

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DBO, DQO Y SST EN
AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL BENEFICIO HÚMEDO DEL CAFÉ
A TRAVÉS DE UNA COLUMNA DE ADSORCIÓN CON BORRA DE CAFÉ**



CORPORACION UNIVERSITARIA
AUTONOMA
DEL CAUCA

**ADRIANA MILEIDY GUARANGUAY PASTAS
DAYANA OROZCO HERNÁNDEZ**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA
FACULTAD CIENCIAS AMBIENTALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE
INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
GESTIÓN INTEGRAL DEL AGUA**

2019

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DBO, DQO Y SST EN
AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL BENEFICIO HÚMEDO DEL CAFÉ
A TRAVÉS DE UNA COLUMNA DE ADSORCIÓN CON BORRA DE CAFÉ**

**ADRIANA MILEIDY GUARANGUAY PASTAS
DAYANA OROZCO HERNÁNDEZ**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Ambiental y Sanitaria

Director

**MSc. Carlos Miguel Torrado Cuellar
Ingeniero Ambiental**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA
FACULTAD CIENCIAS AMBIENTALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE
INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
GESTIÓN INTEGRAL DEL AGUA**

2019

NOTA DE ACEPTACIÓN

Hacemos constar que el presente trabajo de grado: Evaluación de la eficiencia de remoción de DBO, DQO y SST en aguas residuales provenientes del beneficio húmedo del café a través de una columna de adsorción con borra de café, ha sido aceptado por el director y los jurados, como requisito para optar al título de ingeniero ambiental y sanitario.

Firma del director trabajo de grado

Firma del jurado

Popayán, 05 de marzo, 2019

Firma del jurado

DEDICATORIA

El presente trabajo investigativo lo dedicamos principalmente a Dios, Por habernos permitido llegar hasta este punto y habernos dado salud y la fuerza para continuar en este proceso y finalmente lograr nuestros objetivos.

A nuestros familiares y amigos, por estar siempre presentes, acompañándonos y apoyándonos en cada etapa de este proceso.

A todas las personas que nos han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

Agradecimiento

Agradecemos a Dios por bendecirnos la vida, por guiarnos a lo largo de nuestra existencia, ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.

Gracias a nuestros padres, hijos, esposos, hermanos, familiares y amigos por hacer parte día a día de este proceso y aportar de muchas maneras para que todo lo que ayer fue un sueño se convierta en realidad.

Agradecemos a nuestros docentes de la corporación universitaria autónoma del Cauca, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de nuestra profesión, de manera especial, a los docentes que hicieron parte del proyecto de investigación quienes guiaron con su paciencia y rectitud todo este proceso.

Por último, a la corporación universitaria autónoma del cauca y a la Red de formación del talento humano para la innovación social y productiva en el

departamento del Cauca, por el apoyo para la sostenibilidad y desarrollo del proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	13
ABSTRACT	14
INTRODUCCIÓN	15
CAPÍTULO I: PROBLEMA.....	17
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
1.2. JUSTIFICACIÓN	18
1.3. OBJETIVOS	20
1.3.1. Objetivo general.....	20
1.3.2. Objetivos específicos	20
CAPÍTULO II: REFERENTES CONCEPTUALES	21
2.1. ANTECEDENTES	21
2.2. BASES TEÓRICAS.....	23
2.1.1. El café:.....	23
2.1.2. Tipos de café:	24
2.1.3. Composición del café:.....	24
2.1.4. Cadena de valor del café colombiano.....	25
2.1.5. Tipos de beneficio de café	28
2.1.6. Subproductos del café	34
2.1.7. Características fisicoquímicas y microbiológicas de las aguas residuales del café.	36
2.1.8. Problemáticas asociadas a las aguas mieles	38
2.1.9. Adsorción.....	39
2.1.10. Proceso de activación química	41
2.1.11. Prueba de azul de metileno	41

2.1.12. Cinética de adsorción	42
2.1.13. Tiempo de equilibrio.....	43
2.1.14. Características geotextil NTC 1600	44
2.1.15. Columna de adsorción	44
2.3. BASES LEGALES.....	46
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....	47
3.1. ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE MESOPOROS DE LA BORRA DE CAFÉ ACTIVADA A TRAVÉS DE DOS MÉTODOS QUÍMICOS.....	47
3.1.1. Reconocimiento de campo	47
3.1.2. Proceso de activación química de la borra de café.....	47
3.1.3. Prueba de azul de metileno	52
3.2. DETERMINAR LA CINÉTICA DE REACCIÓN DE LA ADSORCIÓN DE DQO DE AGUAS RESIDUALES DEL CAFÉ A TRAVÉS DE LA BORRA DE CAFÉ ACTIVADA MEDIANTE MÉTODOS QUÍMICOS.....	54
3.2.1. Caracterización de las aguas mieles del café	55
3.2.2. Tratamiento preliminar	56
3.2.3. Proceso de cinética de adsorción	59
3.3. EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE LA BORRA DE CAFÉ EN UNA COLUMNA DE FLUJO ASCENDENTE	61
3.3.1. Construcción de la columna de adsorción de flujo ascendente	61
3.3.2. Funcionamiento de la columna de adsorción de flujo ascendente.....	63
3.3.3. Monitoreo de la columna de adsorción de flujo ascendente	64
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	66
4.1. ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE MESOPOROS DE LA BORRA DE CAFÉ ACTIVADA A TRAVÉS DE DOS MÉTODOS QUÍMICOS.....	66
4.1.1. Reconocimiento de campo o zona de estudio	66

4.1.2. Proceso de activación de la borra de café	69
4.1.3. Prueba de azul de metileno para determinación de mesoporos	70
4.2. DETERMINAR LA CINETICA DE REACCION DE LA ADSORCION DE DQO DE AGUAS RESIDUALES DEL CAFÉ A TRAVES DE LA BORRA DE CAFÉ ACTIVADA MEDIANTE METODOS QUIMICOS.....	73
4.2.1. Caracterización de las aguas mieles del café	73
4.2.2 Tratamiento preliminar del agua miel de Café	78
4.2.3. Estudio cinético del proceso de adsorción.....	81
4.3. EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE REMOCIÓN DE LA BORRA DE CAFÉ EN UNA COLUMNA DE FLUJO ASCENDENTE	85
4.3.1. Conductividad eléctrica y SDT monitoreo de las columnas de adsorción con el bioadsorbente y sin el bioadsorbente.....	87
4.3.2 Demanda química de oxígeno (DQO) Demanda biológica de oxígeno (DBO ₅) monitoreo de las columnas de adsorción con el bioadsorbente y sin el bioadsorbente.....	89
4.3.3 sólidos suspendidos totales (SST) monitoreo de las columnas de adsorción con el bioadsorbente y sin el bioadsorbente	91
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	93
5.1. CONCLUSIONES	93
5.2. RECOMENDACIONES	94
BIBLIOGRAFÍA	95
ANEXOS	105

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición de los granos de café tostado.....	25
Tabla 2. Residuos generados en el proceso de beneficio húmedo e industrialización del café.....	34
Tabla 3. Caracterización de las aguas mieles provenientes del beneficio húmedo del café	37
Tabla 4. Modelos cinéticos.....	43
Tabla 5. Especificaciones técnicas geotextiles no tejidos.	44
Tabla 6. Normatividad Ambiental Colombiana	46
Tabla 7. Lista de materiales de laboratorio para el proceso de activación y prueba de azul de metileno	49
Tabla 8. Lista de materiales y equipos para el proceso de cinética de adsorción .	54
Tabla 9. Lista de materiales para la construcción y monitoreo de la columna de adsorción.....	61
Tabla 10. Porcentaje de mezcla en los prototipos.....	68
Tabla 11. Resultados de azul de metileno ácido fosfórico (H_3PO_4).....	71
Tabla 12. Resultados de azul de metileno hidróxido de potasio.....	72
Tabla 13. Monitoreos de las agua mieles del café de la empresa Supracafé en cada una de sus temporadas.....	75
Tabla 14. Dosis óptimas para cada uno de los coagulantes	78
Tabla 15. Monitoreo de la prueba de cinética con respecto al parámetro DQO	82
Tabla 16. Coeficientes ajuste de los modelos cinéticos Pseudo primer orden y Pseudo segundo orden	84
Tabla 17. Monitoreo de la columna de adsorción con el bioadsorbente.....	86
Tabla 18. Monitoreo de la columna de adsorción sin bioadsorbente.....	87
Tabla 19. Resultados prueba de desintegración del bioadsorbente.....	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Partes de un grano de café [27].	23
Figura 2. Esquema general de los procesos de beneficio ecológico del café	29
Figura 3. Café cereza recolectada antes de iniciar su proceso.	30
Figura 4. Primer lavado de la café cereza para separar hojas y otros residuos	30
Figura 5. Vista al iniciar el tiempo de fermentación	31
Figura 6. Descarga del agua miel de café del proceso de beneficio húmedo del café.....	32
Figura 7. Secado de café por funcionamiento mecánico.....	32
Figura 8. Selección de café realizado de manera manual.....	33
Figura 9. Adsorción física.....	40
Figura 10. Adsorción química.....	40
Figura 11. Estructura del azul de metileno	42
Figura 12. Esquema general del proceso de activación química de la borra de café a través de dos métodos químicos.....	48
Figura 13. Recolección de la borra de café.....	50
Figura 14. Ajuste de pH de la borra de café activada con hidróxido de sodio	52
Figura 15. Solución madre y diluciones a diferentes concentraciones de azul de metileno.....	53
Figura 16. Diseño del filtro empacado.....	56
Figura 17. Funcionamiento del filtro empacado.....	57
Figura 18. Prueba de jaras para determinar la dosis óptima para el proceso de coagulación – floculación del agua miel.....	58
Figura 19. Muestras pasadas por papel filtro y posteriormente fijadas.	60
Figura 20. Columna de adsorción con la borra de café.....	62
Figura 21. Columnas de adsorción: A) con bioadsorbente, B) Sin el bioadsorbente	63
Figura 22. Esquema del funcionamiento de la columna de adsorción de flujo descendente.....	64
Figura 23. Ubicación geográfica de la zona estudio Empresa Supracafé y TECNICAFÉ.....	66

