



**DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA LAS AGUAS  
RESIDUALES AGRÍCOLAS GENERADAS EN EL BENEFICIO  
HÚMEDO DEL CAFÉ EN LA FINCA BUENA VISTA; PLANADAS  
TOLIMA, 2019.**

**Luisa Fernanda Campos Morales  
Dayhana Alejandra Durán Medina**

Universidad El Bosque  
Facultad de Ingeniería  
Programa Ingeniería Ambiental  
Bogotá, 2019

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO  
PARA LAS AGUAS RESIDUALES AGRÍCOLAS  
GENERADAS EN EL BENEFICIO HÚMEDO DEL  
CAFÉ EN LA FINCA BUENA VISTA; PLANADAS, TOLIMA, 2019.**

**Luisa Fernanda Campos Morales  
Dayhana Alejandra Durán Medina**



**DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA LAS AGUAS  
RESIDUALES AGRÍCOLAS GENERADAS EN EL BENEFICIO  
HÚMEDO DEL CAFÉ EN LA FINCA BUENA VISTA; PLANADAS  
TOLIMA, 2019.**

**Luisa Fernanda Campos Morales  
Dayhana Alejandra Durán Medina**

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Ingeniero Ambiental**

Director (a):  
Carlos Andrés Peña Guzmán

Línea de Investigación:  
Manejo Integrado del Recurso Hídrico del grupo Agua, Salud y Ambiente.

Universidad El Bosque  
Facultad de Ingeniería  
Programa Ingeniería Ambiental  
Bogotá, Colombia  
2019.

Acta de sustentación

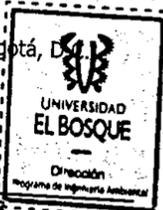


SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE GRADO

ACTA No: 1125

El día **28 OCT 2019**, en las instalaciones de la Universidad El Bosque, se desarrolló la sustentación del trabajo de grado titulado **DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA LAS AGUAS RESIDUALES AGRÍCOLAS GENERADAS EN EL BENEFICIO HÚMEDO DEL CAFÉ EN LA FINCA BUENA VISTA; PLANADAS, TOLIMA**, escrito por **LUISA FERNANDA CAMPOS MORALES, C.C. 1108935390** y **DAYHANA ALEJANDRA DURÁN MEDINA, C.C. 1020831252**, bajo la dirección de **CARLOS ANDRÉS PEÑA GUZMÁN, C.C. 80730492**, como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Ambiental. El trabajo fue evaluado por los jurados **RUBÉN DARIO TAMAYO RAMÍREZ, C.C. 162052** y **EDGAR EDUARDO LADINO MORENO, C.C. 79662344**, quienes deliberaron y concluyeron que cumple con los criterios de calidad, por lo que se determina que el trabajo es **Aprobado**.

En constancia, se firma en Bogotá, D.C.

  
  
**KENNETH OCHOA VARGAS**  
Director  
Programa de Ingeniería Ambiental

  
  
**GERMÁN AGUDELO ASCENCIO**  
Secretario Académico  
Facultad de Ingeniería

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO  
PARA LAS AGUAS RESIDUALES AGRÍCOLAS  
GENERADAS EN EL BENEFICIO HÚMEDO DEL  
CAFÉ EN LA FINCA BUENA VISTA; PLANADAS, TOLIMA, 2019.**

**Luisa Fernanda Campos Morales  
Dayhana Alejandra Durán Medina**

“La Universidad El Bosque, no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velará por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia”.

***(Dedicatoria)***

*A nuestros padres por apoyarnos durante esta etapa universitaria, por su comprensión, ayuda en todo momento y siempre guiar nuestros pasos.*

*A la familia en general, abuelos, tíos, primos por brindarnos compañía y ayuda en una nueva ciudad y nos acogieron durante 5 años.*

*A aquellos docentes que fueron formadores de valores, ética profesional y nos compartieron sus conocimientos en cada aula de clase.*

## **Agradecimientos**

Expresamos nuestros más sinceros agradecimientos a aquellos que de una u otra manera nos brindaron el apoyo para llevar a cabo la elaboración y culminación de este proyecto:

Agradecemos primero que todo a Dios por ser nuestro guía en todo momento, por brindarnos la oportunidad de finalizar nuestra carrera universitaria como ingenieras ambientales y sobretodo, por habernos puesto en el camino a personas maravillosas durante esta etapa universitaria.

A nuestros padres y familiares en general, quienes han estado en el momento justo para ofrecernos voces de aliento en momentos difíciles y quienes han sido, además, nuestro motor para seguir adelante con nuestros propósitos.

A nuestros amigos quienes con paciencia y amor estuvieron pendientes ante cualquier adversidad que se nos presentara en el ámbito académico, fortaleciendo de este modo nuestro conocimiento.

A nuestro director de proyecto Carlos Andrés Peña Guzmán, por compartir sus conocimientos y experiencias con nosotras.

A todo el cuerpo de docentes que hizo posible la realización de este proyecto mediante su acompañamiento y conocimientos aportados.

## 1 Tabla de Contenido

<b>1 Tabla de contenido</b>	7
<b>2 Listado de figuras</b>	10
<b>3 Listado de tablas</b>	10
<b>4 Resumen</b>	11
<b>5 Abstract</b>	11
<b>6 Introducción</b>	12
<b>7 Planteamiento del problema</b>	13
<b>8 Justificación</b>	14
<b>9 Objetivos</b>	15
9.1. <i>Objetivo General</i>	15
9.2. <i>Objetivos específicos</i>	15
<b>10 Marco de referencia</b>	16
10.1. <i>Marco de antecedentes (estado del arte)</i>	16
10.2. <i>Marco Conceptual</i>	18
10.3. <i>Marco teórico</i>	19
10.3.1. <i>Teoría del ecologismo popular</i>	19
10.3.2. <i>Calidad del agua</i>	20
10.3.3. <i>Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH)</i>	20
10.4. <i>Marco Normativo</i>	21
10.5. <i>Marco Geográfico</i>	23
10.6. <i>Marco Institucional</i>	26
<b>11 Metodología</b>	29
11.1. <i>Enfoque</i>	29
11.2. <i>Alcance</i>	29
11.3. <i>Metodología del estudio</i>	30
11.4. <i>Variables, Aspectos e Indicadores</i>	46
<b>12 Plan de Trabajo</b>	48
12.1. <i>Esquematización de las diferentes etapas y fases del trabajo de investigación</i>	48
12.2. <i>Esquema metodológico que integra y articula objetivos, actividades, metodología y resultados esperados.</i>	49
12.3. <i>Presupuesto del diseño del Sistema de tratamiento primario y secundario.</i>	50
12.4. <i>Presupuesto para la realización del proyecto</i>	52
<b>13 Aspectos Éticos</b>	54
<b>14 Resultados y análisis de resultados</b>	54
14.1. <i>Identificación de la línea base</i>	54
14.2. <i>Resultados y discusión por parámetro</i>	60
14.2.1. <i>Potencial de Hidrógeno (pH)</i>	60
14.2.2. <i>Demanda Química de Oxígeno (DQO)</i>	61

14.2.3. Conductividad eléctrica	64
14.2.4. Demanda Bioquímica de Oxígeno	64
14.2.5. Sólidos Sedimentables (SSED)	65
14.2.6. Sólidos Suspendidos Totales (SST)	65
14.2.7. Grasas y Aceites	66
14.2.6. Sólidos Suspendidos Totales (SST)	66
14.3. Componentes del SMTA	70
14.3.1. Trampa de pulpas	71
14.3.2. Reactor Hidrolítico / Acidogénico	71
14.3.3. Recámara dosificadora	71
14.3.4. Reactores metanogénicos	71
14.3.5. Microorganismos metanogénicos	71
14.4. Diseño del SMTA	72
14.4.1. Cálculo de la constante de velocidad de primer orden dependiente de la temperatura ( $K_T$ )	75
14.4.2. Cálculo del área superficial	75
14.4.3. Área de la sección transversal	76
14.4.4. Ancho del estanque	76
14.4.5. Largo del estanque	76
14.4.6. Tiempo de retención hidráulica	77
14.4.7. Carga hidráulica	77
14.4.8. Carga orgánica	78
14.4.9. Tiempo de detención real	78
<b>15 Conclusiones</b>	<b>83</b>
<b>16 Recomendaciones</b>	<b>83</b>
<b>17 Bibliografía</b>	<b>85</b>
<b>18 Anexos</b>	<b>95</b>
18.1. Anexo 1. Árbol de problemas relacionado con el presente proyecto	95
18.2. Anexo 2. Árbol de objetivos relacionado con el presente proyecto	96
18.3. Anexo 3. Figura de relación con las ciencias ambientales y el área de investigación.	97
18.4. Anexo 4. Formato de información con los resultados obtenidos de las muestras de agua analizadas por parte del laboratorio LASEREX.	98
18.5. Anexo 5. Formato de información con los resultados obtenidos de las muestras de agua analizadas nuevamente para análisis de DBO y DQO	99
18.6. Anexo 6. Diagrama de identificación del proceso de beneficio húmedo del café	100
18.3. Anexo 3. Figura de relación con las ciencias ambientales y el área de investigación.	97
<b>19 Glosario de términos</b>	<b>101</b>

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO  
PARA LAS AGUAS RESIDUALES AGRÍCOLAS  
GENERADAS EN EL BENEFICIO HÚMEDO DEL  
CAFÉ EN LA FINCA BUENA VISTA; PLANADAS, TOLIMA, 2019.**

**Luisa Fernanda Campos Morales  
Dayhana Alejandra Durán Medina**

<i>19.1. Cuerpo de agua</i>	<i>101</i>
<i>19.2. Carga contaminante</i>	<i>101</i>
<i>19.3. Norma de vertimientos</i>	<i>101</i>
<i>19.4. pH</i>	<i>101</i>
<i>19.5. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)</i>	<i>101</i>
<i>19.6. Demanda Química de Oxígeno (DQO)</i>	<i>101</i>
<i>19.7. Vertimiento</i>	<i>101</i>
<i>19.8. Contaminación del agua</i>	<i>101</i>
<i>19.9. Tratamiento del agua</i>	<i>102</i>
<i>19.10. Agua residual no doméstica (ARnD)</i>	<i>102</i>
<i>19.11. Beneficio Húmedo del café</i>	<i>102</i>
<i>19.12. Biofiltración</i>	<i>102</i>
<i>19.13. Agua miel (mucílago)</i>	<i>102</i>
<i>19.14. Capacidad de asimilación y dilución</i>	<i>102</i>
<i>19.15. Biofiltros (Filtros biológicos)</i>	<i>102</i>
<i>19.14. Capacidad de asimilación y dilución</i>	<i>102</i>
<i>19.15. Biofiltros (Filtros biológicos)</i>	<i>102</i>
<i>19.16. Sistema de tratamiento anaerobio</i>	<i>102</i>

## 2 Listado de figuras

<i>Figura 1. Identificación de las teorías del proyecto.</i>	21
<i>Figura 2. Organigrama de la oficina involucrada del Ministerio del Medio ambiente y Desarrollo Sostenible</i>	26
<i>Figura 3. Organigrama de la oficina involucrada de la Corporación Autónoma Regional</i>	27
<i>Figura 4. Organigrama de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia</i>	27
<i>Figura 5. Organigrama del Grupo Asociativo de Productores de café especial (ACEDGA)</i>	28
<i>Figura 6. Descripción del enfoque y alcance de la investigación.</i>	30
<i>Figura 7. Información recopilada para conocer la línea base del proceso de beneficio húmedo del café.</i>	32
<i>Figura 8. Proceso de recolección de muestras de agua</i>	33
<i>Figura 9. Fase 1,2 y 3 del proyecto</i>	47
<i>Figura 10. Matriz de los objetivos, actividades, técnicas e instrumentos</i>	48
<i>Figura 11. Proceso productivo del café en la finca Buena Vista</i>	55
<i>Figura 12. Identificación de la línea base del proceso productivo del café</i>	57
<i>Figura 13. Diseño del Sistema de Tratamiento Modular (SMTA)</i>	80
<i>Figura 14. Diseño del humedal de flujo subsuperficial</i>	81

## 3 Listado de tablas

<i>Tabla 1. Normatividad colombiana legal vigente.</i>	10
<i>Tabla 2. Formato de toma de muestras de agua</i>	33
<i>Tabla 3. Rótulo diseñado para la diferenciación de cada tipo de muestra de agua</i>	34
<i>Tabla 4. Características físicas de las muestras de agua</i>	35
<i>Tabla 5. Modelo de identificación de los diferentes sistemas de tratamiento</i>	37
<i>Tabla 6. Valores indicativos para el diseño de humedales</i>	39
<i>Tabla 7. Valores recomendados para los parámetros de diseños de humedales</i>	40
<i>Tabla 8. Características típicas del medio en humedales de flujo subsuperficial</i>	40
<i>Tabla 9. Recopilación de variables, aspectos e indicadores.</i>	46
<i>Tabla 10. Presupuesto del diseño del sistema de tratamiento primario</i>	50
<i>Tabla 11. Presupuesto del diseño del sistema de tratamiento secundario</i>	40
<i>Tabla 12. Presupuesto para la realización del proyecto</i>	51
<i>Tabla 13. Producción más alta de café en el año 2018 en la finca</i>	51
<i>Tabla 14. Resultados de la caracterización del afluente natural y del agua miel</i>	58
<i>Tabla 15. Identificación de los contaminantes críticos</i>	59
<i>Tabla 16. Comparación de los diferentes sistemas de tratamiento que son empleados para el tratamiento del agua miel</i>	68
<i>Tabla 16. Dimensiones finales del SMTA y del humedal artificial de flujo subsuperficial para tratamiento de agua miel</i>	79

## **4 Resumen**

El sector cafetero, realiza el procesamiento del café por vía húmeda, en donde se generan residuos líquidos contaminantes por sus valores de acidez (pH ácido), sólidos sedimentables (SS) y Demanda Química de oxígeno (DQO). Por lo cual, el objetivo de este proyecto fue proponer el diseño de un sistema de tratamiento para las aguas mieles (mucílago) generadas en la finca Buena Vista Planadas, Tolima. Para lo anterior, se conoció la línea base del proceso del café y luego se realizó una caracterización físico-química del agua miel en la cual los parámetros críticos de acuerdo a la **Res. 631:2015** fueron: **DQO** = 34873mg/L; **DBO<sub>5</sub>** = 13896mg/L; **Grasas y aceites** =2052mg/L y **SST** = 4126mg/L. Con esto, se diseñó un Sistema modular de tratamiento anaerobio (**SMTA**) con una capacidad máxima de 1.710kg de café cereza /día y un Humedal artificial de flujo subsuperficial (**SFS**) de 4.644, 2m<sup>2</sup> como complemento del SMTA. Concluyendo, así que el sistema es altamente eficiente en la remoción de los contaminantes presentes en el agua residual del beneficio de café basados en estudios que se han llevado a cabo en los últimos años por universidades, gremios del sector cafetero y por Centro Nacional de Investigaciones de Café, quienes han obtenido valores de remoción del **93%** en el caso del SMTA y del **87,64%** para el caso del SFS. Por lo anterior, se puede inferir que la aplicación de los humedales artificiales es una alternativa viable, que involucra tecnología simple de operar, infraestructura asequible y mantenimiento económico.

*Palabras clave:* Aguas residuales, contaminación del agua, diseño, tratamiento, agua miel (mucílago), SMTA, SFS.

## **5 Abstract**

The coffee sector performs the processing of coffee by humid route, where polluting liquid waste is generated by its acidity values (acidic pH), sedimentable solids (SS) and Chemical Oxygen Demand (COD). Therefore, the objective of this project was to propose the design of a treatment system for honey (mucilage) waters generated at the Buena Vista Planadas estate, Tolima. For the above, the baseline of the coffee process was known and then a physical-chemical characterization of honey water was performed in which the critical parameters according to Res. 631: 2015 were: COD = 34873mg/L; BO<sub>5</sub>D = 13896mg/L; Fats and oils = 2052mg/L and SST = 4126mg/L. With this, a Modular Anaerobic Treatment System (SMTA) was designed with a maximum capacity of 1,710kg of cherry coffee / day and an artificial subsurface flow wetland (SFS) of 4,644.2m<sup>2</sup> as a complement to the SMTA. In conclusion, so the system is highly efficient in removing contaminants present in the wastewater from the coffee benefit based on studies that have been carried out in recent years by universities, coffee sector associations and the National Research Center Coffee, who have obtained removal values of 93% in the case of the SMTA and 87.64% in the case of the FSS. Therefore, it can be inferred that the application of artificial wetlands is a viable alternative, which involves simple technology to operate, affordable infrastructure and economic maintenance.

*Keywords:* Wastewater, water pollution, design, treatment, honey water (mucilage), SMTA, SFS.

## **6 Introducción**

El cultivo del café se encuentra ampliamente difundido en los países tropicales y subtropicales, además es uno de los principales productos de origen agrícola que se comercializa en los mercados internacionales que a menudo genera una gran contribución a los rubros de exportación de las regiones productoras (Galindo, 2011). Actualmente, uno de los productos de mayor importancia en Colombia es el café. Sin lugar a duda, también es el cultivo que mejor representa al Tolima en toda su dimensión geográfica y cultural, pues de manera simultánea el grano se produce en 38 municipios de los 47 que tiene el departamento (Federación Nacional de Cafeteros, 2015).

En general las áreas cafeteras de Colombia corresponden a zonas de montaña con abundancia en fuentes hídricas; sin embargo, los subproductos del beneficio del café representados por la pulpa y mucílago que son manejados inadecuadamente simbolizan el 72% y el 28% de la contaminación que llega a las corrientes naturales de agua, debido a que suministran grandes cantidades de materia orgánica que las bacterias metabolizan o descomponen generando así, valores de pH ácidos, alta demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO), además de la presencia de sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos suspendidos sedimentables (SSS) (Gutiérrez et al. , 2014).

Es por esto que el proyecto se basa en elaborar un diseño de un sistema de tratamiento para las aguas mieles (mucílago) y según los resultados de las pruebas físico-químicas del agua residual agrícola seleccionar el tipo de sistema de tratamiento que mejor se adapte a las condiciones tanto del agua, de la finca, de la población cafetera y del municipio de Planadas, Tolima. Existen diversos tipos de sistemas de tratamientos; entre los cuales se encuentran la utilización de biofiltros tales como los filtros percoladores, que son biofiltros que no ejercen una acción de tamizado o filtración del agua residual, sino que pone en contacto aguas residuales con biomasa adherida a un medio de soporte fijo, constituyendo un lecho de oxidación biológica (Romero, 2005). Usualmente, es circular con un distribuidor rotatorio superficial del agua o rectangular con sistemas de aplicación de agua mediante tuberías y toberas fijas; ambos contienen rellenos de un material inerte como coque metalúrgico o piedras silíceas trituradas sobre el que se rocía el agua a tratar (Romero, 2005). Además, de Sistemas de Biodigestión y Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio (SMTA) el cual remueve la contaminación presente en las aguas residuales producidas por el mucílago fermentado del café, en el lavado de café en los tanques en los tanques de fermentación. Este sistema está compuesto por dos unidades que permiten la separación de las fases de la digestión anaerobia (1, 9,25, 27): el reactor Hidrolítico / Acidogénico (RHA) y el reactor Metanogénico (RM); entre otros (Zambrano, et al., 1999).

La mejor alternativa de tratamiento para depurar las aguas contaminadas está en función de la finalidad para la que se destinará el efluente; además, el diseño del sistema de tratamiento es consecuencia de la caracterización física, química y microbiológica de las aguas residuales del beneficio húmedo del café para así, convertir el efluente en inocuo para el medio ambiente. Es importante tener en cuenta que los dos contaminantes mayores de estas

aguas son: DBO<sub>5</sub> y los sólidos en suspensión, y en menor grado, las sustancias coloidales disueltas (Castillo, 1993).

Los resultados de la caracterización del agua se evaluarán mediante la resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, puesto que en su artículo 9, establece los parámetros físico-químicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas, en esta clasificación de aguas residuales se encuentran las que se generan en el sector cafetero, provenientes ya sea de un proceso ecológico o tradicional (Ministerio de Desarrollo Sostenible, 2015).

## **7 Planteamiento del problema**

En la actualidad existen diversas causas de contaminación hídrica, no obstante, dentro de las más comunes se encuentra el vertimiento de los desechos agroindustriales y domésticos que generan la destrucción de los cuerpos hídricos, la disminución del agua como elemento de abastecimiento, deterioro de la salud, así como también efectos desastrosos sobre los ecosistemas acuáticos y sus componentes (Gil et al., 2012).

En Colombia, el sector agrícola, es el principal contaminante en el país, pues el 95% de las aguas residuales en el área rural, se depositan sin tratamiento alguno en los suelos y fuentes hídricas (Zambrano, 2011). El sector cafetero, realiza el procesamiento del café por vía húmeda, en donde se generan residuos líquidos contaminantes por sus valores de acidez (pH ácido), sólidos sedimentables (SS) y Demanda Química de oxígeno (DQO) (Isaza & Zambrano, 2013), lo cual genera graves desequilibrios en el ecosistema receptor. Es así, como la industria cafetera, de gran importancia y significado en la vida socioeconómica del país (Gómez & Tascón, 2011), se convierte en la responsable del 55% de la huella hídrica gris agrícola en Colombia (Arévalo, Lozano, & Sabogal, 2011).

Según un estudio titulado “*Producir café de manera tradicional incrementa la huella hídrica*” realizado por Conrado Tobón Marín docente del Departamento de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional de Colombia (U.N.) Sede Medellín; 2018: En cultivos en Antioquia, Caldas, Cesar, Cundinamarca, Huila, Nariño, Norte de Santander, Quindío y Tolima la huella hídrica verde del cultivo de café en Colombia es del orden 14.560 m<sup>3</sup> por tonelada mientras que la huella hídrica gris, relacionada con el volumen de agua contaminada como resultado de procesos productivos, es de aproximadamente 5.600m<sup>3</sup> por tonelada, la cual corresponde alrededor de 4.000 millones de m<sup>3</sup> de agua en la producción anual de café en Colombia (Tobón, 2018).

El proceso del beneficio húmedo del café (PBHC), es el proceso para transformar el fruto en semilla y en el cual se utiliza grandes cantidades de agua para las etapas de despulpado, lavado y transporte (Ortiz & Cristóbal, 2014), con un consumo global cercano a los 40 litros de agua por cada kilogramo de café pergamino seco (cps) y en el cual no se realiza manejo a los subproductos obtenidos llevándose a cabo el vertido de las aguas mieles (mucílago) en los afluentes hídricos y en los suelos de la zona aledaña a los cultivos (Cárdenas & Ortiz,

2009). Estas aguas residuales presentan sustancias como fenoles, taninos y taninos, cuyas características estructurales los hacen ser resistentes a procesos de tratamientos biológicos (López & Orozco, 2006), logrando ocasionar la muerte de animales acuáticos (Galindo, Constantino, & Benavides, 2012); Si se vierten grandes volúmenes a los ríos, se puede ocasionar un medio anaeróbico (desprovisto de oxígeno), que puede lograr cambios en la ecología del agua (García, 2017).

Cabe resaltar que, para llevar a cabo los procesos de beneficio húmedo del café el agua potable es necesaria en especial para las clasificaciones de la cereza, de la fermentación, el lavado, el saneamiento de los equipos e instalaciones. Según Gloria Inés Puerta Investigadora científica de Cenicafé; 2015, “Con agua sucia **No** se obtiene café de buena calidad”, puesto que el uso de aguas astringentes, sucias y contaminadas en las fincas para el lavado del café produce sabores sucios, astringentes, no permiten obtener consistencia en la bebida de café. El agua potable permite obtener café inocuo y de calidad consistente (Puerta, 2015).

En el Centro Nacional de Investigaciones del Café (Cenicafé), han desarrollado tecnologías como: Becolsub, Ecomill® , Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales del Beneficio del Café (SMTA) (Isaza H. , 2013) , que los pequeños productores de café se ven limitados a implementarlas porque no cuentan con el espacio ni con el dinero necesario, viéndose en la obligación, de generar los vertimientos de las aguas a los afluentes hídricos sin tratamiento alguno (Valencia & Sánchez, 2014). Es por esto que se propone el diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales agrícolas generadas en el proceso de beneficio húmedo del café, a partir de la identificación de la línea base del beneficio, estableciendo balances de materia y energía y el análisis de los parámetros fisicoquímicos establecidos en la resolución 061 de 2015, para finalmente proponer el diseño del sistema para obtener un prototipo para los pequeños productores de café.

## **8 Justificación**

El agua es la fuente y el sustento de la vida, contribuye a regular el clima del mundo, es la única sustancia presente en abundancia en tres estados físicos (líquido, sólido y gaseoso). Es un solvente extraordinario, un reactivo ideal en procesos metabólicos; tiene una gran capacidad calorífica (Fernández, 2012). De este modo, el agua es un elemento integrante de los ecosistemas naturales, fundamental para el sostenimiento y reproducción de la vida en el planeta (García, 2015).

La contaminación, escasez y deterioro de las aguas en ríos, arroyos, lagos y mantos freáticos tiene consecuencias directas sobre los ecosistemas, salud humana y calidad de vida. Esta situación constituye una tragedia humana indescriptible y un obstáculo importante para el desarrollo (Bokova, 2010). La agricultura es el sector que más demanda el recurso hídrico, las dos terceras partes se destinan al uso agrícola aproximadamente un 30% del agua del país, mientras que un 59% del consumo total de agua se destina a uso industrial y un 11% a gasto doméstico (Faurés, 2013), por lo cual, el sector agrícola es uno de los causantes de la baja calidad del agua, debido a que no realizan una adecuada disposición de los subproductos que

allí se generan. La disposición de las aguas residuales sin tratamiento, es reflejada en el deterioro del recurso hídrico y las condiciones ambientales de las zonas aledañas a los cuerpos de agua, permitiendo observar el aumento de impactos negativos sobre el ambiente (Arévalo, Lozano, & Sabogal, 2011).

Cabe señalar que, en el año 2025 el consumo de agua destinada a uso industrial alcanzará los 1.170 km<sup>3</sup> / año, cifra que en 1995 se situaba en 752 km<sup>3</sup> / año. De este modo, el sector productor es el que más gasta y también es el que más contamina; pues más de un 80% de los desechos peligrosos del mundo se producen en los países industrializados, entre tanto en las naciones en vías de desarrollo un 70% de los residuos que se generan en las industrias se vierten al agua sin ningún tipo de tratamiento previo, lo cual conlleva a contaminar los recursos hídricos disponibles (Rodríguez et al, 2006). De allí la importancia de tratar y reutilizar los vertidos de aguas residuales industriales, pues éstas contienen compuestos orgánicos e inorgánicos que a causa de su toxicidad o sus efectos biológicos a largo plazo ocasionan efectos adversos a los cuerpos hídricos con los cuales tienen contacto. Además de contener sustancias que no se eliminan por un tratamiento convencional, ya sea por estar en concentraciones altas, o por su naturaleza química (Rodríguez et al, 2006).

Es por esto que en la finca Buenavista, ubicada en Planadas-Tolima, surge la necesidad de implementar alternativas que sean eficaces, económicamente viables e innovadoras para el tratamiento de las aguas residuales. Lo anterior, con el fin de generar una mejora de los afluentes hídricos afectados por procesos productivos del café, específicamente en el beneficio húmedo del café que es donde se generan los vertimientos de aguas mieles (mucílago). Se espera que con la implementación de la propuesta de diseño del sistema de tratamiento se logre un equilibrio entre los factores ecológicos, ambientales, sociales y económicos, mejorando la calidad del agua y vida de los habitantes del municipio.

## **9 Objetivos**

### *9.1. Objetivo General*

Proponer el diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales agrícolas, generadas como subproducto del beneficio húmedo del café en la finca Buena Vista; Planadas Tolima.

### *9.2. Objetivos específicos*

- 1.** Determinar la línea base del proceso productivo del café en la finca Buena Vista; Planadas Tolima.
- 2.** Caracterizar y analizar los parámetros fisicoquímicos del agua establecidos en la resolución 631 de 2015 para el beneficio del café.
- 3.** Establecer el dimensionamiento del sistema de tratamiento óptimo para el cumplimiento de la resolución 631 de 2015.

## 10 Marco de referencia

### 10.1. Marco de antecedentes (*Estado del arte*)

El análisis corresponde a una revisión sistemática de artículos de investigación, los cuales tienen la función de servir como herramienta para recopilar información de distintas fuentes ya sean secundarias o terciarias, como, por ejemplo: artículos, tesis, investigaciones, proyectos y/o trabajos de grado, etc. Para la revisión bibliográfica, se tuvo en cuenta la metodología de investigación en su sexta edición, planteada por (Hernández et al., 2014), considerando que es necesario definir objetivos precisos, efectuar una intensa revisión bibliográfica, seleccionar el diseño de investigación adecuado, realizar un buen análisis estadístico el cual representa una herramienta que permite hacer inferencias significativas respecto de los resultados obtenidos para poder llegar a conclusiones objetivas.

Por otra parte, la unidad de análisis establecida para este caso, fue el documento en formato de artículo original, esta búsqueda se delimitó de acuerdo a los criterios de tiempo y lugar. El período de tiempo para los documentos es de cinco años, sin embargo, este se ve modificado en caso tal de que geográficamente se tome como referencia otro país en el cual el último estudio realizado exceda este lapso de tiempo. Además, se tuvieron en cuenta bases de datos las cuales facilitan aún más la búsqueda de información; entre las consultadas se encuentran: Redalyc, Latindex, Google Académico, REDIB, Cenicafe, Anacafe y Dialnet.

