuda de una vara, permite la acción del polvo de semilla de *Moringa* en el agua a tratar en *un tiempo* de 48 horas (h) de acuerdo al estudio propuesto por Mera *et al.* (2016). Tiene una conexión de salida a una altura de 15 cm del fondo que evita la salida del TB de partículas provenientes del bioadsorbente.

Según las características de la unidad productiva que es la producción 625 Kg de café cereza en un día pico se calculó la instalación de dos tanques TB para permitir el tratamiento de las aguas de lavado para que no ocurra saturación en el sistema de tratamiento. Es así que se instalan dos tanques de 750 L cada uno ya que de acuerdo con el estudio realizado por Zambrano *et al.* (2010) por cada 625 Kg de se emplean 649 Litros de agua de lavado. La entrada de agua a los tanques es por separado con el objetivo de realizar el tratamiento del agua por un tiempo de 48h en un tanque, permitiendo que entre al sistema una nueva carga de agua proveniente de un nuevo beneficio al segundo tanque, para escalonar la entrada de agua con el propósito de realizar el beneficio de café todos los días sin que ocurra saturación de agua en el sistema (ver figura 10).



Figura 10. Recamaras de bioadsorbentes. a. recamara bioadsorbentes vista frontal, b. recamara de bioadsorbentes salida de agua del sistema, c. recamara de bioadsorbente vista superior.

La construcción, adecuación y cotas mínimas de distancia de la trampa de pulpas, la recamara dosificadora y los tanques de bioadsorbentes se realiza de acuerdo con las recomendaciones de Zambrano *et al.* (2010), quienes exponen que el terreno de ubicación de los módulos debe de ser plano y la ubicación de estos debe de ser en una pendiente para aprovechar la caída del agua por gravedad, además la distancia entre módulos depende de la unidad productiva para evitar conglomeración de agua en

estos, la salida del agua no debe llegar a una fuente hídrica. También indican que para unir la tubería no se debe utilizar ningún tipo de pegante, se recomienda que sea tubería de instalación a presión.

El tanque Hidrolítico Acidogénico del SMTA no fue tenido en cuenta para el presente prototipo debido a su función que es de solubilizar el material orgánico (MO) y la acidogénesis del agua residual ajustándola para el proceso biológico de la etapa anaerobia del reactor metanogénico (Rendón, 2014) y el proceso propuesto es de absorción de MO siendo que esta etapa no sea necesaria para el tratamiento de este tipo de aguas. Otra justificación radica en la semilla *Moringa oleifera* Lam en su proceso de coagulación - floculación tiene mejor rendimiento a un pH de 5 unidades (Kumar *et al.*, 2010) y el pH del agua producto del beneficio del café a tratar se encuentra entre los 4 y 4,5 unidades (Zambrano *et al.*, 2006) el ajuste de este se realiza en el recorrido del agua en el prototipo.

El reactor metanogénico no fue tenido en cuenta debido a que los procesos de purificación de agua son totalmente diferentes y no es necesario tener bacterias metanogénicas en el prototipo.

4.1.1 Preparación del bioadsorbente *Moringa oleifera* Lam

La preparación del bioadsorbente semilla de *Moringa oleifera* Lam diversos autores como Valverde *et al.* (2013), (Madrona *et al.*, 2012) , (Kumar *et al.*, 2010), Mera

et al. (2016) entre otros disponen de la semilla a nivel de laboratorio en dosis mínimas para pequeñas cantidades de aguas. En el presente estudio se realizó de manera rudimentaria el procesamiento de la semilla de *Moringa* simulando las condiciones de un pequeño productor, que consistió en el pelado de la semilla de forma manual (Ver figura 11 b), luego se tritura por medio de un molino manual casero, para realizar el lavado del polvo de *Moringa*, esta se sumergió en un recipiente con agua y rápidamente se retiró del agua con la ayuda de un colador y subsecuentemente el secado del polvo se realizó de forma natural exponiéndola al sol en una bandeja de metal (Ver figura 11).

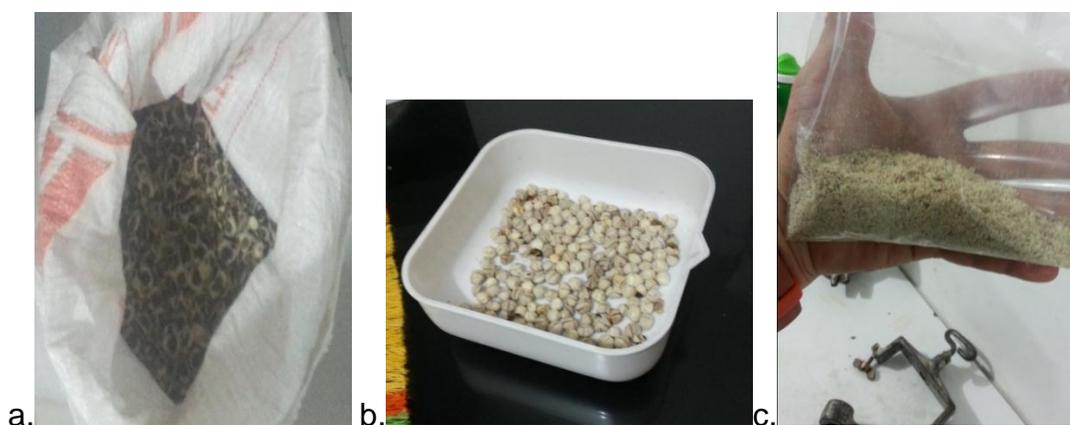


Figura 11. Tratamiento de la semilla de *Moringa oleifera* Lam. a) Semilla de moringa sin tratamiento, b) semilla de moringa pelada y lavada, c) semilla de moringa triturada y secada.

Según trabajos realizados por Mera *et al.* (2016) la dosis optima de polvo de semilla de *Moringa oleifera* Lam es de 4 gramos (g) para cada 600 mL de agua residual proveniente del beneficiadero. La cantidad de gramos polvo de semilla esta dado según

la ecuación 1. Donde Cp es la cantidad de polvo de moringa a tratar y At es la cantidad de agua a tratar en litros. Para el presente estudio que tiene un consumo de agua de 649 L día pico la cantidad de polvo de *Moringa oleifera* Lam a preparar es de 4327 g o 4,327 kilogramos (Kg) para cada tanque de bioadsorbente.

$$C_p = \frac{4g \times (A_t)}{0,6 L}$$

Figura 12. Ecuación 1 Cantidad de polvo de moringa según la cantidad de agua a tratar.



Figura 13. Cantidad de semilla de moringa para el (TB) para 649 L de agua producto del beneficio del café.

4.1.2 Toma de las muestras

La toma de muestras de aguas para el presente estudio se realizó en dos puntos de la siguiente manera:

- Muestra testigo: esta muestra es tomada a la salida del Tanque Tina ubicada en el inicio del sistema como lo muestra la figura 5, diseño del sistema. Esta se encuentra dividida en cuatro tomas de agua saliente de cada uno de los cuatro enjuagues, se recolecto 1 L de agua por cada toma y se deposita en un tanque para realizar la muestra testigo la cual se toma como referente del agua no tratada por el sistema del agua proveniente del lavado de café. Con esta muestra se realizan los análisis de la calidad de agua. (ver figura 14)



Figura 14. Agua producto del beneficio del café sin entrar al sistema de tratamiento a base de bioadsorbentes.

- Toma de muestras de agua tratada: luego de las 48 horas de procesamiento con semilla de moringa, se tomaron las muestras de agua tratada a la salida de los TB. Se calculó que cada TB se desocupaba en 16 minutos, en consecuencia y con el ánimo de tener una muestra de agua lo más homogénea posible se tomaron 4 submuestras una cada 4 minutos mientras se desocupaba el TB, para luego llevar las muestras conservadas de tal manera que se preserve las propiedades fisicoquímicas del agua para realizar los análisis correspondientes en la empresa AGUALIMSU S.A.S ubicada en la ciudad de Neiva (ver figura 15).



Figura 15. Muestras de agua tratada por una misma dosis del bioadsorbente semilla de *Moringa oleifera* Lam. De derecha a izquierda primer agua a tratar, segunda agua a tratar y tercera agua a tratar.

4.2. EVALUACIÓN DE LA ACCIÓN DE LA SEMILLA DE *Moringa oleifera* Lam COMO BIOADSORBENTE EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS MIELES PRODUCTO DEL BENEFICIO DEL CAFÉ.