Figura 24. Vista del tratamiento existente para tratar el agua de salida al sistema de las aguas mieles.....	68
Figura 25. Borra de café activada con ácido fosfórico (H_3PO_4) al 50%.....	69
Figura 26. Desintegración de la borra de café activada a altas concentraciones de KOH.	70
Figura 27. Sólidos sedimentables por cada litro de agua residual del café.....	74
Figura 28. Filtro empacado.....	80
Figura 29. Prueba de cinética de adsorción de la borra de café activada con H_3PO_4	81
Figura 30. Funcionamiento de la columna de adsorción de flujo descendente	85

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Factor de corrección para cada una de las concentraciones adsorbidas por el bioadsorbente.....	52
Ecuación 2. Concentración adsorbida por el bioadsorbente	53
Ecuación 3. Capacidad de adsorción de azul de metileno en el bioadsorbente	53
Ecuación 4. Índice de biodegradabilidad	55
Ecuación 5. Suma de errores cuadrados (SSE).....	60
Ecuación 6. Ecuación de Pseudo primer orden.....	60
Ecuación 7. Ecuación de Pseudo segundo orden	61

RESUMEN

En el proceso de beneficio húmedo del café, se originan dos tipos de subproductos: la pulpa de café y las aguas mieles, estos ocasionan la contaminación de las fuentes de agua debido a la alta concentración de carga orgánica contaminante que contienen. Posterior al consumo de café se generan otros residuos como la borra o cuncho de café, al cual actualmente no se le está realizando ningún proceso de aprovechamiento final para cerrar todo ciclo productivo del café.

El objetivo de esta investigación consistió en la evaluación de la eficiencia de remoción de DBO, DQO y SST de aguas residuales provenientes del beneficio húmedo del café a través de una columna de adsorción de borra de café, con el fin de disminuir la carga contaminante, mejorar la calidad del ambiente y darle un uso sostenible a la borra de café.

Se generó un material adsorbente a partir de la borra de café por medio de una activación química con dos agentes activantes: ácido fosfórico (H_3PO_4) e hidróxido de potasio (KOH). En la borra de café activada se hizo una estimación de la presencia de mesoporos a través de la relación con la adsorción de las moléculas de azul de metileno, se determinó la cinética de reacción de la adsorción de DQO de las aguas residuales del café y finalmente se evaluó la capacidad de adsorción de la borra de café en una columna de adsorción de flujo ascendente.

Los resultados obtenidos en el proceso de adsorción demostraron que la borra de café activada con ácido fosfórico al 50% presenta la mayor retención de la molécula de azul de metileno. La evaluación de la columna de adsorción mostró que el comportamiento de la borra de café activada no logró una remoción en DQO y DBO_5 , caso contrario para SST se obtuvo una eficiencia de remoción del 85,6 %.

ABSTRACT

In the process of a humid benefit of coffee, two types of by-products are produced: coffee pulp and honey water, which cause the contamination of water sources due to high concentrations of organic pollutant loads added to water. After the consumption of coffee, other wastes are generated, such as the wasted coffee grounds, which are not treated.

The objective of this research was the evaluation of the removal efficiency of BOD, COD, and TSS from wastewaters coming from the wet benefit of coffee through a column of adsorption of wasted coffee grounds, to reduce the pollutant load, improve the quality of the environment and give a sustainable use to this byproduct.

An adsorbent material was generated from wasted coffee grounds by mean of a chemical activation with two activating agents: phosphoric acid (H_3PO_4) and potassium hydroxide (KOH). In the activated wasted coffee grounds, an estimation was performed concerning the presence of mesopores by mean of a relationship with the adsorption of methylene blue molecules, the reaction kinetics of the COD adsorption of the coffee wastewater was determined and finally, the adsorption capacity of the wasted coffee grounds was evaluated in a upflowed adsorption column.

The results obtained during the adsorption process showed that wasted coffee grounds activated with phosphoric acid (50% v/v of concentration) presented the higher sorption for the methylene blue molecule. The evaluation of the adsorption column showed that the behavior of the activated wasted coffee grounds did not achieve a COD and BOD₅ removal, otherwise, for SST, satisfactory results were obtained, obtaining a removal efficiency of 85,6%.

INTRODUCCIÓN

Existen más de 563,000 familias productoras de café que habitan en nuestro país, las cuales en su gran mayoría viven en pequeñas fincas o parcelas y sus plantaciones de café, en promedio, no son mayores a 2 hectáreas. Únicamente algo más del 5% de los productores tienen cultivos en extensión superiores a 5 hectáreas; la población que vive directamente del café alcanza los 2 millones de personas [1]. Dentro del aprovechamiento del café existe un proceso llamado beneficio húmedo de café, se denomina de esta manera debido a que se utiliza agua en las etapas de despulpado, lavado y transporte (del fruto, del café despulpado y del café lavado); este proceso tiene un uso cercano a los 40 litros de agua por cada kilogramo de café pergamino, además en su gran mayoría no se realiza un manejo sostenible de los subproductos obtenidos en dicho proceso [2].

En este tipo de beneficio se generan en forma discontinua grandes cantidades de aguas del lavado del café o también llamadas aguas mieles; los caudales emitidos dependen de la producción de café, en cada época y zona cafetera colombiana [3]. Estas aguas se caracterizan por su alto contenido de materia orgánica y un pH ácido [6], es por esto que los residuos y subproductos del café se convierten en una fuente grave de contaminación que conduce al deterioro ambiental [4].

Debido a que los pequeños caficultores necesitan mecanismos económicos y eficientes que les permitan tratar las aguas residuales del proceso (aguas mieles), el presente trabajo propone la utilización de nuevos métodos que les permita aprovechar un residuo del consumo de café como materia prima para la producción de ecotecnologías, con el fin de promover el desarrollo sostenible de los procesos productivos del sector del café con miras a la economía circular.

Estas ecotecnologías se perfilan como una alternativa para la disminución de la carga contaminante aportada por las aguas mieles, bajo una serie de tratamientos fisicoquímicos como neutralización, coagulación, floculación y sedimentación que

antecedes a la columna de adsorción como un tratamiento terciario para la eliminación de contaminantes orgánicos.

CAPÍTULO I: PROBLEMA

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El tratamiento de las aguas residuales procedentes de actividades industriales, pecuarias, agrícolas entre otras, se ha convertido en una de los más grandes desafíos a nivel ambiental. La situación del país es similar a la del resto de Latinoamérica que siguen sin tratar el 80% de las aguas residuales que terminan contaminando ríos y mares, afectando la salud de las personas [5].

La producción de café se ha convertido en un motor del crecimiento económico en Colombia, por lo cual es importante resaltar que dentro del proceso de beneficio del café se generan dos grandes grupos de residuos sin un debido aprovechamiento: residuos sólidos como la pulpa y el mucilago [6], residuos líquidos como aguas de lavado y aguas mieles; este último se considera como uno de los mayores contaminantes orgánicos en el sector cafetero [7], además de otros subproductos posteriores al consumo.

De los residuos antes mencionados, las aguas residuales del café o aguas mieles, tienen un pH ácido y un alto contenido de materia orgánica la cual es metabolizada o descompuesta por bacterias. En el proceso de biodegradación, dichas bacterias consumen cantidades altas de oxígeno disuelto (OD) causando un deterioro ecológico en las fuentes hídricas receptoras [8], variaciones de pH, aumento en la temperatura, cambios en conductividad, incremento de sólidos suspendidos, turbidez y las altas concentraciones de fenoles y antioxidantes[9]. También es importante resaltar que en el proceso de despulpado y lavado de 1 kg de café se genera una cantidad de agua y material contaminante equivalente a aquella producida por 6 personas en un día, cifra bastante alarmante [10].

Supracafé es una empresa productora de café localizada en el Departamento del Cauca, que produce 6500 sacos de grano seleccionado de café al año [11]; hoy en

día uno de sus mayores inconvenientes es la generación de grandes cantidades de aguas mieles las cuales actualmente cuentan con un tratamiento que no es sostenible en condiciones de operación y mantenimiento, por lo tanto es importante evaluar una alternativa de menor costo con mayor eficiencia y menor contaminación.

1.2. JUSTIFICACIÓN

El café ha sido uno de los productos de exportación más importantes en Colombia; su nivel de producción es tan alto que compromete a 590 municipios de los departamentos andinos del país [12], emplea a miles de recolectores de café que conforman el grueso de los trabajadores directos e indirectos, situación que determina que ésta sea una industria de gran importancia para el país.

En el Cauca, el café no solo ha sido motor de desarrollo de la región, sino que además, los 33 municipios cafeteros del departamento basan su dinámica social y económica alrededor del grano, permitiendo que el departamento se destaque por sus resultados en productividad de sus cultivos y que sus cafés se destaquen por su alta calidad [13]. En el proceso de despulpado y lavado de 1 kg café genera una cantidad de agua y material contaminante, equivalente a aquella producida por 6 personas en un día [8], que es vertido a las fuertes hídricas cercanas al proceso productivo de café, es por esto que se presenta una disminución en la calidad del agua de estas fuentes hídricas, por falta de tratamiento de las aguas residuales o aguas mieles del café [14].