Durante la revisión bibliográfica, se realizó la búsqueda del tema en todas las bases de datos, encontrando una dificultad representada en que el número de artículos no era significativo y no estaban enfocados en el tema de interés, en este caso: “Sistemas para el tratamiento de aguas mieles generadas en el beneficio húmedo del café”, publicados entre el 2014 y el 2018, teniendo en cuenta que la búsqueda se redujo a determinadas bases de datos. Es importante resaltar que el término “aguas mieles”, no es genérico para todos los países, modificando el criterio de búsqueda ya que es más comúnmente conocido como “mucílago”.

En la base de datos Redalyc, se empleó el término “aguas residuales del beneficio del café”, obteniendo algunos artículos como lo son: “Biodegradación anaerobia de las aguas generadas en el despulpado del café” de (Olvera e Islas, 2010) y “Eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> y SS en sedimentador y lecho filtrante para el tratamiento de aguas residuales del beneficio de café (*Coffea arábica*)” de (Gutiérrez, et al., 2014), estos artículos se encuentran encaminados a la biodegradabilidad de las aguas residuales del beneficio húmedo del café y a la caracterización de las propiedades químicas del efluente, para la correcta implementación de medidas correctivas. Es importante resaltar el énfasis que tiene el primer artículo en la generación excesiva durante las etapas del proceso húmedo del café, entre 40 a 45 litros de vertido residual por Kg de café procesado (Rodríguez et al., 2000), además de contener alta carga orgánica, presenta pH ácido y color caracterizado por contener macromoléculas como la lignina, los taninos y los ácidos húmicos que son estructuras moleculares complejas (Zayas et al., 2007).

Finalmente, se encontraron artículos de tipo descriptivo en las bases de datos seleccionadas anteriormente, en el caso de la base de datos de Redalyc, se observó que en los artículos se

presentaban contextos, métodos y estudios diferentes con resultados finales similares. En los artículos: “*Biodegradación anaerobia de las aguas generadas en el despulpado del café*” y “*Eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> y SS en sedimentador y lecho filtrante para el tratamiento de aguas residuales del beneficio de café (Coffea arábica)*” de (Gutiérrez et al, 2014) , la fuente principal era el tratamiento de aguas residuales del proceso del café evaluando la eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> y Sólidos Suspendidos (SS) por medio de un lecho filtrante y la implementación de biotecnología.

El estudio de Olvera e Islas, (2010), analizó una comunidad microbiana proveniente del fluido ruminal vacuno, para investigar la facilidad de depuración de aguas residuales del despulpado de café mediante la disminución de la carga orgánica expresada como DQO, además del volumen de metano generado. Obteniendo así, resultados de remoción de DQO superiores a la mitad del contenido orgánico inicial, llegando a 91,2 % con pH de 4,6 y 28°C en 16 días (Olvera e Islas, 2010). Entre tanto, el estudio de Gutiérrez y otros (2014), se focalizó en evaluar la eficiencia expresada en porcentaje de remoción de los parámetros DBO<sub>5</sub> y Sólidos Suspendidos (SS) en el sistema típico de tratamiento de aguas residuales, sedimentadores de geometría cuadrada y lecho filtrante (filtro de flujo ascendente - FFA o por un filtro de flujo horizontal - FFH); los resultados para este estudio, mostraron eficiencias de remoción de sólidos suspendidos superiores al 95 % y remoción de DBO<sub>5</sub> cercanas al 20 %; los máximos valores de remoción de SS se presentaron con la combinación integrada por sedimentador tipo 1 (Desnatador de geometría cuadrada de menor área), el filtro tipo 1 (Filtro anaerobio de flujo ascendente) y tiempo de retención hidráulica en el sedimentador de 30 horas (Gutiérrez et al., 2014).

Se confirmó que los estudios presentaran la información pertinente al trabajo de grado, y que dentro de sus contextos realizaran la descripción de los procesos implementados por cada uno de los investigadores permitiendo determinar que las aguas residuales del beneficio del café son de alto impacto en el ambiente; se observó que ambos métodos son eficaces al momento de llevar a cabo la remoción de DBO<sub>5</sub>. En estudios realizados por Orozco (2003), las eficiencias de remoción para DBO<sub>5</sub> para otros sistemas propuestos como el caso del reactor metanogénico tipo UAF superan el 80 % y los Sistemas Modulares de Tratamiento Anaerobio que alcanzaron el 83% (Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFÉ), 2011). Adicionalmente, según reporte del Ministerio de Ambiente de Colombia (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Resolución 631 de 2015: “Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”, 2015), solamente el 51% de los sistemas de tratamiento de aguas residuales tanto domésticos como industriales instalados en Colombia funcionan de manera aceptable.

El artículo más reciente se obtuvo de Guiolombo (2017), que establece dos sistemas de filtro como tratamiento de aguas residuales del café en el municipio de Planadas, Tolima, en donde establece que las aguas residuales que se producen durante el proceso del beneficio húmedo del fruto del café son biodegradables, pero poseen características físico químicas particularmente agresivas con el medio ambiente, como se mencionaba anteriormente: pH

bajo, acidez alta y concentraciones de material altas, que corresponden a contaminantes entre 60 y 240 veces superiores a las aguas residuales domésticas (Guilombo, 2017). Es por esto que, el autor establece la implementación de tecnologías ecológicas como el despulpado sin agua, la fermentación natural a través de un tanque tina, así como el establecimiento de un filtro primario o recámara de filtrado, que corresponde a un sistema integral para que los recursos económicos no se conviertan en un límite, y se obtenga la efectividad del filtro primario para remoción de carga contaminante >80% de DQO y DBO<sub>5</sub>, constituido por unas capas de gravilla y piedra, así como tanques de almacenamiento para el correcto tratamiento del efluente.

De acuerdo a los resultados obtenidos durante la revisión bibliográfica, es importante resaltar la diversidad de tratamientos para el agua residual del beneficio del café, es por esto que según Zambrano y otros (2015), Cenicafé desde hace dos décadas dio a conocer a la población cafetera los primeros diseños de sistemas modulares para tratamiento (SMTA), que se encuentra constituido por una fase metanogénica, sistema que ha tenido aceptación en las zonas cafeteras de los departamentos del Tolima, Cundinamarca, Magdalena, Quindío, Caldas y Huila, entre otros. Lo que más llama la atención, es que en el montaje del reactor metanogénico, evaluaron satisfactoriamente diferentes medios de soporte de microorganismos, como la borra del café, las guaduas, botellas no retornables y llantas usadas (Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFÉ), 2011).

Por otra parte, en el anterior trabajo evaluaron la factibilidad y desempeño de un reactor metanogénico tipo UAF fabricado en polietileno, utilizando Botellas Plásticas No Retornables (BPNR) como material de soporte de la biomasa, buscando plantear una estrategia más económica para el montaje de los reactores metanogénicos, que forman parte de los SMTA, que utilizan trozos de guadua y obtener eficiencias de remoción acordes con lo exigido por la legislación colombiana (Zambrano et al., 2015). Finalmente, los dos artículos colombianos mencionados anteriormente presentan relación en los promedios de las eficiencias de remoción para el estado estable del reactor metanogénico que fueron de 80%, 83%, 45,9% y 72,3% para DQO, DBO<sub>5</sub>, ST y SST, respectivamente, y la depuración de las aguas residuales del lavado del café por medio del SMTA (con una eficiencia del 86,6%), permite evitar el 96,5% de la contaminación potencial generada durante el beneficio húmedo del café (Orozco, 2003).

### *10.2. Marco conceptual*

En Colombia se utiliza el beneficio húmedo del café, con el fin de obtener características de acidez y aromas pronunciados para lograr altos rendimientos en las captaciones y mejorar el pago por cada carga de café a los campesinos. En la finca Buena Vista se realiza el proceso de beneficio húmedo del café (PBHC) después de la recolección del fruto maduro en los cafetales. Este proceso incluye la etapa de: **flotes, despulpado, fermentación, lavado y secado del grano.**

En los **flotes**, se sumerge el café en un tanque con agua a fin de que aquellos granos vacíos, sobremaduros e imperfectos floten por gravedad y sean sacados del proceso. En el

**despulpado**, a las cerezas se les retira la pulpa rápidamente después de la recolección (Federación Nacional de Cafeteros, 2010) y es depositado en unos tanques para posteriormente pasar a la etapa de **fermentación**, en donde se realiza la remoción del mucílago (*Baba que recubre el grano despulpado*), éste es un líquido gelatinoso con viscosidad y humedad apropiadas para que mediante la acción de fuerzas que presionan el grano en las despulpadoras, ocurra el despulpado (Roa *et al.*, 1999), teniendo en cuenta la variedad del café se establecen los tiempos de fermentación; si es variedad caturra se deja entre 24-36 horas, pero si es variedad Castillo y Colombia, se deja entre 36-48 horas en proceso de fermentación. De acuerdo con estudios realizados por Puerta Gloria & Ríos Sara, (2011): el mucílago de café fresco es un material vegetal con alto contenido de agua, 85% a 91%; los azúcares son los principales componentes de su materia seca, 6,2% a 7,4%, conformados por 63% de azúcares reductores. Esta composición química y las levaduras y bacterias naturales del mucílago explican su característica perecedera y la ocurrencia natural de su fermentación a temperatura ambiente. Finalmente, ocurre el **lavado**, que permite retirar completamente el mucílago fermentado del grano y el **secado**, en donde se pone el café en las marquesinas con el fin de reducir la humedad contenida en el grano hasta en un 12%, que es la norma vigente para la comercialización del grano (Oliveros, *et al.*, 2013).

El departamento del Tolima, es una región que en los últimos años ha dedicado gran parte de su terreno a los cultivos del café, por tal motivo es importante estudiar los impactos ambientales que se generan en el mismo. El proceso de beneficio húmedo genera dos tipos de residuos, la pulpa y el agua miel. Esta última, aporta carga orgánica, posee un pH ácido (entre 4 y 4.5), lo cual significa que acidifican el agua donde se depositan estos residuos. Lo anterior, da como resultado un foco de contaminación puesto que, en el cultivo del café, 80% del grano es al final un desecho en pulpa y aguas residuales (Sánchez *et al.*, 2016), que conlleva al agotamiento del oxígeno (anaerobiosis) y se destruye por asfixia la flora y fauna existente en los alrededores de la finca (Álvarez *et al.*, 2011).

### 10.3. Marco teórico

Es de suma importancia identificar las teorías bajo las cuales se rige el presente proyecto, por lo cual a continuación se especificarán algunas teorías, esto tiene como objetivo principal determinar el marco que encierra el problema central.

10.3.1. *Teoría del “ecologismo popular”*, propuesta por Joan Martínez-Alier y Ramachandra Guha: La teoría no atiende tanto a lo que los pobres piensen sobre el medio ambiente, sino en lo que hacen, es decir, cómo lo defienden, es así como postula que el componente ecologista está implícito en sus acciones. Desde su aprehensión, el ecologismo es definido como: “un fenómeno social de personas con estómagos llenos, una nueva moda de lujo y de tiempo de ocio”, que en este caso da a entender que la palabra ecologismo no puede ser arraigada desde un punto de vista de la sociedad de escasos recursos pues ellos no han gozado ni vivido el bienestar que antecede a los valores post materialistas. De este modo, la tesis del “Ecologismo popular”, no cree y rechaza que los ricos sean más ecologistas que los pobres o que los pobres sean bastante pobres para ser ecologistas; incluso sus expositores

recalcan que los segundos son menos dañinos ecológicamente que los primeros (Montero & Sandí, 2009).

Según el chileno Mauricio Folchi “ni todos los conflictos de contenido ambiental son ecologistas ni todos los conflictos ecologistas son protagonizados por los pobres”. Él sostiene que las luchas que emanan de la relación sociedad-naturaleza solo en pocas ocasiones desembocan en “ecologismo popular”, por lo que muchos de los conflictos deben comprenderse de “contenido ambiental” (Montero & Sandí, 2009). Dichos conflictos ambientales, se generan cuando se presiona la estabilidad histórica conseguida entre una comunidad y su hábitat, lo cual ocurre como consecuencia de la acción de algún agente que altera o pretende alterar las relaciones preexistentes entre una comunidad y su ambiente, o cuando una comunidad decide modificar su vinculación con el ambiente afectando los intereses de alguien más. De tal modo que, los conflictos ambientales pueden ser entendidos como: “aquellos en los que existe una disputa por un recurso o por el impacto que genera un determinado uso del mismo, sin cuestionar la forma (Montero & Sandí, 2009).

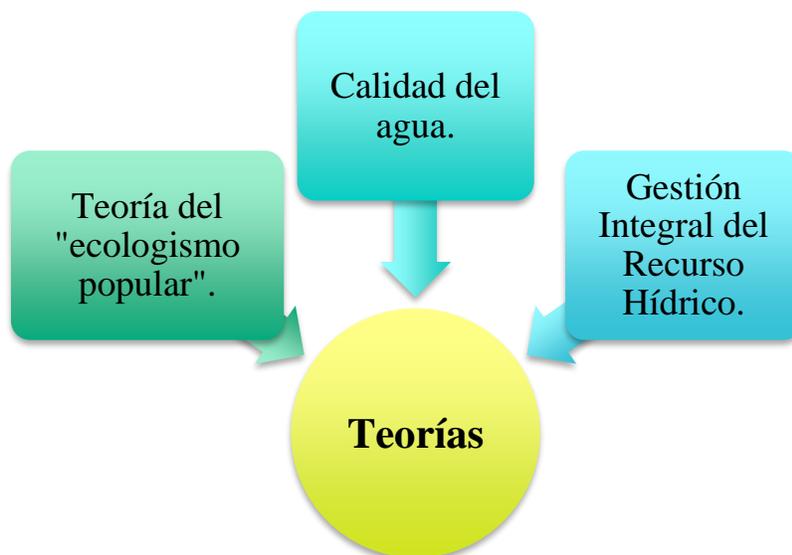
*10.3.2. Calidad del agua:* En el potencial de uso de fuentes no convencionales tales como recuperación, reutilización, reciclaje, desalinización y gestión de la demanda de agua se deben identificar los parámetros pertinentes del ciclo hidrológico y evaluar el requerimiento de agua de las diferentes alternativas de desarrollo. Además, señalar las principales situaciones relacionadas con el recurso hídrico y los conflictos potenciales, su severidad e implicaciones sociales (Agencia Canadiense para el Desarrollo Internacional (CIDA), 2005).

*10.3.3. Gestión integral del recurso hídrico (GIRH):* La GIRH se define como “un proceso que promueve la gestión y el aprovechamiento coordinado de los recursos hídricos, la tierra y los recursos naturales relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales. Colombia cuenta con una amplia legislación acorde a las tendencias mundiales, el Gobierno Nacional, a través de la Ministra de Relaciones Exteriores, el Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible y el Ministro de Vivienda, Ciudad y Territorio radicó ante el Congreso el proyecto de ley que aprueba el protocolo relativo a la contaminación procedente de fuentes y actividades terrestres y que busca mantener la calidad de las aguas para la salud de los ecosistemas y la biodiversidad marina, así como para el desarrollo de las actividades productivas y económicas, principalmente de las poblaciones costeras. Se debe tener en cuenta que la Gestión Integral del Recurso Hídrico proporciona estrategias que definen el rumbo hacia donde deben apuntar las acciones que desarrollen cada una de las instituciones y de los usuarios que intervienen en la gestión integral del recurso hídrico, estableciendo la base técnica que la soporta y en donde se refleja en detalle el estado actual del recurso en el país (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018).

De las tres teorías se deduce que el agua es de vital importancia para la vida y existencia en la tierra, además de aclarar que, en la actualidad debido a la evolución que ha vivido el país y las actividades desarrolladas por el hombre tales como la agricultura y la industrialización se han generado conflictos de este recurso y esto ha conllevado a su vez a causar efectos adversos a la calidad del mismo que afectan de forma negativa la calidad de

vida de la población, fauna y flora de la zona debido principalmente a los vertimientos resultantes de los procesos agrícolas e industriales. Pues a pesar de contar con una amplia gama de legislación referente a la calidad del agua se presentan casos en los cuales no se realiza ningún tipo de tratamiento previo a los vertidos de aguas residuales agrícolas que se producen. Razón por la cual es importante llevar a cabo procesos de tratamiento a este tipo de aguas mediante un sistema de tratamiento que sea eficaz, fácil de usar y de alcance económico en este caso para los cafeteros del sector de Planadas-Tolima.

**Figura 1.** Identificación de las teorías del proyecto.



*Fuente:* Autores, 2018.

#### 10.4. Marco normativo

Para lograr un equilibrio entre el componente social, económico y ambiental de cualquier proyecto, es necesario tener en cuenta la normativa legal vigente, con el fin de conocer, por ejemplo, en el tema de calidad del agua, los límites máximos permisibles de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos para proponer medidas que puedan ser evaluadas y así evidenciar la efectividad de las medidas de mejora propuestas. En la siguiente tabla, se encuentra recopilada la normativa colombiana que rige los vertimientos puntuales que se presentan actualmente por actividades agrícolas, domésticas e industriales, en donde se encuentra involucrado el sector productivo cafetero, debido a los vertimientos de aguas mieles generadas en el beneficio húmedo del café.

**Tabla 1.** *Normatividad colombiana legal vigente.*

Norma	Artículos involucrados	Establece
Decreto Ley 2811 de 1974	Art. 1, 2, 7,8, 139,191.	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.
Decreto 1594 de 1984	Capítulo III. Art. 29,32.	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.
Resolución 1207 de 2014	Art. 6.	Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas.
Decreto 1076 del 2015		Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.
Resolución 631 del 2015	Capítulo VI. Art 9. Agroindustria.	Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.
Decreto 050 del 2018	Art. 6, 8, 9.	Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 1076 de 2015, Decreto Único

Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible en relación con los Consejos Ambientales Regionales de la Macro cuentas (CARMAC), el Ordenamiento del Recurso Hídrico y Vertimientos y se dictan otras disposiciones.

---

**Fuente:** Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, (2017).

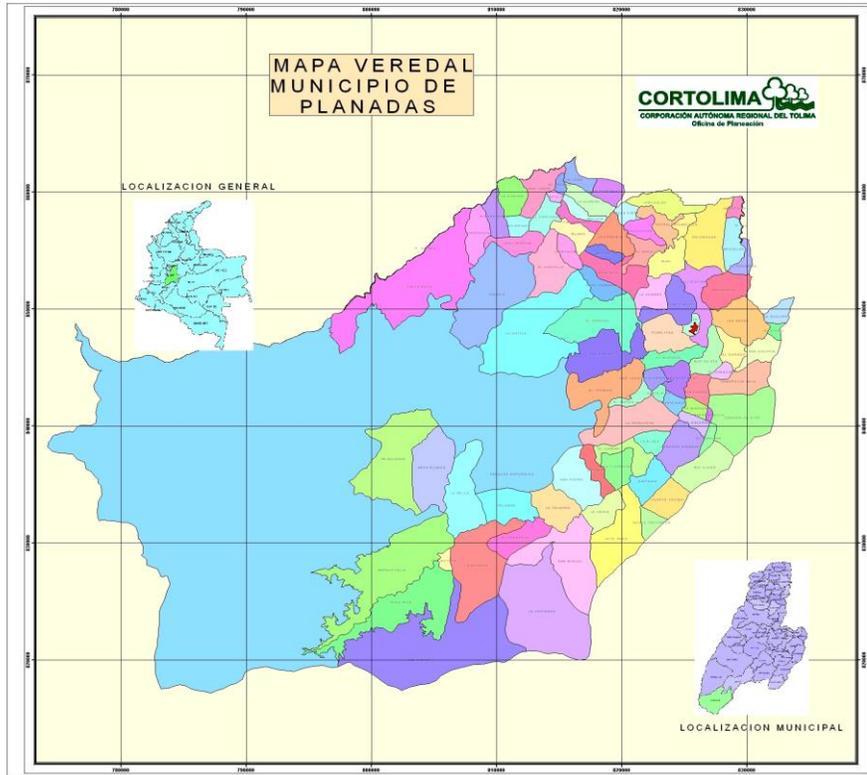
### *10.5. Marco geográfico*

El municipio de Planadas se encuentra ubicado al Sur Occidente del país y al Sur Oriente del departamento del Tolima, en las estribaciones de la cordillera central de los Andes Colombianos. La cabecera municipal está localizada aproximadamente a los 03°11'41" de latitud norte y 75°38'41" de longitud oeste, a una altura sobre el nivel del mar de 1.2.24 m.s.n.m. con una temperatura promedio de 20°C y a una distancia de la capital departamental (Ibagué) de 231 km por vía terrestre (Alcaldía Municipal de Planadas Tolima, 2000).

El municipio cuenta con un área de 1646 Km<sup>2</sup>, de los cuales solo el 0,04% pertenece al área urbana y el 99,96% al sector rural. Limita al Norte con Roblando y Ataco- Tolima, al Este con Neiva y Santa María- Huila, al Sur con Teruel- Huila y Páez (Belalcázar) (Cauca) y al Oeste con Toribío y Corinto (Cauca). Cuenta con los corregimientos de Bilbao y Gaitania, además de 5 caseríos (Gobernación del Tolima, 2014). La topografía del terreno es montañosa en su mayor parte y corresponde a la Cordillera Central, en donde se destacan las serranías de Iquira y Atá, la cuchilla de San Pablo, los altos del Trigo y Castel, y los cerros de Órganos y Planada. Recorren el territorio los ríos Atá, Claro, Saldaña, San Miguel y Séquila. Sus tierras se encuentran en el clima templado, la humedad relativa promedio anual es de 88% y la temperatura promedio anual es de 22,2°C, siendo agosto el mes de mayor temperatura y noviembre el de menor (IGAC, 2016).

La precipitación media anual es de 2.039 mm, está asociada a la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y se distribuye en un régimen bimodal que se extiende entre los meses de enero a mayo y octubre a diciembre, siendo octubre y noviembre los meses más lluviosos (IGAC, 2016). En su jurisdicción se encuentra el Parque Nacional Natural Nevado del Huila, que se encuentra situado en el extremo sur oeste en el límite de los departamentos Cauca y Huila. (Alcaldía Municipal de Planadas Tolima, 2000).

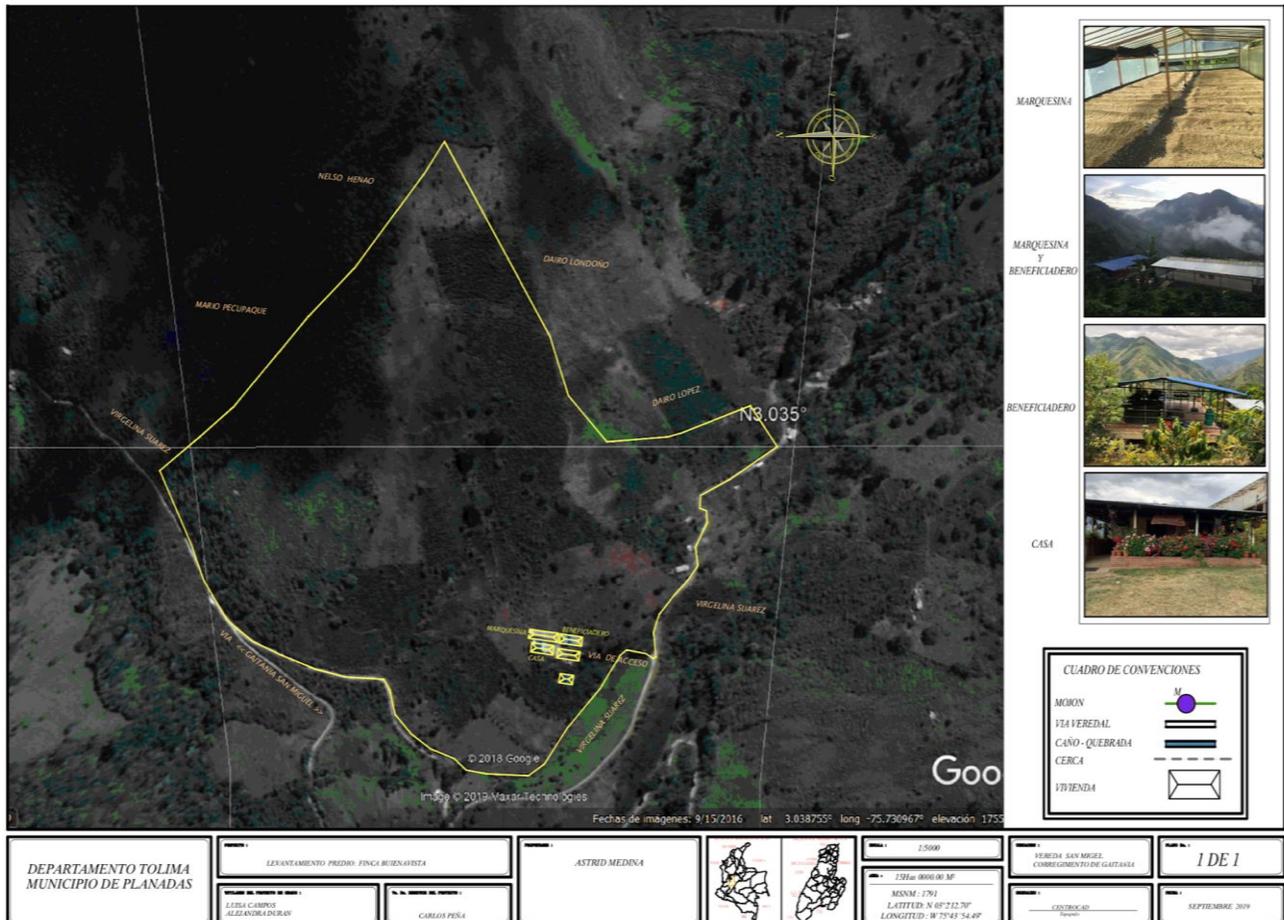
**Imagen 1.** Localización geográfica del municipio de Planadas, Tolima.



**Fuente:** Alcaldía Municipal de Planadas Tolima, 2000.

En el municipio de Planadas, se encuentra el corregimiento de Gaitania y en él, la vereda San Miguel, en la cual se localiza la finca de estudio, Buena Vista. La cual cuenta con una extensión de 15 hectáreas de las cuales 13,5 están destinadas para el cultivo del café, en donde se encuentran variedades tales como: castillo, caturra, típica, Colombia y actualmente realizan en la parte alta de la finca siembras de variedades como geisha y bourbon rosado. En la siguiente imagen, se muestra la división por lotes de café que existen en el sitio de estudio, los límites y la ubicación.

**Imagen 2. Localización del sitio de estudio.**



**Fuente:** CENTROCAD & Autores, 2019.

10.6. Marco institucional

Para el presente proyecto se tuvieron en cuenta diferentes actores que participan directamente en la ejecución del mismo y desde diferentes oficinas de cada uno de estos entes se lograría financiar y dar a conocer la importancia de la implementación de un sistema de tratamiento que logre disminuir la carga contaminante de las aguas mieles generadas en el beneficio húmedo del café. Existen otras instituciones que debido a su relación directa con el sector cafetero como lo es la Federación Nacional de Cafeteros, pueden replicar la información de que los cafeteros cumplan con la normativa legal vigente en pro de buscar un equilibrio ecológico, económico y social.

**Figura 2.** Organigrama de la oficina involucrada del Ministerio del Medio ambiente y Desarrollo Sostenible.



**Fuente:** Autores, 2019.

**Figura 3.** Organigrama de la oficina involucrada de la Corporación Autónoma Regional.



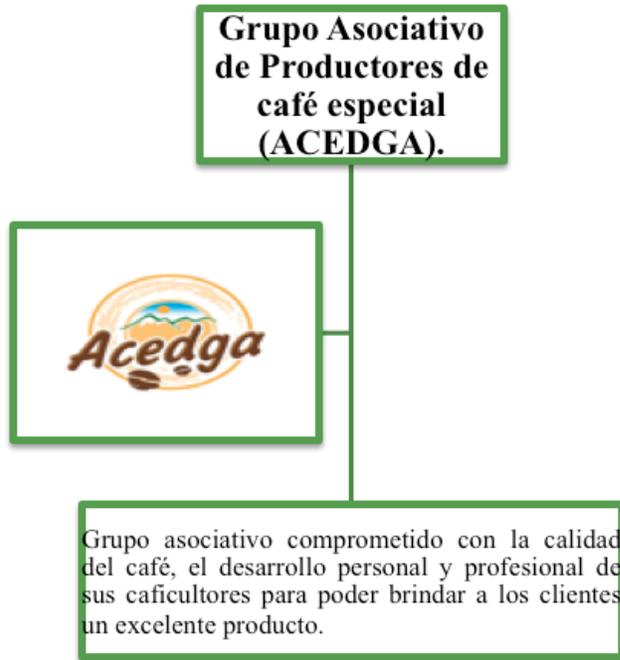
*Fuente:* Autores, 2018.

**Figura 4.** Organigrama de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia.



*Fuente:* Autores, 2018.

**Figura 5.** Organigrama del Grupo Asociativo de Productores de café especial (ACEDGA).



*Fuente:* Autores, 2018.

## 11 Metodología

### 11.1. Enfoque

La metodología de investigación de este proyecto, presenta un **enfoque metodológico mixto**, pues presenta componentes cuantitativos y cualitativos. El enfoque cualitativo de acuerdo a (Monje, 2011), se plantea, por un lado, que observadores competentes y cualificados pueden informar con objetividad, claridad y precisión acerca de sus propias observaciones del mundo social, así como de las experiencias de los demás. A partir de lo anterior, la investigación presenta un **enfoque cualitativo**, pues se hace énfasis en charlas directas con los propietarios y administradores de la finca, para conocer la línea base del proceso productivo del café propuesto en el objetivo 1 y así identificar los consumos de agua, energía para poder establecer los balances de materia y energía, mediante visitas de campo para analizar de cerca la realidad. Por otra parte, se realiza una revisión bibliográfica, a partir de la identificación de la problemática que se ha venido presentando a lo largo del tiempo en las fincas productoras de café del municipio de Planadas, Tolima; en consecuencia a esta problemática, han surgido determinados estudios los cuales son tomados como fuente de revisión bibliográfica con el objetivo de indagar acerca de los posibles avances que se han realizado en el tema, en este caso sería un estado de arte del mucílago.