En el Tabla 7 se presentan los resultados de las determinaciones “*in situ*”, obtenidas tanto en la entrada como en la salida del sistema de tratamiento de aguas residuales producto del beneficio de café en el sistema prototipo de tratamiento de aguas producto

Para el parámetro DBO_5 entendido como la cantidad de oxígeno disuelto (OD) consumido por los microorganismos para la oxidación de la MO como medio de oxidación hasta dióxido de carbono y agua (Carreño, 2016), de acuerdo a la ecuación 2. utilizada por (Barrado *et al.*, 2016) se puede concluir que con este tratamiento los porcentajes de remoción de DBO_5 se encuentran entre los 86% y 77%, indicando de esta manera la acción del bioadsorbente al remover la MO disminuyendo su disponibilidad en el agua.

$$\% \text{ de remoción de } DBO = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100$$

Figura 16. Ecuación 2 porcentaje de remoción de carga contaminante; C_0 es la carga contaminante inicial, C_1 carga contaminante final. Fuente:(Rentería *et al.*, 2014) y (Mera *et al.*, 2016).

Aunque los porcentajes de remoción son altos para este parámetro no cumple con la normatividad exigida por el gobierno Colombiano en la resolución 0631 de 2015, en comparación con estudios realizados por Zambrano *et al.* (2015) sobre evaluación de un reactor metanogénico tipo filtro anaeróbico de flujo ascendente para tratar aguas mieles del café se muestra que el porcentaje de remoción para el parámetro es de 83% superado solo por el resultado del tanque 1 muestra a, que posee una remoción del 86% en el sistema propuesto en este estudio. Evidenciando la acción coagulante de la *Moringa oleífera* para la sedimentación de la MO presente en este tipo de aguas concordado con lo planteado por (João *et al.*, 2014) .

Con este resultado se denota que al no realizarse la corrección previa del pH este puede influir en el poder de adsorción – coagulación de la semilla de Moringa según lo expuesto por Alves *et al.* (2014) donde argumenta que la eficiencia de la semilla de moringa tiene un mayor rendimiento para un pH de 7 unidades abriendo la discusión para formular un estudio sobre la aplicación de otro agente absorbente que ayude a la *Moringa oleifera* Lam para corregir el pH y disminuir la carga contaminante para este parámetro para este tipo de aguas como es el caso de CaO, sulfato de aluminio, e hidroxicloriguro de aluminio expuestos por (Romero *et al.*, 2013) en el tratamiento de aguas del arroyo en Poza Rica en el cual muestra buenos resultados y que son de bajo valor económico para la región.

El parámetro DQO mide la cantidad de oxígeno necesario para oxidar el carbono orgánico completamente a dióxido de carbono agua y amonio (Carreño, 2016), en el presente estudio mostro una remoción de este parámetro entre 87% y 80%, gracias al efecto del bioadsorbente en el sistema. No obstante los resultados del presente estudio no cumplen con la normatividad expuesta en la resolución 0631 de 2015 para este parámetro. Pero en comparación con el estudio realizado por Zambrano *et al.* (2015) en el que se obtienen remociones máximas del el 80% de DQO con el SMTA, para esta clases de aguas; lo anterior demuestra, que el sistema propuesto aporta mejores resultados en la remoción de dicho parámetro haciéndolo más viable para el pequeño caficultor colombiano.

La relación de DBO5 /DQO presentan una relación aproximada a 0,5 similar a un desagüe domestico relación sugerida por el libro Biotecnología ambiental de aguas y aguas residuales por (Carreño, 2016).

En el parámetro grasas y aceites el cual posee componentes indeseables debido a que pueden contribuir a la obstrucción de las tuberías, producción de malos olores espumas e inhiben el crecimiento de microorganismos que pueden afectar al sistema de tratamiento (Carreño, 2016), en el presente estudio mostro porcentajes de remoción entre 70% y 51%. Dichos resultados no cumplen con la normatividad exigida en la resolución 0631 de 2015, sugiriendo un ajuste en la altura del tubo de salida hacia la excavación de rebose ER permitiendo con esto eliminar mayor cantidad de grasas y aceites por densidad presentes en el agua. Este ajuste en el parámetro puede afectar positivamente la remoción de parámetros como la DBO₅ debido a que grasas y aceites elevadas inhiben el crecimiento de microorganismos que ayuden a la oxidación de la MO en el agua a tratar (Carreño, 2016).

El pH es una expresión del carácter ácido o básico de un sistema acuoso, en un sentido estricto, es una medida de la actividad del ion hidronio; en un sentido práctico, es una medida de la concentración molar del ion hidronio en un sistema acuoso (Carreño, 2016), los resultados expuestos muestran que el biadsorbente *Moringa oleifera* Lam para aguas producto del beneficio de café no muestra variaciones

significativas en este. Por tal razón este parámetro no cumple con la normatividad expuesta en la resolución 0631 de 2015 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

Según los resultados expresados en el cuadro 8. Muestra que la tendencia del pH es a tener un carácter cada vez más ácido, ocasionado por la aglomeración de minerales como hierro, cobre, aluminio y azufre presentes en las aguas de café las cuales pueden afectar las poblaciones micro - biológicas del agua, además de provocar malos olores (Mera *et al.*, 2016). De acuerdo con la afirmación anterior es necesario ajustar el presente parámetro para que cumpla la normatividad vigente; una alternativa es la adición de sustancias como el CaO, sulfato de aluminio, e hidroxiclورو de aluminio que muestran buenos resultados neutralizando aguas con pH ácidos propuesto por Romero *et al.* (2013), para ayudar la acción del bioadsorbente utilizado.

En el parámetro Sólidos Suspendidos Totales comprendidos como aquellos sólidos que quedan después de filtrar el agua residual a través de un filtro de fibra de vidrio de 1,2 μm de tamaño de poro (Carreño, 2016). La presencia de sólidos suspendidos se relaciona con la turbiedad debido al alto contenido de materia orgánica, que impide la penetración de la luz solar sobre la columna de agua, según la Comisión Nacional del Agua cuando superan los 300 mg/L, dificultan la actividad fotosintética y disminuye el oxígeno en el agua Mera *et al.* (2016), el presente estudio el parámetro sólidos suspendidos totales en todas las muestras se evidencia el cumplimiento con la

normatividad expuesta en la resolución 0631 de 2015 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015), mostrando remociones entre los 92% y 85%, de acuerdo con el trabajo realizado por (Valverde *et al.*, 2013) comprobando el poder de precipitar los iones suspendidos presentes en el agua por la semilla de *Moringa oleifera* Lam en aguas contaminadas.

Los sólidos sedimentables son una medida del volumen de sólidos asentados al fondo de un cono imhoff, en un período de una hora, y representan la cantidad de lodo removible por sedimentación simple (Molina *et al.*, 2006), el parámetro en el estudio realizado muestra un incremento significativo desde la muestra testigo hasta la muestra c en los dos TB debido al incremento de sólidos producidos por la propiedad del adsorbente (Valverde *et al.*, 2013), las muestras a y b de los dos TB cumplen con la resolución 0631 del 2015 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015); los tratamientos c de ambos tanques no cumplen con la normatividad expuesta anteriormente. Concluyendo para este parámetro que la dosis del biadsorbente es recomendable solo para tratar solo dos cargas de agua a tratar por el sistema.

Los parámetros Color 436 nm y Color 620 nm son producidos por los minerales disueltos, colorantes o ácidos húmicos de las plantas, la descomposición de la lignina produce compuestos coloreados de taninos y ácido húmicos. Este último produce un color pardo amarillo a pardo negro (Molina *et al.*, 2006), en el estudio realizado muestra una disminución significativa en todos los tratamientos, este parámetro presenta un

porcentaje de remoción entre 91% a 88% para color 436 nm y de 93% a 90% para color 620 nm, esto debido a la capacidad de adsorción de las partículas anteriormente dichas por parte de la semilla de *Moringa oleifera* Lam (Valverde *et al.*, 2013), para el presente parámetro aunque es solicitado por la resolución 0631 de 2015 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015) este no se encuentra establecido y solo se solicita análisis y reporte, los porcentajes de remoción son altos.