Se hace necesario la investigación de nuevos mecanismos para tratar las aguas residuales que vierten procesos productivos como el del beneficio húmedo de café, con el fin de dar nuevas e innovadoras opciones acorde a las capacidades económicas de los pequeños productores que conforman más del 90% de los caficultores colombianos. Técnicas como la adsorción, coagulación, floculación, oxidación, precipitación y filtración, producen alta cantidad de lodos y su

implementación, operación y diseño conllevan a costos operacionales elevados [15].

La adsorción es un método adecuado para ser utilizado en plantas de tratamiento de aguas residuales, con el fin de garantizar el cumplimiento de la norma y además el mejoramiento de la calidad de vida de las personas que utilizan el recurso hídrico en cualquier proceso productivo que esté generando algún tipo de vertimiento, además de ser un proceso económico [14] y que permiten la utilización y/o aprovechamiento de los subproductos del café, como lo es la borra o cuncho de café.

La borra del café es un residuo no valorado el cual se produce como subproducto de consumo resultante de la preparación de la bebida que queda en el colador, el cual no es tenido en cuenta dentro de la cadena de valor ya que en el proceso de elaboración de la bebida de café sólo se utiliza el 6% del peso del fruto fresco y el resto queda en forma de residuos, que de no ser utilizados o dispuestos convenientemente se convierten en fuentes de contaminación del medio ambiente [18], por consiguiente este subproducto tienen gran potencial en procesos de activación de biomasa permitiendo la reducción de costos y de problemas ambientales.

Los bioadsorbentes son materiales naturales que pueden utilizarse para la remoción de contaminantes en el agua, estos tienen usos diversos y son de bajo costo [19]; en la empresa Supracafé se genera diferentes subproductos dentro del proceso productivo, uno de ellos es la borra o cuncho de café la cual no tiene un uso sostenible, por tal motivo es importante estudiar la borra de café como una alternativa para el tratamiento de agua residual [20].

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la eficiencia de remoción de DBO, DQO y SST de aguas residuales provenientes del beneficio húmedo del café a través de una columna de adsorción de borra de café.

1.3.2. Objetivos específicos

- ❖ Analizar la presencia de mesoporos de la borra de café activada a través de dos métodos químicos.

- ❖ Determinar la cinética de reacción de la adsorción de DQO de aguas residuales del café a través de la borra de café activada mediante métodos químicos.

- ❖ Evaluar la capacidad de adsorción de la borra de café en un filtro anaerobio de flujo ascendente.

CAPÍTULO II: REFERENTES CONCEPTUALES

2.1. ANTECEDENTES

El tipo de agua residual generada en el proceso de beneficio húmedo del café es un grave problema que afecta al medio ambiente. En un estudio realizado por Cenicafé se realizó una caracterización fisicoquímica de las aguas mieles, presentando propiedades biodegradables, bajos valores de pH, alta carga orgánica contaminante (sólidos totales y Demanda Química Oxígeno) y evidenciando que la mayor parte de los contaminantes se encuentran disueltos[19]; lo que la hace no apta para riego de cultivos, aplicación de agroquímicos, lavar café o para el consumo humano y animal [20].

La Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC) en conjunto con el Centro Nacional de Investigaciones del Café (Cenicafé) en el año 2017, estudiaron diferentes métodos para el tratamiento anaerobio de las aguas mieles del café, los cuales no eran suficientes para la remoción de contaminantes; lo que los llevo a proponer un sistema modular de tratamiento anaerobio (SMTA) conformado por un reactor hidrolítico, recámara de dosificación y un reactor metanogénico [21].

Este tipo de tecnología (SMTA) ha mostrado eficiencias de remoción de la carga orgánica superiores al 80% lo que permite además cumplir con la Resolución 0631 de 2015 del Ministerio de Ambiente. Cenicafé ha estudiado otras alternativas de solución para proporcionar información a los medianos y grandes caficultores como el reusó de esta agua en las fosas de pulpa y tratamientos químicos [22].

Teniendo en cuenta, la problemática y las soluciones citadas anteriormente es necesario mencionar investigaciones acerca de los métodos y materias primas eco tecnológicas, que se pueden ser utilizadas en la elaboración de materiales bioadsorbentes, que pueden ser utilizados como una alternativa de tratamiento para

el manejo del vertimiento de las aguas mieles y así el agua usada tenga muy poco efecto contaminante en las fuentes de agua.

En investigaciones recientes se han utilizado diferentes subproductos agrícolas como: coco, naranja, maíz y café para la producción de carbón activado por medio de activación química, que consiste en poner en contacto la materia prima (subproductos agrícolas) con un agente activador a temperaturas que oscilan entre los 600 y 900 °C [23]. Entre los agentes activadores utilizados en la literatura, se destacan el Hidróxido de Potasio (KOH) y el Ácido Fosfórico (H_3PO_4).

Lavado et al (2012) realizaron una investigación en la cual prepararon dos tipos de carbones activados a partir de astillas de eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill) mediante activación química usando hidróxido de potasio (KOH) y ácido fosfórico (H_3PO_4) como agentes activantes. Estos materiales fueron preparados con una razón de impregnación de 1,0 g/gca [masa de agente activante (g)/masa de carbón activado (gca)], a una temperatura de carbonización de 600 °C. Se evaluó la capacidad de adsorción de Cr (VI) en soluciones acuosas y el efecto del pH de la solución. Los mejores resultados se obtuvieron con el carbón activado con ácido fosfórico (H_3PO_4), con una capacidad de adsorción 75,2 mg/g a pH= 2 [24].

En otras investigaciones, se evaluó la borra de café como bioadsorbente para la remoción de cromo trivalente presente en soluciones acuosas, en las cuales se determinó la máxima capacidad de retención de cromo (III) sobre el material bioadsorbente durante un tiempo de adsorción de 60 minutos. El bioadsorbente presentó una capacidad de adsorción de 6.89 mg/L y el tiempo de equilibrio de la adsorción fue de 40 minutos; posterior a este tiempo el adsorbente se saturó; los datos experimentales se ajustaron correctamente a un comportamiento cinético de pseudo segundo orden [25].

2.2. BASES TEÓRICAS

2.1.1. El café:

Es una bebida que se obtiene a partir de los granos tostados y molidos de los frutos de una planta de café (cafetos), morfológicamente muy variables; los cuales son utilizados para preparar y tomar como una infusión [26]. Además, es el principal producto agrícola de Colombia, y de él depende un porcentaje significativo de la economía y el sustento de gran parte de la población colombiana.

El café como grano, es una semilla de un fruto que se obtiene de un arbusto (cafeto) llamada popularmente cereza, poseen una piel exterior que envuelve una pulpa dulce y su estado de madurez es de color rojo (exocarpio), en el interior posee diferentes capas como: una goma rica en azúcares adherida a las semillas que se conoce como mucílago (mesocarpio) y una delicada membrana dorada que recubre las dos semillas del café, llamada pergamino (endocarpio); y el café verde (endospermo) son los granos o semillas que se tuestan para preparar los diferentes tipos de café (figura 1) [27].

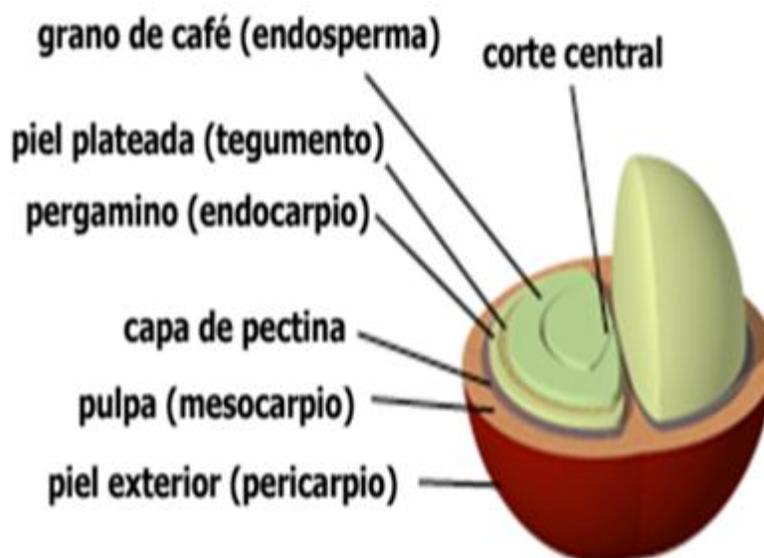


Figura 1. Partes de un grano de café [27].

2.1.2. Tipos de café:

En el mundo existen dos grandes grupos de semillas de café como: la Arábica y la Robusta o Canephora. En Colombia, solamente se cultivan cafés arábigos, los cuales producen una bebida suave, de mayor aceptación en el mercado mundial y de mejor precio [28].

Existen más de 1.000 variedades de café arábico, entre ellas las variedades de café en Colombia son variedad Caturra, Colombia, Borbón, Típica, Maragoripe, etc. El café colombiano es conocido como Arábica Lavado, de más alta calidad a diferencia de los granos de otros orígenes. Todo el café de Colombia es lavado, debido a que este proceso extrae impurezas y agentes ácidos [28].