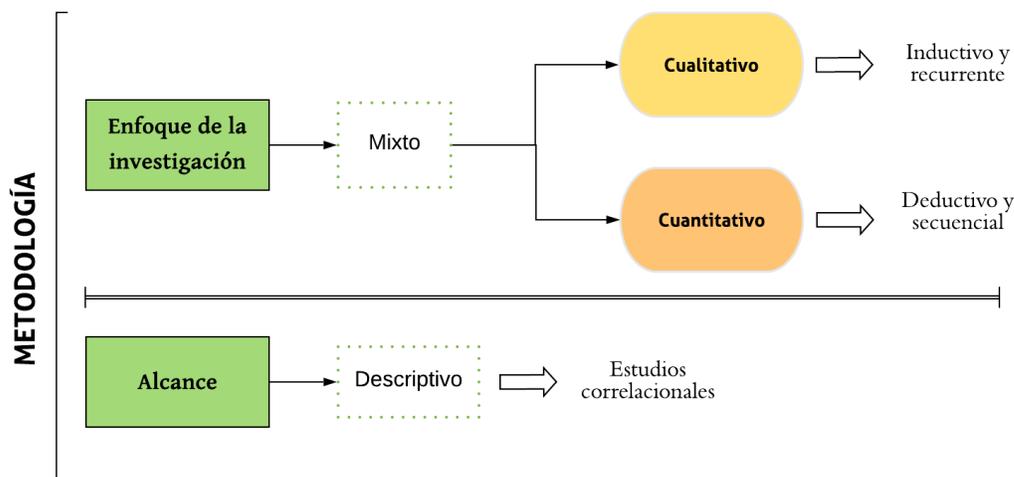
También presenta un **enfoque cuantitativo**, debido a que en el objetivo 1 se establece el reconocimiento de la línea base para calcular los consumos de agua en época de cosecha, medidas de los tanques de almacenamiento y tuberías con el fin de obtener los datos concretos de los caudales en cada una de las etapas del proceso de beneficio húmedo del café; Además, se realizó la toma de muestras de agua, análisis en laboratorio y comparación con la literatura y normativa legal vigente, estableciendo diagramas de barras para poder tener una mejor interpretación de la información. Por último, para el dimensionamiento del sistema de tratamiento que mejor se adecue a los resultados obtenidos por el laboratorio que ratifican los parámetros críticos a tratar, se tendrán en cuenta las medidas como el área, longitud, tiempo de retención, entre otras.

### 11.2. Alcance

En cuanto al alcance, la investigación presentará un alcance descriptivo con aspectos de tipos de estudios correlacionales, donde según Hernández *et al*, (1997): “*La investigación correlacional se distingue de la descriptiva, porque la investigación descriptiva se centra en medir con precisión las variables individuales y los estudios correlacionales evalúan el grado de relación entre dos variables*” lo que permitirá centrar el estudio hacia la generación de las aguas mieles o mucílago junto con la realización de la respectiva caracterización del agua miel (parámetros fisicoquímicos) y el análisis de la misma por medio de un laboratorio acreditado bajo las normas **ISO 9001: 2008, SC 6996-2 y GP1000:2009, GP 168-2 y por el IDEAM** como lo es **LASEREX** (Laboratorios de Servicios de Extensión en Análisis Químico) y el laboratorio **CORCUENCAS** ubicados en la ciudad de Ibagué, Tolima. Además, se llevaron a cabo visitas de campo con el fin de identificar la línea base del proceso de beneficio húmedo del café, es decir, reconocer los consumos de agua, energía, mano de obra, materias primas a fin de establecer balances de materia y energía con el fin de conocer

y entender todo el sistema, para así lograr que el sistema de tratamiento que se diseñe se adecue a los requerimientos de la finca y las necesidades actuales.

**Figura 6.** Descripción del enfoque y alcance de la investigación.



**Fuente:** Autores, 2019.

### 11.3. Metodología del estudio

Para dar cumplimiento a los objetivos específicos propuestos, la metodología se divide a continuación en la descripción para cada objetivo específico de los procedimientos que se tuvieron en cuenta para su cumplimiento:

*Objetivo 1: Determinar la línea base del proceso productivo del café.*

Con el fin de dar cumplimiento al objetivo 1, se realizó la salida de campo hacia Gaitania corregimiento de Planadas Tolima, una vez allí, se procedió a ejecutar una charla con los propietarios de la finca Buena vista a fin de poder conocer a gran rasgo el procedimiento del beneficio húmedo del café, esta entrevista proporcionó la información suficiente acerca de cada una de las etapas del beneficio del café permitiendo identificar mediante el funcionamiento de la maquinaria cuál es el consumo energético e hídrico en el proceso productivo. Así como también, visualizar y analizar el punto de captación del agua suministrada al proceso y el punto de vertimiento de las aguas mieles (mucílago) que se generan en la etapa de fermentación; junto con las mediciones de los tanques y mediciones de caudal mediante el método volumétrico y consumo de energía. Una vez se obtuvo dicha información, se dio paso a llevar a cabo los respectivos balances de masa y energía del proceso teniendo en cuenta el dimensionamiento de los tanques con los que cuenta la finca cafetera.

La toma del caudal, se realizó mediante medición volumétrica manual (Ver imagen 3), utilizando un cronómetro y un recipiente aforado de 10 L en los diferentes puntos de muestreo; los datos a tener en cuenta para el cálculo final son:

**Ecuación 1.** Método para hallar el caudal del agua

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

Donde:

Q = Caudal en L/S

V=Volumen en litros

t=Tiempo en segundos

La identificación de la línea base del proceso productivo es primordial para conocer las materias primas que ingresan al proceso de beneficio húmedo del café, identificar aquellas actividades críticas que más generan consumo de agua y vertimientos sin tratamiento alguno. Además, de esta forma se puede establecer que se requiere un estudio físico y químico de las aguas que, de acuerdo a los resultados obtenidos, está siendo consumida y vertida en altas cantidades.

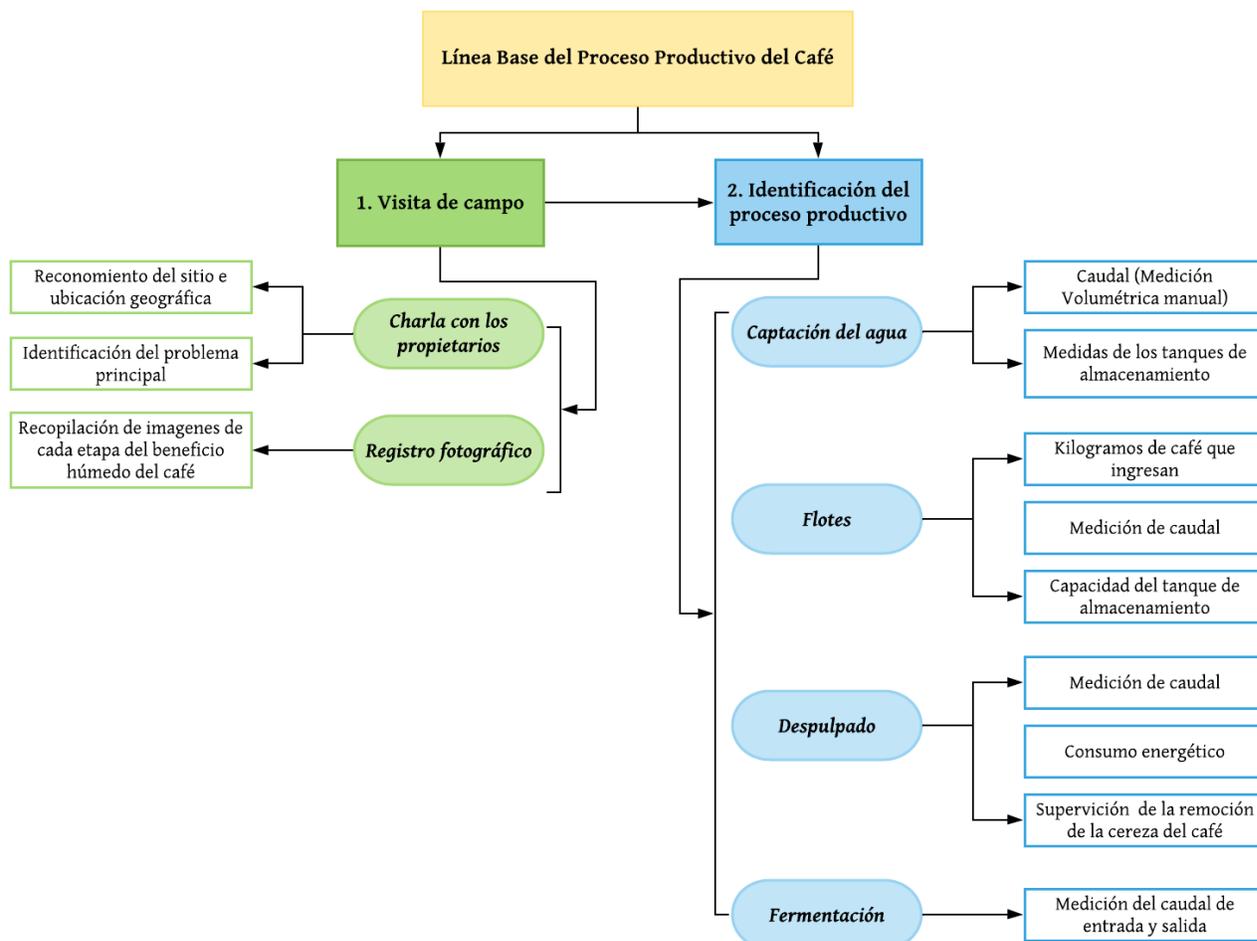
**Imagen 3.** Medición Volumétrica Manual del Caudal



**Fuente:** Autores, 2019.

En la figura 4. se recopila la información que fue tenida en cuenta para cada etapa del proceso de beneficio húmedo del café y las unidades manejadas fueron claves para poder establecer el consumo máximo de agua, energía y generación de vertimientos en cada una de las etapas respectivamente.

**Figura 7.** Información recopilada para conocer la línea base del proceso de beneficio húmedo del café.



**Fuente:** Autores, 2019.

*Objetivo 2: Caracterizar y analizar los parámetros fisicoquímicos del agua establecidos en la resolución 631 de 2015 para el beneficio del café con el fin de establecer los contaminantes críticos del agua miel (mucílago) y así seleccionar el sistema de tratamiento que mejor se adapte a las condiciones del agua, de la finca, de la población cafetera y del municipio de Planadas, Tolima.*

Para realizar la toma de muestras de agua, se realizó un seminario en la ciudad de Medellín llamado “Toma de muestras, custodia y mediciones en campo para cuerpos de agua superficial (Quebradas, ríos y lagos), vertimientos y agua potable” con el fin de conocer las metodologías que se deben tener en cuenta antes de ir a campo, es por esto que se tuvo en cuenta el *standard methods for the examination of water and wastewater, 23rd edition* y la guía de toma de muestra de aguas residuales establecida por el IDEAM. A partir de estos dos

documentos, se realizó una guía de toma de información en campo para recopilar los datos más importantes como se evidencia en el siguiente formato (Ver tabla 2).

**Tabla 2.** Formato de toma de muestras de agua.

Formato de toma de muestras			
Fecha		Hora de muestra	
Nombre		Dirección	
Color y olor del agua		Condiciones del sitio	
Observaciones significativas			

*Fuente:* Autores, 2019.

Para la recolección de las muestras de agua se realizó un muestreo simple, es decir, que representa una masa de agua en un instante determinado, tanto en el nacimiento del afluente que abastece los tanques que distribuyen el agua tanto para el consumo humano como para el beneficio húmedo del café, tal como se observa en la figura 8.

**Figura 8.** Proceso de recolección de las muestras de agua.



*Fuente:* Autores, 2019.

Las muestras de agua obtenidas fueron llevadas al laboratorio LASEREX, ubicado en la Universidad Del Tolima y al Laboratorio de CORCUENCAS para ratificar los resultados de

dos parámetros críticos (DQO y DBO<sub>5</sub>), en Ibagué en menos de 24 horas con hielo a una temperatura que no superó los 6°C, con el fin de que las propiedades no fueran modificadas puesto que no se aplicaron preservantes. Después de esto, se esperaron 15 días hábiles para obtener los resultados de las muestras. Es importante resaltar que las muestras fueron rotuladas para tener diferenciación de la muestra de agua del efluente de agua natural y del agua residual, para esto se diseñó el siguiente sistema de rótulo que fue ubicado en las botellas de plástico en cada una de las muestras (Ver tabla 3).

**Tabla 3.** *Rótulo diseñado para la diferenciación de cada tipo de muestra de agua,*

Muestra de agua para análisis					
Número de muestra		Fecha		Hora	
Lugar		Dirección		Técnica de preservación realizada	
Análisis requerido					

*Fuente:* Autores, 2019.

Se llevó a cabo la caracterización física y química del agua miel (mucílago) y afluente natural, pues aunque ya existen estudios que establecen los niveles de DQO, DBO<sub>5</sub>, SS, pH y SST de estas aguas, se considera importante realizarlo debido a que las variedades de café son diferentes. Razón por la cual se establece en este objetivo la evaluación de los parámetros anteriormente mencionados. De este modo para dar cumplimiento a este objetivo, se realizaron dos visitas de campo a la finca Buena Vista, ubicada en la Vereda San Miguel del Corregimiento de Gaitania perteneciente al municipio de Planadas, Tolima.

No obstante, es de aclarar que es posible que no haya estudios que brinden todos los valores de los parámetros de calidad del agua, o de ser así no se recomienda tomarlos pues estos cambian dependiendo el proceso que realicen en el sector productivo y la variedad de café con la que estén trabajando. Es por esto que, los parámetros que no se tengan en cuenta de los estudios ya realizados deben ser medidos en laboratorios certificados y acreditados por el IDEAM. Todos estos parámetros, deben estar acordes a la resolución 631 del año 2015 que establece los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Además de que, para realizar la toma de muestras, se debe tener en cuenta la Norma Técnica Colombiana (NTC) ISO 5667 (Ojeda, 2015), la cual se divide en los siguientes ítems:

**NTC-ISO 5667- 1: Directrices para el diseño de programas de muestreo.**

**NTC-ISO 5667- 2: Técnicas generales de muestreo.**

**NTC-ISO 5667- 3: 3 Preservación y manejo de muestras.**

Para la toma de las muestras, es importante tener en cuenta los diferentes tipos de muestras que existen: instantáneas, discretas, periódicas, continuas, en serie y compuestas; por otra parte, pueden ser realizados de manera manual o automática y la selección de uno u otro dependerá de las condiciones a las que se enfrenten en el sitio de muestreo (ICONTEC, 2003). Para este proyecto, se realizó el muestreo manual porque es apto para sitios de fácil acceso. El equipo más sencillo para tomar las muestras en la superficie, es un balde o botella de boca ancha introducido en el cuerpo de agua que debe ser retirado después de lleno y debe ser de material compatible para que esto no influya en los análisis y resultados (Ojeda, 2015).

**Tabla 4.** *Características Físicas de las muestras de agua.*

Parámetro a estudiar	Tipo de recipiente	Técnica de Preservación	Volumen de muestra (mL)	Tiempo máximo de Preservación	Comentarios
Color aparente	Plástico o vidrio	Refrigerar 2-5°C	500	48 horas	Muestra simple o compuesta
Conductividad	Plástico o vidrio	Refrigerar 2-5°C	500	28 días	Muestra simple o compuesta
Olor	Vidrio		500	6 horas	Muestra simple. Analizar tan pronto como sea posible
pH	Plástico o vidrio		50	15 minutos	Muestra simple. Analizar inmediatamente
Temperatura	Plástico o vidrio	Ninguna	100	15 minutos	Muestra simple. Analizar inmediatamente
Turbiedad	Plástico o vidrio	Refrigerar 2-5°C	100	24 horas	Muestra simple o compuesta. Analizar el mismo día o almacenar en oscuridad hasta 1 día.

**Fuente:** (Autores, 2018), (Ojeda, 2015) & (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), 2003).

Las pruebas realizadas por el laboratorio LASEREX certificado bajo las normas ISO 9001: 2008, SC 6996-2 y GP1000:2009, GP 168-2, fueron las correspondientes a pH, DQO, DBO<sub>5</sub>, Conductividad eléctrica, Sólidos Suspendidos Totales y Sólidos Sedimentables; puesto que se tuvieron en cuenta solo estos a partir de la **Resolución 0631 de 2015** en su **Capítulo VI - Artículo 9**; y las pruebas realizadas por el laboratorio de CORCUENCAS corresponden a DQO y DBO<sub>5</sub>.

**Imagen 4.** Valores límites permisibles para vertimientos generados en procesos de beneficio tradicional del cultivo de café.

PARÁMETRO	UNIDADES	PROCESAMIENTO DE HORTALIZAS, FRUTAS, LEGUMBRES, RAÍCES Y TUBÉRCULOS	BENEFICIO DE CAFE (CLASIFICACIÓN DE LA FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS - FNC/ CENICAFÉ).	
			PROCESO O ECOLÓGICO	PROCESO TRADICIONAL
<b>Generales</b>				
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00	5,00 a 9,00	5,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O <sub>2</sub>	150,00	3.000,00	650,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>2</sub> )	mg/L O <sub>2</sub>	50,00		400,00
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	100,00	800,00	400,00
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	5,00	10,00	10,00
Grasas y Aceites	mg/L	10,00	30,00	10,00
<b>Compuestos de Fósforo</b>				
Fósforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
<b>Compuestos de Nitrógeno</b>				
Nitrógeno Total (N)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
<b>Otros parámetros para análisis y reporte</b>				
Color Real (Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm y 620 nm).	m <sup>-1</sup>	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte

**Fuente:** Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015.

*Objetivo específico 3: Establecer el dimensionamiento del sistema de tratamiento óptimo para el cumplimiento de la Resolución 631 de 2015.*

Para el cumplimiento de éste, se tuvo en cuenta el resultado de los dos objetivos anteriores con el propósito de tener claridad acerca del caudal del agua miel generada en el beneficio húmedo del café y los parámetros físico químicos que se encuentran por encima del límite permisible de la resolución 631:2015 a fin de que el sistema de tratamiento logre satisfacer la remoción de la carga contaminante.

Por otra parte, se realizó una revisión bibliográfica con el objeto de identificar los diferentes sistemas de tratamiento que han sido implementados en Colombia para el tratamiento del agua miel y de esta forma, establecer una tabla comparativa que permitiera elegir el sistema de tratamiento primario con más eficiencia en cuanto a remoción de

contaminantes (DBO<sub>5</sub>, DQO, Coliformes, huevos de Helminto), menor tiempo de retención hidráulica, control de generación de olores, menores costos, entre otros. Lo anterior se puede observar en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Modelo de identificación de los diferentes sistemas de tratamiento.

Condición Ambiental	SMTA	Biodigestor Tipo Taiwanés	Biofiltro	Electrocoagulación (Con electrodos Fe/Al)	UAF	Humedal artificial de flujo subsUPERficial (HFSS)	Sedimentador y Lecho filtrante
	Anaeróbico	Anaeróbico	Anaeróbico	Electroquímico	Anaeróbico	-	Anaeróbico
Adecuado para aguas residuales crudas							
Adecuado para aguas residuales asentadas							
Temperaturas adecuadas							
Eficiencia de eliminación de DBO							
Eficacia de eliminación de nutrientes (N,P)							
Remoción de coliformes							
Eficiencia de remoción de sólidos suspendidos							
Remoción de huevos de Helminto (Parásitos por contaminación fecal )							
Tiempo de retención hidráulica (TRH)							
Molestias de olor							
Demanda energética y producción de gas							
Requisito de tierra							
Requiere operador calificado							
Costos de inversión							

**Fuente:** Autores, 2019.

La anterior tabla, fue calificada de la siguiente forma: excelente (++) , positivo (+), negativo (-), teniendo en cuenta tesis y artículos científicos para encontrar la información solicitada. Al final, el sistema que mayor calificación excelente obtuvo, fue el elegido para empezar a diseñar el mismo de acuerdo a los requerimientos de la finca. De tal forma, para el presente proyecto se seleccionó el SMTA (Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio) que ha sido desarrollado por la Federación Nacional de Cafeteros, Rendón Raúl (2014), Zambrano Diego, Isaza Juan, Rodríguez Nelson & López Uriel (1999) y Cenicafe a lo largo de los años.

El sistema modular de tratamiento anaerobio (SMTA), cuenta con las siguientes unidades: Una trampa de pulpas, una etapa hidrolítica/acidogénica, una recámara dosificadora y una etapa metanogénica. Adicionalmente, cuenta con una excavación en tierra, la cual se llena con tallos de café, a fin de disponer algún eventual excedente de aguas mieles generado. Para

su posterior diseño, se tuvo en cuenta la siguiente información: la producción anual en @ de café pergamino seco (cps) y el porcentaje de producción en la semana pico en relación a la cosecha anual (%) (Zambrano, *et al*, 2010). Estos datos fueron necesarios para llevar a cabo los respectivos cálculos del volumen de los tanques en cada una de las etapas del proceso de tratamiento, así:

En este caso, de acuerdo a Zambrano, Rodríguez, López & Zambrano, (2010): para fincas con producciones diarias de café superiores a 1.710 kg de café cereza (c.c.) se debe calcular el volumen de la siguiente manera:

Para calcular el volumen necesario de los reactores hidrolíticos, se implementa la siguiente ecuación:

**Ecuación 2.** *Volumen del reactor hidrolítico/acidogénico.*

$$V_{RHA} = 0,000405 * S_p * P_a$$

Donde:

**$V_{RHA}$**  : Volumen total de la fase hidrolítica/acidogénica, en m<sup>3</sup>.

**$S_p$** : Porcentaje de café cereza beneficiado en la semana pico respecto a la cosecha anual (%).

**$P_a$** : Producción anual de café pergamino seco (c.p.s.), en arrobas (@) de c.p.s.

**0,000405**: Una constante.

**NOTA:** El volumen obtenido mediante la aplicación de la fórmula, se puede dividir por dos (2) para calcular el número de tanques de 2m<sup>3</sup> que se requieren, o por cinco (5) si se desean utilizar tanques de 5m<sup>3</sup> en nuestro caso se dividirá por dos (2) a fin de conocer la cantidad necesaria de tanques de 2m<sup>3</sup> (Zambrano, *et al*, 2010).

Ahora bien, para calcular el volumen de los reactores metanogénicos, se utiliza la siguiente fórmula:

**Ecuación 3.** *Volumen del reactor metanogénico.*

$$V_{RM} = 0,000338 * S_p * P_a$$

Donde:

**$V_{RM}$**  : Volumen total de la fase metanogénica, en m<sup>3</sup>.

**$S_p$** : Porcentaje de café cereza beneficiado en la semana pico respecto a la cosecha anual (%).

**$P_a$** : Producción anual de café pergamino seco (cps.), en arrobas (@) de cps.

**0,000338**: Una constante.

**NOTA:** El volumen obtenido puede ser dividido por 2 para calcular el número de tanques de  $2\text{m}^3$  que se necesitan, en este caso este es el máximo tamaño de los tanques recomendados para esta fase (Zambrano, *et al*, 2010).

En cuanto a la recámara dosificadora, se emplean tanques de polietileno de 250 L de capacidad y 65 cm de altura. Para calcular el número de tanques a utilizar, se debe tener presente que una recámara dosificadora permite alimentar hasta cinco (5) reactores metanogénicos. Por otra parte, la excavación en tierra es de 1 m x 1 m x 1 m, ésta es rellena con tallos de café provenientes del zoqueo del café (para manejar sobrecargas hidráulicas o taponamientos en el sistema). Respecto a la trampa de pulpas, esta se fabrica en polietileno de 250 L (Zambrano, *et al*, 2010).

**NOTA:** Debido a que la finca Buena Vista cuenta con una topografía muy pendiente las excavaciones para los tanques se deben hacer con las paredes inclinadas y las unidades deben instalarse en zigzag, a fin de disminuir el riesgo de derrumbamiento (Zambrano, *et al*, 2010).

Con el fin de fortalecer el SMTA y cumplir aún mejor con los niveles de calidad de agua establecidos en la Resolución 631:2015 se estableció un sistema de tratamiento secundario que cumpliera con los requisitos necesarios tales como: alta eficiencia de remoción de contaminantes y además, que fuera factible de implementar en la finca Buena Vista, en este caso el sistema seleccionado de acuerdo a lo anterior corresponde al diseño de un humedal artificial de flujo subsuperficial (SFS, subsurface flow wetlands) el cual es diseñado específicamente para la fase final de tratamiento de algún tipo de agua residual puesto que ha tenido a lo largo del tiempo buenos resultados de remoción de cargas contaminantes y está construido típicamente en forma de un lecho o canal que contiene un medio apropiado. Como medio se utiliza grava, arena u otro tipo de materiales del suelo. El medio se planta con la vegetación emergente, en este caso, el nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie del medio (Crites y Tchobanoglous, 2000).

Para el diseño del mismo, se tuvo en cuenta el método utilizado por Metcalf & Eddy, (1995) y el propuesto por otros autores como Crites y Tchobanoglous, (2000). Además, se observan algunas características del medio en humedales SFS según Reed, Crites & Middlebrooks, (1995). Para los humedales de flujo subsuperficial se involucran los aspectos relacionados con el manejo de la vegetación, la vida silvestre y el monitoreo (Crites & Tchobanoglous, 2000). En la tabla 6 se indican los intervalos de valores recomendados para los parámetros de diseño del humedal artificial propuestos por Metcalf & Eddy, (1995):

**Tabla 6.** Valores indicativos para el diseño de humedales.

Parámetro de diseño	Unidades	Flujo subsuperficial (SFS)
Tiempo de retención hidráulica	d	4 - 15
Profundidad del agua	m	0,3 - 0,75
Carga de DBO <sub>5</sub>	kg/ha - d	<67
Carga hidráulica	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> - d	0,014 - 0,046
Superficie específica	ha / (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /d)	7,1 - 2,15

*Fuente:* Metcalf & Eddy. (1995).

En la tabla 7, se encuentran los parámetros de diseño propuestos por Crites y Tchobanoglous, (2000).

**Tabla 7.** Valores recomendados para los parámetros de diseño de humedales.

Parámetro de diseño	Unidades	Tipo de humedal	
		Flujo libre (FWS)	Flujo Subsuperficial (SFS)
Tiempo de detención hidráulica.	d	2 – 5 DBO 7 – 14 N	3 – 4 DBO 6 – 10 N
Velocidad de carga de DBO	kg/ha - d.	< 110	< 110
Velocidad de carga de SST	kg/m <sup>2</sup> - d		0,04
Profundidad del agua.	m	0,06 – 0,45	0,3 – 0,61
Profundidad del medio	m		0,46 – 0,76
Tamaño mínimo	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> - d	5,3 – 10,7	
Relación L:W		2:1 a 4:1	
Control de mosquitos.		Requerido	No se requiere
Intervalo de cosecha.	Año	3-5/año	No se requiere
Calidad esperada del efluente.			
DBO <sub>5</sub>	mg/L	< 20	< 20
SST	mg/L	< 20	< 20
NTK	mg/L	< 10	< 10
PT	mg/L	< 5	< 5

*Fuente:* (Crites & Tchobanoglous, 2000)

En la tabla 8, se observan las principales características del medio en humedales SFS, según Reed, Crites & Middlebrooks (1995):

**Tabla 8.** Características típicas del medio en humedales de flujo subsuperficial.

Tipo de medio	Tamaño efectivo $D_{10}^*$ (mm)	Porosidad, n (%)	Conductividad hidráulica, $K_s$ ( $m^3/m^2/d$ )
Arena gruesa	2	28 a 32	100 a 1000
Arena con grava	8	30 a 35	500 a 5000
Grava fina	16	35 a 38	1000 a 10000
Grava mediana	32	36 a 40	10000 a 50000
Roca triturada	128	38 a 45	50000 a 250000

*Fuente:* (Reed, Crites & Middlebrooks. 1995).

Los datos anteriores fueron necesarios para poder llevar a cabo los cálculos de los siguientes parámetros de diseño del humedal:

### Tiempo de detención hidráulica

Ahora bien, para la determinación del tiempo de detención en humedales de flujo subsuperficial, SFS, diseñados para la eliminación de DBO, se emplea el siguiente modelo de eliminación de primer orden:

#### Ecuación 4. Tiempo de detención hidráulica.

$$\frac{C_e}{C_o} = \exp[-K_T * t']$$

Donde:

$C_e$  = Concentración de DBO<sub>5</sub> del efluente, mg/L.

$C_o$  = Concentración de DBO<sub>5</sub> del afluente, mg/L.

$K_T$  = Constante de velocidad de primer orden dependiente de la temperatura,  $d^{-1}$ .

$t'$  = Tiempo de detención real, en días.

Para los coeficientes que intervienen en la ecuación se han estimado los valores que se indican a continuación:

$K_T = K_{20} (1,06)^{(T-20)}$ , T en °C (Reed, Crites & Middlebrooks., 1995).

$K_{20} = 0,678 d^{-1}$ , según Reed, Crites & Middlebrooks (1995). Según Metcalf & Eddy (1995), depende de la porosidad del medio, variando entre **1,84** para arena media y **0,86** para arena gravosa. U.S. EPA (1988), reporta un valor promedio de **1,28**.