Para el parámetro Fosforo Total los porcentajes de remoción presentados en el cuadro 8 son entre 84% y 71% mostrando la pérdida de floculación – coagulación del bioadsorbente después de tratar con una misma dosis tres volúmenes de aguas, aumentando la cantidad de fosforo en el agua que si no es controlado conduce a la proliferación de algas ayudando a la eutrofización de aguas (Carreño, 2016), en el estudio realizado el agua producto del beneficio de café presento un tiempo de reposo de 48 horas en el cual no presento presencia de algas a simple vista. El presente parámetro la normatividad vigente solicita análisis y reporte.

El parámetro nitrógeno total para el presente estudio muestra variaciones en los niveles de este mostrando incrementos en los análisis de los tratamientos en comparación de la muestra testigo; de acuerdo al estudio realizado por Rondón *et al.* (2017) en el cual se evidencia que la semilla de *Moringa oleifera* Lam presenta un porcentaje de nitrógeno de 7,7% de su masa, este produce un incremento en los resultados para este parámetro debido al alto contenido presente en la semilla el

cual es adicionado al nitrógeno proveniente de este tipo de aguas. El incremento elevado de este parámetro genera el crecimiento de microorganismos que pueden consumir el oxígeno disuelto en el agua (Carreño, 2016). El parámetro Nitrógeno total la norma exige análisis y reporte. Es necesario incluir un sistema terciario como el propuesto por (Zambrano *et al.*, 2015) con plantas macrófitas que ayuden a reducir los niveles de nitrógenos presentes en las aguas salientes del sistema propuesto.

De los resultados obtenidos se puede apreciar una disminución progresiva del porcentaje de remoción para una misma dosis de bioadsorbente de los parámetros DBO, DQO, grasas y aceites, solidos sedimentables, solidos suspendidos totales, Color 436 nm, Color 620 nm, fosforo total y nitrógeno total, denotando la pérdida de capacidad de absorción del bioadsorbente a medida que diferentes cargas de agua pasan por el sistema; así como la poca afectación del bioadsorbente sobre el pH en este tipo de aguas, sugiriendo una combinación de bioadsorbentes como la cal hidratada para neutralizar el pH y mejoramiento del poder de adsorción de carga contaminante por parte de la semilla de *Moringa Oleifera* Lam para parámetros como la DBO₅. Planteados en estudios realizados por (Romero *et al.*, 2013).

4.3. ANÁLISIS DE LOS ASPECTOS OPERATIVO, LEGAL Y ECONÓMICO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS USADAS EN EL PROCESO DEL BENEFICIO DEL CAFÉ MEDIANTE SEMILLA DE *Moringa oleifera* Lam COMO BIOADSORBENTE

Los aspectos operativo, legal y económico son expuestos luego de la construcción, puesta en funcionamiento del sistema y su respectivo análisis de aguas mostrando los siguientes resultados:

4.3.1. Aspectos Operativos

El aspecto operativo del presente estudio toma como referente la puesta en marcha del sistema, que para el presente caso tiende a ser la preparación de la Semilla de *Moringa oleifera* Lam para introducirla en la recamara de bioadsorbentes, dicho proceso tiene una duración de medio jornal, de acuerdo con las indicaciones anteriormente dadas en el diseño del sistema es un trabajo secuencial y de poca tecnicidad para la preparación por parte de los agricultores.

De acuerdo con los análisis de aguas muestra que en la mayoría de los parámetros muestran una disminución de remoción de la carga contaminante a medida que se purifica volúmenes de agua producto del beneficio del café sin embargo en los parámetros de DBO₅, DQO, grasas y aceites, pH y el ultimo tratamiento de los sólidos sedimentables no cumplen con la normatividad expuesta por la resolución 0631 del 2015 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015)

La instalación, la preparación y adición del bioadsorbente no requiere de una mayor complejidad de su uso por tal motivo este sistema es de muy fácil aplicación para las pequeñas unidades productivas de café. El sistema propuesto promueve la disminución de tiempo de estancamiento de aguas disminuyendo la aparición de vectores que generen enfermedades en la comunidad (Cenicafé, 2011). El sistema propuesto solo requiere trabajo en la preparación de la semilla de *Moringa oleifera* Lam para el funcionamiento del sistema, el proceso de limpieza del TB al finalizar el tratamiento de las aguas con la moringa y el manejo de los residuos de moringa para prepararlo como abono para las plantas.

4.3.2. Aspectos Legales

Con los datos adquiridos por la empresa AGUALIMSU S.A.S muestran que en la mayoría de los parámetros muestran una disminución significativa de remoción de la carga contaminante en el agua producto del beneficio de café a medida que se introduce volúmenes de agua en el sistema, solo el parámetro sólidos sedimentables muestra un aumento para este parámetro.

Los parámetros de DBO₅, DQO, grasas y aceites , pH y sólidos sedimentables en cierta medida no cumplen con la normatividad expuesta por la resolución 0631 del 2015 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015) pero con la connotación que están muy cerca de cumplir con esta normatividad.

El parámetro DQO para el presente estudio mostro mejores rendimientos que los obtenidos por (Zambrano *et al.*, 2015), en el estudio de sobre la Evaluación de un reactor metanogénico tipo filtro anaeróbico de flujo ascendente para tratar aguas mieles del café.

Los sólidos suspendidos totales cumplen con lo exigido por la normatividad vigente para aguas producto del beneficio del café, demostrando de esta forma la acción de la semilla de *Moringa oleifera* Lam expuesto por (Mera *et al.*, 2016).

Para los parámetros color, fosforo total y nitrógeno total aunque la normatividad solo exigía el análisis y reporte de los parámetros se evidencio porcentajes de remoción de 93%, 84% y 11% respectivamente, el parámetro nitrógeno total evidencio un incremento en este debido a la adición de este por parte del bioadsorbente.

4.2.3. Aspectos Económicos

En la Tabla 8 se realiza teniendo en cuenta las recomendaciones de (Estupiñán, 2006) en su libro “Análisis financiero y de gestión”. De acuerdo al diseño, construcción y puesta en marcha del sistema realizamos la sumatoria de los costos de materiales, insumos y mano de obra.

Tabla 8. Costo sistema de tratamiento de aguas con bioadsorbentes.

ELEMENTO	UNIDAD	COSTO
TANQUES		
Tanque polietileno negro 250L con tapa (H 65cm)	1	206.000.00
Tanque polietileno negro 105L	1	106.000.00
Tanque polietileno negro de 750L	2	700.000.00
TUBERÍAS Y ACCESORIOS		
Adaptador macho PVC presión 1 ½"	2	6.000.00
Adaptador hembra PVC presión 1"	2	6.000.00
Codos PVC 1 ½"	4	13.200.00
Codos PVC 1"	14	12.600.00
Disco PVC de 1 ½" con 38 perforaciones 7/32" o maya secaflex 4x4	2	5.000.00
Maya mosquitera (150 cm de ancho)	2 mt	12.000.00
Limpiador de PVC	1	7.000.00
Pegante PVC	1	10.000.00
Reducciones PVC presión de 1 ½" a ½"	1	3.000.00
ELEMENTO	UNIDAD	COSTO
TUBERÍAS Y ACCESORIOS		
Rollos cinta teflón	1	3.000.00
Semicodo PVC presión 1"	2	2.400.00
Tapón copa PVC presión 1"	3	3.600.00
Tee PVC presión 1"	4	4.000.00
Tubo PVC presión de ½"	1 mt	2.400.00
Tubo PVC presión de 1"	18 mt	37.500.00
Tubos PVC sanitario de 1 ½"	18 mt	54.000.00
Válvula bola PVC 1"	6	30.000.00
Válvula bola PVC 1 ½"	1	9.000.00
Válvula flotador 1"	1	14.000.00
Piedra caliza o gravilla de río	0,20 kg	10.000.00
MANO DE OBRA PARA EL MONTAJE		
Jornal	2	60.000.00
INSUMOS		
Semilla de <i>Moringa Oleífera Lam</i>	10 Kg	300.000.00
COSTO TOTAL DEL SISTEMA		1.616.700.00

De acuerdo con la Tabla 8 el costo del sistema comprando la semilla de *Moringa oleifera* Lam es de \$1.616.700.00 pesos, en la figura 15 se evidencia los porcentajes de los costos del sistema donde podemos apreciar que si el caficultor cultiva la planta de *Moringa oleifera* Lam puede reducir el costo de la implementación del sistema en un 18%.