2.1.3. Composición del café:

El café tiene múltiples componentes. Los granos de café crudos de variedad Arábica, contienen cafeína el 1,2% de la materia seca, 4,2% de minerales, de los cuales 1,7% es potasio; 16% lípidos, 1,0% trigonelina, 11,5% proteínas y aminoácidos, 1,4% ácidos alifáticos, 6,5% ácidos clorogénicos, 0,2% glucósidos y 58% carbohidratos [29].

La composición de los granos de café se altera en el proceso de tostado, pierde gran cantidad de agua que posee apenas entre 1% a 5%, proteínas, ácidos clorogénicos y carbohidratos (Tabla 1). Al mismo tiempo ocurren transformaciones químicas y se forman cientos de sustancias volátiles durante el proceso de tosti3n, como los gases volátiles que conforman el aroma, pigmentos poliméricos y melanoidinas [30].

Tabla 1. Composición de los granos de café tostado

Componente	Variedad Arábica (%)
Cafeína	1,3
Minerales	4,5
Lípidos	17,0
Trigonelina	1,0
Proteínas	10,0
Ácidos alifáticos	2,4
Ácidos clorogénicos	2,7
Carbohidratos	38,0
Aromas volátiles	0,1
Melanoidinas	23,0

Fuente: Cenicafé

El café también posee gran cantidad de contaminantes y sus concentraciones dependen de múltiples factores que intervienen en la selección, preparación y tostado del grano. Entre ellos se encuentran las parafinas que se utilizan en el procesamiento de la fibra, hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH), trazas de nitrosaminas (N-nitrosopirrolidinas- NPYR), aminas heterocíclicas y residuos de pesticidas como organoclorados, organofosforados y micotoxinas [30].

2.1.4. Cadena de valor del café colombiano

La cadena del café se concentra principalmente en el café verde para exportación, está fuertemente determinado por la dinámica del mercado mundial de este producto, lo que afecta tanto a la producción como a la actividad Cafetera nacional y el desempeño de los agricultores [32].

2.1.4.1. Caficultor: la persona que cultiva el café o cafeto se le denomina caficultor. En Colombia existen 563.000 familias productoras de café donde su gran mayoría viven en pequeñas fincas o parcelas cuyos cultivos de café en promedio, no superan las 2 hectáreas; y el 5% de los productores colombianos de café tiene plantaciones de un tamaño superior a las 5 hectáreas [31].

Las actividades agrícolas que se llevan a cabo en las fincas cafeteras son las labores de recolección y post cosecha, las realizan los mismos productores (caficultores), garantizando un compromiso especial con el producto que sale de su finca donde implica llevar un café de calidad del árbol a la taza. En la última etapa de esta fase productiva se obtiene café pergamino seco (CPS), el cual es el producto final que adquieren los caficultores para su venta [32].

2.1.4.2. Compradores de café en verde: Es importante tener en cuenta que para comercializar café colombiano a ciertos países es necesario asegurarse que cumpla los requisitos de garantía de origen. Los procesadores o clientes industriales transportan el CPS a la trilladora, en donde se le quita el endocarpio que lo cubre y se convierte en café verde y luego será clasificado de acuerdo con su calidad, en esta etapa el grano de Café aún no ha sido tostado. Las principales empresas procesadoras son: Colcafé S.A, Nestlé, Casa Luker, Águila Roja. A partir de este momento se puede comercializar como café verde [32]. Algunos compradores de café verde en el Departamento del Cauca son: Cooperativa Multiétnica y Pluricultural de Pequeños Caficultores del Cauca (COMEPKAFE), Cooperativa de Caficultores del Cauca, Exportaciones Asorcafé S.A.S entre otras [33].

2.1.4.3. Tostadores: EL proceso de tuestión es la transformación de los granos de café verde mediante la aplicación de calor, lo que origina varios cambios físicos y reacciones químicas que desarrollan todo el aroma y sabor de la apreciada bebida [34].

Inicialmente el grano absorbe calor y pierde la humedad y algunos gases. Luego ocurre el "primer crack" con un sonido como de crispeta (maíz tostado) o "palomitas de maíz". A partir de ese momento el grano crece en tamaño y comienza a tomar un color oscuro por la caramelización de los azúcares conformando los más de 800 compuestos químicos que tiene el café tostado [34].

La transformación de los azúcares simples y aminoácidos, que le otorgan al café la mayoría de sus mejores propiedades aromáticas y su color característico, se conoce como la reacción de Maillard. Finalmente, y dependiendo del grado de tostación deseado, puede haber un "segundo crack" y se presenta una reacción exotérmica (que libera calor). A partir de ese momento es necesario reducir la temperatura aplicada con agua o con aire frío para obtener exactamente el color y sabor deseados. Las reacciones químicas en el interior del grano continúan por algún tiempo (horas o incluso días) después de que el grano ha salido del tostador, durante el cual el café tostado continúa emitiendo CO₂. Es por esta razón que las técnicas de empaque deberán tener en cuenta la liberación de dichos gases [34].

Posterior al café verde y tostado se puede transformar en diferentes productos terminados como café molido, descafeinado, liofilizado, líquido y soluble. Algunas empresas que realizan la tostación del café en el Departamento del Cauca son: Exportaciones Asorcafé S.A.S, Expocosurca S.A. C.I. entre otras. [35].

2.1.4.4. Baristas: Un barista es el profesional especializado en el café de alta calidad, que trabaja creando nuevas y diferentes bebidas basadas en él, usando varios tipos de leches, esencias y licores, entre otros. También es el responsable de la presentación de las bebidas y puede complementar su trabajo con arte del latte [36].

Colombia tiene tres nuevos campeones nacionales: barista, catador y de cafés filtrados: Ronal Valero, de Juan Valdez Café, es el nuevo campeón barista; Walter Acevedo Ospina, de Amor Perfecto, es el nuevo campeón catador, y Sebastián

Villamizar de La Palma y El Tucán, es el nuevo campeón de cafés filtrados. En el marco de la feria Cafés de Colombia Expo 2017, durante cuatro días se llevaron a cabo en Corferias el XII Campeonato Colombiano de Baristas, el VII Campeonato Colombiano de Catadores y el II Campeonato de Cafés Filtrados [37].

2.1.4.5. Consumidor: Según datos de la Federación, el consumo de café en Colombia está por debajo de los países nórdicos, que consumen 12 kg per cápita al año, mientras que en el país tan solo llega a los 2,2 kg al año. El mercado se compone por dos grandes segmentos: tostado/molido e instantáneo. En ese sentido, son segmentos que están muy relacionados y lo normal es que cuando crece uno, en el otro pasa lo contrario [38].

En Colombia el 60% de los hogares conviven con los dos tipos de café, esta es una dinámica que se ha mantenido en los últimos tres años. Si miramos el detalle de los segmentos, en tostado/molido encontramos que las familias gastan en promedio 67.375 pesos al año, lo que significa un mercado de más de 400 mil millones de pesos, teniendo en cuenta que el 80% de los hogares lo consumen. De este segmento se venden en el país cerca de 5,5 millones de tazas al año, aseguró el estudio [38].

2.1.5. Tipos de beneficio de café

2.1.5.1. Beneficio convencional del café: se conoce como el proceso que tradicionalmente se ha utilizado en Colombia para transformar el fruto de café o semilla en un producto de consumo y en el cual se utiliza agua en las etapas de despulpado, lavado y transporte del fruto, del café despulpado y del café lavado, con un consumo global cercano a los 40 litros de agua por cada kilogramo de café pergamino seco, además, se requiere de infraestructura especializada para medianas y grandes producciones y en el cual no se realiza manejo a los subproductos [39].

2.1.5.2. Beneficio ecológico del café: Es un proceso de beneficio de café amigable con el ambiente, que permite obtener cafés con la calidad física y de taza característicos del café de Colombia. Se define como el conjunto de operaciones realizadas para transformar el café cereza en café pergamino seco, en el cual consiste en racionalizar el agua en el lavado del café utilizando menos de a 5 L por kg de CPS para el despulpado, el transporte de la pulpa y eliminación del mucilago se realiza de forma natural o mecánica, utilizando desmucilaginosos, lavadores mecánicos o tanques de fermentación [40]. El beneficio ecológico tiene de manera general seis pasos o momentos fundamentales tal como lo muestra la figura 2.

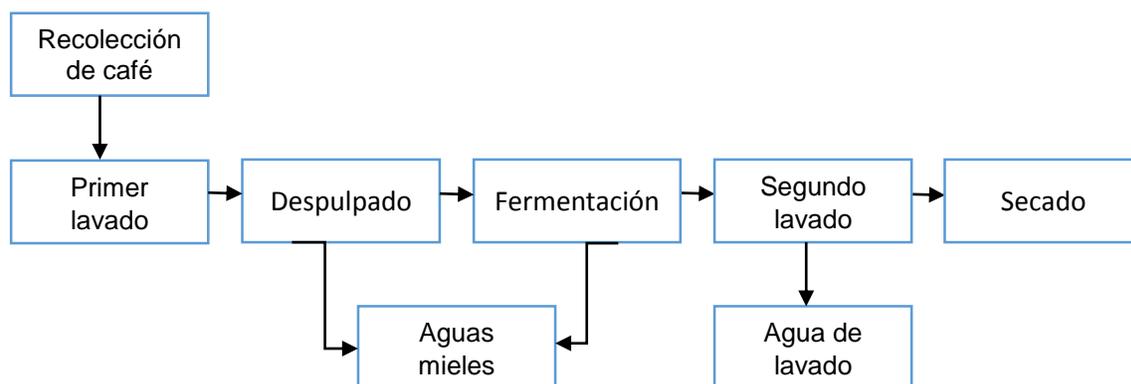


Figura 2.Esquema general de los procesos de beneficio ecológico del café

Este proceso, es realizado por medio de vía húmeda, con base en los siguientes procesos: se inicia con la recolección de café cereza, en esta etapa se cosechan únicamente los granos que alcanzan el estado de madurez completa, normalmente de color rojo o amarillo, ya que los verdes dañan el sabor de la taza de un café. (Figura 3) Todo este proceso se desarrolla de forma manual [41].