El tiempo de retención hidráulica se puede expresar, en función del caudal de diseño y de la geometría del sistema, mediante la siguiente expresión:

**Ecuación 5.** *Tiempo de retención hidráulica.*

$$TRH = \left[ \frac{L * W * n * d}{Q} \right]$$

Donde:

**TRH** = Tiempo de detención en los huecos intersticiales, en días, para SFS.

**L** = Longitud del estanque, en metros.

**Q** = Caudal que circula a través del sistema en m<sup>3</sup> /d.

**W** = Ancho del estanque, en metros.

**d** = Profundidad del estanque, en metros.

**n** = Porosidad, o espacio utilizado por el agua para fluir a través del humedal. La porosidad es un porcentaje y se expresa en forma decimal.

La porosidad (**n**) varía entre **0,65** y **0,75**, según Reed, Crites & Middlebrooks (1995). Y Crites & Tchobanoglous (1998), para humedales con vegetación completa, desde densa hasta menos madura, respectivamente. Para humedales con vegetación menos densa, Kadlec & Knight (1996), reportan valores mayores, entre **0,95** y **1,0**. Mientras que, Gearheart (1999), reporta valores de porosidad de **0,75** para humedales con plantas no emergentes.

Para los SFS, el tiempo de detención real es función de la conductividad hidráulica del medio y de la longitud del depósito y se expresa:

**Ecuación 6.** *Tiempo de detención real.*

$$TRR = \left[ \frac{L}{K_s * S} \right]_i$$

Donde:

**TRR** = Tiempo de detención real, en días, para SFS.

**L** = Longitud del estanque, en metros.

**K<sub>s</sub>** = Conductividad hidráulica, en m /d.

**S** = Pendiente del depósito, en m/m (Fracción).

**Área Transversal (Ac):**

Se calcula mediante la ley de Darcy que describe el régimen de flujo en un medio poroso y es aceptada para ser utilizada en el diseño de los humedales con flujo subsuperficial que utilizan como medio en el lecho, suelo o grava. Dicha ecuación es la siguiente (Metcalf & Eddy, 1995):

**Ecuación 7. Área transversal.**

$$A_c = \left[ \frac{Q}{K_s * S} \right]$$

Donde:

$A_c$  = Área Transversal, en  $m^2$ .

$Q$  = Caudal medio en  $m^3 /d$ .

$K_s$  = Conductividad hidráulica, en  $m /d$ .

$S$  = Pendiente del depósito, en  $m/m$  (como fracción).

**NOTA:** Para los humedales SFS, la velocidad de flujo  $K_s * S$  se debe limitar a **6,8 m/d** para minimizar el arrastre localizado de películas biológicas (Metcalf & Eddy, 1995).

**Ancho del estanque (W):**

Para este cálculo se empleó la metodología utilizada por Metcalf & Eddy (1995):

**Ecuación 8. Ancho del estanque (W):**

$$W = \left( \frac{A_c}{d} \right)$$

Donde:

$W$  = Ancho del estanque, en metros.

$A_c$  = Área Transversal, en  $m^2$ .

$d$  = profundidad del estanque, en metros.

**Área Superficial necesaria ( $A_s$ ):**

En este caso, se implementó la ecuación utilizada por Metcalf & Eddy (1995):

**Ecuación 9. Área Superficial necesaria ( $A_s$ ):**

$$A_s = L * W = \left[ \frac{Q \ln \left( \frac{C_o}{C_e} \right)}{K_T * d * n} \right]$$

Donde:

$A_s$  = Área superficial necesaria,  $m^2$ .

$L$  = Longitud del estanque, en metros.

$W$  = Ancho del estanque, en metros.

$n$  = Porosidad.

$d$  = profundidad del estanque, en metros.

$C_e$  = Concentración de  $DBO_5$  del efluente,  $mg/L$ .

$C_o$  = Concentración de  $DBO_5$  del afluente,  $mg/L$ .

$K_T$  = Constante de velocidad de primer orden dependiente de la temperatura,  $d^{-1}$ .

$Q$  = Caudal medio en  $m^3 /d$ .

### Carga hidráulica ( $L_w$ ):

La carga hidráulica en las lagunas que utilizan macrófitas, se calcula mediante la expresión según U.S.EPA, (1999):

**Ecuación 10.** Carga hidráulica ( $L_w$ ):

$$L_w = \left[ \frac{Q}{L * W} \right]$$

Donde:

$L_w$  = Carga hidráulica,  $m^3 / m^2$  -día.

$Q$  = Caudal medio en  $m^3 / d$ .

$L$  = Longitud del estanque, en metros.

$W$  = Ancho del estanque, en metros.

### Carga orgánica ( $C_L$ ):

La carga orgánica en las lagunas que utilizan macrófitas, se calcula mediante la expresión, según U.S.EPA, (1999):

**Ecuación 11.** Carga orgánica ( $C_L$ ):

$$C_L = \left[ \frac{Q * C_o}{A_s} \right]$$

Donde:

$C_L$  = Carga orgánica, en  $kg DBO_5/ha$ -día.

$Q$  = Caudal medio en  $m^3 / d$ .

$C_o$  =  $DBO_5$  en el afluente en  $g/m^3$ .

$A_s$  = Área específica,  $m^2$ .

### Diseño hidráulico

Para el diseño hidráulico se emplea la metodología establecida para los *humedales de flujo subsuperficial* propuesta por Reed, Crites y Middlebrooks en 1995. A partir de la ley de Darcy, se establece la **ecuación 11**. En donde se obtiene el régimen de flujo en un medio poroso que es lo normalmente aceptado para el diseño de humedales de flujo subsuperficial.

**Ecuación 12.** Diseño hidráulico a partir de la ley de Darcy.

$$v = K_s * s \wedge v = \left[ \frac{Q}{W * y} \right] \Rightarrow Q = [K_s * A_c * s]$$

Donde:

$K_s$  = Conductividad hidráulica de una unidad de área del humedal perpendicular a la dirección del flujo,  $m^3 / m^2/d$

$Q$  = Caudal promedio a través del humedal,  $m^3 / d$ .

$A_c$  = Área de la sección transversal perpendicular al flujo,  $m^2$ .

$s$  = Gradiente hidráulico o pendiente de la superficie de la agua en el sistema  $m/m$ .

$v$  = Velocidad de Darcy (Velocidad aparente),  $m/d$ .

Para calcular el ancho mínimo de la celda del humedal de flujo subsuperficial que sea compatible con el gradiente hidráulico seleccionado para el diseño, se obtiene la **ecuación 12**.

**Ecuación 13.** *Ancho mínimo de la celda del humedal.*

$$s = \left[ \frac{m * y}{L} \right] \wedge L = \left[ \frac{A_s}{W} \right] \wedge A_c = [W * y]$$

**Donde:**

$W$  = Ancho de una celda del humedal,  $m$ .

$A_s$  = Área superficial del humedal,  $m^2$ .

$L$  = Longitud de la celda del humedal,  $m$ .

$m$  = Pendiente del fondo del lecho, % expresado como decimal.

$y$  = Profundidad del agua en el humedal,  $m$ .

Finalmente, se obtiene la **ecuación 13**. Que permite calcular el ancho mínimo de una celda compatible con el gradiente hidráulico seleccionado. El valor de ( $m$ ) típicamente se encuentra entre 5 y 20% de la pérdida de carga potencial.

**Ecuación 14.** *Ancho mínimo de la celda del humedal (Corregida).*

$$W = \frac{1}{y} \left[ \frac{Q * A_s}{m * K_s} \right]^{0,5}$$

**NOTA:** Al momento de hacer el diseño del humedal se debe tener en cuenta la pendiente del mismo, pues la superficie del filtro debe mantenerse plana para evitar erosión, además el fondo debe tener una pendiente de 1 a 2% de la entrada a la salida para lograr un buen drenaje, siendo preferible en este caso tener una pendiente del 1% (Rodríguez, 2017).

#### 11.4. Variables, aspectos e indicadores.

Teniendo en cuenta las técnicas de recolección y el análisis de información mencionada anteriormente para cada objetivo específico, es necesario determinar las variables e indicadores que son producto de estas. A continuación, se recopila en la tabla 9, las variables más relevantes establecidas a partir de las temáticas: ecológica, social y económica. Todo lo anterior, con el fin de establecer una relación con aquellas variables que pueden ser medibles a lo largo del proyecto.

**Tabla 9.** *Recopilación de variables, aspectos e indicadores.*

<b>Temática</b>	<b>Variable</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Indicador</b>
<b>Ecológica</b>	Caudal en cada uno de los procesos del beneficio húmedo del café	Cantidad de agua consumida	$\frac{Volumen (L)}{Tiempo (S)}$
	Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DB O_5$ )	Número de materia orgánica contenida en el agua	400 mg/L - Resolución 631 del 2015
	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica	650 mg/L $O_2$ - Resolución 631 del 2015
	pH	Medida de acidez o alcalinidad de una disolución	5.0-9.0 - Resolución 631 del 2015
	Sólidos Sedimentables (SSED)	Cantidad de partículas mayores de 0.01 mm	10 mL/L - Resolución 631 del 2015
	Sólidos Suspendedos Totales (SST)	Cantidad de partículas menores de 0.01 mm	400 mg/L - Resolución 631 del 2015
	Grasas y Aceites	Número de lípidos biológicos	10 mg/L - Resolución 631 del 2015
	Energía empleada para el proceso de beneficio húmedo	Consumo de energía consumida	$\frac{Kwh Inicial}{Kwh Final}$
<b>Social</b>	Participación en la socialización de la propuesta	Número de personas implicadas	$\frac{Empleados y administradores}{Total de trabajadores} \cdot 100$
<b>Económica</b>	Costos en la implementación del sistema de tratamiento	Inversión en el sistema de tratamiento a implementar	$\frac{Costo del sistema}{Ingresos anuales de la finca}$
	Pago por el vertimiento de aguas residuales	Ahorro económico	$\frac{Costo de multa por vertimiento}{Ingresos anuales de la finca}$

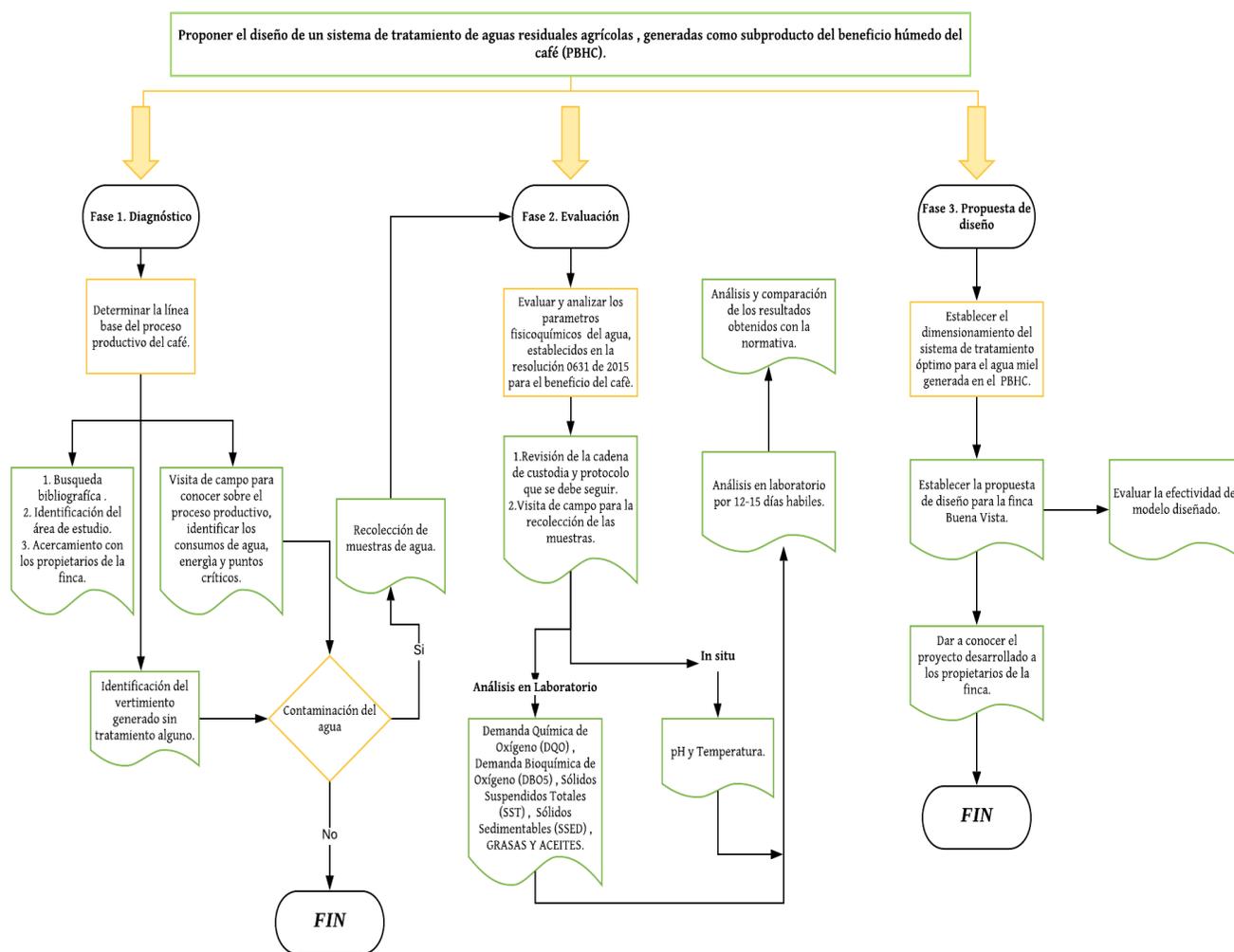
**Fuente:** Autores & Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015, 2019.

## 12 Plan de Trabajo

### 12.1. Esquematización de las diferentes etapas y fases del trabajo de investigación.

Con el fin de dar cumplimiento a los objetivos propuestos, la metodología se dividió en 3 fases teniendo en cuenta los 3 objetivos específicos planteados para lograr el desarrollo del objetivo general. A continuación, se presenta un diagrama que permite ver la forma en la que se desarrolló la presente investigación, así como la explicación específica de que es lo que incluye. Además, describe los procedimientos empleados para desarrollar la investigación, instrumentos y materiales utilizados:

Figura 9. Fase 1,2 y 3 del proyecto.

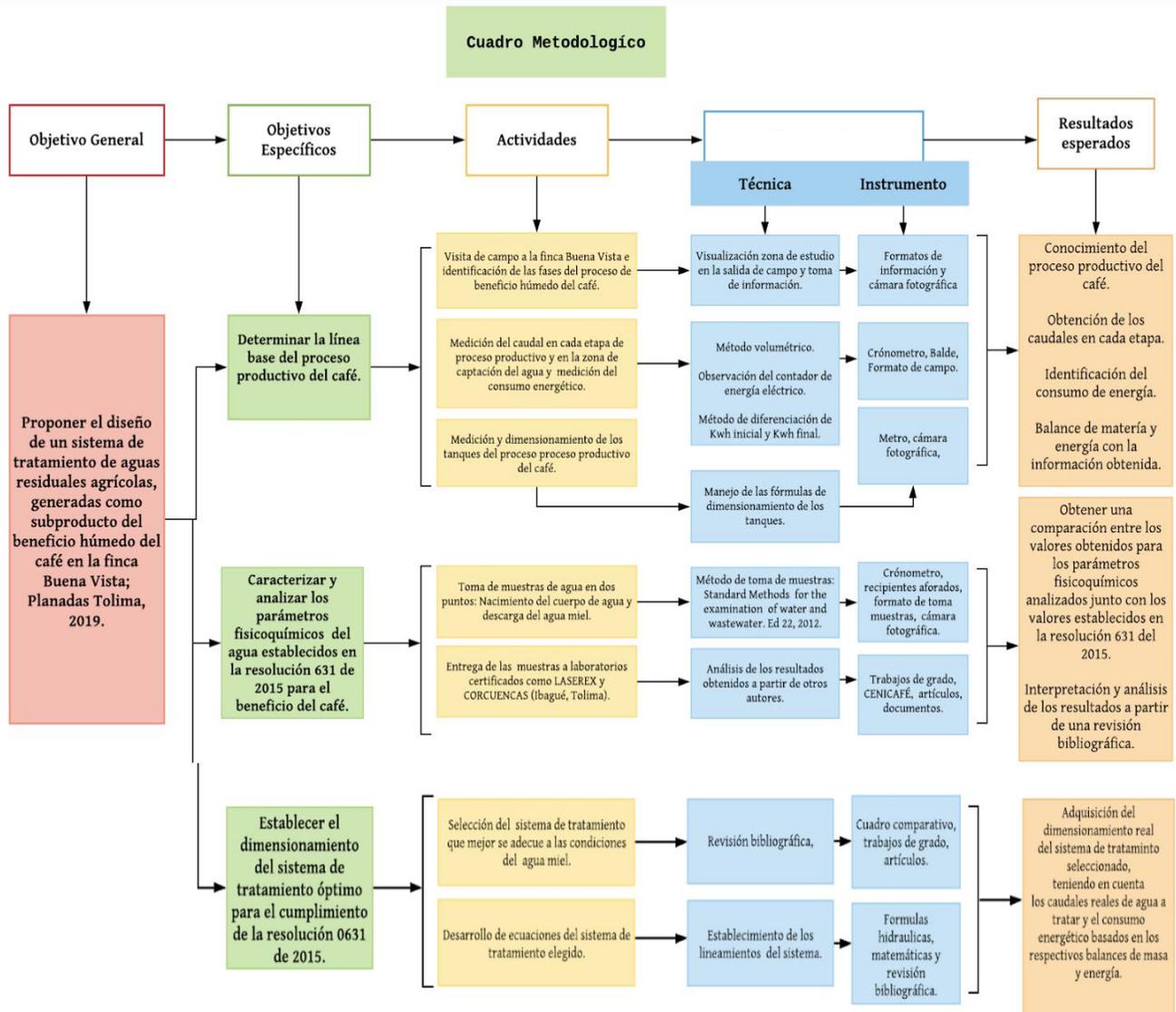


Fuente: Autores, 2018.

*12.2. Esquema metodológico que integra y articula objetivos, actividades, metodología y resultados esperados.*

A continuación, se presenta la matriz de los objetivos, actividades, técnicas e instrumentos que se desarrollan en el transcurso de la salida de campo y el proyecto junto con los resultados que se esperan obtener de los mismos al ser ejecutados.

**Figura 10. Matriz de los objetivos, actividades, técnicas e instrumentos.**



*Fuente:* Autores, 2019.

12.3. Presupuesto del diseño del Sistema de tratamiento primario y secundario.

A continuación, se observa el respectivo presupuesto de los dos sistemas de tratamiento a implementar en la finca Buena Vista, Planadas Tolima. En éste, se tuvo cuenta cada una de las actividades involucradas en su construcción, además, de los materiales, recurso humano, entre otros (Ver Tablas 10 y 11).

**Tabla 10.** Presupuesto del diseño del sistema de tratamiento primario.

SMTA				
Detalle	Unidad	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
<b>Reactor Hidrolítico Acidogénico</b>				
Tubería y Accesorios	Pulgada	N/A	\$400.650	\$400.650
Mano de obra	Jornal	2	\$27.604	\$55.208
Tanque de polietileno x 2	m <sup>3</sup>	3	\$457.191	\$1'371.573
<b>Recámara dosificadora</b>				
Materiales de construcción	N/A	N/A	\$120.000	\$120.000
Mano de obra	Jornal	3	\$27.604	\$82.812
Tanque de polietileno x 250	L	1	\$105.291	\$105.291
<b>Reactor metanogénico</b>				
Tubería y Accesorios	Pulgada	N/A	\$312.450	\$312.450
Tanque de polietileno x 2	m <sup>3</sup>	2	\$457.191	\$914.382
Botellas plásticas	Unidad	980	\$50	\$49.000
Mano de obra	Jornal	3	\$27.604	\$82.812

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO  
PARA LAS AGUAS RESIDUALES AGRÍCOLAS  
GENERADAS EN EL BENEFICIO HÚMEDO DEL  
CAFÉ EN LA FINCA BUENA VISTA; PLANADAS, TOLIMA, 2019.**

**Luisa Fernanda Campos Morales  
Dayhana Alejandra Durán Medina**

Manguera de polietileno reciclado	1 <sup>1/2</sup> " x 50 m	1	\$80.000	\$80.000
<b>Total</b>			\$2'015.635	<b>\$3'574.178</b>

*Fuente:* Autores, 2019.

A continuación, se observa el presupuesto elaborado para la implementación del humedal artificial de flujo subsuperficial. Es de aclarar que los propietarios de la finca Buena Vista ya cuentan con algunos de los detalles para su construcción, así como la adecuación del terreno. En este caso, los materiales que ya disponen es la arena y ya tienen realizada la limpieza y el movimiento del terreno, así como el respectivo recubrimiento de membrana plástica. Lo anterior, genera un beneficio económico al momento de llevarse a cabo la construcción del SFS, pues se tiene un ahorro de \$2'350.416. Pues, se estaría evitando la inversión en un jornal que equivale a \$27.604 en la limpieza del terreno, \$82.812 en tres jornales en el movimiento de tierra, \$320.000 en 160m<sup>2</sup> en el recubrimiento de membrana plástica y \$1'920.000 en la adquisición de 32m<sup>3</sup> de arena.

**Tabla 11.** *Presupuesto del diseño del sistema de tratamiento secundario.*

<b>SFS</b>				
<b>Detalle</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor Unitario</b>	<b>Valor Total</b>
Grava	m <sup>3</sup>	32	\$60.000	\$1'920.000
Plantas	Unidad	144	\$300	\$43.200
Sembrado	Jornal	2	\$27.604	\$55.208
Tubos de entrada y descarga del vertimiento	Pulgada	2	\$4.000	\$8.000
<b>Total</b>			\$91.904	<b>\$2'026.408</b>

*Fuente:* Autores, 2019.

12.4. Presupuesto para la realización del proyecto.

A continuación, se especifica el costo del desarrollo de algunas actividades que permitieron el desarrollo del presente proyecto:

**Tabla 12.** Presupuesto para la realización del proyecto.

Actividad	Ítem	Unidad	Cantidad	Costo / muestra	Costo Total
<b>Personal externo</b>	Pruebas de laboratorio certificado: Laboratorio LASEREX	<b>Demanda Química de Oxígeno (DQO) mg/L</b>	2	\$136.200	\$272.400
		<b>Demanda Bioquímica de Oxígeno (BOD) mg/L</b>	2		
		<b>pH</b>	2		
		<b>Alcalinidad</b>	2		
		<b>Acidez</b>	2		
		<b>Conductividad eléctrica. µS/cm</b>	2		
		<b>Sólidos suspendidos totales (SST). mg/L</b>	2		
		<b>Sólidos suspendidos. mg/L</b>	2		
		<b>Sólidos sedimentables (SSED). mL/L</b>	2		
		<b>Grasas y Aceites. mg/L</b>	2		
	Visita a la Finca Buena Vista.	<b>Número de viajes</b>	2 (4 <i>Ida</i> y <i>Vuelta</i> ,	\$56.000	\$448.000

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO  
PARA LAS AGUAS RESIDUALES AGRÍCOLAS  
GENERADAS EN EL BENEFICIO HÚMEDO DEL  
CAFÉ EN LA FINCA BUENA VISTA; PLANADAS, TOLIMA, 2019.**

**Luisa Fernanda Campos Morales  
Dayhana Alejandra Durán Medina**

			<i>viaje 2 personas para un total de 8 pasajes Ida y vuelta)</i>		
	Hospedaje y alimentación	<b>Alimentación y hospedaje para dos personas durante dos días.</b>	4 desayunos 4 almuerzos 4 cenas 4 habitaciones <i>(Esto teniendo en cuenta que fueron dos visitas realizadas a la finca por dos personas)</i>	\$24.000 \$28.000 \$26.000 \$80.000	\$158.000
<b>Actividad</b>	<b>Ítem</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor Unitario</b>	<b>Valor Total</b>
<b>Personal externo</b>	Director	<b>Número de horas dedicadas al proyecto</b>	<b>30 horas</b>	\$18.333	\$549.990
<b>TOTAL</b>				<b>\$1'428.390</b>	

*Fuente:* Autores, 2018.

### 13 Aspectos Éticos

Para la ejecución de este proyecto, se realizarán visitas de campo con el fin de obtener las muestras de agua pertinentes para el análisis fisicoquímico y microbiológico en un laboratorio certificado. Por otra parte, no se requiere de una evaluación del comité de ética, porque no se busca realizar ninguna intervención o modificación intencionada de las variables biológicas, fisiológicas, psicológicas o sociales de los individuos que participan en el estudio, como se establece en la resolución 008430 de 1993.

### 14 Resultados y Análisis de resultados

Con el fin de presentar los resultados obtenidos durante la realización del proyecto, se establecieron tablas y diagramas que recopilan la información más importante para darla a conocer de una manera ordenada y clara a cualquier tipo de lector. A continuación, se presenta por separado la información del objetivo 1 y 2.

#### 14.1. Identificación de la línea base

*Objetivo específico 1: Determinar la línea base del proceso productivo del café.*

La identificación de la línea base permitió describir la situación inicial durante el beneficio húmedo del café, es decir, se identificó el consumo de agua y energía que se realiza durante el proceso, así como el dimensionamiento de los tanques receptores de agua como se observa en la figura 11. Para los cálculos, se tuvo en cuenta la producción en cosecha del año 2018 de café en la finca Buena Vista como se observa en la Tabla 13.

**Tabla 13.** Producción más alta de café en el año 2018 en la finca Buena Vista.

Mes	Fecha (2018)	Cantidad de Kg en cereza	Cantidad de Kg mojados	Kilos secos
<b>JUNIO</b>	Junio 1	1394	407	203
	Junio 4	1639	504	264
	Junio 5	2364	739	360
	Junio 6	2148	673	340
	Junio 7	1653	509	260
	Junio 8	1211	327	1888
	Junio 11	840	257	128

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO  
PARA LAS AGUAS RESIDUALES AGRÍCOLAS  
GENERADAS EN EL BENEFICIO HÚMEDO DEL  
CAFÉ EN LA FINCA BUENA VISTA; PLANADAS, TOLIMA, 2019.**

**Luisa Fernanda Campos Morales  
Dayhana Alejandra Durán Medina**

Junio 12	1295	396	200
Junio 13	769	218	104
Junio 14	927	283	146
Junio 15	663	250	123
Junio 18	1171	453	226
Junio 19	1041	324	161
Junio 20	1252	404	198
Junio 21	4336	406	201
Junio 22	677	203	97
Junio 25	816	226	114
Junio 26	1115	335	226
Junio 27	1481	335	171
Junio 28	1370	465	246
Junio 29	1250	411	215
Junio 30	653	220	116
<b>TOTAL</b>	<b>30.065</b>	<b>8.345</b>	<b>5.987</b>

*Fuente:* Proprietarios de la finca Buena Vista, 2019.

De acuerdo a la visita de campo realizada a la finca Buena Vista, se identificó el proceso productivo que se lleva a cabo antes de realizar el beneficio húmedo del café, como se evidencia en la siguiente figura (Ver figura 11).

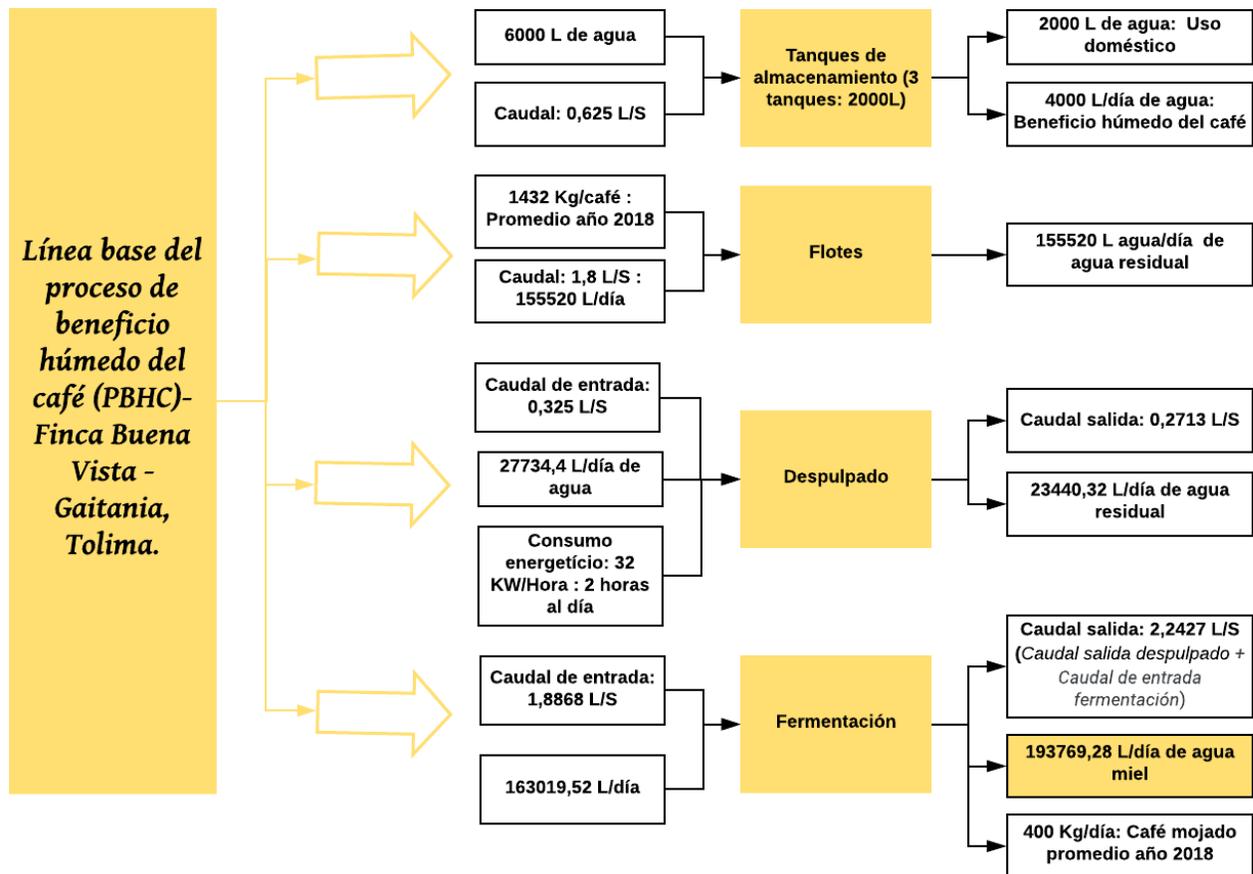
**Figura 11.** Proceso Productivo del Café en la finca Buena Vista.