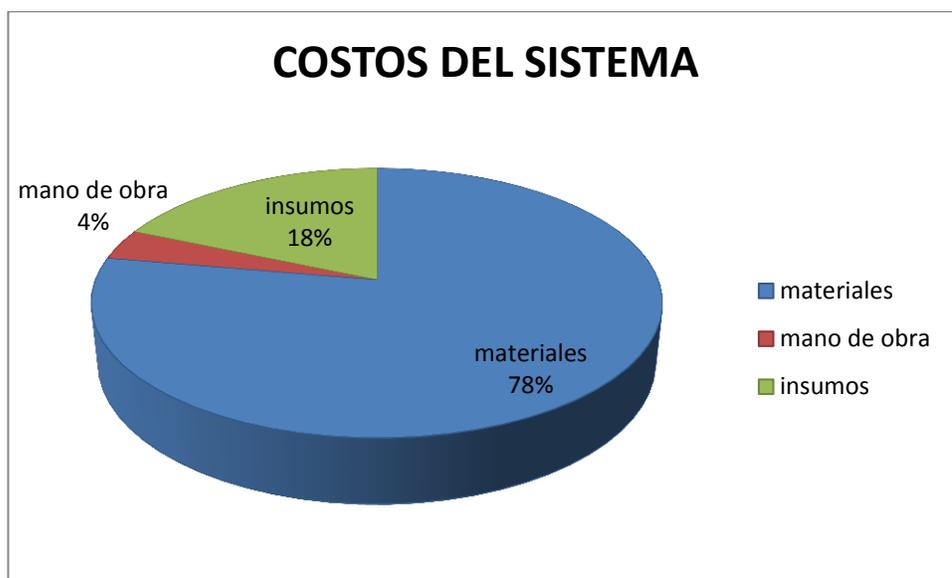


Figura 17. Costos del sistema de tratamiento a base de la semilla de *Moringa oleifera* Lam como bioadsorbente.

4.3. RELACIÓN COSTO BENEFICIO DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS EMPLEANDO *Moringa oleifera* Lam CON REFERENCIA AL SMTA PARA EL PEQUEÑO CAFICULTOR COLOMBIANO

Para La relación costo beneficio del sistema de tratamiento de aguas empleando *Moringa oleifera* Lam con referencia al SMTA se elaboró La Tabla 9 que muestra las generalidades del SMTA y el sistema de tratamiento de agua a base de

bioadsorbente *Moringa oleifera* Lam, con el fin de tener una idea general de ambos sistemas.

Tabla 9. Generalidades del SMTA y el sistema de tratamiento de agua a base de bioadsorbente *Moringa oleifera* Lam.

	Sistema modular de tratamiento anaerobio SMTA	Sistema de tratamiento con el bioadsorbente <i>Moringa oleifera</i> Lam
Tipo de tanques utilizados en el sistema	Tanque tina Tanque utilizado para realizar el lavado de café cereza en el cual ocurren procesos de fermentación del mucilago del café.	Tanque tina Tanque utilizado para realizar el lavado de café cereza en el cual ocurren procesos de fermentación del mucilago del café.
	Trampa de pulpas Tanque de 105 litros (L) con la función de realizar la separación por densidad de las pulpas provenientes de la fermentación del café cereza además de permitir la separación de material de gran peso molecular por medio de un tuvo con perforaciones de 7/32 pulgadas.	Trampa de pulpas Tanque de 105 litros (L) con la función de realizar la separación por densidad de las pulpas provenientes de la fermentación del café cereza además de permitir la separación de material de gran peso molecular por medio de un tuvo con perforaciones de 7/32 pulgadas.
	Reactor Hidrolítico Acidogénico Tanque o grupo de tanques unidos entre sí con la función de solubilizar el material orgánico y la acidogénesis del agua residual ajustándola para el proceso biológico de la etapa anaerobia del reactor metanogénico.	Recamara dosificadora Tanque de 250 L de 60 cm de alto con una válvula flotador que permite la entrada secuencial del agua, este actúa como un doble filtro que tienen como objetivo eliminar la totalidad moléculas de gran tamaño que persisten en el agua a tratar.
	Recamara dosificadora Tanque de 250 L de 60 cm de alto con una válvula flotador que permite la entrada secuencial del agua, este actúa como un doble filtro que tienen como objetivo eliminar la totalidad moléculas de gran tamaño que persisten en el agua a tratar.	Tanque de bioadsorbentes Tanque o grupo de tanques sin conexión entre ellos que tienen como objetivo permitir el contacto del bioadsorbente con el agua a tratar
	Reactor metanogénico Tanque en el cual se introduce el inoculo de bacterias y el agua a tratar puede contener en su interior botellas plásticas o guadua.	
Método principal para eliminar carga contaminante	Bacterias metanogénicas Proceso mediante el cual se inoculan bacterias provenientes del estiércol del ganado vacuno para que se consuma la materia orgánica disuelta en el agua.	Bioadsorbente <i>Moringa oleifera</i> Lam Proceso en el cual se prepara las semillas de moringa para ser introducidas al tanque con el agua contaminada y por su propiedad esta flocula y precipita la carga orgánica disuelta en el agua.
Tiempo de preparación	La preparación de las bacterias metanogénicas tiene un periodo de inoculación de 60 días.	El proceso de preparación del polvo de semilla de moringa tiene un tiempo de medio día.
Productos de desecho	Son los resultantes de la trampa de pulpas, el material proveniente de no tratar las bacterias con las recomendaciones suministradas y gas metano.	Resultantes de la trampa de pulpas y los residuos de semilla luego de su utilización.

Continuación Tabla 9. *Generalidades del SMTA y el sistema de tratamiento de agua a base de bioadsorbente Moringa oleifera Lam.*

Manejo de los desechos	Tanto el material de las trampas de pulpas como el proveniente de los tanques metanogénicas son vertidos en la excavación de rebose. El gas metano es aprovechado para labores de cocina. Algas que aparecen en el reactor hidrolítico- acidogenico son enterradas para evitar problemas ambientales.	El material producto de la trampa de pulpas es vertido a la excavación de rebose y los residuos de la semilla son utilizados como abono para el cultivo.
Manejo de caudal	Debe de manejar un caudal que permita la estabilización del agua antes de que entre en contacto con las bacterias metanogénicas.	No presenta manejo de caudal por que el sistema trabaja es con volúmenes de agua a tratar.
Tiempo del agua en el sistema	Maneja caudales que hace que el agua circule lentamente no se estima un tiempo determinado para un ciclo de agua.	La permanencia del agua en el sistema es de dos días.

El costo del sistema es dividido en costos implementación y mantenimiento para tenerlos como referencia para indicar el beneficio neto de estos en el aporte de una agricultura sostenible para el pequeño caficultor colombiano.

4.3.1 costos de implementación

Para el presente estudio se reconocen como costos de implementación aquellos que se encuentren relacionados con el tratamiento inmediato del agua en ambos sistemas por ende:

4.3.1.1 Aspecto Operativo

Los costos de operación de los sistemas son aquellos que permiten el funcionamiento de los sistemas para el tratamiento de las aguas, como lo es la adecuación de terrenos, instalación del sistema y la puesta en marcha de este; está relacionada con el tiempo hombre que se gasta en realizar estas funciones.

La Tabla 9 pone en evidencia la sencillez del sistema propuesto por el presente estudio en comparación del SMTA para el pequeño caficultor colombiano en términos de cantidad de módulos para el tratamiento de aguas, razón por la cual para la instalación, adecuación de terrenos y mantenimiento se necesita de 3 jornales para implementar el SMTA y para el sistema propuesto se necesitó de 2 jornales.

El tiempo de arranque en el SMTA de acuerdo con trabajos realizados por Zambrano *et al.* (2010) construcción y operación del sistema modular de tratamiento anaerobio para las aguas mieles tiene una duración de 2 meses en los cuales se debe seguir las recomendaciones, porcentajes de mezclas y aplicación de sustancias como la cal masilla para poder obtener un rendimiento óptimo del sistema. Esto indica que si el inculo es afectado por condiciones climáticas o temporadas fuera de la cosecha es necesario empezar nuevamente además de la necesidad de un mayor dominio de la técnica para el funcionamiento del sistema y en este periodo de tiempo no es posible realizar tratamientos al agua de la pequeña unidad productiva, se necesita de la asesoría técnica de un funcionario para el arranque del sistema.