Figura 3. Café cereza recolectada antes de iniciar su proceso.

Fuente: Cenicafé 2018.

El café cereza recolectado, es sometido a un primer lavado para separar hojas y otros residuos (figura 4), y el fruto es seleccionado y clasificado de mayor densidad, que en efecto brinda las mejores características organolépticas de más alta calidad como: olor, sabor, cuerpo y acidez.



Figura 4. Primer lavado de la café cereza para separar hojas y otros residuos

Fuente: Cenicafé 2018.

Se continúa con el despulpado que se realiza el mismo día de la recolección, los granos de café se despulpan, retirando la cereza del grano, simultáneamente en el paso de la fermentación, con la separación del mucilago en tanques de fermentación o por medios mecánicos, los granos permanecen en reposo por 12 a 18 horas, dependiendo de algunas variables como clima, cantidad del mucilago, volumen de café y grado de madurez (figura 5).



Figura 5. Vista al iniciar el tiempo de fermentación

Fuente: Cenicafé 2018.

Luego, se hace un segundo lavado con agua limpia donde se retiran los restos de mucilago que quedan en el grano y se eliminan los azúcares; además, se generan las aguas mieles, “mucilago” que salen del sistema tanque sifón que son transportadas por un canal rectangular y se descargan al sistema de tratamiento (figura 6).



Figura 6. Descarga del agua miel de café del proceso de beneficio húmedo del café
Fuente: Cenicafé 2018.

Después de lavar los granos de café se someten a un secado, en el que se exponen los granos al calor del sol o por medio mecánico, con el fin de reducir la humedad de un 60% aproximadamente que es el resultado después del proceso del lavado aun 11% o 12%, facilitando así su conservación. Posteriormente se realiza un lavado a todos los equipos utilizados en el proceso [41].



Figura 7. Secado de café por funcionamiento mecánico
Fuente: Cenicafé 2018.

Terminado el proceso de beneficio húmedo, incluyendo el secado, el café es sometido a un nuevo proceso de selección y trilla de café, para obtener el café almendra o café verde el cual estará listo para el proceso de tostón y preparación de la bebida de café o para llevar y llenar en sacos para vender localmente y exportar (figura 8).



Figura 8. Selección de café realizado de manera manual

Fuente: Cenicafé 2018.

El proceso finaliza con el tostado de café, cuando el grano verde es sometido a una fuente de calor, generando el delicioso aroma y sabor; se muelen y quedan listos para la preparación de la bebida. De tal manera que la producción de café tiene diferentes pasos importantes que determinan la calidad final del producto, tales como: recolección, selección del grano, lavado, trilla, tostión, molienda y preparación [28].

Este proceso, permite que el café continúe conservando la calidad exigida por las normas de comercialización, evitando pérdidas del producto y eliminando procesos innecesarios, lográndose además el aprovechamiento de los subproductos en producción de bioetanol de la pulpa y el mucilago del café y postratamiento de aguas

residuales del beneficio del café utilizando humedales, lo cual representa el mayor ingreso.

2.1.5.3. Beneficio ecológico del café sin vertimientos: En este sistema se realiza un uso racional del agua y se tratan los subproductos como pulpa, mucilago y aguas residuales, de forma que no se generen vertimientos en el proceso. La tecnología Ecomill es la nueva propuesta de Fedecafé para realizar el beneficio de café más amigable con los recursos naturales. La operatividad de este equipo consiste en realizar un despulpado sin agua, transporte de café despulpado y de la pulpa sin agua, proceso de fermentación natural en tanques cilíndricos que no necesitan agua para el vaciado del café, sistema mecánico de lavado con mínima cantidad de agua menos de 0.5 L por kg de CPS y manejo de las aguas residuales con cero vertimientos [39].

2.1.6. Subproductos del café

En cada una de las etapas del proceso de beneficio ecológico del café por vía húmeda se genera diferentes tipos de residuos con su respectiva pérdida y pérdida acumulada en todo el proceso (tabla 2) [42].

Tabla 2. Residuos generados en el proceso de benéfico húmedo e industrialización del café

Proceso	Residuo obtenido	Pérdida (gramos)
Despulpado	Pulpa fresca	436
Desmucilaginado	Mucilago	149
Secado	Agua	171
Trilla	Pergamino película plateada	42
Torrefacción	Volátiles	22
Preparación bebida	Borra	104

Fuente: Cenicafé

2.1.6.1. La Pulpa: es la más voluminosa y representa el 56 % del volumen del fruto y el 40% del peso. La composición química de este residuo, al sufrir un proceso de fermentación, puede provocar que se formen cargas orgánicas de 20 kg por quintal oro procesado es decir a 46 kg de café después de su transformación [43], esto como un desecho sólido no reutilizado. Las aguas del despulpado pueden generar hasta un máximo, en términos de DQO, de 52,277 mg O₂ por Litro, equivalente siempre en términos de DQO a 7,18 kg O₂ por quintal oro [41].

2.1.6.2. El mucílago: puede poseer una carga orgánica, en el agua del primer lavado, expresa una DQO, de 26,535 mg O₂ /Litro, equivalente a 3,64 kg O₂ /quintal oro producido. El mucílago representa entre 20 y 22% del peso del fruto y conforma una importante proporción de la carga orgánica potencial, por su alto contenido de azúcares, pectinas y ácidos orgánicos [41].

2.1.6.3. El aguamiel: es agua limpia utilizada para despulpar y lavar el grano de café, se convierte en residual (agua miel). Su naturaleza química está relacionada con la composición fisicoquímica 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. Así se origina su aporte como carga orgánica, del primero y segundo lavado, con alrededor en términos de DQO de 43,615 mg O₂ por Litro, equivalente a 6 kg de DQO por quintal oro [19].

2.1.6.4. Borra de café: residuos que se genera en las fábricas de café soluble, cuando se prepara la bebida a partir del grano tostado y molido, corresponde a la fracción insoluble del grano tostado. Representa cerca del 10% del peso del fruto fresco [42].

2.1.7. Características fisicoquímicas y microbiológicas de las aguas residuales del café.

Los contenidos de contaminantes orgánicos y minerales presentes en las aguas residuales de beneficio del café, están relacionados con el tipo de beneficio empleado (fermentación natural y desmucilaginado) como también la cantidad y calidad del agua usada en el proceso [14]. Las aguas residuales que se producen durante el proceso de beneficio húmedo del fruto del café, son biodegradables en casi su totalidad durante la digestión anaerobia, aproximadamente un 80% de la DQO es convertido rápidamente en metano; poseen características físico-químicas, particularmente agresivas con el medio ambiente como: pH bajos y concentraciones de materia orgánica alta, correspondiente a contaminantes entre 60 y 240 veces superiores a las aguas residuales domésticas; lo cual genera graves desequilibrios en el ecosistema receptor y en sus componentes (tabla 3).

Tabla 3. Caracterización de las aguas mieles provenientes del beneficio húmedo del café

Parámetro	Unidades	Promedio
pH	Unidades	3,71
DQO total	ppm	10070
DQO filtrada	ppm	7143
DBO ₅	ppm	3875
Nitrógeno total	ppm	218,25
Nitrógeno amoniacal	ppm	9,51
ST	ppm	2818
SST	ppm	1553
P-PO ₄	ppm	0,005
S-SO ₄	ppm	29,5
Nitrógeno nítrico	ppm	0,73
Acidez	ppm	823

Fuente: Tecnicafé

La composición del mucilago es el 35,8% son sustancias pépticas totales, el 17% representa a celulosa y cenizas, el 45,8% son azúcares totales. El mucilago representa un 5% aproximadamente del peso total del grano de café; dentro del fruto constituye una capa de 0,5 a 2 mm de espesor y está fuertemente adherido a la cáscara. Físicamente el mucilago es un sistema coloidal tipo “gel” que la planta ha sintetizado mediante procesos metabólicos durante el año. Químicamente el mucilago contiene agua, pectinas, azúcares y ácidos orgánicos, rica en azúcares tales como: monosacáridos, glucosa, galactosa, y arabinosa, los cuales le dan las características especiales y únicas al café [44].

2.1.8. Problemáticas asociadas a las aguas mieles

La contaminación ocasionada por la industria cafetalera en el proceso de beneficio del café constituye un serio problema en los países productores del mismo. El procesado del fruto se realiza generalmente mediante el llamado “Beneficio húmedo del café”, donde se consume grandes cantidades de agua y se genera dos subproductos agua miel y pulpa que se utilizan de manera irracional, se consideran de poco o nulo valor económico y por consiguiente es designado como desechos [9], el cual se vierte la pulpa y el mucilago a las fuentes de agua directamente a los ríos, generando malos olores, contaminando de fuentes de agua, y representan 3590 kg DBO₅ /1000 arrobas de CPS y 3484 kilogramos de SST/1000 arrobas de CPS [10].