*Fuente:* Autores, 2019.

Se identificaron las etapas del proceso de beneficio húmedo del café y en cada una de estas, se realizaron las mediciones de los caudales de entrada y de salida, el dimensionamiento de los tanques, consumo energético y kilogramos de café procesados. Es por esto que se logró establecer un diagrama con las entradas y salidas en cada proceso.

Figura 12. Identificación de la línea base del proceso productivo del café.



Fuente: Autores, 2019.

De acuerdo a la figura anterior, es posible determinar que existe un consumo total de agua de 350.273,92 L/día. Además, una generación de agua residual sin tratamiento alguno que está siendo vertida al suelo hasta llegar al sistema de alcantarillado. Para los cálculos, se tuvo en cuenta la producción en cosecha del año 2018 de café en la finca Buena Vista como se observa en la Tabla 6. Con estos resultados es posible establecer que se debe diseñar un sistema que logre reutilizar un porcentaje de agua utilizada durante el proceso que no posee carga contaminante como la usada en el proceso de flotes.

*Objetivo específico 2: Caracterizar y analizar los parámetros fisicoquímicos del agua establecidos en la resolución 0631 de 2015 para el beneficio del café con el fin de establecer los contaminantes críticos del agua miel (mucílago) y así seleccionar el sistema de tratamiento que mejor se adapte a las condiciones del agua, de la finca, de la población cafetera y del municipio de Planadas, Tolima.*

La caracterización del agua proporcionó información sobre las concentraciones de los diferentes parámetros físicos y químicos establecidos en la norma, tanto para la muestra de agua del afluente natural como para el agua miel generada como vertimiento producto del beneficio húmedo del café, con el fin de comparar estos resultados con la normativa legal vigente y de esta manera, analizar cuál es el sistema de tratamiento que se puede implementar para el tratamiento de la misma. En la tabla 14, se presentan los resultados obtenidos para las dos muestras de agua.

**Tabla 14.** Resultados de la caracterización del afluente natural y del agua miel.

Parámetro	Unidades	Valores límites permisibles (Proceso Tradicional) Res. 631:2015	Resultado afluente natural	Resultado del agua miel
<b>pH</b>	0-14	5,00-9,00	8,2	4,6
<b>Alcalinidad</b>	mg CaCO <sub>3</sub> /L	Análisis y reporte	89,0	-
<b>Acidez</b>	mg CaCO <sub>3</sub> /L		-	844,0
<b>Demanda Química de Oxígeno (DQO)</b>	mg/L	650	259,3	34873
<b>Conductividad eléctrica</b>	µS/cm	Análisis y reporte	204	556
<b>Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>)</b>	mg/L	400	1,47	13896
<b>Sólidos suspendidos</b>	mg/L	-	16	>750
<b>Sólidos sedimentables (SSED)</b>	mL/L	10	< 0,1	<0,1

<b>Sólidos Suspendidos Totales (SST)</b>	mg/L	400	106	4126
<b>Grasas y aceites</b>	mg/L	10	38	2052

*Fuente:* Laboratorio LASEREX, Laboratorio Ambiental del Tolima & Autores, 2019.

De acuerdo con la tabla anterior, se logra determinar que algunos parámetros exceden en gran proporción los valores límites permisibles acorde a la Resolución 631:2015, evidenciando incluso que algunos de éstos se sobrepasan en más del 100% la concentración. Entre éstos se encuentran: DBO<sub>5</sub>, DQO, Grasa y Aceites y SST.

En la siguiente tabla, se lleva a cabo la identificación de los contaminantes con concentraciones más críticas en el vertimiento del agua miel (mucílago).

**Tabla 15.** *Identificación de contaminantes críticos del agua miel generada en el beneficio húmedo de café.*

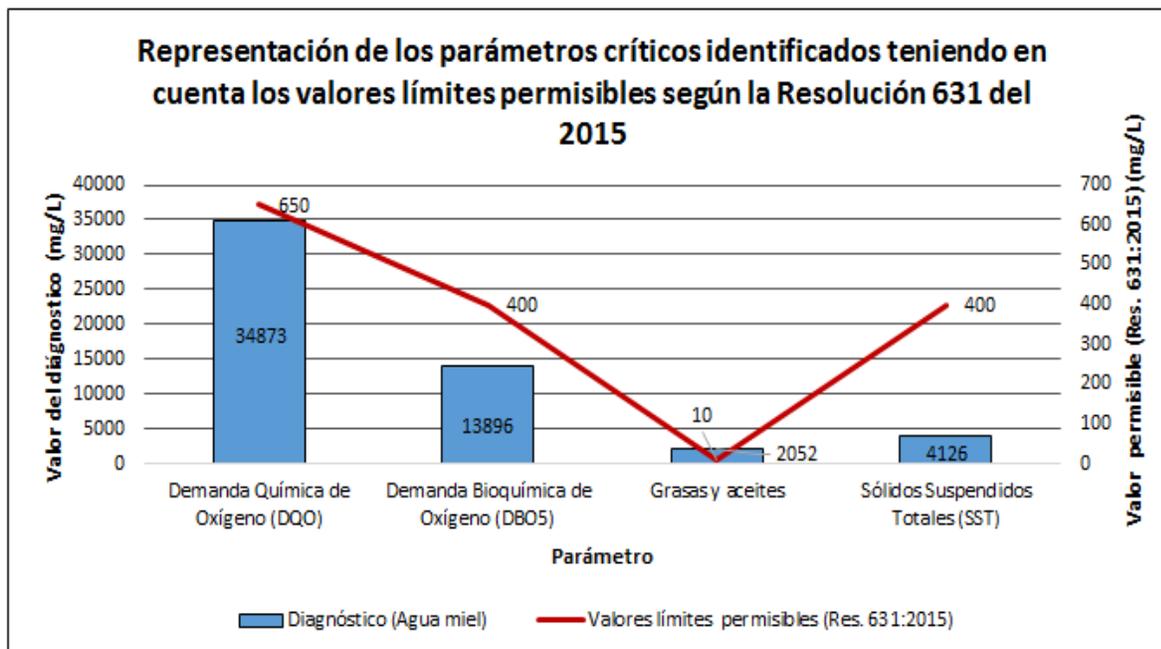
<b>Parámetro crítico</b>	<b>Unidad</b>	<b>Resultado del agua miel</b>	<b>Valores límites permisibles (Proceso Tradicional) Res. 631:2015</b>
<b>Demanda Química de Oxígeno (DQO)</b>	mg/L	34873	650
<b>Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>)</b>	mg/L	13896	400
<b>Grasas y aceites</b>	mg/L	2052	10
<b>Sólidos Suspendidos Totales (SST)</b>	mg/L	4126	400

*Fuente:* Autores, 2019.

Con el fin de hacer más comprensible la diferencia de los valores que exceden los rangos límites permisible de la Res. 631:2015 a continuación, se presenta un gráfico en el cual se

encuentran los valores de la tabla anterior. La línea roja representa los valores máximos permisibles mientras que las barras son los datos obtenidos en el diagnóstico del agua miel (mucílago).

**Gráfica 1.** *Parámetros críticos identificados de acuerdo a la Res. 631:2015.*



*Fuente:* Autores, 2019.

Para llevar a cabo el respectivo análisis de cada parámetro físico y químico cabe aclarar que, la composición de las aguas mieles (mucílago) depende considerablemente de la cantidad de café procesado, de la madurez del fruto, disponibilidad de agua, de quién y cómo realiza el beneficio, en este caso el proceso que realizan es de forma tradicional, lo cual brinda de cierto modo una explicación en los resultados obtenidos a continuación:

#### 14.2. Resultados y discusión por parámetro

##### 14.2.1. Potencial de Hidrógeno (pH):

El pH es la medida adimensional de acidez o alcalinidad de una sustancia. Este involucra una escala con valores que oscilan de 0 a 14, en donde un pH igual a 7 es neutro, menor que 7 es ácido y mayor que 7 es básico a 25 °C. A distintas temperaturas, el valor de pH neutro puede variar debido a la constante de equilibrio del agua (Almégica & Muñoz, 2013).

Las aguas mieles (mucílago) cuentan con un pH bajo y una acidez muy alta, puesto que el 60% del fruto de café está formado por desechos sólidos como la pulpa (40%), Mucílago (16%) y cascarilla o pergamino (4%), siendo estos altamente contaminantes. Esto genera una afectación química en el agua pues ocasiona un cambio en el pH volviéndolo ácido, pues se

presenta una disminución de la concentración de oxígeno disuelto y oxidación de la materia orgánica (Zúñiga, 2013).

Lo anterior, se ve reflejado en los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica del agua miel, en este caso, se tiene un valor de pH igual a 4,6 unidades y una acidez equivalente a 844,0 mg CaCO<sub>3</sub>/L; este valor al ser comparado con el que se adquirió del afluente natural que fue de 8,2 unidades y el valor límite permisible de la **Resolución 0631 del 17 de marzo de 2015. Art. 9.** que oscila entre 5 - 9 unidades, se establece que el dato del efluente natural se encuentra en el rango de la Resolución 0631:2015 mientras que el resultado del agua miel (mucílago) está fuera del nivel establecido por la norma, es decir, que corresponde a un vertimiento ácido al ser inferior a 7 unidades. Estos valores corresponden a estudios realizados por Zambrano, Isaza, Rodríguez & López (1999), los cuales muestran que las aguas mieles (mucílago) cuentan con un pH que oscila entre 4.0 - 4,5 unidades (Zambrano et al, 1999).

La acidez se debe a que, en el mucílago del café hay presencia de sustancias ácidas las cuales incluyen los ácidos volátiles como el acético a partir de la fermentación de los azúcares en el mucílago, el málico, láctico, cítrico, succínico y otros compuestos de ácidos orgánicos los cuales hacen que este tipo de aguas residuales lleguen a tener un pH de hasta 3,8 unidades, en el cual bajo estas condiciones las plantas y animales difícilmente pueden sobrevivir. Además, estudios realizados por López, et al., (1989) & Zambrano, et al., (1999), reportaron contenidos de ácido galacturónico, málico, láctico, butírico, cítrico y propiónico en soluciones obtenidas con café recién despulpado y encontraron variaciones de la concentración de estos ácidos durante la fermentación, es por esto que la descarga de contaminantes del café altera tajantemente la acidez natural del agua (pH 2,5) (López et al, 1989) (Zambrano et al, 1999).

En cuanto al resultado de alcalinidad del afluente natural se obtuvo un valor de 89,0 mg CaCO<sub>3</sub>/L este valor es bajo al compararlo con el obtenido de acidez de la muestra de agua miel que fue de 844,0 mg CaCO<sub>3</sub>/L; de tal modo que no cuenta con una capacidad alta para neutralizar ácidos. Esto se evidencia también en estudios realizados por Zayas et al, (2007), pues en este caso evaluaron los parámetros fisicoquímicos del agua miel y obtuvieron resultados similares a los de este estudio; por ejemplo, el pH fue de 4,6 unidades con una concentración de Taninos de 0,16 mg/L. Lo anterior, lo atribuyen a que los efluentes aparte de contener una alta carga orgánica, presentan pH ácido y color; asociando esto a sus constituyentes que son elementos como la cafeína, grasas, sustancias pépticas y macromoléculas. Las principales macromoléculas son la lignina, los taninos y los ácidos húmicos, que en todos los casos son estructuras moleculares complejas, dichos compuestos son de difícil degradación por parte de consorcios microbianos (Zayas et al., 2007).

#### *14.2.2. Demanda Química de Oxígeno (DQO):*

En análisis de aguas, la Demanda Química de Oxígeno, es un parámetro analítico de primordial importancia en el control de la calidad de las aguas, pues permite determinar la cantidad de oxígeno necesario para oxidar el contenido de materia orgánica a dióxido de carbono y agua independientemente de la capacidad biológica de las sustancias para ser asimiladas (METCALF, 1985).

En general, el método DQO se usa como indicador de la presencia de contaminantes en aguas naturales y aguas residuales tanto industrial como civil. Se utiliza para monitorizar la eficiencia de los procesos de depuración en las instalaciones de tratamiento de los vertidos: el valor de DQO se mide tanto en el agua de entrada como de salida. La eficiencia del proceso de tratamiento se expresa normalmente como DQO eliminado, en forma de porcentaje de la materia orgánica purificada durante el ciclo (Metcalf, 1985). En este caso, el resultado obtenido del agua miel (mucílago) fue de 34873 mg/L, el cual al ser comparado con el valor del efluente natural que fue de 259,3 mg/L y el límite permisible de la **Resolución 631 del 17 de marzo de 2015. Art. 9.** (Parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas (ARND) a cuerpos de aguas superficiales de actividades productivas de agroindustria y ganadería), se tiene que se encuentra fuera del valor de la norma y excede el valor del efluente natural, es decir, esta muestra no cumple con el rango para la Demanda Química de Oxígeno que es de 650 mg/L para el vertimiento de agua residual no doméstica.

Lo anterior, se debe a que los subproductos del proceso del café generan una alta contaminación al ambiente, principalmente la pulpa, que es un residuo sólido el cual representa entre un 40% y 46% del peso del fruto con una carga contaminante equivalente a 20 kilogramos de demanda química de oxígeno (DQO) por quintal de café oro (equivalente poblacional anual de 0.96 persona) y el mucílago, residuo líquido que representa entre 9% y 11% del peso del fruto con una carga contaminante equivalente a 6.0 kilogramos de demanda química de oxígeno (DQO) por quintal de café oro (equivalente poblacional anual de 0.29 persona) (Guerrero, 2007). Cabe aclarar que, un quintal de café oro equivale a 46 kg y el café oro o también conocido como café verde es un término que se acuña al grano de café posterior a que se hayan separado las diferentes envolturas a través del proceso de descascarillado o morteadado. En este caso, este es un tipo de café que se encuentra listo para ser tostado y posteriormente molido (Federación Nacional de Cafeteros, 2012).

Sumado a esto, el agua se contamina con los compuestos que se adicionan en el despulpe y/o lavado del café, transformándose así en agua residual, la cual tiene por compuestos contaminantes los siguientes que a su vez aportan al incremento de la DQO cierto porcentaje, así: en el despulpado, los compuestos presentes son las Proteínas (9,1%), Taninos (9,8%), Ácido Clorogénico (14,5%), Ácido Cafeico (0,7%), Cafeína (20,7%) y Azúcares (45,1%); los porcentajes escritos corresponden al aporte de estos compuestos a la DQO (Guerrero, 2007). Sin embargo, en un estudio denominado “**El filtro anaeróbico con guadua: Una alternativa para el tratamiento de las aguas mieles**” realizado por Patricia Osorio, Ingeniera Sanitaria, CVC Cali Colombia, se encontró que los niveles de la DQO van desde 2.164,7 - 28.178,2 mg/L (Osorio, sf). Además, estudios realizados por Class (2003), muestran que la concentración de las aguas mieles se ubica entre 7000 y 12000 mg/L de DQO (Class, 2003). Estos valores de DQO pueden llegar incluso a ser mayores si en el agua existen cantidades significativas de materia orgánica biológicamente resistente haciendo que la DBO sea menor que la DQO, en el caso del agua miel se debe a los compuestos orgánicos minerales de difícil degradación que se mencionaron anteriormente (Sawyer, et al., 2001). De otro lado, en la cuantificación de la Demanda Química de Oxígeno de los subproductos del proceso tradicional de beneficio húmedo de café, constituidos principalmente por la pulpa y el

mucílago, Zambrano et al (2010), encontraron que por cada kilogramo de fruto se producen en promedio 115,1 g de DQO, de los cuales el 73,7% (85 g) provienen de la pulpa y 26,3% (30 g) provienen del mucílago (Rodríguez et al, 2015).

Según Moreno & Romero (2016), la contaminación unitaria producida diariamente por un habitante corresponde a 100g de DQO, lo cual quiere decir que la pulpa y el mucílago procedentes del beneficio húmedo convencional de 1 Kg de café en cereza, genera una contaminación similar a la producida por una persona durante el día. Teniendo en cuenta lo anterior, una carga de café pergamino seco obtenido del beneficio convencional produce una contaminación equivalente a 690 habitantes / día. De este modo, la importancia de tratamiento de las aguas de beneficio es debido a que, la oxidación de la materia orgánica contenida en el agua se efectúa por medio de la micro flora bacteriana que se alimentan de la materia consumiendo el oxígeno disuelto en el agua; en el caso del vertimiento del agua miel se agota el oxígeno (anaerobiosis) y se destruye por asfixia la flora y fauna acuática (Hernández & Hidalgo, 2000).

#### 14.2.3. Conductividad eléctrica:

La conductividad es una medida de la propiedad que poseen las soluciones acuosas para conducir la corriente eléctrica. Esta depende de la presencia de iones, su concentración, movilidad, valencia y de la temperatura de la medición. Las soluciones de la mayor parte de los compuestos inorgánicos son buenas conductoras, por otra parte, las moléculas orgánicas al no disociarse en el agua, conducen la corriente en muy baja escala (IDEAM, 2006).

Respecto a este parámetro, se obtuvieron los siguientes resultados para el caso del afluente natural 204  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y para el agua miel (mucílago) fue de 556  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , al comparar estos dos valores se logra evidenciar que ambos tienen una diferencia un poco significativa pues en el caso del agua miel (mucílago) el valor es mayor indicando así que, en este caso las aguas mieles al tener una conductividad alta producen corrientes más altas. Lo anterior se debe al pH bajo con el que cuentan las aguas mieles (mucílago) que fue de 4,6 unidades. A su vez, este valor del agua miel indica que éstas tienen un contenido moderado de sales y posiblemente un alto contenido de sólidos disueltos totales (SDT) en el agua, puesto que a medida que estos dos parámetros incrementan también lo hacen la salinidad y la corrosividad del agua (Olmos et al, 2003). Estos valores al compararlos con Decreto 109:2015, de 17 de marzo “*Por el que se aprueba el Reglamento de Vertidos al Dominio Público Hidráulico y al Dominio Público Marítimo-Terrestre de Andalucía*” se encuentran por debajo del rango que oscila entre 500 a 1.500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , por lo cual ninguno de éstos afecta el proceso biológico de depuración (Blasco, 2015). No obstante, en estudios realizados por Contreras et al, (2015), encontraron que el agua miel presenta generalmente una conductividad eléctrica de 119,47  $\mu\text{S}/\text{cm}$  debido a la reducción del pH de la muestra que recolectaron (Contreras et al, 2015).

#### 14.2.4. Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $\text{DBO}_5$ ):

El parámetro de contaminación orgánica más ampliamente empleado, aplicable tanto a aguas residuales como a aguas superficiales, es la ***DBO a 5 días*** ( $\text{DBO}_5$ ). La determinación del mismo está relacionada con la medición del oxígeno disuelto que consumen los

microorganismos en el proceso de oxidación bioquímica de la materia orgánica (Tchobanoglous, et al., 1998). La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es una prueba usada para la determinación de los requerimientos de oxígeno para la degradación bioquímica de la materia orgánica en las aguas municipales, industriales y en general residual; su aplicación permite calcular los efectos de las descargas de los efluentes domésticos e industriales sobre la calidad de las aguas de los cuerpos receptores. Los datos de la prueba de la DBO se utilizan en ingeniería para diseñar las plantas de tratamiento de aguas residuales (IDEAM, 2007).

Este parámetro se utiliza para caracterizar las aguas o para determinar su calidad o grado de contaminación. Si los niveles de DBO de una muestra de agua son muy altos, quiere decir que la concentración de oxígeno disuelto es muy baja, pues las bacterias requieren de oxígeno para sobrevivir y por ende lo consumen, ocasionando que el oxígeno disuelto baje, esto trae como consecuencia la imposibilidad de vida en las aguas (Ramalho, 1991).

Los resultados obtenidos para la muestra de agua residual (agua miel) , arrojó un valor de 17,5 mg/L que comparado con el límite máximo permisible que es de 400 mg/L no presenta problemas al estar por debajo de lo permitido y estos resultados fueron obtenidos por medio del laboratorio LASEREX, al analizar los datos se identificaron irregularidades por lo que se envió una nueva muestra de agua residual al laboratorio de CORCUENCAS certificado por el IDEAM, en donde se obtuvo un valor de 13,896 mg/L y comparado con el límite establecido por la norma se encuentra por encima 13,496 mg/L.

De acuerdo a autores como Salazar et al., 2013 en su artículo “Diagnóstico *del tratamiento de aguas residuales mediante los sistemas Cenicafé y Majavita del beneficio ecológico del café con módulo Becolsub en la Hacienda Majavita*” evidencian un resultado de 3800 mg/L de un agua miel evaluada y Álvarez et al. , 2011 en el trabajo titulado “ *Evaluación de un sistema de tratamiento de aguas residuales del pre beneficiado de café (coffea arábica) implementado en la comunidad Carmen Pampa provincia Nor Yungas del Departamento de la Paz*” , en el cual reportan un valor de 6050 mg/L, presentando relación con lo estipulado por García, 2017 , quien establece que el sector cafetero genera un impacto negativo al con el vertimiento de las aguas mieles directamente a las fuentes hídricas provocando una grave contaminación, por ejemplo, cambios de acidez, deficiente demanda química de oxígeno (DQO) , altos índices de demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>); En resumen, las aguas residuales que se producen durante el proceso de beneficio húmedo del fruto del café, son biodegradables, pero poseen características fisicoquímicas particularmente agresivas con el ambiente: pH bajos, acidez alta y concentración de materia orgánica alta, correspondientes a poderes contaminantes entre 60 y 240 veces superiores a las aguas residuales domésticas (Zambrano & Rodríguez,2008).

La alta presencia de la ***Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>)*** en las aguas residuales, se debe principalmente a la materia orgánica carbonosa que es usada como fuente de alimentación por los organismos aerobios (Organismos que requieren de oxígeno para vivir); El nitrógeno oxidable y compuestos de nitrógeno orgánico, que sirven de sustrato para bacterias específicas del género *Nitrosomas* y *Nitrobacter* y poseen la función de oxidar el

nitrógeno amoniacal en nitritos y nitratos; Por otra parte, los compuestos reductores químicos, como los sulfitos, sulfuros y el ión ferroso que son oxidados por el oxígeno disuelto (Xil,2012). Por último, es importante resaltar que esta carga contaminante se genera principalmente, en el beneficio húmedo del café, debido al mucílago que se genera en la etapa de desmucilaginado y representa del fruto fresco de café alrededor de 14,85% (Montilla, 2006). El mucílago es uno de los residuos que genera alta contaminación debido a su composición química, por cada millón de sacos de 60 kg de café almendra se generan aproximadamente 55 500 toneladas de mucílago fresco, el cual si no se utiliza adecuadamente produciría una contaminación equivalente a la generada durante un año, por excretas y orina, de una población de 310 000 habitantes en términos de DBO (Rodríguez, 2009).

#### *14.2.5. Sólidos Sedimentables (SSED):*

Los Sólidos Sedimentables (SSED) 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; se expresan comúnmente en unidades de mL/L (Giraldo, 1995).

Las aguas utilizadas en el proceso de despulpado durante el beneficio del café, se caracterizan por contener una gran cantidad de sólidos sedimentables, azúcar y otras sustancias, que contribuyen a una alta contaminación de los cuerpos receptores de agua (Giraldo,1995) ; sin embargo, los resultados obtenidos para la muestra de agua del efluente natural y el agua miel arrojó un valor de  $< 0,1$  mL/L, es decir, se encuentra por debajo del límite máximo permisible que es de 10,00 mL/L establecido en la Resolución 631 de 2015. Teniendo en cuenta autores como Molina & Villatoro, 2006, en su trabajo “Propuesta de Tratamientos de Aguas Residuales en Beneficios Húmedos de Café” en donde registran un valor de 280 mg/L para Sólidos Sedimentables en la muestra de agua analizada, la muestra de agua del presente trabajo presenta irregularidades que pudieron ser ocasionadas porque la medición de este parámetro no se realizó directamente en campo, ni se realizó duplicado como lo establece el *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (Métodos estándar para el examen de agua y aguas residuales)*, lo que pudo influir en el resultado obtenido.

Por otra parte, es importante tener en cuenta que el proceso de beneficio húmedo del café en general, arroja en sus afluentes cantidades apreciables de estos materiales influyendo adversamente en los cuerpos de aguas receptoras obstruyendo el paso de la luz solar, por lo tanto, disminuyen la actividad fotosintética de las plantas acuáticas trayendo como consecuencia la disminución de la concentración de oxígeno disuelto en el agua, induciendo a un estado anaerobio indeseable (Cárdenas & Ortiz, 2014). Es por esto, que el sistema de tratamiento que se pretenda diseñar debe lograr abarcar este parámetro para evitar problemas de remoción en caso tal que llegue a superar el valor máximo permisible.

#### *14.2.6. Sólidos Suspendidos Totales (SST):*

Las características físicas más importantes del agua residual son: El contenido total de sólidos, término que engloba la materia en suspensión, la materia sedimentable, la materia

coloidal y la materia disuelta. Otras características físicas importantes son el olor, la temperatura, la densidad, el color y la turbiedad (Tchobanoglous, et al., 1998). Los Sólidos Suspendidos Totales (SST) se definen como los residuos no filtrables de una muestra de agua natural o residual industrial o doméstica y es la porción de sólidos retenidos por un filtro de fibra de vidrio que posteriormente es secado a 103-105°C, hasta llegar a un peso constante. También se asocian a la turbidez y color del agua (Cárdenas & Ortiz, 2014).

El resultado obtenido para el efluente natural es de 106 mg/L y la cantidad de sólidos en el vertimiento es de 4126 mg/L, teniendo en cuenta la normativa legal vigente mencionada anteriormente (Res. 631 de 2015) que establece como límite 400 mg/L, es decir, se encuentra una concentración considerable de este parámetro en el agua miel que excede el valor permisible ; Teniendo en cuenta el trabajo realizado por García (2017) , titulado “Establecimiento de un Sistema de Filtro para Tratamiento de Aguas Miel en una finca del municipio de Ibagué, promoviendo los tres pilares de producción y sostenibilidad (económico, social y ambiental)” , en donde reporta un valor de 453 mg/L y autores como Molina & Villatoro (2006), quienes establecen que entre las características típicas en las aguas residuales generadas en el beneficio húmedo del café más precisamente, el agua de lavado empleada para la fermentación, se encuentran los sólidos suspendidos totales en concentraciones que varían desde los 4100 hasta los 5200 mg/L, valor que coincide con los datos obtenidos en el presente trabajo.

Estos valores altos obtenidos de SST, generan una disminución de la luz que penetra en la columna de agua, con lo que se suprime la actividad fotosintética del fitoplancton, las algas y las macrófitas. Es decir, limita el desarrollo de la vida acuática; Además, es un indicador importante de los problemas de erosión en las cuencas hidrográficas (Molina & Villatoro, 2006). El aguamiel de café contiene sustancias peptídicas. Aproximadamente un 36 % del mucílago está compuesto por pectina (Braham and Bressani, 1979). La pectina precipita en presencia de calcio por lo que, en el agua de lavado de café el calcio da lugar a la formación de precipitados que se mantienen en solución como sólidos suspendidos. Por otra parte, la presencia de SST se da en el agua miel del café al ser un subproducto que proviene de la composición físico química de la pulpa y el mucílago, debido a que estos dos elementos proporcionan partículas y componentes durante el contacto turbulento e intenso con el agua limpia, aportando de esta manera, materia orgánica, fósforo, nitrógeno, carbohidratos no fermentados, alcoholes, ácidos orgánicos, taninos, cafeína, ácido cafeico y ácido clorogénico (ANACAFE, 2005). Contiene una alta cantidad de sólidos sedimentables y suspendidos, azúcares, materia soluble y en general materia orgánica en abundancia, lo que la hace altamente contaminante (Erick, 1996).

#### *14.2.7. Grasas y aceites:*

A el aceite y la grasa se les concede especial atención por su escasa solubilidad en el agua y su tendencia a separarse de la fase acuosa (Barba, 2002). Grandes cantidades de este parámetro producen un impacto estético, reducen la re oxigenación a través de la interface aire-agua, generando la disminución del oxígeno disuelto y absorbiendo la radiación solar, afectando a la actividad fotosintética y, en consecuencia, la producción interna de oxígeno

disuelto. Además, encarecen los tratamientos de depuración y algunos aceites en especial los minerales, suelen ser tóxicos para la vida acuática (González, 2016).