En comparación con el sistema propuesto por el presente estudio se necesita medio jornal para la preparación del bioadsorbente y el sistema puede entrar en funcionamiento tan pronto como se tenga la dosis para la aplicación al tanque de bioadsorbentes, haciendo de este sistema más práctico para su puesta en marcha.

4.3.1.2 Aspecto legal

Los costos directos legales van de la mano de la existencia de los sistemas de tratamiento de aguas, que para el presente estudio este costo no aplica puesto que se da por entendido la existencia de estos como referente para poder realizar esta comparación.

4.3.1.3 Aspectos económicos

El aspecto económico para los costos de implementación tiene en cuenta los costos de operación y compra de materiales para la instalación del sistema, para el siguiente estudio no se tuvo en cuenta costos de transporte debido a que este es cambiante para las diferentes regiones de Colombia y se asume que es igual para ambos sistemas.

Con base de la tabla 9 podemos inferir que para la compra de materiales e instalación el SMTA tiene un costo más elevado debido al mayor número de módulos utilizados por este. Para el presente estudio el sistema se diseñó y construyó asimilando el proceso realizado por un SMTA 600 que es el sistema que se recomienda para la unidad productiva en la cual se llevó a cabo la experiencia, a partir de este, se realizó la cotización de la cooperativa de caficultores del Huila CADEFIHUILA confrontándolo con el costo de poner en marcha del sistema a base de bioadsorbentes se expresa en la figura 18.

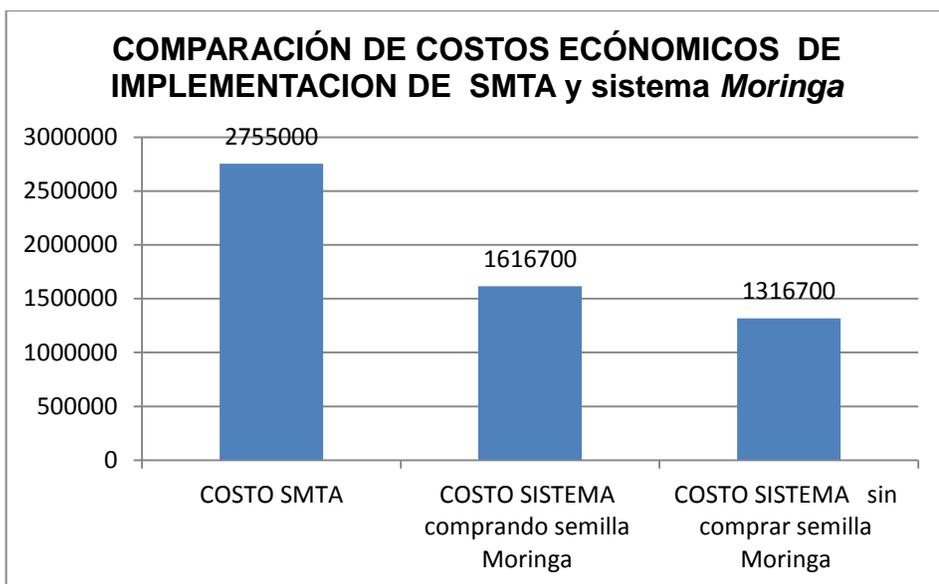


Figura 18. Comparación de costos de materiales e insumos del SMTA y sistema a base de Moringa.

El un costo de un SMTA 600 es de \$2.755.000.00 pesos en comparación del sistema expuesto en el presente estudio que tiene un costo de \$1.616.700.00 comprando la semilla evidenciando una reducción en el costo para el pequeño

caficultor del 41% y si sin comprar la semilla el costo es de 1.313.700.00 reduciendo el costo de poner en marcha el sistema en un 52 % en comparación del SMTA.

En la tabla 10 se evidencian los costos de implementación de los sistemas, evidenciando unos costos bajos para este ítem en el sistema propuesto en el presente estudio.

Tabla 10. *Comparación de costos de implementación entre el SMTA y el Sistema de tratamiento con el bioadsorbente Moringa oleifera Lam en pesos colombianos*

Costos de implementación		
	Sistema modular de tratamiento anaerobio SMTA	Sistema de tratamiento con el bioadsorbente <i>Moringa oleifera</i> Lam
Instalación (jornales)	90.000	60.000
Servicio técnico	600.000	0
Materiales e insumos	2.755.000	1.616.700
Total	3.445.000	1.676.700

4.3.2 costos de mantenimiento

Los costos mantenimiento están relacionados con el uso del material de desecho producido por estos para un periodo de tiempo de un año.

4.3.1. Aspecto operativo

El mantenimiento del sistema propuesto va de la mano del enjuague el tanque de bioadsorbente para incluir una nueva dosis de este que se recomienda realizarse

cada 15 días en temporada de cosecha y en temporada de post-cosecha cada vez que se utilice el sistema siendo de esta manera un número de 14 enjuagues al año que en tiempo de trabajo hombre serán aproximado de 2 jornales al año. El mantenimiento del SMTA está relacionado con el control de la aparición de algas en el tanque hidrolítico-acidogénico (las algas son sacadas y enterradas para evitar problemas ambientales) que en el año es muy variable puede realizarse este proceso 6 veces al año y el soporte de las bacterias metanogénicas en temporadas de post-cosecha (aplicación de urea y cal masilla) proceso que puede variar entre 2 y 3 veces al año que sumado en horas de trabajo hombre corresponde a 3 jornales.

El material de desecho producido por el SMTA es vertido a la recámara de rebose (Zambrano *et al.*, 2010). El producto de desecho producido por el sistema a base del polvo de semilla de *Moringa oleifera* Lam puede ser aprovechado como abono orgánico por el caficultor mediante procesos como la lombricultura gracias a su alto contenido de nitrógeno (Olson *et al.*, 2011), ayudando de esta manera a una agricultura sostenible en las regiones cafeteras del país que en hora de trabajo hombre es de un jornal al año.

El sistema propuesto tiene la necesidad de utilizar grandes cantidades de semilla brindando al caficultor una alternativa de variabilidad de cultivos en la región como lo es el de sembrar la planta de *Moringa oleifera* Lam ya que por sus diversos usos hacen de esta rentable como lo ha expuesto Olson *et al.* (2011) en su trabajo la *Moringa oleifera*

Lam un árbol de múltiples usos. En el año se pronostica un número de 18 cambios de bioadsorbente aproximadamente para tratar el agua producto del beneficio de café, ya que según la pequeña unidad productiva esa sería su producción promedio de café y por ende de lavados.

El sistema propuesto promueve la disminución de tiempo de estancamiento de aguas disminuyendo la posibilidad de aparición de vectores que generen enfermedades en la comunidad (Cenicafé, 2011), a diferencia del SMTA que en el reactor hidrolítico acidogénico y en el reactor metanogénico presentan un estancamiento debido al caudal que maneja este sistema (Zambrano *et al.*, 2010) .

4.3.2.2 Aspecto legal

El aspecto legal en los costos de mantenimiento están relacionados con el tratamiento del agua si este cumple con la normatividad vigente.

Los SMTA en Colombia han tenido una gran acogida de acuerdo a su capacidad de manejar volúmenes grandes de agua permitiendo al caficultor utilizar esta tecnología(Zambrano *et al.*, 2015). Las aguas tratadas por este sistema cumplen con la normatividad expuesta en la resolución 0631 de 2015 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015) .

El sistema propuesto por el presente estudio no cumple con los parámetros de DBO₅,DQO, grasas y aceites , pH y solidos sedimentables para la normatividad

expuesta por la resolución 0631 del 2015 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015), por tal razón surge la necesidad de ajustar el sistema. El parámetro DQO para el mostro mejores rendimientos que los expuestos por (Zambrano *et al.*, 2015), Los sólidos suspendidos totales cumplen con lo exigido por la normatividad vigente y los parámetros color, fosforo total y nitrógeno total se evidencio porcentajes de remoción de 93%, 84% y 11% respectivamente estos últimos se exige solo el análisis y reporte. Es de vital importancia potencializar el bioadsorbente para que este cumpla con la normatividad y sea viable para el pequeño caficultor colombiano. Para este punto de no ser corregido puede acarrear costos sobre las tasas retributivas por la carga contaminante vertida al ambiente circundante.