Los impactos sociales están relacionados con la calidad de vida de los caficultores, debido a los impactos ambientales que originan el propio cultivo y el beneficio húmedo del café como: problemas de salud en poblaciones aledañas y fundamentalmente de los trabajadores que aplican insecticidas, fungicidas tóxicos y productos químicos, la disminución del rendimiento de sus tierras, por la erosión provocada por la precipitación sobre todo en terrenos con pendientes sometidos a la deforestación y al monocultivo durante mucho tiempo y la creciente utilización de agroquímicos para el mantenimiento de las producciones, implica cada vez mayores gastos, así como un aumento en el costo del grano [45].

Dependiendo de las características fisicoquímicas y microbiológicas de las aguas mieles del café pueden contener diversos contaminantes, que han sido clasificados como contaminantes peligrosos debido a su alta toxicidad para la vida acuática y la salud humana. Ante esta situación se han desarrollado alternativas de tratamiento de aguas residuales. Diversos métodos se han reportado en la literatura y son empleados para la eliminación de contaminantes en solución acuosa. Las tecnologías de tratamiento incluyen como métodos: precipitación química,

intercambio de iones, procedimiento de separación de membrana, degradación biológica, oxidación química, extracción con disolventes y adsorción [46].

2.1.9. Adsorción

La adsorción es uno de los métodos, que ha demostrado ser popularmente aceptado por su versatilidad, conveniencia, sencillez para eliminar diversos contaminantes presentes en el agua, dando como resultado un efluente de mejor calidad y es un proceso económicamente factible, principalmente para las pequeñas y medianas industrias [46].

La adsorción es un proceso que implica una fase sólida biomasa (adsorbente) y una fase líquida (solvente) que contiene las especies disueltas (adsorbato) que van a ser retenidas por el sólido. Para que este proceso se lleve a cabo debe existir afinidad del adsorbente por el adsorbato, para que estos últimos sean transportados hacia el sólido donde van a ser retenidos por diferentes mecanismos. Esta operación continúa hasta que se establece un equilibrio entre el adsorbato disuelto y el adsorbato enlazado al sólido [43].

La adsorción se produce por la acción de las fuerzas activas que existen en la superficie del sólido, que provocan la aparición de una fuerza atractiva neta, normal a la superficie de este. En función de la naturaleza de estas fuerzas, la adsorción se puede clasificar en dos tipos generales:

2.1.9.1. Adsorción física o fisisorción: las interacciones que se establecen entre la superficie del sólido y el adsorbato son de naturaleza física, fundamentalmente fuerzas de Van der Waals (figura 9). No se produce, por tanto, compartición ni transferencia de electrones, manteniéndose la individualidad del sólido y del adsorbato. Se trata de un proceso reversible, con calores de adsorción, aprox. 20-40 kJ/mol son semejantes a las entalpías de condensación de la sustancia adsorbida [47].

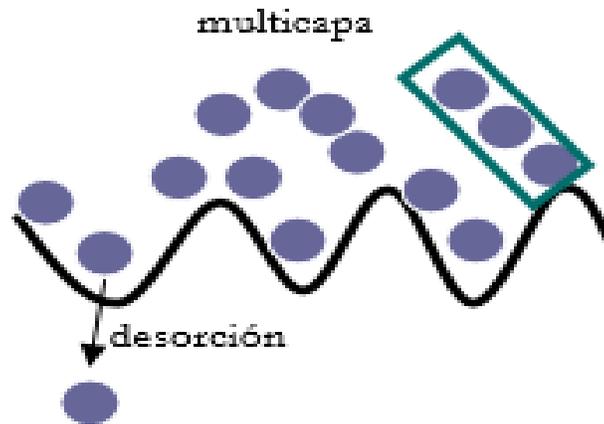


Figura 9. Adsorción física

2.1.9.2. Adsorción química o Quimisorción: las fuerzas que se establecen son verdaderos enlaces químicos, perdiéndose la individualidad de las moléculas y resultando un fenómeno irreversible. No ocurre sobre toda la superficie del sólido, si no solamente sobre los centros activos (figura 10). Los calores de adsorción son mayores que los intercambiados en la fisisorción entre -400 y -80 kJ/mol [15]. La cantidad de adsorbato que puede retener un adsorbente es función de las características y de la concentración del adsorbato y de la temperatura. En general, la cantidad de materia adsorbida se determina como función de la concentración a temperatura constante, y la función resultante se conoce con el nombre de isoterma de adsorción [47].

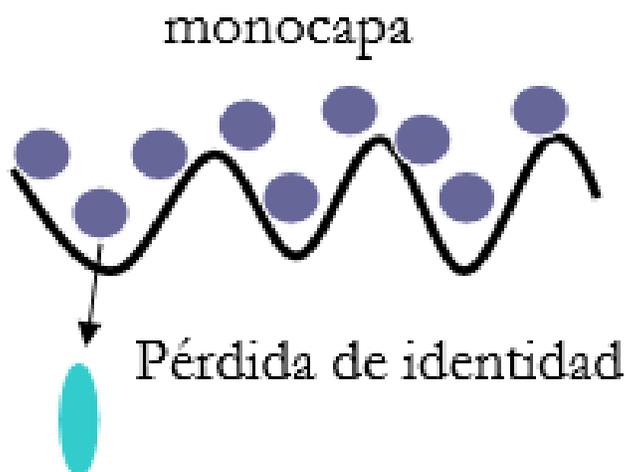


Figura 10. Adsorción química

2.1.10. Proceso de activación química

Se obtiene mediante un tratamiento químico, utilizando reactivos químicos y a temperaturas altas, la materia prima se transforma en carbón, pero adquiriendo propiedades con una gran actividad y poder de adsorción. El proceso de activación química es aplicado directamente a la materia prima; que principalmente son residuos agrícolas o biomasa vegetales las cuales se mezclan con un agente químico activante, principalmente cloruro de zinc o ácido fosfórico entre otros [47].

La carbonización y/o activación es mayor cuando se realiza a temperaturas altas, lo recomendado es que sea entre 500 a 900 °C. Es decir, los reactivos se mezclan con la materia prima, teniendo en cuenta un tiempo y temperatura de reacción apropiados. Concluido el proceso, se descarga y se enfría y se lava el carbón para recuperar el agente activador. Luego el carbón activado se filtra y se seca. Los procedimientos químicos de activación son obtenidos por impregnación empleándose sustancias deshidratantes como el cloruro de zinc, ácido fosfórico, ácido sulfúrico, ácido bórico, ácido nítrico, sulfuro de potasio, sulfatos de magnesio y sodio, etc. [48].

El ácido fosfórico, actúa sobre la materia prima, deshidratándola y combinándose con los compuestos oxigenados e hidrogenados, para dar agua como subproducto. Esta reacción favorece la activación, pues habrá menor cantidad de material volátil incorporado en la estructura del carbón [47].

2.1.11. Prueba de azul de metileno

El azul de metileno o cloruro de tetrametilitionina (figura 11) es un colorante de la tiazina usado inicialmente como un colorante para el teñido de la seda y el almidón, hoy día es muy utilizado para la tinción de tejidos y bacterias, además se usa como agente antiséptico [49].

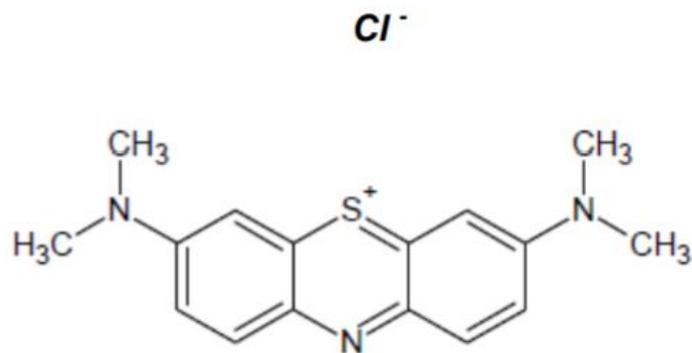


Figura 11. Estructura del azul de metileno

2.1.11.1. Mesoporos: Para caracterizar los mesoporos de debe tener en cuenta el área superficial específica, el volumen del poro y la distribución del tamaño del poro, debido a que los mesoporos juegan un papel esencial en el transporte de moléculas de adsorbato sobre los microporos. La distribución del tamaño del poro depende fundamentalmente de tres factores: el origen de la materia prima, el tipo de activación y la duración del proceso de activación [50].

2.1.12. Cinética de adsorción

El estudio cinético del proceso de adsorción permite determinar la velocidad a la que los contaminantes son retirados del medio acuoso. Se han propuesto varios modelos cinéticos para describir el mecanismo (tabla 4). Se ha determinado que la cinética del proceso de adsorción ocurre en dos fases una de forma rápida y una donde la velocidad disminuye hasta alcanzar el equilibrio. El mecanismo cinético es bastante complejo y puede involucrar reacciones químicas entre grupos funcionales del adsorbente y los iones metálicos, reacciones de intercambio iónico y/o formación de complejos; además hay que tener en cuenta los procesos de transferencia de materia tales como transporte de especies en el seno de la fase líquida, difusión desde la fase líquida hasta la superficie del sólido y difusión en el interior de los macroporos y microporos [50].