Los principales grupos de sustancias orgánicas presentes en el agua residual son las proteínas (40-60 por 100), hidratos de carbono (25-50 por 100), y grasas y aceites (10 por 100) (Metcalf & Eddy, 1995). En este caso, se encuentra una presencia de aceites y grasas tanto en la muestra de agua miel con un valor de 2052 mg/L y en la del afluente natural con 38 mg/L, lo anterior se atribuye al contenido de compuestos de bajo peso molecular formados, en los cuales son de gran relevancia los ácidos grasos de cadena corta tales como el acético, propiónico, butírico, éstos hacen parte de la composición del café; estos ácidos grasos se conocen como ácidos volátiles debido a que se pueden destilar a presión atmosférica; mientras que para el caso del afluente natural puede atribuirse a la presencia natural de ácidos grasos o incluso durante su recorrido puede recibir grasa de tipo vegetal o animal de alguna fuente externa, en este caso, ambos valores exceden los rango límites permisibles de acuerdo a la Res. 0631:2015 para el parámetro de grasas y aceites, dicho valor es de 10 mg/L (Sawyer, et al, 2001). De acuerdo a estudios realizados por García, (2017), el agua miel presenta un valor de grasas y aceites totales de 2,02 mg/L, sin embargo, al comparar este resultado con el de investigaciones llevadas a cabo en Cenicafé, se han encontrado valores del 9% de sustancias grasas y compuestos fenólicos del orden de 8,7%, como taninos, y 10,8% como ácidos clorogénicos, calculados como DQO. Dichas sustancias, se incorporan al agua cuando ésta se utiliza en el despulpado y transporte de la pulpa, generando una baja tasa de degradabilidad, retrasando el proceso de depuración. Los valores reportados de aceites y grasas fueron del orden de 10,0 y 7,6 ppm y de 6,1 y 4,8 ppm de forma natural, siendo éstos inferiores a los valores máximos permisibles para vertimientos puntuales del sector cafetero, provenientes del beneficio ecológico, dado que la norma exige un valor máximo de 30 ppm (Resolución 631 del 2015). De otro lado, las aguas residuales provenientes del lavado del grano, están compuestas por azúcares, pectinas y ácidos, con altas velocidades de degradación. No obstante, en este caso no se reporta la presencia de aceites y grasas, en ellas (Rodríguez, et al., 2015).

Finalmente, la presencia de grasas y aceites en el agua residual conlleva a tener problemas en la red de alcantarillado, es por esto que, si no se elimina el contenido en grasa antes del vertido del agua residual, esto puede interferir con la vida biológica en aguas superficiales y crear películas y acumulaciones de materia flotante desagradables. Sumado a esto, son el componente de las aguas residuales que tiene una mayor tendencia a oxidarse, lo cual conlleva a que, al llegar a los reactores biológicos, fijen rápidamente el oxígeno disuelto disponible, pudiendo ocasionar situaciones de anoxia puntuales que podrían propiciar la proliferación de microorganismos filamentosos (Cada kg de grasa supone entre 2 y 2,5 kg de DQO, lo que implica que las grasas y aceites en su proceso oxidativo) (González, 2016).

*Objetivo específico 3: Establecer el dimensionamiento del sistema de tratamiento óptimo para el cumplimiento de la Resolución 631 de 2015.*

Con el fin de proponer el diseño del sistema de tratamiento, se realizó una revisión bibliográfica en donde se identificaron los diferentes sistemas de tratamiento que han sido empleados en Colombia para tratar aguas residuales generadas en el proceso de beneficio húmedo del café (Ver Tabla 16). En donde se establecieron diferentes características típicas de las tecnologías de tratamientos de aguas residuales. La calificación se basó en asignar: ++ que significa que cumple **excelente** el criterio, + (**Positivo**) y - (**Negativo**).

**Tabla 16.** Comparación de los diferentes sistemas de tratamiento que son empleados para el tratamiento del agua miel.

Condición Ambiental	SMTA	Biodigestor tipo Taiwanés	Biofiltro	Electrocoagulación (Con electrodos Fe/Al, 2.3 A y pH natural).	UAF	Humedal artificial de flujo subsuperficial (HFSS)	Sedimentador y Lecho filtrante
	Anaeróbico	Anaeróbico	Anaeróbico	Electroquímico	Anaeróbico	-	Anaerobio
Adecuado para aguas residuales crudas	++	++	++	++	++	++	++
Adecuado para aguas residuales asentadas	++	++	++	+	+	+	+
Temperaturas adecuadas	26 a 32°C	29 y 33°C	16 a 27°C	26 a 34°C	10 a 30°C	13 a 32°C	25 y 38 °C
Eficiencia de eliminación de DBO	>83%	80%	50 a 60%	73 a 80%	83,4%	60 al 90%	20%
Eficacia de eliminación de nutrientes (N,P)	++	++	+	++	++	++	-
Remoción de coliformes	99%	50 a 70%	48,13%	93%	65 al 75%	99,99%	20%
Eficiencia de remoción de	>95%	95,14%	50 a 70%	80%	74,4%	60 al 90%	>95%

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO  
PARA LAS AGUAS RESIDUALES AGRÍCOLAS  
GENERADAS EN EL BENEFICIO HÚMEDO DEL  
CAFÉ EN LA FINCA BUENA VISTA; PLANADAS, TOLIMA, 2019.**

**Luisa Fernanda Campos Morales  
Dayhana Alejandra Durán Medina**

<i>Sólidos Suspendidos</i>							
<i>Remoción de huevos de Helminto (Parásitos por contaminación fecal )</i>	<b>63 al 100%</b>	<b>63%</b>	<b>60%</b>	<b>62%</b>	<b>50%</b>	<b>95 al 100%</b>	<b>15 al 19%</b>
<i>Típico TRH (Tiempo de retención hidráulica)</i>	<b>2 días</b>	<b>20 a 50 días</b>	<b>3 a 7 días</b>	<b>1 a 2h</b>	<b>2,6 días</b>	<b>5 a 12 días</b>	<b>24 a 36 h</b> (Sedimentador) <b>&lt;2 min</b> (FFA- FFH)
<i>Molestias de olor</i>	++	++	++	++	+	+	+
<i>Demanda energética y producción de gas</i>	Producción de biogás ++	Producción de biogás ++	Producción de biogás -	Producción de biogás - Demanda energética -	Producción de biogás: ++	Producción de biogás -	Producción de biogás -
<i>Requisito de tierra</i>	++	++	+	No requiere	+	-	+
<i>Requieren operadores calificados</i>	+	+	++	++	+	+	+
<i>Costo de inversión</i>	++	++	+	-	++	-/+	++

***Fuente:*** Autores, 2019.

De los ocho (8) sistemas de tratamiento que se evaluaron mediante la tabla de comparación anterior, se seleccionó como método de tratamiento primario el Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio (SMTA) puesto que éste es el que mayores porcentajes de remoción de contaminantes asociados a las aguas mieles producto del beneficio húmedo del café ha tenido en comparación a los otros siete sistemas a lo largo del tiempo en los diversos estudios que han llevado a cabo asociaciones del gremio cafetero y universidades en Colombia y otros lugares del mundo. Otra de las razones por las cuales se optó por el SMTA es que, presenta una serie de ventajas en cuanto a los criterios de diseño de los otros siete sistemas, por ejemplo, éste requiere menor tiempo de retención hidráulica (2 días) lo cual hace que su proceso sea más rápido que los demás sistemas.

En cuanto a los porcentajes de eficiencia de remoción de carga contaminante se tiene que: el SMTA ha mostrado una remoción de la carga orgánica superiores al 80% de la DBO<sub>5</sub>, remoción de coliformes del 99%, remoción de Sólidos Suspendidos mayores al 95%, remoción de huevos de Helminto del 63 al 100% y una reducción de DQO mayor al 80%.

Estos porcentajes de remoción se deben a que el SMTA está compuesto por dos unidades, las cuales permiten la separación de fases de la digestión anaerobia: el reactor Hidrolítico/Acidogénico (RHA) y el reactor Metanogénico (RM) mediante el cual involucran una tecnología de tratamiento biológico.

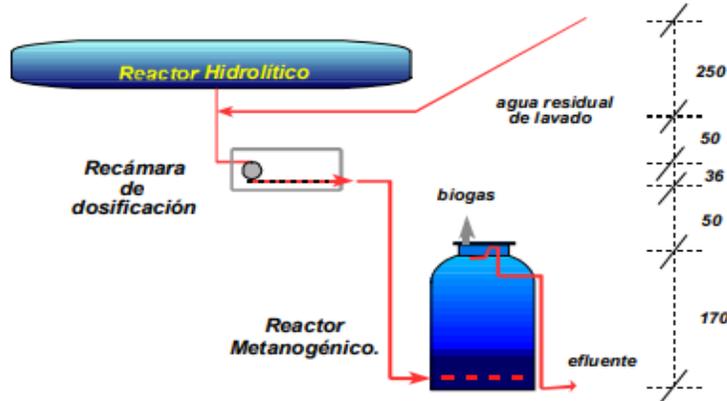
Este sistema de tratamiento anaerobio es económico, su mantenimiento no es complicado y por ende es de fácil acceso a la población cafetera. Además, en este sistema, el flujo de las aguas residuales ocurre por gravedad aprovechando la topografía de la zona cafetera colombiana, por tanto, no requiere uso de energía eléctrica para el bombeo del agua residual; utiliza unidades prefabricadas de polietileno las cuales logran elevar la temperatura interna de los tanques hasta los 30°C lo que, a su vez, permite controlar los olores ofensivos de los alrededores. Otra de las ventajas de esta tecnología, es la utilización de organismos metanogénicos presentes en el estiércol vacuno o porcino, responsables de la etapa principal del tratamiento de agua mieles, y el uso de trozos de guadua o de botellas plásticas no retornables como medio de soporte para los microorganismos (Rendón, 2014). Sumado a lo anterior, este sistema no requiere la adición de reactivos químicos para neutralizar, ni balancear la composición química de las aguas residuales del café. De otro lado, se alcanza una biodegradación superior al 90% en la DQO y permite la producción de biogás el cual puede ser utilizado como suministro propio de energía para la finca (cocción de preparación de alimentos). Sumado a esto, no requiere de grandes extensiones de terreno para su implementación (Cerquera, 2017).

A continuación, se describen cada uno de los componentes del SMTA, a fin de conocer mejor su estructura y funcionamiento:

#### *14.3. Componentes del SMTA*

Este sistema está constituido por una trampa de pulpas, los Reactores Hidrolíticos Acidogénicos de Flujo Ascendente RHAFAs, la recámara dosificadora que regula el flujo de su efluente en un orificio de 7/64 pulgada, a un caudal constante alrededor de 550 ml/min, terminando el proceso de biodegradación en el reactor metanogénico que debe ser previamente inoculado con bacterias metanogénicas provenientes de estiércol de ganado vacuno o porcino (Zambrano *et al.* 1999) (Ver **imagen 5**).

**Imagen 5.** Esquema de un SMTA. Cotas mínimas en el terreno (Medidas en centímetros).



**Fuente:** Zambrano *et al* 1999.

#### 14.3.1. Trampa de pulpas

Es la primera unidad encargada de evitar la entrada de material suspendido con tamaños de partícula superiores a 5 mm, y cuya acumulación puede ocasionar taponamiento de tuberías (Zambrano *et al*, 2010).

#### 14.3.2. Reactor hidrolítico / acidogénico

Constituido por uno o varios tanques de polietileno en los cuales ocurre la solubilización del material orgánico suspendido (Zambrano *et al.*, 2010). En esta unidad se reconocen dos etapas de importancia en la digestión anaerobia, la hidrólisis en la que los compuestos insolubles y solubles poliméricos de alto peso molecular son transformados en compuestos de menor peso molecular como son azúcares y aminoácidos por la acción de exoenzimas, de tal forma que los compuestos pueden ser asimilados por la célula. La acidogénesis se da una vez los compuestos son asimilados por las bacterias para ser transformados en ácidos orgánicos saturados (Rendón, 2014).

#### 14.3.3. Recámara dosificadora

Este elemento utiliza los principios de la filtración lenta reteniendo el material orgánico particulado no solubilizado y permite tener el control del caudal en el sistema (Zambrano *et al*, 2010). Está fabricada en mampostería y un flotador que puede construirse en PVC. A esta recámara se debe proveer de una tapa a fin de evitar la dispersión de olores ofensivos y la caída de algún material dentro de la misma que pueda obstaculizar el paso del agua (Rendón, 2014; Zambrano *et al* 1999).

#### 14.3.4. Reactores metanogénicos

Está compuesto por un tanque cilíndrico negro, provisto de una tapa sujeta con tornillos y un tubo para la salida del biogás producido en su interior. Este tanque está empacado con trozos de guadua o de botellas plásticas no retornables, en los cuales se establecen los microorganismos metanogénicos, que transforman la contaminación orgánica soluble en biogás, permitiendo eliminar de esta forma más del 80% de la contaminación orgánica presente en las aguas mieles que llegan al sistema (Rendón, 2014; Zambrano *et al*, 2010).

#### 14.3.5. Microorganismos metanogénicos

En los sistemas de tratamiento anaerobio de aguas residuales, los microorganismos metanogénicos cumplen una función primordial dado que transforman la contaminación soluble en biogás. Para el caso de los SMTA se utiliza como fuente de los microorganismos metanogénicos las excretas de cerdo o de vacuno disueltas en agua en proporción 1:1 (Rendón, 2014).

#### 14.4. Diseño del SMTA

La información que se requiere para el diseño incluye la producción anual en @ de café pergamino seco (cps) y el porcentaje de producción en la semana pico en relación a la cosecha anual (%).

Para este caso se diseñará un sistema modular de tratamiento anaerobio (SMTA) que cuenta con las siguientes unidades: Una trampa de pulpas, una etapa hidrolítica acidogénica, una recámara dosificadora y una etapa metanogénica.

Para llevar a cabo el diseño del SMTA, fue necesario desarrollar las **ecuaciones 2 y 3** propuestas por Zambrano, Rodríguez, López & Zambrano, (2010); a fin de obtener el volumen específico de los tanques en cada una de las etapas del proceso de tratamiento, así:

En el caso del volumen para los reactores hidrolíticos se tiene que:

**Ecuación 2.** *Volumen del reactor hidrolítico/acidogénico.*

$$V_{RHA} = 0,000405 * S_p * P_a, \text{ entonces:}$$

$$V_{RHA} = 0,000405 * 6,44\% * 2.000 \text{ @) de c.p.s.} = 5,22 \text{ m}^3 \approx 5 \text{ m}^3$$

El resultado anterior se divide en dos (2), a fin de conocer la cantidad de tanques de  $2\text{m}^3$  que se requieren, así:

$$N^\circ \text{ de tanques de } 2\text{m}^3 = 5 / 2 = 2,5 \approx 3 \text{ tanques de } 2 \text{ m}^3$$

De tal modo que, para la finca Buena Vista se requiere un volumen necesario para el reactor hidrolítico/acidogénico de  $5 \text{ m}^3$  y 3 tanques de  $2 \text{ m}^3$ .

Ahora, para calcular el volumen necesario de los reactores metanogénico se utiliza la misma ecuación cambiando el valor de la constante, así:

**Ecuación 3.** *Volumen del reactor metanogénico.*

$$V_{RM} = 0,000338 * S_p * P_a$$

$$V_{RM} = 0,000338 * 6,44\% * 2.000 @ \text{ de c.p.s.} = 4,35 \text{ m}^3 \approx 4 \text{ m}^3$$

$$N^\circ \text{ de tanques de } 2 \text{ m}^3 = 4 / 2 = 2 \text{ tanques de } 2 \text{ m}^3$$

Al igual que en el caso anterior, fue necesario dividir por 2 el resultado del volumen obtenido ( $4 \text{ m}^3$ ) para calcular el número de tanques de  $2 \text{ m}^3$  que se necesitan, obteniéndose que en la finca se requieran 2 tanques de  $2 \text{ m}^3$  de capacidad.

Respecto a los demás componentes del SMTA, se tomaron los datos suministrados por Zambrano, *et al*, (2010), los cuales son los siguientes:

Para la elaboración de la *recámara dosificadora*, se emplean tanques de polietileno de 250 L de capacidad y 65 cm de altura. Para calcular el número de tanques a utilizar, se debe tener presente que una recámara dosificadora permite alimentar hasta cinco (5) reactores metanogénicos. Por otra parte, *la excavación en tierra* es de 1 m x 1 m x 1 m, ésta es rellena con tallos de café provenientes del zoqueo del café (para manejar sobrecargas hidráulicas o taponamientos en el sistema). Respecto a *la trampa de pulpas*, esta se fabrica en polietileno de 250 L.

A continuación, se muestran los respectivos cálculos realizados para el diseño del sistema de tratamiento secundario que complementa el SMTA:

#### 14.5. *Humedal artificial de flujo subsuperficial*

En el presente proyecto, se seleccionó como método secundario de tratamiento de las aguas mieles (mucílago) un humedal de flujo subsuperficial (SFS), puesto que éste de acuerdo a Rodríguez, N, (2009): proporciona un tratamiento efectivo en forma pasiva y minimiza la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de operadores calificados, no son costosos en cuanto al hecho de construirlos al igual que el costo de operación y mantenimiento de los procesos convencionales de alta calidad es bajo permitiendo el fácil acceso a pequeños y medianos caficultores. Otra de las ventajas de este sistema radica en que, la operación a nivel de tratamiento secundario es posible durante todo el año y, además, los sistemas de humedales proporcionan una adición valiosa al "espacio

verde" de la comunidad, e incluye la incorporación de hábitat de vida silvestre y oportunidades para recreación pública. Lo más relevante, es que los sistemas de humedales no producen biosólidos ni lodos residuales; los cuales requerirían tratamiento subsiguiente y disposición. De otro lado, son muy efectivos en la remoción de DBO, DQO, SST, metales y algunos compuestos orgánicos y microorganismos patógenos de las aguas residuales. La remoción de nitrógeno y fósforo a bajos niveles también es posible. Pues, la remoción de la carga orgánica con la implementación del pos tratamiento por medio de los humedales artificiales según Rendón (2014) en su estudio "*Implementación y evaluación de estrategias para el manejo integrado del agua en la estación central naranjal "CENICAFÉ"*": Alcanzó en términos de DQO un valor del 74%, en cuanto a la remoción de la turbidez esta se relacionó con los niveles de remoción de los sólidos suspendidos totales con valores que superan el 80%.

Los *SFS* se caracterizan porque la circulación del agua en los mismos se realiza a través de un medio granular (subterráneo), con una profundidad de agua cercana a los **0,6 m** (pues, ésta oscila entre 0,46 m a 0,76 m, **tabla 7. Valores recomendados para los parámetros de diseño de humedales**) (Crites y Tchobanoglous, 2000). El medio se planta con la vegetación emergente y por diseño, el nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie del medio (United States Environmental Protection Agency (U.S.EPA), 2000). De acuerdo a Rendón, 2014: "Para lograr una mayor eficiencia del sistema de pos tratamiento, el humedal será sembrado con especies de platanilla (*Heliconia spp*) a una distancia entre plantas de 50 cm". Dichas macrófitas fueron elegidas, puesto que además de su buen rendimiento en cuanto a tratamiento de aguas residuales se tiene que ayudan a incrementar la concentración de oxígeno disuelto en la columna de agua (Rendón, 2014). Sumado a lo anterior, el uso de estas macrófitas puede ser aprovechado para proporcionar una apariencia estética al sistema de humedales y así mejorar la aceptación del público, además de su mayor tasa de crecimiento y por tanto su mayor eficiencia en remoción y potencial económico de la comercialización de sus flores (Fuentes, sf).

Es así como, en este caso se adoptó el modelo de diseño de Reed, Crites, & Middlebrooks, (1995); Metcalf & Eddy (1995) y Crites & Tchobanoglous (1998); en sus correspondientes documentos, debido a que éstos se han implementado en el desarrollo de diseños de diversos estudios, lo cual hace que éstas técnicas sean apropiadas para la consolidación y diseño final del humedal artificial.

Lo primero que se determinó fue el caudal de diseño, el cual se halló mediante el método volumétrico empleando un balde de 10 L (recipiente aforado) y un cronómetro, éste procedimiento se realizó 3 veces con el objeto de minimizar posibles errores en la toma de datos, al final éstos fueron promediados obteniendo un caudal de diseño de  $Q = 2,2427 \text{ L/s}$ . Dicho resultado se pasó a L/d y luego a  $\text{m}^3/\text{d}$ , a fin de un mejor manejo de unidades dadas las fórmulas del diseño del humedal, así:

Pasando el resultado a L/s se tiene:

$$Q = 2,2427 \frac{L}{s} * \frac{86400 s}{1 d} = 193769,28 \frac{L}{d}$$

Ahora bien, al pasarlo a m<sup>3</sup>/d se obtiene lo siguiente:

$$Q = 193769,28 \frac{L}{d} * \frac{0,001 m^3}{1 L} = 193,76928 \frac{m^3}{d}$$

De tal forma que, el caudal de diseño para el humedal artificial es de **Q = 193,76928 m<sup>3</sup>/d.**

Para llevar a cabo el diseño hidráulico se tomó en cuenta los parámetros dados por Crites y Tchobanoglous, (2000), los cuales son:

- Caudal afluente.
- Características físicas e hidráulicas del medio soporte: porosidad del medio soporte (% de huecos), la conductividad hidráulica o la permeabilidad intrínseca y la temperatura promedio del agua.
  - Características del afluente (DBO5, concentración de nitrógeno, de fósforo, de trazas de metales pesados, de patógenos, etc.).
  - Valor de la constante de velocidad de primer orden del sistema a 200 C (K20).
  - Características de las plantas emergentes que se van a utilizar, fundamentalmente la profundidad radicular máxima.
  - Características de las plantas emergentes que se van a utilizar, fundamentalmente la profundidad radicular máxima.
  - Características deseadas en el efluente. (DBO5, concentración de nitrógeno, de fósforo, de trazas de metales pesados, de patógenos, etc.).
  - Tiempo de detención hidráulica, Velocidad de carga de SST, Carga orgánica, tiempo de retención real.

Los anteriores parámetros permitieron llevar a cabo el cálculo de: área superficial, área de la sección transversal, profundidad, ancho y longitud del estanque, tiempo de retención, carga orgánica, carga hidráulica, constante de velocidad de primer orden dependiente de la temperatura y tiempo de detención real. A continuación, se presentan los respectivos cálculos de cada uno de los criterios mencionados anteriormente, los cuales fueron basados en la metodología propuesta por Reed, Crites, & Middlebrooks (1995), Metcalf & Eddy (1995) y United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA), 1999).

*14.4.1. Cálculo de la constante de velocidad de primer orden dependiente de la temperatura (K<sub>T</sub>)*

Esta constante se calcula mediante la siguiente expresión:

$$K_T = K_{20}(1,06)^{(T-20)}$$

Donde,  $K_{20} = 0,678d^{-1}$

Entonces,  $K_{20} = 0,678d^{-1} (1,06)^{(22,2-20)}$

Finalmente, se tiene que:  $K_{20} = 0,771d^{-1}$

#### 14.4.2. Cálculo del área superficial

El área superficial del SFS se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$A_s = L * W = \left[ \frac{Q \ln \left( \frac{C_o}{C_e} \right)}{K_T * d * n} \right]$$

Reemplazando valores:  $A_s = \left[ \frac{193,76928 \frac{m^3}{d} * \ln \left( \frac{13896 \frac{mg}{L}}{400 \frac{mg}{L}} \right)}{0,771 d^{-1} * 0,6 m * 0,32} \right]$

Se tiene que,  $A_s = 4644,222m^2$

**Nota:** En este caso se tomó como porcentaje de porosidad (n) igual a 0,32 teniendo en cuenta las características típicas del medio en humedales de flujo subsuperficial, según Reed, Crites & Middlebrooks (1995) las cuales se encuentran en la **tabla 8**. Dicho valor corresponde al medio de tipo arena gruesa.

#### 14.4.3. Área de la sección transversal

Para el cálculo del área transversal del humedal (Ac), se supone una pendiente del lecho (S) del 1% y un valor para la conductividad hidráulica (Ks) de 500 m/d teniendo en cuenta

los valores de la **tabla 8**. *Características típicas del medio en humedales de flujo subsuperficial*, presentada por Reed, Crites & Middlebrooks (1995).

$$A_c = \left[ \frac{Q}{K_s * S} \right]$$

$$\text{Reemplazando valores: } A_c = \left[ \frac{193,76928 \frac{m^3}{d}}{500 \frac{m}{d} * 0,01} \right]$$

$$\text{Finalmente, se tiene que: } A_c = 38,754m^2$$

#### 14.4.4. Ancho del estanque

Para este cálculo se empleó la metodología utilizada por Metcalf & Eddy (1995):

$$W = \left[ \frac{A_c}{d} \right]$$

$$\text{Reemplazando se tiene que: } W = \left[ \frac{38,754m^2}{0,6 m} \right]$$

$$\text{Finalmente se obtiene: } W = 64,59 m$$

#### 14.4.5. Largo del estanque

Para este cálculo se empleó la metodología utilizada por Reed, Crites y Middlebrooks, (1995):

$$L = \left[ \frac{A_s}{W} \right]$$

$$\text{Reemplazando valores: } L = \left[ \frac{4644,222m^2}{64,59 m} \right]$$

Se obtiene que: **L = 71, 90 m**

#### 14.4.6. Tiempo de retención hidráulica

Para calcular el TRH se empleó la metodología propuesta por Metcalf y Eddy, (1995).

$$\mathbf{TRH} = \left[ \frac{L * W * n * d}{Q} \right]$$

$$\text{Reemplazando valores: } \mathbf{TRH} = \left[ \frac{71,90\text{m} * 64,59\text{m} * 0,32 * 0,6\text{m}}{193,76928 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}} \right]$$

Finalmente, se obtiene: **TRH = 4, 6 d ≈ 5 d**

#### 14.4.7. Carga hidráulica

La carga hidráulica en las lagunas que utilizan macrófitas, se calcula mediante la expresión según U.S.EPA, (1999):

$$L_W = \left[ \frac{Q}{L * W} \right]$$

$$\text{Reemplazando los valores: } L_W = \left[ \frac{193,76928 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{71,90\text{m} * 64,59\text{m}} \right]$$

Finalmente, se obtiene:  **$L_W = 0,04173 \frac{\text{m}}{\text{d}}$**

#### 14.4.8. Carga orgánica

La carga orgánica en las lagunas que utilizan macrófitas, se calcula mediante la expresión, según U.S.EPA, (1999):

$$C_L = \left[ \frac{Q * C_O}{A_S} \right]$$

$$\text{Reemplazando valores: } C_L = \left[ \frac{193,76928 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} * 13896 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}}{4644,222\text{m}^2} \right]$$

$$\text{Se obtiene que: } C_L = 579,778 \frac{g}{m^2 * d}$$

$$\text{Pasando el resultado a } \frac{kg}{ha * d}: C_L = 5797,78 \frac{kg}{ha * d}$$

#### 14.4.9. Tiempo de detención real

Para los **SFS**, el tiempo de detención real es función de la conductividad hidráulica del medio y de la longitud del depósito y se calcula mediante la siguiente expresión de acuerdo a Metcalf y Eddy, (1995):

$$TRR = \left[ \frac{L}{K_s * S} \right]$$

$$\text{Reemplazando los valores se tiene que: } TRR = \left[ \frac{71,90m}{500 \frac{m}{d} * 0,01} \right]$$

Finalmente, se tiene que: **TRR = 14,38 d ≈ 14 d**

Al finalizar los respectivos cálculos del diseño final y estructura del humedal para el diseño final y planteado como sistema de tratamiento secundario y los respectivos para el SMTA objetivo de este proyecto, se presenta una tabla resumen que reúne las dimensiones correspondientes a cada sistema, los cuales fueron diseñados acorde al caudal real que se genera en el beneficio húmedo del café de la finca Buena Vista:

**Tabla 17.** Dimensiones finales del SMTA y del humedal artificial de flujo subsuperficial para tratamiento de agua miel o mucílago generado en la Finca Buena Vista, Planadas, Tolima.

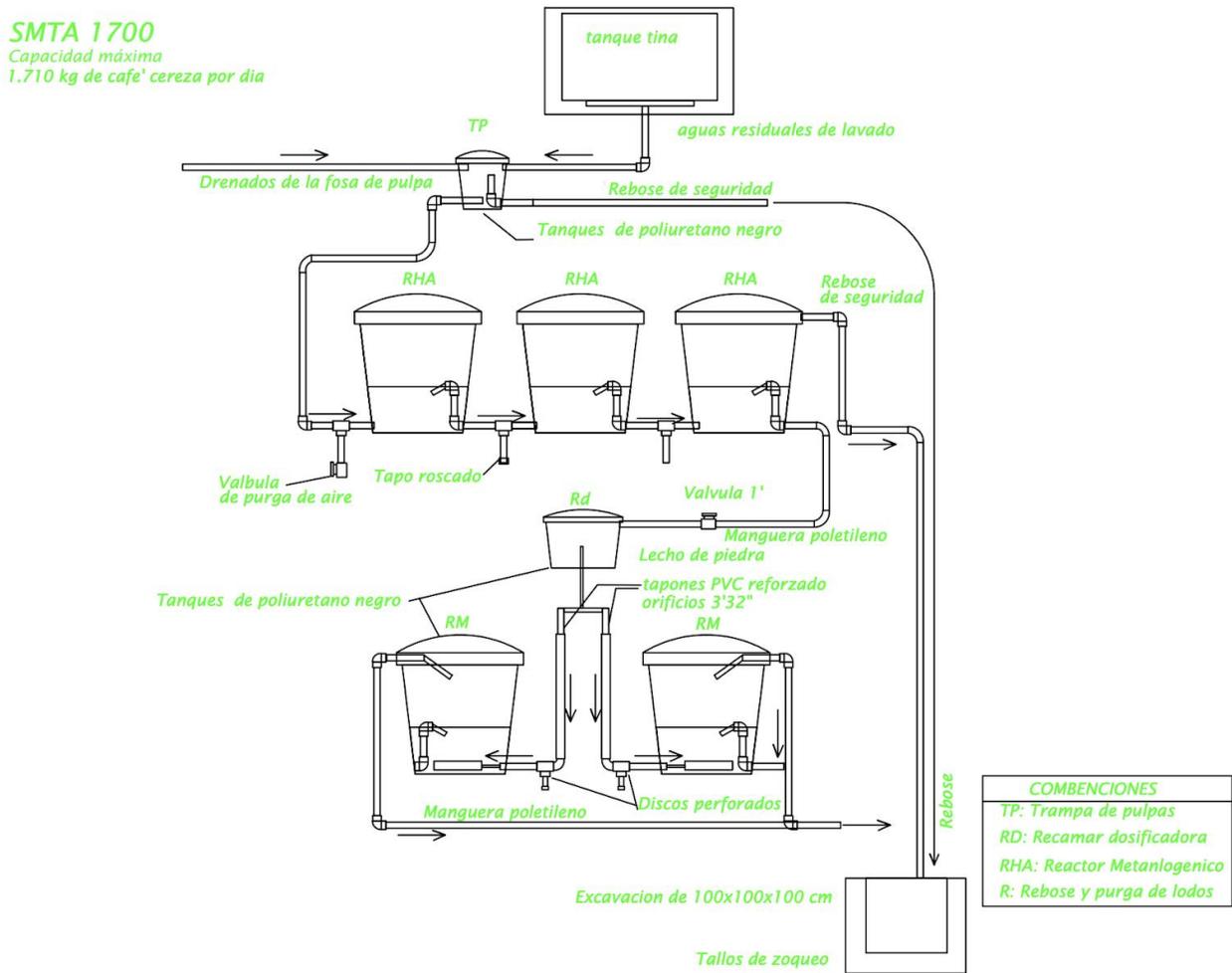
SMTA		
Parámetro	Valor	Unidad
Volumen del reactor hidrolítico/acidogénico	5	m <sup>3</sup>
Volumen del reactor metanogénico.	4	m <sup>3</sup>
Volumen de la recámara	250	L

dosificadora		
Altura de la recámara dosificadora	65	Cm
Volumen de la trampa de pulpas	250	L
Excavación en tierra (dimensionamiento)	1*1*1	m
<b>Humedal artificial de flujo subsuperficial</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Caudal	193,76928	m <sup>3</sup> /d
K <sub>20</sub>	0,771	d <sup>-1</sup>
Área superficial	4644,222	m <sup>2</sup>
Área de la sección transversal	38,754	m <sup>2</sup>
Ancho del estanque	64,59	m
Largo del estanque	71,90	m
Tiempo de retención hidráulica	5	d
Carga hidráulica	0,04173	m/d
Carga orgánica	5797,78	kg/ha*d
Tiempo de detención real	14	d

*Fuente:* Autores, 2019.