4.3.2.3 Aspectos económicos

El aspecto económico para los costos de mantenimiento es derivado de los aspectos operativos; en la tabla 11 se expresan los costos de mantenimiento con relación de los dos sistemas. El costo legal de los costos de mantenimiento no es aplicable para la presente investigación puesto que se evidencia que se debe realizar adecuaciones al sistema para dar cumplimiento a la normatividad colombiana.

Tabla 11. Comparación de costos de mantenimiento a un año entre el SMTA y el Sistema de tratamiento con el bioadsorbente Moringa oleifera Lam en pesos colombianos

Costos de mantenimiento		
	Sistema modular de tratamiento anaerobio SMTA	Sistema de tratamiento con el bioadsorbente <i>Moringa oleifera</i> Lam
Jornales	90.000	60.000
Servicio técnico	300.000	0
Materiales	20.000	5.400.000
Total	410.000	5.460.000

4.3.3 RELACION COSTO – BENEFICIO EN LOS SISTEMAS

En la figura 19 se evidencian los costos de implementación y de mantenimiento para el SMTA y el sistema de tratamiento con el bioadsorbente *Moringa oleifera* Lam, donde se evidencia que siendo más económico el sistema propuesto para colocarlo en marcha a un periodo de tiempo de un año de funcionamiento el SMTA presenta unos costos de \$3.855.000 en comparación de \$7.136.700 del sistema propuesto en el presente estudio.

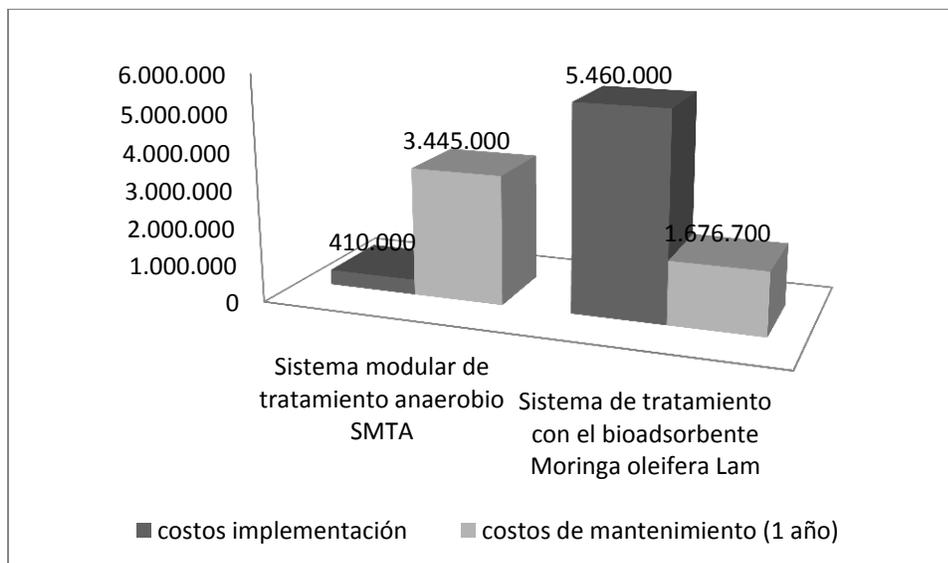


Figura 19. Comparación de costos totales del SMTA y sistema a base de Moringa (proyectado a un año de implementación de los sistemas).

Los beneficios planteados para el pequeño caficultor colombiano son directamente referenciados a la utilización de las buenas prácticas agrícolas, al cumplimiento de la legislación colombiana referente a vertimientos puntuales (resolución 0631 de 2015) y al aprovechamiento de los recursos naturales, por este motivo tomamos los beneficios de ambos sistemas como un dato estándar el cual en ambos sistemas va a tener un igual valor es este aspecto; motivo por el cual si tomamos como referente la operación de los beneficios relacionada a los costos totales de un año de funcionamiento de los sistemas el SMTA tendrá una mayor relación costo beneficio en su implementación.

Nos obstante el sistema propuesto en el presente estudio genera unos subproductos como es el caso de los residuos del polvo de semilla de moringa con el material orgánico del proceso de floculación – coagulación, que al ser muy ricos en nitrógeno y fosforo son propicios para elaboración de abonos orgánicos permitiendo de esta forma generar un ingreso extra al sistema productivo al momento de reducir compra de abonos para el mismo cultivo.

Igualmente si se plantea el cultivo de *Moringa oleifera* Lam en las pequeñas unidades productivas de café se desarrolla una reducción para colocar en marcha el

sistema anualmente de un 71% en su funcionamiento asiendo de la relación costo beneficio mayor que la desarrollada por el SMTA.

5. CONCLUSIONES Y RESULTADOS

Lo expuesto a lo largo del trabajo realizado permite abordar a las siguientes conclusiones:

En cuanto a la necesidad de desarrollar tecnologías alternativas viables para el caficultor colombiano sobre el tratamiento de aguas producto del beneficio del café para promover y dar aportes positivos a la política de calidad de agua expuesta en el 2010 por el estado colombiano (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010), se han desarrollado diversos sistemas como son las tecnologías SMTA y ECOMIL de CENICAFÉ que logran buenos resultados en términos de remoción de cargas contaminantes.

Sin embargo las anteriores tecnologías presentan dificultades en términos de costos y operación para los pequeños productores de café, quienes en función de su cantidad, generan un grave problema de contaminación sobre los ecosistemas acuáticos en la región andina de Colombia.

En este sentido el diseño elaborado en la presente investigación se constituye en un aporte relevante para el abordaje de uno de los problemas que se le atribuyen al sector de la caficultura colombiana, en términos de ser un sistema de fácil implementación y con unos costos estimados del 52% menos que el sistema SMTA; de igual forma la operación del sistema con bioadsorbente no requiere experticia, requiere poco tiempo y emplea elementos propios de una finca cafetera, aspectos todos estos que facilitan su implementación para un pequeño caficultor.

Además el uso de la semilla de *Moringa oleifera* Lam como bioadsorbente aunque no logra a plenitud las exigencias requeridas en la legislación colombiana, si realiza importantes porcentajes de remoción de las cargas contaminantes del agua producto del beneficio del café, incluso para algunos parámetros denota mejores resultados que los mostrados por el sistema SMTA. En este sentido se recomienda para futuros trabajo realizar una corrección previa del pH con cal y poder así obtener mejores resultados de acuerdo lo planteado por ANACAFÉ (2012), Como también realizar estudios que analicen la inclusión de otro modulo o la adición conjunta del bioadsorbente con agentes como óxido de calcio, sulfato de aluminio o hidroxiclорuro de aluminio que aporten a mejorar su acción.

Los residuos del sistema de tratamiento son ricos en nitrógeno por la acumulación que hace el bioadsorbente, en consecuencia, es posible su empleo como

abono en los propios cafetales aspecto que puede contribuir a la sostenibilidad de la unidad productiva.

El sistema propuesto no tuvo en cuenta tratamientos terciarios instalados subsecuentemente, debido a la necesidad de demostrar la capacidad por si solo del bioadsorbente por tal razón nace la pregunta del efecto de un tratamiento terciario ajustado al sistema propuesto en pro de mejorar la remoción de carga contaminante de los parámetros no cumplidos en la normatividad expresada como puede ser el empleo de biojardineras (módulo terciario para mitigar la carga contaminante en aguas gracias al uso de plantas macrófitas). Estos problemas, entre otros, deberán ser objetos de nuevas investigaciones que propicien un uso eficiente y sostenible de los recursos naturales para el bienestar de las generaciones futuras principalmente de las regiones cafeteras de Colombia.

El presente estudio recomienda el cultivo de la planta *Moringa oleifera* Lam en las unidades productivas de café para mitigar la problemática del costo beneficio en la compra de la semilla que puede dificultar la implementación del sistema en el pequeño caficultor, y con su siembra además de disminuir los costos del sistema, su cultivo puede aportar con diferentes usos como cerca viva, mitigación de procesos erosivos y su creciente uso comercial como planta medicinal hace que la incorporación de la planta sea propicia para las unidades productivas, sin embargo es necesario de realizar estudios sobre el cultivo de esta en las condiciones climáticas y edáficas en las cuales

se encuentran los cultivos de café debido a las características propias del cultivo de la planta.