Tabla 4. Modelos cinéticos

Modelo cinético	Ecuación	Parámetros
Pseudo primer orden	$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t})$	<p>K_1 (min⁻¹) = constante cinética de adsorción de primer orden</p> <p>q_e = carga de colorante en el equilibrio, bajo las condiciones de contorno $t = 0$ con $q_t = 0$ y $t = t$ con $q_t = q_e$,</p> <p>t = tiempo</p>
Pseudo segundo orden	$q_t = \frac{K_2 q_e^2 t}{1 + K_2 q_e^2 t}$	<p>K_2 (g/mg*min) = constante cinética de adsorción de segundo orden</p> <p>q_e = carga de colorante en el equilibrio, bajo las condiciones de contorno $t = 0$ con $q_t = 0$ y $t = t$ con $q_t = q_e$,</p> <p>t = tiempo</p>

Fuente: [51]

2.1.13. Tiempo de equilibrio

El tiempo de equilibrio es aquel a partir del cual se satura el adsorbente, la evaluación del efecto del tiempo de contacto necesario para alcanzar el equilibrio como paso previo al estudio de la cinética de adsorción es fundamental ya que contribuye a determinar la naturaleza del proceso [33]. Se ha observado que el mecanismo de retención ocurre inicialmente con la migración del adsorbato desde la solución a la superficie del adsorbente, seguido por un proceso de difusión para finalizar en la fijación en el sitio activo [49].

2.1.14. Características geotextil NTC 1600

Tabla 5. Especificaciones técnicas geotextiles no tejidos.

Especificaciones	Valor	Unidad
Marca	PAVCO	
Apertura aparente	0,202	(mm)
Espesor	1,50	(mm)
Permisividad	2,0	(1/s)
Permeabilidad	26×10^{-2}	(cm/s)
Tasa de flujo	5530	L/min/m ²

Fuente: Geo sistemas [52]

2.1.15. Columna de adsorción

Una columna de adsorción sirve para separar compuestos indeseables de una corriente líquida o gaseosa. La modalidad de operación de una columna de adsorción es batch, porque a medida que pasa el fluido que contiene la sustancia que se desea separar, que se conoce como sorbato, el adsorbente, que es el material sobre el que se deposita el sorbato, se va saturando, hasta agotar su capacidad de adsorción. Cuando esto sucede debe suspenderse la operación de la columna, el adsorbente debe desorberse mediante el paso de una sustancia que retire el sorbato, y generalmente debe volverse a activar [53].

Es significativo la implementación de un tratamiento de agua y la reutilización de subproductos agrícolas como material bioadsorbente, para intentar disminuir el grado de contaminación que ocasionan las aguas mieles; utilizando una columna de adsorción anaerobia de flujo ascendente, la cual se encarga de la eliminación de carga contaminante, brinda una buena alternativa de tratamiento por ser considerado eficiente, de relativos bajos costos de construcción, operación y

mantenimiento. El funcionamiento de este tratamiento se evalúa tomando muestras y midiendo parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de interés [54], [55].

2.1.16. Turbiedad

La turbidez es la medida de dispersión de la luz en el agua por la presencia de sólidos suspendidos, disminuyendo la calidad del agua, este parámetro tiene una relación directa con los sólidos suspendidos totales, ya que la concentración excesiva de estos va a aumentar considerablemente los niveles de turbidez del agua [56], [57].

2.1.17. Demanda Química de Oxígeno y Demanda Bioquímica de Oxígeno

Estos parámetros que se utilizan para medir el grado de contaminación presente en un efluente. Mediante estos parámetros se cuantifica la cantidad de oxígeno necesario para oxidar, por vía química (DQO) o por vía biológica (DBO_5), la materia orgánica presente en el residuo, siendo proporcional el valor encontrado a la cantidad de materia orgánica presente [58].

2.3. BASES LEGALES

Las actividades y procesos referentes al manejo y tratamiento de residuos líquidos deben ser acorde con la normatividad ambiental en este sentido

Tabla 6. Normatividad Ambiental Colombiana

Ley	Norma	Descripción	Entidad	Referencia
Leyes ordinarias	Decreto 2811 de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	[59]
	Decreto 1594 de 1984, derogada por la 3930 del 2010 que fue modificada por la 4728 del 2010	Sobre las aguas servidas, usos u vertimientos de residuos líquidos	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	[60]
	Decreto 3930 de 2010	por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.	Presidencia de la Republica	[61]
	Resolución 0631 del 17 de marzo de 2015.	Parámetros permisibles máximos en los vertimientos puntuales	Ministerio De Ambiente y desarrollo sostenible	[62]
	Resolución 2115 del 22 de junio de 2007	Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano	Ministerio de la protección social ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial	[63]

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE MESOPOROS DE LA BORRA DE CAFÉ ACTIVADA A TRAVÉS DE DOS MÉTODOS QUÍMICOS

3.1.1. Reconocimiento de campo

Para el desarrollo del proyecto, se realizaron visitas al parque TECNICAFÉ y la Empresa Supracafé ubicada en el Municipio de Cajibío, Departamento del Cauca, esto con el fin de recolectar información de la producción del café e identificar los tipos de tratamiento de aguas mieles y las condiciones de manejo actual de las mismas.

3.1.2. Proceso de activación química de la borra de café

Dentro de las actividades que se realizaron en el laboratorio para el proceso de activación química de la borra de café, se llevaron a cabo procesos como: recolección de la materia prima, lavado de la borra de café, primer secado, impregnación, segundo secado, segundo lavado, ajuste de pH, tercer secado; respectivamente para cada uno de los agentes químicos (figura 12).

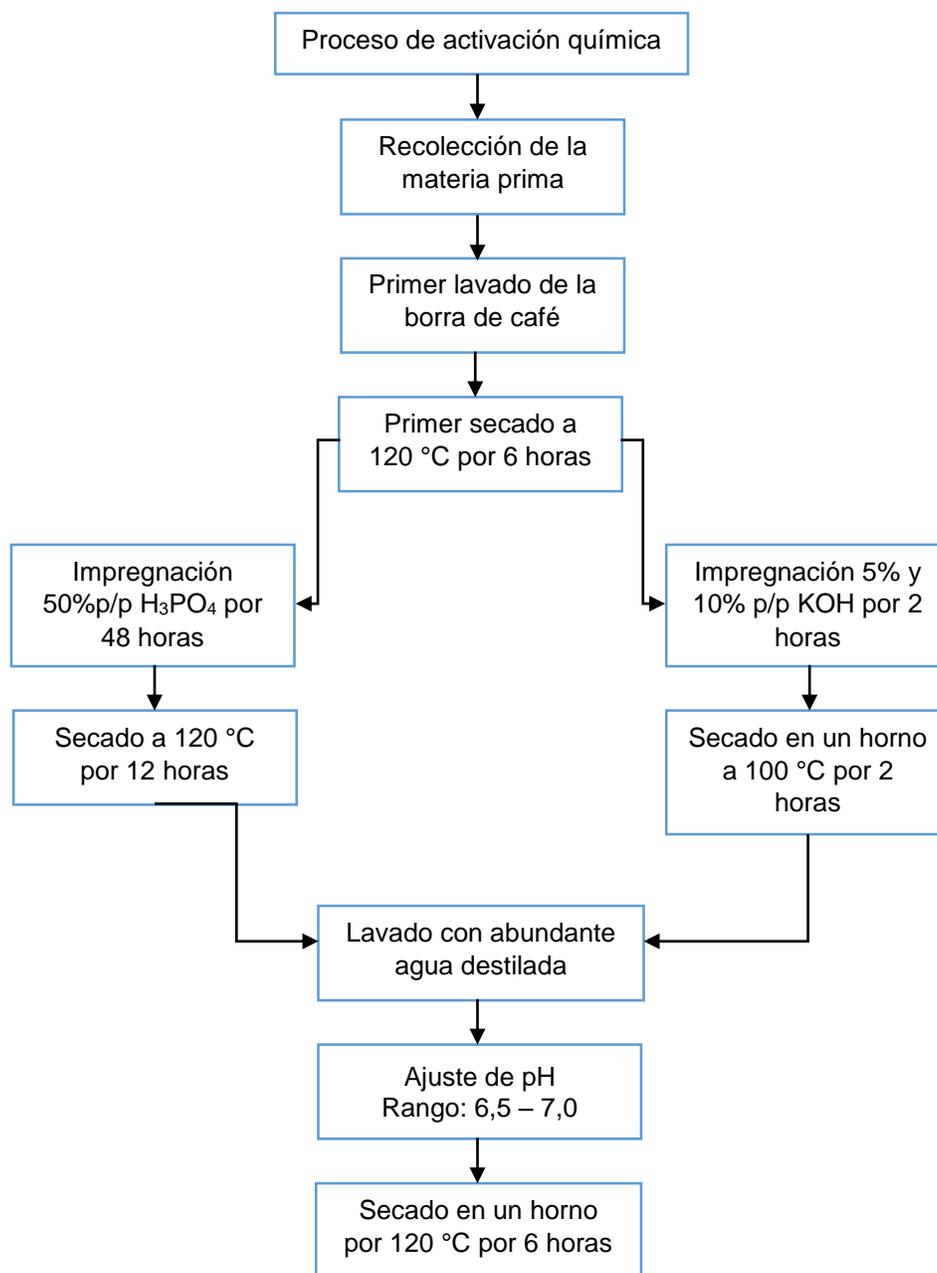


Figura 12. Esquema general del proceso de activación química de la borra de café a través de dos métodos químicos

3.1.2.1. Lavado de material para actividades de laboratorio: Se hizo un respectivo lavado de material para eliminar impurezas y trazas de otro material o agente químico presente en la vidriería (tabla 7). En el proceso inicialmente se realizó un lavado simple con agua de la llave y detergente neutro libre de fosfatos, cuando fue necesario se usó un churrusco de laboratorio para garantizar la

eliminación de residuos de sustancias, posteriormente se hizo un segundo lavado con una solución de ácido nítrico (HNO_3) al 10% y enjuague con agua destilada por triplicado. Finalmente, el material limpio se introdujo en una estufa para secado a una temperatura de 100 °C. El material fue introducido al desecador para evitar su contaminación y además dejándolo enfriar para su uso.