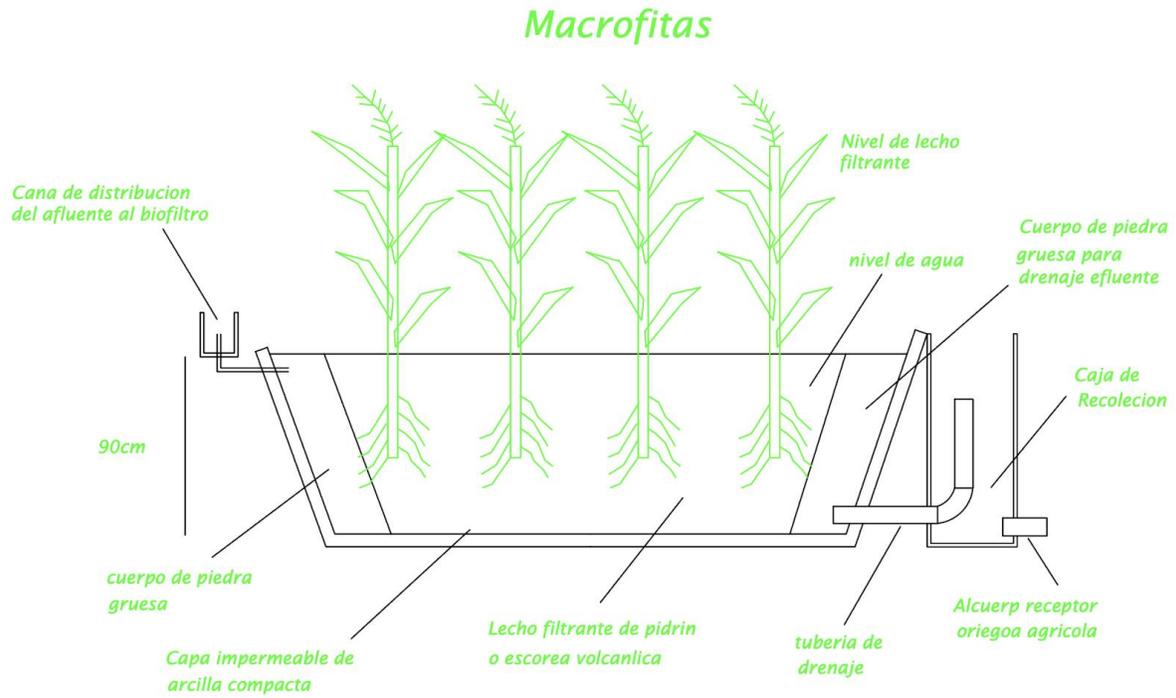
Finalmente, se presentan los respectivos diseños de los dos sistemas de tratamiento a implementar en la finca Buena Vista:

**Figura 13.** Diseño del Sistema de Tratamiento Modular (SMTA).



**Fuente:** Autores, 2019.

Figura 14. Diseño del humedal de flujo subsuperficial.



Fuente: Autores, 2019.

## 15 Conclusiones

- Se determinó que las aguas mieles (mucílago) producto del beneficio húmedo del café aportan una alta carga de materia orgánica y sustancias que afectan drásticamente la calidad del cuerpo hídrico o suelo donde son vertidas directamente sin ningún tipo de tratamiento previo, logrando cambiar sus características fisicoquímicas afectando tanto a la vida acuática como terrestre, pues para este estudio todos los valores exceden los límites permisibles según la **Resolución 631:2015**.

- Los sistemas de tratamiento de aguas mieles, actualmente requieren una alta inversión económica que muchos campesinos no están dispuestos a pagar porque son pequeños o medianos productores; es por esto que se debe diseñar un sistema de fácil acceso para cualquier tipo de caficultor que logre disminuir la carga contaminante de las aguas mieles para dar cumplimiento a la normativa legal vigente.

- La propuesta de un sistema de tratamiento complementario como lo es el humedal artificial de flujo subsuperficial, se estableció después de realizar una revisión bibliográfica y determinar que este sistema se caracteriza por tratar con efectividad aguas que presentan altos niveles de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), Sólidos suspendidos (SS) y nitrógeno. Además, se eligió un humedal de flujo subsuperficial (SFS) porque este tipo de humedal tiene la ventaja de evitar problemas de moscos, ya que el agua fluye por debajo del medio poroso (grava) y no está expuesta como ocurre con el humedal de flujo libre (FWS).

## 16 Recomendaciones

- Se recomienda profundizar con respecto a los análisis de las características de las aguas mieles (mucílago) generadas en el proceso de beneficio húmedo del café teniendo en cuenta que pueden existir otros factores o parámetros críticos adicionales que no fueron abarcados en este trabajo porque la normatividad legal vigente no los exige; De este modo se obtendría un mejor resultado en el sistema de tratamiento modular a implementar, pues se tendría de manera más específica las sustancias a reducir y tratar.

- Es importante que se realice el análisis In Situ de algunos parámetros que no son exigidos en la norma pero que sus resultados pueden ser significativos al momento de elegir un sistema de tratamiento para estas aguas, como lo son: Nitratos, Nitritos, Conductividad, Temperatura y Oxígeno Disuelto. Además, realizar con un tiempo previo la búsqueda de laboratorios acreditados por el IDEAM y de esta forma, evitar errores en los resultados obtenidos.

- Al momento de proponer un sistema de tratamiento de agua residual, tener en cuenta el área que se necesita para su correcta implementación y de esta manera, rectificar en una visita de campo la factibilidad de que este sea empleado. Además, se podría realizar el cálculo de los ahorros económicos que podrían llegar a tener los caficultores al cumplir con la normatividad legal vigente a lo largo del tiempo.

- Realizar capacitaciones con profesionales que logren dar a conocer a la comunidad cafetera las ventajas y desventajas de implementar un sistema de tratamiento, costos, medidas de manejo y los sellos a los que pueden acceder como lo es *Rainforest Alliance Certified* que se obtiene cumpliendo con los tres pilares de sostenibilidad: económico, social y ecológico. Siendo una opción de que puedan acceder a ayudas y su materia prima logre adquirir un poco más de reconocimiento.
- Los propietarios de la finca sugieren que al momento de diseñar el humedal artificial se siembran pastos de corte especialmente el *pasto Vetiver* que es una gramínea perenne, con un sistema radical fuerte que crece verticalmente, además, en Colombia se ha logrado adaptar a temperaturas frías como la que posee la finca Buena Vista y crece muy bien bajo condiciones húmedas. Esto con el fin de que el humedal sea doble propósito y este pasto sirva de alimento para el ganado.
- Realizar los cálculos de la utilidad de la implementación de un sistema de tratamiento de agua residual con respecto a los cobros que pueden llegar a tener si son vigilados por una corporación autónoma regional (CORTOLIMA) debido a que generan vertimiento y hacen uso del agua sin tener alguna concesión.
- Se debe tener en cuenta que, al momento de contar con tantos procesos en el beneficio húmedo del café, debe existir una programación mensual en donde una persona capacitada pueda revisar los tanques de almacenamiento, la tubería que mueve el agua y de esta forma evitar desperdicios de agua como el evidenciado a la hora de medir caudales en la visita a la finca.

## 17 Bibliografía

- Almégica, A., Muñoz, M. (2013). *pH, Historia de un concepto. Análisis en textos de educación superior. Tesis doctoral*. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional.
- Álvarez, J., Smeltekop, H., Cuba, N. & Loza, M. (2011). Evaluación de un sistema de tratamiento de aguas residuales del pre beneficiado de café (*Coffea arábica*) implementado en la comunidad Carmen Pampa provincia Nor Yungas del Departamento de La Paz. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 2(1), 34-42.
- Asociación Nacional de Café (ANACAFE). (2005). *Manual de Beneficiado Húmedo del Café*. Guatemala.
- Alcaldía Municipal de Planadas Tolima. (2000). Plan de Ordenamiento Territorial de Planadas Tolima. *Escuela Superior de Administración Pública (ESAP)*, 498.
- Agencia Canadiense para el Desarrollo Internacional. (CIDA). (2005). Planes de gestión integrada del recurso hídrico. Manual de capacitación y guía operacional.
- Aguasistec. (2017). Solución en tratamientos de agua.
- Álvarez, G., & Arcilao, D. (2011). *Despulpado del Café sin Agua*. Federación Nacional de Cafeteros, Avances Técnicos No.164, Chinchiná.
- Arévalo, D., & Sabogal, H. (2011). *Generación de energía: Criterios de diseño para sistemas de tratamiento anaerobio UASB*. Universidad del Valle, Curso de Tratamiento Anaerobio de las Aguas Residuales, Santiago de Cali.
- Barba, L. (2002). Conceptos básicos de la contaminación del agua y parámetros de medición. Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente. Área Académica Ingeniería Sanitaria y Ambiental Santiago de Cali. p 27-35.
- Blasco, E. (2015). *Actualidad Jurídica Ambiental*. Unidad de Investigación y Formación del Centro Internacional de Estudios de Derecho Ambiental (CIEDA-CIEMAT).
- Bokova, L. (Abril de 2010). Agua elixir de vida. (M. d. Banús, Ed.) *STAFF- Elementalwatson "la" revista*, 1(1).
- Castillo, M. (1993). Traitement des eaux résiduaires de d'usines de transformation du café par voie humide. Analyse d'un projet pilote dans la région Xalapa - Coatepec. Coatepec.
- Class, M. (2003). Realización de una planta piloto de tratamiento descentralizada. Documentación e investigación de una pequeña planta técnica biológica para aguas residuales de la producción del café, desde la planeación hasta la optimización. Tesis

doctoral. Facultad de Técnicas Ambientales y de Biotécnica. Fachhochschule Huyesen Friedberg, Alemania.

Cárdenas, R., & Ortiz, J. (2009). Tratamiento de aguas mieles del café. *Centro Nacional de Investigaciones del Café*, 7. Cárdenas, C.G, Ortiz, J.E. (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*. Manizales: Universidad de Manizales.

Cárdenas, C.G, Ortiz, J.E. (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*. Manizales: Universidad de Manizales.

Cafeteros, F. N. (2011). Construyendo el modelo para la gestión integrada del recurso hídrico en la caficultura colombiana. *Cenicafé*, 28-91.

Cárdenas, R., & Ortiz, J. (2009). Tratamiento de aguas mieles del café. *Centro Nacional de Investigaciones del Café*, 7.

Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFÉ). (2011). Construyendo el modelo para la gestión integrada del recurso hídrico en la caficultura colombiana. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia.

Cerquera, M. (2017). Evaluación de desempeño del reactor hidrolítico acidogénico de flujo descendente como tratamiento primario de las aguas mieles del café en el departamento del Valle del Cauca. Tesis de posgrado. Universidad de Manizales. Manizales, Colombia.

Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFÉ). (2016). Beneficio del café.

Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFÉ). (2011). Construyendo el modelo para la gestión integrada del recurso hídrico en la caficultura colombiana.

Crites, R. & Tchobanoglous, G. (2000). Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados. Bogotá, Colombia: Editorial McGraw-Hill.

Contreras, K, Mendoza, Y, Salcedo, J, Olivero, R., & Mendoza, G. (2015). El Nopal (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural complementario en la clarificación de agua. *SCIELO*, 10(1):40-50.

Erick, S. (1996). *Valoración económica de la contaminación de las fuentes de agua por los desechos de la industria del beneficiado húmedo del café: El uso del concepto de costo defensivo*. Tesis de Posgrado, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Escuela de Posgrado de Costa Rica.

- Faurés, J. (2013). Afrontar la escasez de agua Un marco de acción para la agricultura y la. *Ed. Cooperación Italiana para el Desarrollo.*
- Federación Nacional de Cafeteros. (2010). Un producto especial: Post cosecha. Recuperado el 28 de septiembre del 2019 de: [http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre\\_el\\_cafe/el\\_cafe/post-cosecha/](http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre_el_cafe/el_cafe/post-cosecha/)
- Federación Nacional de cafeteros. (2012). Glosario Cafetero para conocer más sobre el Café de Colombia. Colombia: Al grano - Noticias e información que lo acerca al mundo cafetero. Recuperado el 22 de febrero del 2019 de: <https://www.federaciondecaseteros.org>
- Federación Nacional de Cafeteros. (2015). Tolima, Café de Alta Calidad: Caracterización de la Caficultura. Comité de Cafeteros del Tolima. Programa SICA. Recuperado el 10 de octubre del 2019: Comité de cafeteros.
- Fernández, A. (11 de Diciembre de 2012). El agua: un recurso esencial. *Química Viva*, 11(3), 147-170.
- Fuentes, R. (sf). Evaluación de Canna Sp. y Heliconia Sp. Para el tratamiento de aguas servidas mediante un humedal artificial a escala piloto. Tesis de posgrado. Universidad Simón Bolívar. Barranquilla: Colombia.
- Galindo, X. (2011). Producción e industrialización de Café Soluble. Caso: Solubles Instantáneos. Tesis de grado. Guayaquil: Universidad de Guayaquil.
- Galindo, A., Constantino, M., & Benavides, P. (2012). Evaluación de macroinvertebrados acuáticos y calidad de agua en quebradas de fincas cafeteras de Cundinamarca y Santander, Colombia. *Revista Cenicafé*, 1, 70-92.
- García, Y. (2017). *Establecimiento de un sistema filtro para tratamiento de aguas mieles en una finca de Ibagué, promoviendo los tres pilares de producción y sostenibilidad (Económico, social y ambiental)*. Tesis, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y Medio Ambiente, Ibagué Tolima.
- Gamboa, O. R. (2013). *Dimensionamiento y costeo de un reactor anaerobio de media bolsa a nivel de planta piloto para la producción de biogás a partir de aguas mieles del café*. Tesis de grado. San José, Costa Rica: Ciudad Universitaria Rodrigo Facio.
- Garavito, A., & Puerta, G. (1998). *Utilización del mucílago del café en la alimentación de cerdos*. Avances técnicos Cenicafé 248. Federación Nacional de Cafeteros. p2. [Online].
- García, M. (2015). Derecho al agua y calidad de vida. *RIDE Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, 6(11).
- Gil, M., Soto, A., Usma, J., & Gutiérrez, O. (2012). Emerging contaminants in waters: effects and possible treatments. *SCIELO*, 7(2). 52-53.

- Giraldo, G. (1995). Manual de análisis de agua. *Universidad Nacional de Colombia*. Sede Manizales. Departamento de Ciencias. 178p.
- Guilombo, J.G. (2017). Establecimiento de dos sistemas filtro como tratamiento para aguas residuales del café, en el municipio de Planadas, Tolima. Tesis de grado. Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD).
- Gearheart, R.A. (1999). Free water surface wetlands for wastewater treatment: A technology assessment. Florida: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water Management, U.S. Bureau of Reclamation, Phoenix, AZ.*
- Guerrero, J. (2007). Proyecto de rehabilitación del sector cafetalero en Nicaragua. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Diagnóstico y diseño de beneficios húmedos del café. p 16-17. Nicaragua.
- González, A. (2016). Manual de Producción y Consumo Sostenible Gestión del Recurso Hídrico: Sector Cafetero. Corporación Autónoma Regional de del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA) & Centro Nacional de Producción Más Limpia. p 56-69.
- Gobernación del Tolima. (2014). Estadísticas 2011-2014. Secretaria de Planeación y TIC: Planadas, Tolima. 126.
- Gómez, R., & Tascón, C. (2011). Manejo de lixiviados y aguas de lavado en el proceso de Beneficio Húmedo del Café. *Revista de Cenicafé, I*, 46-60.
- Gutiérrez, N.; Valencia, E.; Aragón, R. (2014). Eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> y SS en sedimentador y lecho filtrante para el tratamiento de aguas residuales del beneficio de café (*Coffea arábica*). *Colombia Forestal*, 17(2), 151-159.
- Gutiérrez, N., Valencia, E., Aragón, R.A. (2014). Eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> y SS en sedimentador y lecho filtrante para el tratamiento de aguas residuales del beneficio de café (*Coffea arábica*). *Colombia Forestal*, 17 (2): 151-159.
- Guerrero, J. (2007). Proyecto de rehabilitación del sector cafetalero en Nicaragua. Instituto Interamericano de Cooperación para la agricultura. Diagnóstico y diseño de beneficios húmedos del café.
- Hernández, J & Hidalgo, G. (2000). Evaluación de tres metodologías para reducir los niveles de contaminantes en efluentes de tratamiento primario de las aguas residuales del procesamiento de café en Costa Rica. Tesis Licenciatura. Universidad EARTH. Guácimo, Costa Rica. 200; 85.
- Hernández, R., Fernández, C., Baptista, M.P. (2014). Metodología de la investigación. México D.F: Interamericana Editores, S.A. de C.V. Capítulo I.
- Hernández, R., Fernández, C., Baptista, M.P. (1997). Metodología de la investigación. México D.F: MC The McGraw-Hill Companies, Inc. Capítulo II.

- Hernández, C. F. (2006). *Metodología de Investigación* (4ª Edición ed.). México: McGraw-Hill.
- Hernández, S. F. (2014). Metodología de investigación. (S. D. McGraw-Hill / INTERAMERICANA EDITORES, Ed. (6).
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2003). NTC-ISO 5667-1. Calidad del Agua: Muestreo. Directrices para el Diseño de Programas de Muestreo. (2), 26.
- ICONTEC. (2004). Norma técnica colombiana: NTC-IS0 5667-3. Calidad del agua, muestreo parte 3: Directrices para la preservación y manejo de las muestras.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2006). Conductividad eléctrica por el método electrométrico en aguas. 02, 1-7. Recuperado el 24 de marzo de 2019: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Conductividad+El%C3%A9ctrica.pdf/f25e2275-39b2-4381-8a35-97c23d7e8af4>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2007). Instructivo para la toma de muestras de aguas residuales. Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. 03, 1-17. Recuperado el 24 de marzo de 2019: [http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38158/Toma\\_Muestras\\_AguasResiduales.pdf/f5baddf0-7d86-4598-bebd-0e123479d428](http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38158/Toma_Muestras_AguasResiduales.pdf/f5baddf0-7d86-4598-bebd-0e123479d428)
- IGAC. (2016). Planadas, uno de los municipios Tolimense en los que renacerá la paz. *Diccionario Geográfico de Colombia*. Recuperado el 21 de marzo del 2019 de: <https://igac.gov.co/noticias/planadas-uno-de-los-municipios-tolimense-en-los-que-renacera-la-paz>
- IGAC. (2010). Decreto 3930 de 2010. Usos del agua y residuos líquidos. . *Instituto Geográfico Agustín Codazzi*.
- Isaza, D., & Zambrano, A. (2013). Demanda Química de Oxígeno y Nitrógeno Total, de los subproductos del proceso tradicional de beneficio Húmedo del café. *Cenicafé*, 4, 279-289.
- Isaza, H. (2013). Sistema de tratamiento anaerobio para las aguas mieles. *Cenicafé*, 37-64.
- Isaza, H. (2013). Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio para las aguas mieles. *II*, 36.
- Kadlec, R. & Knight. R. (1996). *Treatment Wetlands*. Boca Raton, Florida: CRC Press. Taylor & Francis Group. 1st Edition.
- López, G., Bautista, R., Moreno, G. & Dentan, E. (1989). Factors related to the formation of "overfermented coffee beans" during the wet processing method and storage of coffee. COLLOQUE Scientifique international sur le café. París: ASIC. 373-384.

- López, U., & Orozco, P. (2006). Tratamiento anaerobio de las aguas mieles del café. *Boletín técnico N°29*, 17-29.
- Metcalf, E. (1985). Ingeniería Sanitaria: Tratamiento, evacuación, y reutilización de aguas residuales. Barcelona: *Editorial Labor*, 2ª edición.
- Metcalf & EDDY. (1995). Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Tercera edición. Madrid, España: Editorial McGraw-Hill. 2 Volúmenes.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Resolución 631 de 2015: Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Capítulo VI y Artículo 9., Agroindustria.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). Gobierno de Colombia presenta para aprobación del Congreso el protocolo para proteger las aguas del Caribe.
- Montero, B.A., Sandí, J.A. (2009). La contaminación de las aguas mieles en Costa Rica: Un conflicto de contenido ambiental (1840-1910). *Diálogos Revista Electrónica de Historia*, 10 (1): 4-15.
- Molina, A., Villatoro, R. (2006). Propuesta de tratamiento de aguas residuales en beneficios húmedos de café. Tesis de grado. El Salvador: Universidad El Salvador.
- Monje, C.A. (2011). Metodología de la investigación cuantitativa y cualitativa: Guía Didáctica. Neiva: Universidad Surcolombiana.
- Moreno, N & Romero, A. (2016). *Evaluación de diferentes métodos para la transformación de la pulpa de café en abono orgánico en fincas cafeteras*. (Tesis de posgrado). Universidad de Manizales, Manizales, Colombia.
- Olmos, R., Sepúlveda, R., & Villalobos, F. (2003). El agua en el medio ambiente: Muestreo y análisis. México: Plaza y Valdés, S.A Cap. 2.
- Olvera, J.R. , Islas, J. (2010). Biodegradación anaerobia de las aguas generadas en el despulpado del café. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 12 (2): 230-239.
- Olvera, J., & Gutiérrez, J. (2010). Biodegradación anaerobia de las aguas generadas en el despulpado del café. *Revista Colombiana Biotecnol*, XII (2), 230-239.
- Orozco, P. (2003). Arranque y puesta en marcha de un reactor metanogénico tipo UAF para el tratamiento de las aguas residuales del lavado del café. Tesis de grado. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.

- Oliveros, C.E., Ramirez, C.A., Sanz, J.R., Peñuela, A.E., Pabón, U.J. (2013). Secado solar y secado mecánico del café: Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura. Chinchiná: Cenicafé.
- Ojeda, L. (2015). Técnicas de Muestreo de Aguas: Recolección, Manejo y Preservación de Muestras. *Hanna Instruments.*, 32-34.
- Ojeda, L. (2015). Técnicas de Muestreo de Aguas: Recolección, Manejo y Preservación de Muestras. (1), 32.
- Ortiz, J., & Cristóbal, R. (2014). *Manejo Integrado del Recurso Agua, En el Proceso de Beneficio Húmedo del Café, para la Asociación de Productores de Café Especial "Acafeto" en el municipio de Fresno, Departamento del Tolima.* Universidad de Manizales, Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Manizales Caldas: Universidad de Manizales.
- Osorio, P. (sf). *El filtro anaeróbico con guadua: Una alternativa para el tratamiento de las aguas mieles.* Cali, Colombia: Library International Reference Centre for Community Water Supply and Sanitation NRC.
- Palacio, L. P. (sf). *Diseño de un sistema de biofiltros para el tratamiento de aguas residuales que llegan de manera directa al humedal Neuta en el municipio de Soacha.* 30-32.
- Paredes, J. (2017). *USMP- Universidad de San Martín de Porres.*
- Peñuela, A., Pabón, J., Rodríguez, N., & Oliveros, C. (2010). *Evaluación de una enzima pectinolítica para el desmucilaginado del café.* *Cenicafé*, 3(61), 241-250.
- Pérez, M. (2013). *pH, Historia de un concepto. Análisis en textos de educación superior. Tesis doctoral.* Universidad Pedagógica Nacional. Bogotá, Colombia. p 8.
- Pértegas., S. P. (2002). *Investigación: Investigación cuantitativa y cualitativa* (Vol. 9). España: Unidad de Epidemiología Clínica y Bioestadística. Complejo Hospitalario-Universitario Juan Canalejo.
- Puerta, G. (2015). *La inocuidad y calidad del café requiere de agua potable para su beneficio y preparación de la bebida.* [En línea]. Disponible en internet: <https://docplayer.es/17157495-La-inocuidad-y-calidad-del-cafe-requiere-de-agua-potable-para-su-beneficio-y-preparacion-de-la-bebida.html>.
- Puerta, G., Ríos, S. (2011). Composición química del mucílago de café, según el tiempo de fermentación y refrigeración. *Revista Cenicafé*, 62 (2): 23-40.
- Ramallo, R.S. (1991). *Tratamiento de Aguas Residuales*, (1ª edición en español). Barcelona: Reverté S.A.

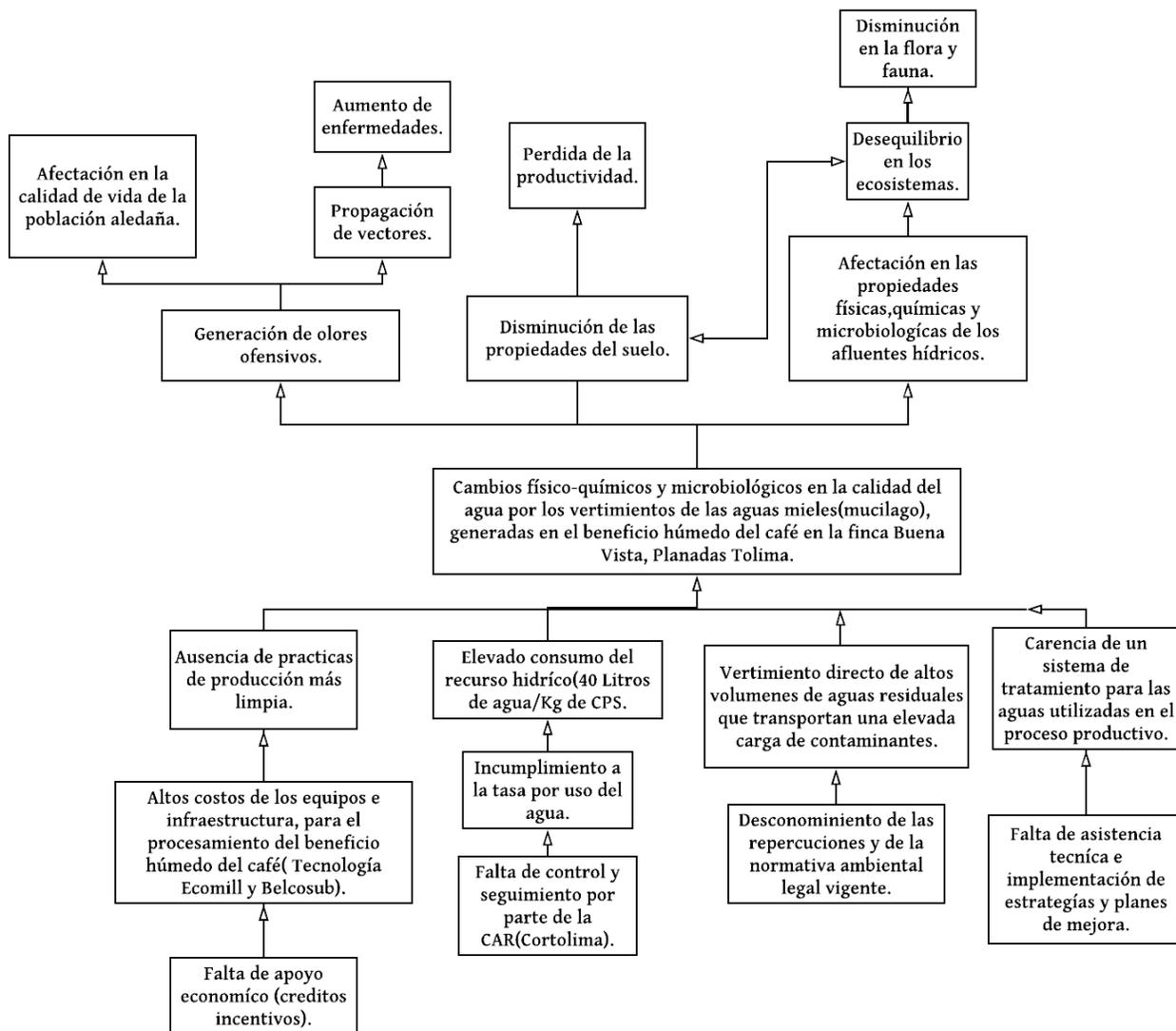
- Rendón, J. (2014). Implementación y evaluación de estrategias para el manejo integrado del agua en la estación central naranjal “CENICAFÉ”. Tesis posgrado. Universidad de Manizales, Manizales, Colombia.
- Reed, S. C.; Crites, R.W.; Middlebrooks, E. J. (1995). Natural Systems for Waste Management and Treatment. USA: McGraw-Hill, Inc. Second Edition.
- Romero, J. (2005). Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principios de diseño. Bogotá: *Escuela Colombiana de Ingeniería*.
- Rodríguez, S., Pérez, R.M., Fernández, M. (2000). Estudio de la biodegradabilidad anaerobia de las aguas residuales del beneficio húmedo del café. *Revista Interciencia*, 25 (8): 386-390.
- Rodríguez, N. (2009). Estudio de un biosistema integrado para el postratamiento de las aguas residuales del café utilizando macrófitas acuáticas. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia: España.
- Roa, G., Oliveros, C., Álvarez, J., Ramírez, C., Sanz, J., Dávila, M., Álvarez, R., Zambrano, D., Puerta, G., Rodríguez, N. (1999). Beneficio ecológico del café. Manizales: Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFÉ).
- Roy, E, Navaz, M, Batiz, C., & Kuja, L. (2017). Informe técnico para la construcción de sistemas de tratamiento y aprovechamiento de residuos del café. Embajada de España e Perú. Ingeniería Sin Fronteras. p 8-24.
- Rodríguez, N., Sanz, J., Oliveros, C & Ramírez, C. (2015). *Beneficio del café en Colombia: Prácticas y estrategias para el ahorro, uso eficiente del agua y el control de la contaminación hídrica en el proceso de beneficio húmedo del café*, (1ª edición), Manizales, Colombia: FNC- Cenicafé.
- Rodríguez, S. (2011). Manual sobre Disciplina Ambiental: El derecho a un medio ambiente adecuado. Mecanismos de protección. 14.
- Rodríguez, A., Letón, P., Rosal, R., Dorado, M., Villar, S., & Sanz, J. (2006). Informe de vigilancia tecnológica: Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. CEIM Dirección General de Universidades e Investigación. Elece Industria Gráfica, 2(8), 8-11.
- Rodríguez, L. (2017). Propuesta de diseño de humedal artificial de flujo subsuperficial, como sistema de tratamiento del agua miel generada en el beneficio húmedo del café, variedad castillo. Estudio de caso finca el Triunfo, Ubaque -Cundinamarca. Tesis de pregrado. Universidad El Bosque: Bogotá, D.C.
- Salazar, V. T. (2013). Tipos de biofiltros: Biofiltros una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. 34-36.