Por último es importante señalar que bajo la luz de los resultados expuestos en los diseños desarrollados, la operatividad del sistema, la eficiencia en la remoción de cargas contaminantes, la relación costo beneficio y las recomendaciones sugeridas el sistema de tratamiento de aguas mieles producto del beneficio del café con base en el bioadsorbente *Moringa oleifera* Lam es un sistema viable para la implementación en pequeñas unidades productivas de café, que contribuye a la solución de la problemática ambiental generada en la caficultura en cuanto a la disminución importante de la carga contaminante vertida a las fuentes hídricas al tiempo que aborda uno de los desafíos del sector rural planteado por CENICAFE que es generar riqueza al tiempo que se logre la sostenibilidad de los sistemas de producción en términos de equidad, productividad, competitividad y manejo sostenible de los recursos naturales.

BIBLIOGRAFÍA

- Alves, A, Soares, R., & Adriano, E. (2014). Potencial de uso de compostos orgânicos como, coagulantes, floculantes e adsorventes no tratamento de água e efluentes. *Fórum Ambiental da Alta Paulista*, 12(10), 168-183.
- Anacafé. (2012). Tratamiento aguas residuales Beneficio - Anacafé. Recuperado 3 de agosto de 2016, de https://www.anacafe.org/glifos/index.php/Tratamiento_aguas_residuales_Beneficio
- Arango, A. (2007). *BIOSISTEMA INTEGRAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN* (tesis). UNIVERSIDAD DE MANIZALES, MANIZALES.
- Arreola, M. M. S., & Canepa, J. R. L. (2013). Moringa oleifera una alternativa para sustituir coagulantes metálicos en el tratamiento de aguas superficiales. Recuperado 28 de julio de 2016, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46730913001>
- Asma, S. (2005). Removal and recovery of heavy metals from aqueous solution using papaya wood as a new biosorbent. *Separation and Purification Technology*, 45(1), 25-31.
- Barrado, M. M., Beltran, J., & Martín, J. (2016). Microalgae removal with Moringa oleifera. *Toxicon*, 110(1), 68-73. <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2015.12.001>
- Bautista, A. (2010). *Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos (Estelí, Nicaragua)* (tesis). UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR, Nicaragua.
- Beltrán-Heredia, J., & Sánchez-Martín, J. (2009). Improvement of water treatment pilot plant with Moringa oleifera extract as flocculant agent. *Environmental Technology*, 30(6), 525-534. <https://doi.org/10.1080/09593330902831176>
- Cadena, J., & Jaramillo, A. (2009). El papel estratégico del agua y el cultivo del café en Colombia. *ventana al campo tropical*, 1, 40-42.

- Cárdenas, C. (2000). *Evaluación de un sistema para el tratamiento de los lixiviados de pulpa y mucílago producidos en la tecnología BECOLSUB, STLB* (tesis). Universidad de la Sabana, Chía (Colombia).
- 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*. (tesis). UNIVERSIDAD DE MANIZALES, MANIZALES.
- Carreño, cesar. (2016). *Biotecnología Ambiental de Aguas y Aguas Residuales* (segunda, Vol. 1). Bogota: ECOE.
- Cenicafé. (2011a). Construyendo el modelo para la gestión integrada del recurso hídrico en la caficultura colombiana. Recuperado de http://www.cenicafe.org/es/documents/PROPUESTA__P_A_CENICAFE_ABRIL13.pdf
- Cenicafé. (2011b). Construyendo el modelo para la gestión integrada del recurso hídrico en la caficultura colombiana. Recuperado de http://www.cenicafe.org/es/documents/PROPUESTA__P_A_CENICAFE_ABRIL13.pdf
- Chapagain, A., & Hoestra, A. (2003). The water need to have the duch drink coffee. *UNESCO-IHE*, 38.
- Congreso de Colombia. (1993). Ley 99 de 1993. Recuperado 25 de octubre de 2016, de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=297>
- Conpes. (2006). Concepto favorable para el otorgamiento de la garantía de la nación a Finagro para contratar un empréstito externo con el gobierno español para financiar parcialmente el programa "Fortalecimiento de la calidad de café en Colombia" Bogotá Colombia 2006.
- Constitución Política de Colombia. (1991). *ConstitucionColombia.com*. Recuperado 25 de octubre de 2016, de <http://www.constitucioncolombia.com/>

- de Paula, H. M., de Oliveira Ilha, M. S., & Andrade, L. S. (2014). Concrete plant wastewater treatment process by coagulation combining aluminum sulfate and Moringa oleifera powder. *Journal of Cleaner Production*, 76, 125-130. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.031>
- Díaz, S., Vesga, E., & Vega, H. (2013). Identificación del manejo de subproductos del beneficio del café en las fincas localizadas en la parte alta de la microcuenca La Sancotea, Vereda Alto de Reinas, Socorro-Santander. *EL CENTAURO*, 5(8), 19-30.
- Estupiñán Gaitán Rodrigo. (2006). *Análisis Financiero y de Gestión* (Vol. 2). Bogota: Ecoe Ediciones.
- Federación Nacional de Cafeteros. (2010). El Café de Colombia | Café de Colombia. Recuperado 19 de octubre de 2016, de http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/el_cafe_de_colombia/
- Federación Nacional de Cafeteros. (2016). La Gente del Café. Recuperado 17 de agosto de 2016, de http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/la_tierra_del_cafe/la_gente_del_cafe/
- García, H., Corredor, A., Calderón, L., & Gómez, M. (2013). Análisis costo beneficio de energías renovables no convencionales en Colombia. Recuperado de <http://www.repository.fedesarrollo.org.co/handle/11445/331>
- García, J. (2015). *Aplicación del método winkler como sustitución de la respirometría en la determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en efluentes del proceso de beneficiado húmedo de café* (tesis). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Grajalez, A., Jaramillo, A., & Cruz, G. (2008). Los nuevos conceptos sobre “agua virtual” y “huella hídrica” aplicados al desarrollo sostenible: implicaciones de la agricultura en el consumo hídrico. *Agron*, 16(1), 1-9.
- Gupta, K., Fladd, W., & Tonikian, S. (2007). Ubiquitination screen using protein microarrays form comprehensive of Rsp5 substrats in yeast. *Mol Syst Biol*, 116.

- Haq, B., Beenish, M., Asif, M., & Nadeem, R. (2007). Removal of Zn(II) ions from aqueous solution using *Moringa oleifera* Lam. (horseradish tree) biomass. *Process Biochemistry*, 42(1), 547-553.
<https://doi.org/10.1016/j.procbio.2006.10.009>
- IDEAM. (2014). MÉTODOS ANALÍTICOS - IDEAM. Recuperado 11 de septiembre de 2018, de <http://www.ideam.gov.co/web/agua/metodos-analiticos>
- IDEAM. (2015). *Estudio Nacional del Agua 2014*. Bogota: Panamericana Formas e Impresos S.A.
- Instituto Nacional de Salud. (2011). *Manual de instrucciones para la toma, preservación y transporte de muestras de agua de consumo humano para el análisis de laboratorio*. Bogotá.
- João, F., Silva, J. B. G., Roque, O. C. C., Nascentes, A. L., & Silva, L. D. B. (2014). Evaluation of the effect of the seed extract of *Moringa oleifera* Lam over the efficiency of organic filters in wastewater treatment of dairy cattle breeding. *Engenharia Agrícola*, 34(1), 143-152.
<https://doi.org/10.1590/S0100-69162014000100015>
- Joao, F., Silva, J., Roque, O., Nasenses, A., & Silva, L. (2014). Evaluation of the effect of the seed extract of *moringa oleifera lam* over the efficiency of organic filters in wastewater treatment of dairy cattle breeding. *Enginier Agríc., Jaboticabal*, 34(1), 143-152.
- Kadir, M., Abdul, A., Daud, Z., Khaled, N., & Mustafa, F. (2015). HEAVY METAL REMOVAL IN A COMBINED UASB-DFAF AND HUASB-DFAF SYSTEM REACTORS TREATING MUNICIPAL WASTEWATER. *Malaysian Journal of Civil Engineering*, 27(2), 352-366.
- Katayon, S., Megat, M., & Abdullah, A. (2006). the effectiveness of *moringa oleifera* as primary coagulant in high-rate settling pilot scale water treatment plant. *International Journal of Engineering and Technology*, 3(2), 191-200.
- Kumar, D., Sessaiah, K., Reddy, A., Rao, M., & Wang, M. (2010). Biosorption of Pb²⁺ from aqueous solutions by *Moringa oleifera* bark: Equilibrium and kinetic studies. *Journal of Hazardous Materials*, 174(1), 831–838. <https://doi.org/doi:10.1016/j.jhazmat.2009.09.128>