- Sánchez, L., Vera, R., Henk, V., Cipriani, G. (2016). *Mejor Ambiente: Manual para la construcción de sistemas de tratamiento de aguas residuales en beneficios pequeños de café*. Carazo, Nicaragua: UTZ CERTIFIED.
- Sawyer, C., McCarty, P & Parkin, G. (2001). *Química para ingeniería ambiental*, (4ª edición en español), Bogotá D.C., Colombia: McGraw-Hill.
- Sistema de Información Ambiental De Colombia (SIAC). (2017). *Calidad del agua*. Res 883/2018.
- Tesoro Ambiental para Colombia. (2018). *Tratamiento Anaerobio*. [Online]. Centro de Referencia y Documentación.
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., Trillo, M. J. D., Trillo, F. I., Cajigas, A., & Metcalf & Eddy. (1998). *Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- Tobón, C. (2018). “*Producir café de manera tradicional incrementa la huella hídrica*”. Departamento de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional de Colombia (U.N.) Sede Medellín. Agencia de noticias de la Universidad Nacional de Colombia.
- United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA). (1999). *Manual. Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. Cincinnati, Ohio. National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development. EPA 625/R – 99/010.
- United States Environmental Protection Agency (U.S.EPA). (2000). *Folleto Informativo de Tecnología de Aguas Residuales. Humedales de flujo subsuperficial*. EPA 832-F-00-024. Office of Water Washington, D.C.
- Valencia, N., & Sánchez, U. (2014). *Manejo de residuos en la agroindustria cafetera*. 10.
- Velasco, M., Puerta, G., & Rodríguez, N. (2010). *Impacto Biológico de los efluentes del beneficio húmedo del café*. *Cenicafé*, 4, 234-252.
- Xil, W.A. (2012). *Evaluación de la eficacia del tratamiento de aguas mieles de un beneficio húmedo de café, localizado en San Juan La Laguna, Sololá*. Tesis de grado. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Zambrano, F, Isaza, H, Rodríguez, V & López, P. (1999). *Tratamiento de aguas residuales del lavado del café*. *Boletín Técnico Cenicafé*. 20:1-26.
- Zambrano, D., Isaza, J., Rodríguez, N., & López, U. (1999). *Tratamiento de aguas residuales del lavado del café*. (F. N. café., Ed.) *Revista Cenicafé*, 7-10.

- Zambrano, D.A., Rodríguez, N., López, P.U., Zambrano, A.J. (2010). Construya y opere su sistema modular de tratamiento anaerobio para las aguas mieles. Chinchiná: Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFÉ).
- Zambrano, A. (2011). Construyendo el modelo para la gestión integrada del recurso hídrico en la caficultura colombiana. 28-91.
- Zambrano, D., & Isaza, J. (1998). Demanda química de oxígeno y nitrógeno total, de los subproductos del proceso tradicional de beneficio húmedo del café. *Cenicafé*, 4(49), 279-289.
- Zayas, T., Geissler, G., Hernández, F. (2007). Chemical oxygen demand reduction in coffee wastewater through chemical flocculation and advanced oxidation processes Journal of Environmental Sciences. *Journal of Environmental Sciences*, 19 (3): 300-305.
- Zambrano, D.A., Rodríguez, N., Orozco, P.A., Lopez, U. (2015). Evaluación de un reactor metanogénico tipo filtro anaeróbico de flujo ascendente para tratar aguas mieles del café. *Revista Cenicafé*, 66 (1): 32-45.
- Zambrano, F., D. A; Rodríguez V., N. (2008). *Sistemas para el tratamiento de aguas mieles: Investigación aplicada en beneficio de los productores cafeteros*. Chinchiná (Colombia), Cenicafé. Disciplina de Calidad y Manejo Ambiental. 19 p.
- Zayas, T., Geissler, G., Hernández, F. (2007). Chemical oxygen demand reduction in coffee wastewater through chemical flocculation and advanced oxidation processes Journal of Environmental Sciences. *Journal of Environmental Sciences*, 19 (3): 300-305.
- Zuñiga, P., Tardencilla, C. (2013). Beneficio húmedo del café. Cooperativa de Servicios Múltiples R.L. Boaco – Nicaragua. Recuperado el 11 de agosto del 2019.
- Zúñiga, F. (2005). *Tratamiento de aguas mieles (residuales) del procesamiento del café en húmedo, en el Fundo Halcón Negro-Chanchamayo*. Universidad Nacional Agraria de la Selva, Facultad de Recursos Naturales Renovables, Tingo María, Perú.

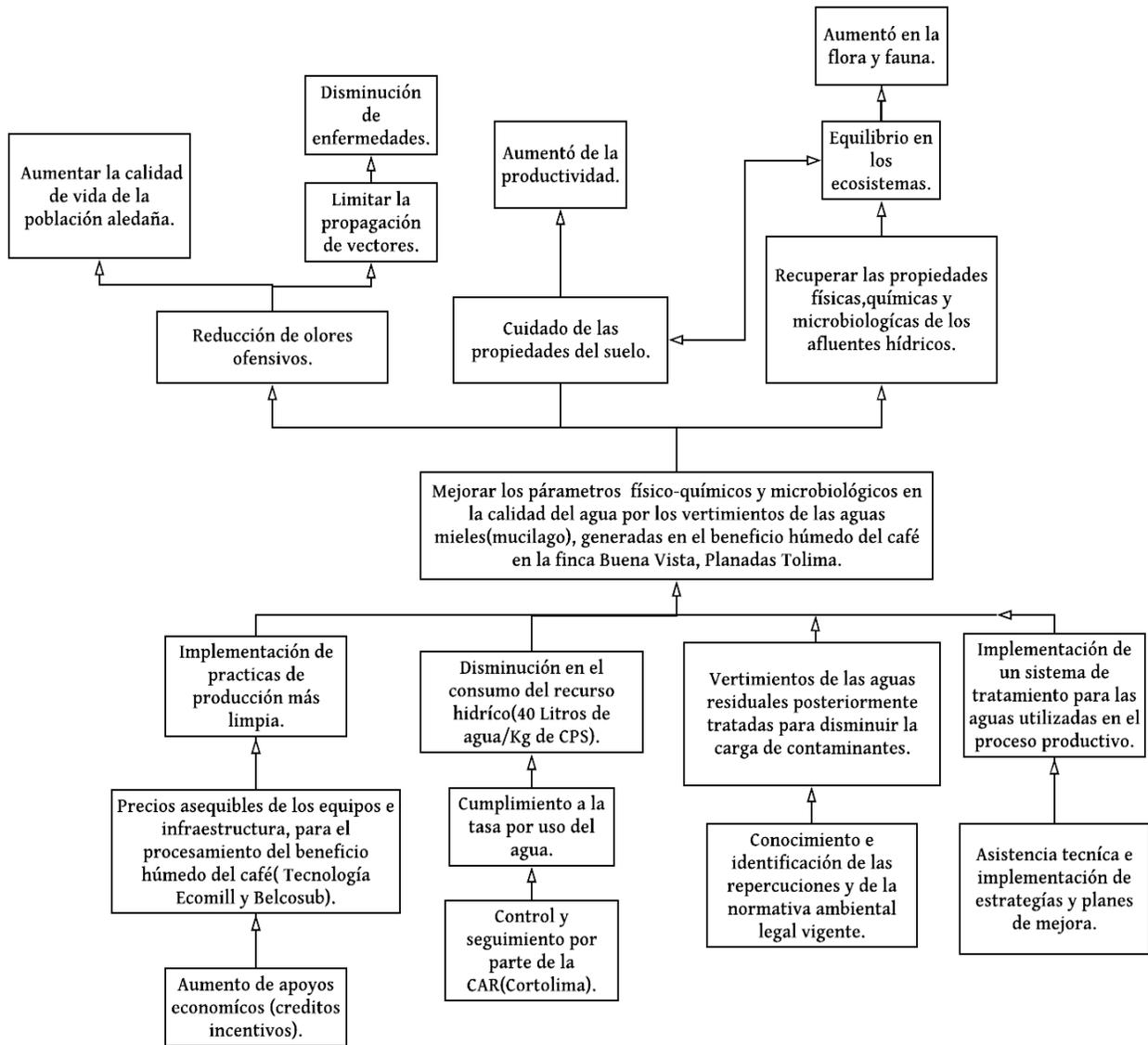
18 Anexos

Anexo 1. *Árbol de problemas relacionado con el presente proyecto.*



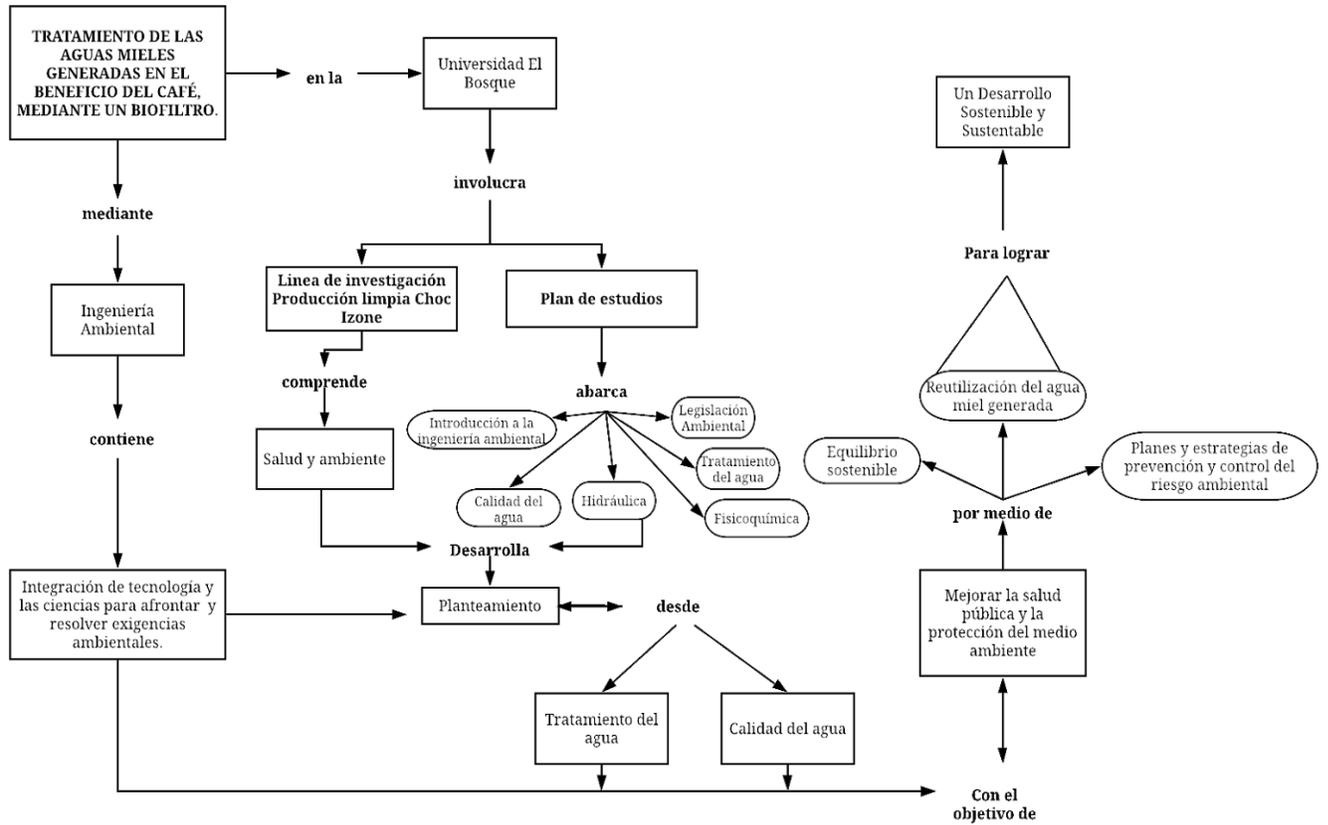
**Fuente:** Zambrano & Isaza, 1998); (Peñuela, Pabón, Rodríguez, & Oliveros, 2010); (Olvera & Gutiérrez, 2010); (Zúñiga, 2005); (Rodríguez, Sanz, Oliveros, & Ramírez, 2015); (Autores,2018).

Anexo 2. *Árbol de objetivos relacionado con el presente proyecto.*



*Fuente:* Autores, 2018.

**Anexo 3. Figura de relación con las ciencias ambientales y el área de investigación.**

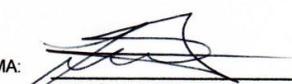


*Fuente:* Autores, 2018.

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO  
PARA LAS AGUAS RESIDUALES AGRÍCOLAS  
GENERADAS EN EL BENEFICIO HÚMEDO DEL  
CAFÉ EN LA FINCA BUENA VISTA; PLANADAS, TOLIMA, 2019.**

**Luisa Fernanda Campos Morales  
Dayhana Alejandra Durán Medina**

**Anexo 4. Formato de información con los resultados obtenidos de las muestras de agua analizadas por parte del laboratorio LASEREX.**

USUARIO (persona o entidad)		ALEJANDRA DURAN MEDINA			
FECHA DE RECEPCIÓN		FECHA DE MUESTREO		FECHA DE ENTREGA	
26/03/2109		25/03/2019		24/04/2019	
TIPO DE ANALISIS		VEREDA (Finca)		MUNICIPIO	
ESPECIAL		San Miguel (Buenavista)		Planadas	
MUESTRA		264		265	
IDENTIFICACION		Afluente natural		Agua Residual-Beneficio	
PUNTO DE MUESTREO		---		---	
PARÁMETROS	UNIDADES	264	265	---	---
pH	0-14	8,2	4,6	---	---
Temperatura (Lab.)	°C	---	---	---	---
Dureza	mg CaCO <sub>3</sub> /L	---	---	---	---
Alcalinidad (Origen)	Expresado como mg CaCO <sub>3</sub> /L	89,0	ND	---	---
OH <sup>-</sup>		---	---	---	---
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>		---	---	---	---
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	---	---	---	---	---
Acidez	mg CaCO <sub>3</sub> /L	---	844,0	---	---
DQO	mg/L	259,3	3416	---	---
Conductividad Eléctrica	µS/cm	204	556	---	---
DBO	mg/L	1,47	0	---	---
Sólidos suspendidos	mg/L	16	> 750	---	---
Sólidos Sedimentables	mL/L	<0,1	<0,1	---	---
Turbidez	UNF	---	---	---	---
Grasas Y aceites	---	---	---	---	---
Sólidos Totales	mg/L	106	4126	---	---
Calcio	mg/L	---	---	---	---
Magnesio	mg/L	---	---	---	---
Sodio	mg/L	---	---	---	---
Potasio	mg/L	---	---	---	---
Nitratos	mg NO <sub>3</sub> /L	---	---	---	---
Nitritos	mg/L	---	---	---	---
Cloruros	mg Cl <sup>-</sup> /L	---	---	---	---
Sulfatos	mg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /L	---	---	---	---
Cianuros	mg/L	---	---	---	---
Mercurio	µg/L	---	---	---	---
*RESULTADO ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO DE AGUAS					
PARÁMETROS	---	---	---	---	MÉTODOS
Recuento Coli fecal UFC/100ml	---	---	---	---	Filtración por membrana
Recuento Coli total UFC/100ml	---	---	---	---	Filtración por membrana
UFC: Unidades Formadoras de Colonias ND: No Detectado					
Observaciones :					
1. Los resultados encontrados son válidos únicamente para la muestra analizada. La misma fue tomada por personas ajenas al laboratorio.					
2. LASEREX no se hace responsable de la interpretación de los resultados ni de la forma como se proceda con ellos.					
Certificados bajo las normas: ISO 9001:2008 SC 6996 - 2 Y GP1000: 2009 GP 168 - 2					
					
FIRMA:					
			DIRECTOR LASEREX		
			NOMBRE: LUIS OVEIMAR BARBOSA		
			MAT. PROF PQ-2316		
			TELEFAX: 2771212 EXT 9359		

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO  
PARA LAS AGUAS RESIDUALES AGRÍCOLAS  
GENERADAS EN EL BENEFICIO HÚMEDO DEL  
CAFÉ EN LA FINCA BUENA VISTA; PLANADAS, TOLIMA, 2019.**

**Luisa Fernanda Campos Morales  
Dayhana Alejandra Durán Medina**

**Anexo 5. Formato de información con los resultados obtenidos de las muestras de agua analizadas nuevamente para análisis de DBO y DQO.**

 Instituto de Investigación y Estudios Ambientales	CORPORACIÓN DE CUENCAS DEL TOLIMA CORCUENCAS LABORATORIO AMBIENTAL DEL TOLIMA SISTEMA DE GESTIÓN DE CALIDAD		
	FLA - 048	VERSIÓN 4	
<b>INFORME DE RESULTADOS</b>			

REGISTRO: 282

FECHA DE EMISIÓN: 2019-07-03

INFORMACIÓN DEL CLIENTE	
NOMBRE	DAYHANA ALEJANDRA DURAN MEDINA
CONTACTO	Dayhana Alejandra Duran Medina – Estudiante Ing Ambiental Universidad del Bosque
DIRECCIÓN	Calle 146 No. 12 A – 27, edificio Allegro Apto 1103, Bogotá D.C.
TELÉFONO	318 230 7008

IDENTIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS	
LUGAR DE MUESTREO	FINCA BUENA VISTA – VEREDA SAN MIGUEL
FECHA Y HORA TOMA MUESTRAS	2019-06-13
RESPONSABLE MUESTREO	Cliente
PROTOCOLO DE MUESTREO	Cliente
MUNICIPIO	Planadas
DEPARTAMENTO	Tolima
RECEPCIÓN LABORATORIO	2019-06-13 12:46
RESPONSABLE	Camilo José Cabezas
PERIODO DE ANÁLISIS	2019-06-13 a 2019-06-18 DBO <sub>5</sub> : 2019-06-13 a 2019-06-18

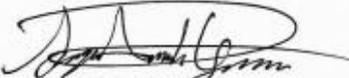
SITIOS DE MUESTREO	CÓDIGO	OESTE	NORTE	ALTURA
Agua residual después del proceso de beneficio húmedo de café	721	*****	****	*****

RESULTADOS DE LABORATORIO			
PARÁMETROS	UNIDADES	MÉTODO <sup>(1)</sup>	721
Matriz	*****	*****	A.R.n.D. <sup>(2)</sup>
Tipo de Muestra	*****	*****	Puntual
Demanda Química de Oxígeno <sup>†</sup>	mg O <sub>2</sub> /L	5220 C	34873
Demanda Bioquímica de Oxígeno <sup>†</sup>	mg O <sub>2</sub> /L	5210-B, 4500-O C	13896

<sup>(1)</sup> Standard Methods for the examination of water and wastewater. Edición 22, 2012, <sup>(2)</sup> Agua Residual no Doméstica.

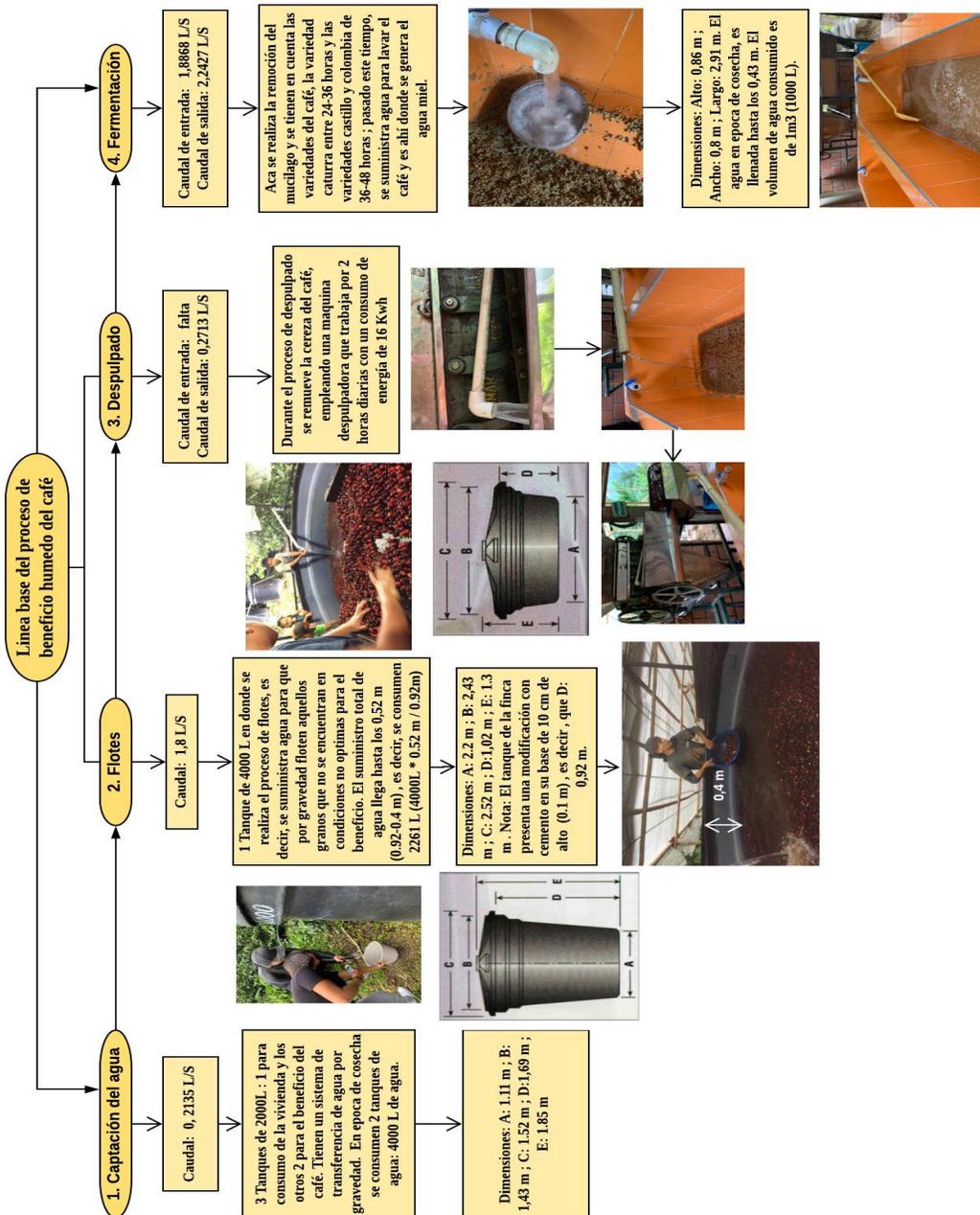
<sup>†</sup>PARÁMETRO ACREDITADO POR EL IDEAM, SEGÚN RESOLUCIÓN 2963 DE NOVIEMBRE 26 DE 2018.

*"Este informe de resultados es válido únicamente para las muestras analizadas y relacionadas en él. Cualquier reproducción parcial requiere de la autorización del Jefe de Laboratorio y la Directora Ejecutiva"*

  
**Sergio Andrés Guevara B.**  
 Ingeniero Químico T.P. 20232 CPIQ  
 Jefe de Laboratorio (E)

  
**VoBo. Gloria E. Páez Pérez**  
 Directora Ejecutiva  
 CORCUENCAS

*Anexo 6. Diagrama de identificación del proceso de beneficio húmedo del café.*



## 19 Glosario de términos

Los conceptos claves son vitales para el correcto desarrollo de este proyecto, debido a la información que suministran para sentar las bases del mismo. A continuación, se procede a describir los conceptos de acuerdo a la problemática en la que se enmarca.

### 19.1. *Cuerpo de agua*

Sistema de origen natural o artificial localizado, sobre la superficie terrestre, conformado por elementos físicos-bióticos y masas o volúmenes de agua, contenidas o en movimiento (IGAC, 2010).

### 19.2. *Carga contaminante*

Es el producto de la concentración másica promedio de una sustancia por el caudal volumétrico promedio del líquido que la contiene determinado en el mismo sitio; en un vertimiento se expresa en kilogramos por día (kg/d) (IGAC, 2010).

### 19.3. *Norma de vertimientos*

Conjunto de parámetros y valores que debe cumplir el vertimiento en el momento de la descarga (IGAC, 2010).

### 19.4. *pH*

Logaritmo, con signo negativo, de la concentración de iones hidrógeno, en moles por litro (Sistema de Información Ambiental De Colombia (SIAC), 2017).

### 19.5. *Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)*

Es una medida de la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos en la estabilización de la materia orgánica biodegradable, en condiciones aeróbicas (IDEAM, 2007).

### 19.6. *Demanda Química de oxígeno (DQO)*

Determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo (IDEAM, 2007).

### 19.7. *Vertimiento*

Descarga final a un cuerpo de agua, a un alcantarillado o al suelo, de elementos, sustancias o compuestos contenidos en un medio líquido (IGAC, 2010).

### 19.8. *Contaminación del agua*

Acción de introducir algún material en el agua alterando su calidad y su composición química. Según la Organización Mundial de la Salud el agua está contaminada “cuando su composición se haya modificado de modo que no reúna las condiciones necesarias para el uso, al que se le hubiera destinado en su estado natural” (IGAC, 2010).

#### *19.9. Tratamiento del agua*

Involucra una serie de actividades con el fin de reducir el contenido de carga contaminante de cuerpos de agua proveniente de actividades industriales, agrícolas o de uso doméstico, y son realizados previamente a dar una disposición final (Aguasistec, 2017).

#### *19.10. Agua residual no doméstica (ARnD)*

Son las procedentes de las actividades industriales, comerciales o de servicios distintas a las que constituyen aguas residuales domésticas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Resolución 631 del 2015. Parámetros vertimientos., 2015).

#### *19.11. Beneficio Húmedo del café*

Consiste en un conjunto de operaciones para transformar los frutos de café, en café pergamino de alta calidad física y en taza, el cual, por su estabilidad en un amplio rango de condiciones ambientales, es el estado en el cual se comercializa internamente este producto en Colombia (Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFÉ), 2016).

#### *19.12. Biofiltración*

Todo proceso biológico utilizado para el control o tratamiento de compuestos volátiles orgánicos e inorgánicos presentes en la fase gaseosa. En la biofiltración, los microorganismos son los responsables de la degradación biológica de los contaminantes volátiles contenidos en corrientes de aire residual (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2007).

#### *19.13. Agua miel (Mucílago)*

Estructura rica en azúcares y pectina que cubre el endospermo de la semilla y mide aproximadamente 0.4 milímetros de espesor, representa 15.5 a 22% del peso del fruto. El pH del mucílago en café maduro oscila entre 5.6 a 5.75 (Asociación Nacional de Café (ANACAFÉ), s.f.).

#### *19.14. Capacidad de asimilación y dilución*

Capacidad de un cuerpo de agua para aceptar y degradar sustancias, elementos o formas de energía, a través de procesos naturales, físicos químicos o biológicos sin que se afecten los criterios de calidad e impidan los usos asignados (IGAC, 2010).

#### *19.15. Biofiltros (Filtros biológicos)*

Son humedales artificiales de flujo subterráneo, diseñados para maximizar la remoción de los contaminantes que se encuentran en las aguas residuales (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2007).

#### *19.16. Sistema de tratamiento anaerobio*

Sistema de tratamiento del agua residual que se hace en ausencia de oxígeno (Tesauro Ambiental para Colombia, 2018).