- Ledo, P., Lima, R., & Duarte, M. (2009). Estudio comparativo de sulfato de aluminio y semillas de Moringa oleifera para la depuración de aguas con baja turbiedad. *Información tecnológica*, 3-12.
- Madrona, G. S., Branco, I. G., Seolin, V. J., Filho, B. de A. A., Fagundes-Klen, M. R., & Bergamasco, R. (2012). Evaluation of extracts of Moringa oleifera Lam seeds obtained with NaCl and their effects on water treatment. Recuperado 28 de julio de 2016, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=303226542006>
- Matuk, V., Puerta, G., & Rodríguez, N. (1997). IMPACTO BIOLÓGICO DE LOS EFLUENTES DEL BENEFICIO HUMEDO DEL CAFÉ. *CENICAFÉ*, 48(4), 234-252.
- Meneghel, A. (2013). Smart materials for waste water applications. *Applications*, 4-25.
- Mera, C. F. M., Salamanca, M. L. G., Rojas, C. M., & Concha, J. P. P. (2016). Efecto de la moringa oleífera en el tratamiento de aguas residuales en el Cauca, Colombia. *INGRESAR A LA REVISTA*, 14(2), 100-109. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(14\)100-109](https://doi.org/10.18684/BSAA(14)100-109)
- Mera, C., Gutierrez, M. L., Montes, C., & Paz, J. (2016). Efecto de la moringa oleífera en el tratamiento de aguas residuales en el Cauca, Colombia. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 100-109. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(14\)100-109](https://doi.org/10.18684/BSAA(14)100-109)
- Metcalfe, J. (1994). Biological water-quality assessment of rivers: use of macroinvertebrate communities. *The Rivers Handbook*, 144-170.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010a). Política Nacional para la gestión integral del Recurso Hídrico.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010b). Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico | Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Recuperado 14 de diciembre de 2017, de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/1932-politica-nacional-para-la-gestion-integral-del-recurso-hidrico>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015a). Resolución 0631 de 2015. Recuperado 25 de octubre de 2016, de

http://www.fenavi.org/index.php?option=com_content&view=article&id=3167:resolucion-0631-de-2015&catid=393:uso-de-recursos

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015b). Resolución 0631 de 2015. Recuperado 14 de diciembre de 2017, de

http://www.fenavi.org/index.php?option=com_content&view=article&id=3167:resolucion-0631-de-2015&catid=393:uso-de-recursos

Molina, A., & Villatoro, R. (2006). *PROPUESTA DE TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES EN BENEFICIOS HUMEDOS DE CAFE* (Maestría). UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR, SALVADOR.

Muyibi, S., & Alfugara, A. (2003). Treatment of surface water with Moringa Oleifera seed extract and alum – a comparative study using a pilot scale water treatment plant. *International Journal of Environmental Studies*, 60(6), 617-626. <https://doi.org/10.1080/723032000087925>

Muyibi, S., Birima, A., Mohammed, T., & Noor, M. (2004). Conventional treatment of surface water using moringa oleifera seeds extract as a primary coagulant. *IJUM Engineering Journal*, 5(1), 25-35.

Oliveros, C., Sanz, J., Ramírez, C., & Tibaduiza, C. (2013). ECOMILL® Tecnología de bajo impacto ambiental para el lavado del café. *Ciencia, tecnología e innovación para la caficultura colombiana*, 432(1), 1-8.

Olson, M. E., & Fahey, J. W. (2011). Moringa oleifera: un árbol multiusos para las zonas tropicales secas. Recuperado 29 de julio de 2016, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=42520885001>

Peralta, Y. (2014). *Arcillas pilarizadas con Al-Fe y Al-Ce-Fe como sistema de postratamiento de las aguas residuales del beneficio húmedo del café* (tesis). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Ramírez, C., Oliveros, C., & Sanz, J. (2015). Manejo de lixiviados y aguas de lavado en el proceso de beneficio húmedo del café. *CENICAFÉ*, 66(1), 46-60.

- Rendón, J. (2014). *IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE ESTRATEGIAS PARA EL MANEJO INTEGRADO DEL AGUA EN LA ESTACIÓN CENTRAL NARANJAL "CENICAFÉ"* (Tesis de maestría). Universidad de Manizales, Manizales, Colombia.
- Rentería, M., Ramírez, L., Palma, N., & Rubio, H. (2014). Remoción de plomo en solución acuosa por la cáscara de naranja (*Citrus sinensis*). *Investigación y Ciencia*, 22(62), 5-10.
- Romero, I., Gonzales, R., Arriaga, M., Aranda, J., & Barro, G. (2013). Clarificación de agua del arroyo el Hueleque de Poza Rica, utilizando cal, sulfato de aluminio e hidroxiclورو de aluminio. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 9(1), 1-10.
- Rondón, M., Díaz, Y., Rodríguez, S., Guerra, B., Fernández, E., & Tabio, D. (2017). Empleo de semillas de Moringa oleífera en el tratamiento de residuales líquidos. *INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL*, 38(2), 87-101.
- Sala, L., García, S., González, J., Frascaroli, M., Bellú, S., Mangiameli, F., ... Salas, J. (2010). Biosorción para la eliminación de metales pesados en aguas de desecho. *Química y Medio Ambiente*, 106(2), 114-120.
- Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2010). *METODOLOGÍA de la investigación* (quinta). México D.F.: McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A.
- Surcolombiana, U. (s. f.). Portal Universitario :: Universidad Surcolombiana. Recuperado 13 de septiembre de 2016, de <https://www.usco.edu.co/es/estudia-en-la-usco/programas-postgrado/facultad-de-ingenieria/maestria-en-ingenieria-y-gestion-ambiental/>
- Trejos, J., Serna, C., Cruz, G., & Calderón, P. (2011). Ventajas sociales y ambientales de la adopción de la Norma de Agricultura Sostenible en dos regiones cafeteras de Colombia. *CENICAFÉ*, 62(2), 111-131.
- Valverde, K. C., Moraes, L. C. K., Bongiovani, M. C., Camacho, F. P., & Bergamasco, R. (2013). Coagulation diagram using the Moringa oleifera Lam and the aluminium sulphate, aiming the removal of

color and turbidity of water. Recuperado 29 de julio de 2016, de

<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=303228846013>

Vega, H., & Martínez, H. (2011). ADAPTACIÓN DEL SMTA AL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL BENEFICIO ECOLÓGICO DEL CAFÉ CON LA TECNOLOGÍA BECOLSUB. *EL CENTAURO*, (1), 1-11.

Worch, E. (2012). *Adsorption Technology in Water Treatment Fundamentals, Processes, and Modeling*. Germany: DE GRUYTER.

Zambrano, D, Rodriguez, N., Lopez, U., & Zambrano, A. (2010). Construya y opere su sistema modular de tratamiento anaerobio para las aguas mieles. *CENICAFÉ*, 1, 35.

Zambrano, Diego, Isaza, Juan, Rodríguez, N., & López, U. (1999). *Tratamiento de aguas residuales del lavado del café* (Boletín Técnico No. 20) (pp. 1-31). Chinchina, Caldas, Colombia: CENICAFÉ.

Zambrano, Diego, Rodríguez, N., LÓPEZ, U., Orozco, P., & Zambrano, A. (2006). TRATAMIENTO ANAEROBIO DE LAS AGUAS MIELES DEL CAFÉ. *CENICAFÉ*, 1-29.

Zambrano, Diego, Rodríguez, N., Zambrano, A., & López, U. (2010). *Construya y opere su sistema modular de tratamiento anaerobio para las aguas mieles* (pp. 1-35). Chinchina, Caldas, Colombia: CENICAFÉ.

Zambrano F., D. A., Rodriguez V., N., Orozco R., P. A., & Lopez P., U. (2015). Evaluación de un reactor metanogénico tipo filtro anaeróbico de flujo ascendente para tratar aguas mieles del café. Recuperado de <http://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/607>

Zhexian, X. (2006). Study on the equilibrium, kinetics and isotherm of biosorption of lead ions onto pretreated chemically modified orange peel. *Biochemical Engineering Journal*, 31(2), 160-164.

ANEXOS

Anexo1. Cotización Cadefihuila SMTA 600

Anexo 2. Resultados análisis de agua AGUALINSU SAS