Tabla 7. Lista de materiales de laboratorio para el proceso de activación y prueba de azul de metileno

Actividades	Materiales de laboratorio
Lavado de material de laboratorio	Detergente neutro, churruscos de laboratorio, ácido nítrico (HNO_3) al 10%, agua destilada, horno, gradilla.
Lavado de la borra de café	2 Beaker 1000 mL, agua destilada, horno, planchas, magnetos, tamiz, lámina de aluminio.
Proceso de activación de la borra de café	Beaker 300 mL, agua destilada, horno, planchas, magnetos, papel film, pipetas 10 mL, pro pipeta, balones 50 mL.
Prueba azul de metileno	Beaker 50 mL, balones aforados 50 mL, pipeta (1 mL, 2 mL, 5 mL, 10 mL), propipeta, micro pipeta, magnetos, planchas, papel film, espectrofotómetro de nano color (UV/Vis).

3.1.2.2. Recolección de la materia prima: La borra de café fue recolectada y almacenada en un recipiente hermético, debidamente rotulado en la finca de la empresa Supracafé, posteriormente en laboratorios de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca; se hizo el pesaje de la muestra y se realizó su rápido procesamiento, en cuanto a lavado, secado y activación química, de lo contrario la muestra se refrigeraba por un máximo tiempo de 12 horas; esto con el fin de evitar

la contaminación del material por el crecimiento de hongos sobre la superficie, (figura 13).



Figura 13. Recolección de la borra de café

3.1.2.3. Lavado de la borra de café: La muestra recolectada inicialmente se pesó en una balanza analítica, luego se realizó el lavado del material o borra de café repetidas veces con agua destilada a una velocidad de agitación de 500 rpm, con el fin de remover de manera homogénea los residuos presentes en el material que pudiesen afectar el proceso de activación, es por eso que este proceso se hizo hasta no observar coloración en el agua del lavado de la borra de café. Posteriormente, las muestras se extendieron uniformemente sobre una lámina de aluminio; para hacer el proceso de secado, en un horno a 100 °C durante 24 horas, finalmente la muestra secada fue pesada y almacenada en un recipiente hermético con el fin de evitar su hidratación.

3.1.2.4. Activación química de la borra de café: La borra de café se preparó mediante activación química con dos agentes activantes:

- ❖ Hidróxido de potasio (KOH): Se prepararon dos soluciones de hidróxido de potasio (KOH) a concentraciones de 5% y 10%. Este agente químico fue

mezclado con el material adsorbente en una relación de KOH: Borra de 3:1 a 100 r.p.m. por un lapso de 2 horas, durante este proceso de impregnación del material, el recipiente fue hermetizado evitando la evaporación de la solución activadora. La activación química de la borra de café se llevó a cabo en un horno a 100 °C durante 2 horas, una vez transcurrido el tiempo de activación, se dejaba que el horno se enfriara naturalmente hasta la temperatura ambiente.

Tras la activación, se procedió al lavado de la borra de café activada con suficiente agua destilada con objeto de retirar el exceso de reactivo, se midió y ajustó pH con hidróxido de sodio (NaOH) 0,1 N a un rango de 6,5-7 unidades; finalmente la borra de café activada fue secada en un horno a 120 °C durante 6 horas [45].

- ❖ **Ácido fosfórico (H_3PO_4):** Se mezcló la borra de café con una solución al 50% de ácido fosfórico (H_3PO_4) en relación 3:1 respectivamente a 200 r.p.m. en un lapso de 48 horas, durante este proceso de impregnación el recipiente fue hermetizado evitando la evaporación de la solución activadora. Para optimizar el proceso de activación, la borra de café se sometió a calentamiento en un horno por un periodo de 12 horas a 120 °C. Una vez terminado el tiempo de activación, se dejó que el horno se enfriara naturalmente hasta temperatura ambiente. Posteriormente se lavó la borra de café activada con abundante agua destilada con objeto de retirar el exceso de reactivo, se midió y ajustó pH con hidróxido de sodio (NaOH) 0,1 N hasta llegar a un rango de 6,5-7 unidades como lo muestra la figura 14; finalmente la borra de café activada fue secada en un horno a 120 °C durante 6 horas [45].



Figura 14. Ajuste de pH de la borra de café activada con hidróxido de sodio

Por último, cada una de las muestras fueron almacenadas en un recipiente hermético debidamente rotulado, con el fin de evitar que las muestras se contaminen o tengan contacto con el aire para su degradación.

3.1.3. Prueba de azul de metileno

Esta prueba se realizó con el fin de determinar la adsorción del azul de metileno en relación con la presencia de mesoporos del bioadsorbente con ácido fosfórico e hidróxido de potasio; para lo cual fue necesario preparar una solución madre de azul de metileno en agua destilada a 100 ppm, a partir de esta solución se prepararon diferentes diluciones a concentraciones de 3 ppm, 2 ppm, 1 ppm, 0,5 ppm y 0,1 ppm (figura 15), cada una de estas disoluciones se prepararon en balones. Se pusieron en contacto 10 mg del bioadsorbente con 20 mL de cada una de las disoluciones anteriormente mencionadas. Para la determinación de mesoporos se construyó una curva de calibración siguiendo la absorbancia a su longitud de onda máxima ($\lambda=645$ nm), mediante espectrofotometría de Nanocolor (UV/Vis), en un espectrofotómetro Macherey-Nagel MN Sincé 1911 [64].



Figura 15. Solución madre y diluciones a diferentes concentraciones de azul de metileno

A los datos obtenidos se les aplicó un factor de corrección en cada una de las concentraciones iniciales y finales de los agentes químicos que se utilizó para la activación química de la borra de café; para saber la concentración final de adsorción de azul de metileno en la borra de café se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$\text{factor de correccion (blanco)} = C_i - C_{fb} \quad (1)$$

Dónde: C_i = concentración inicial de azul de metileno (mg/L), C_{fb} = concentración final de azul de metileno del blanco (mg/L).

$$C_a = f_{cb} + C_{fb} \quad (2)$$

Dónde: C_a = concentración adsorbida por el bioadsorbente (mg/L), F_{cb} = factor de corrección blanco (mg/L), C_{fb} = concentración final del bioadsorbente (mg/L)

3.2. DETERMINAR LA CINÉTICA DE REACCIÓN DE LA ADSORCIÓN DE DQO DE AGUAS RESIDUALES DEL CAFÉ A TRAVÉS DE LA BORRA DE CAFÉ ACTIVADA MEDIANTE MÉTODOS QUÍMICOS.

En las actividades efectuadas en esta fase, se usaron y manipularon materiales de laboratorio, a los cuales se les realizó un respectivo lavado con la finalidad de obtener resultados reales (tabla 8).

Tabla 8. Lista de materiales y equipos para el proceso de cinética de adsorción

Actividades	Materiales de laboratorio	Equipos
Monitoreo de las aguas mieles del café	Probeta 1000 mL, botellas rotuladas, cintas indicadoras de pH, agua destilada, guantes, conos Imhoff 1000 mL, gotero 25 mL, ácido nítrico 85%.	pH metro, conductímetro,
Elaboración filtro empacado	Tubo de 2" y 1", tapones PVC, manguera de nivel 5/8", pegante PVC, silicona, geotextil NT 1600, segueta, lija, limpiador de tubería.	Taladro
Tratamiento preliminar	Balón aforado 500 mL, gotero 25 mL, agua destilada, pipeta 5 mL, propipeta, sulfato de aluminio, cloruro férrico, moringa 1%,	Balanza analítica, Floculador, cronometro.
Proceso de sedimentación	Tanque, varilla de agitación, probeta 50 mL, 500 mL.	cronometro
Cinética de adsorción	Botellas rotuladas, cintas medidoras de pH, agua destilada, guantes, beaker 1000 mL, 10 mL, balones aforados 50 mL, gotero 25 mL, ácido nítrico 85%, agujas hipodérmicas 1 cm ³ , papel filtro.	pH metro, conductímetro, planchas, magneto,

Fuente: Elaboración propia

3.2.1. Caracterización de las aguas mieles del café

3.2.1.1. Monitoreo de las aguas mieles del café: Según la guía de toma de muestras de agua residuales (IDEAM), se realizaron 3 monitoreos; cada una de las muestras se obtuvo de manera compuesta, estas se colectaron en recipientes herméticos debidamente purgados y rotulados. Adicional a esto se realizó una fijación de la muestra con ácido nítrico para evitar contaminación y modificación de la muestra [65].

Estas muestras, se llevaron al laboratorio Ambiental de la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC), donde los parámetros a evaluados fueron: DQO, DBO y SST; como también se midieron otros parámetros in situ: SDT, pH y Turbiedad; para esto se tuvo en cuenta que los equipos estuvieran debidamente calibrados, estos parámetros están establecidos por la resolución 0631 de 2015 referente a vertimientos puntuales de aguas residuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público [62].

Dentro de los parámetros in situ se midieron sólidos sedimentables, para medición de este parámetro se llenó el cono Imhoff hasta la marca de 1 L con una muestra bien homogeneizada, se dejó sedimentar durante 45 minutos y se agitó suavemente la muestra cerca de las paredes del cono con una varilla de agitación, para permitir mayor sedimentación y finalmente se dejó reposar durante 15 minutos, se leyó y registró el volumen de sólidos sedimentables en miligramos por litro [65].

Finalmente, se calculó una relación entre la DBO y DQO para determinar la naturaleza de las agua mieles para cada temporada de producción, se hizo por medio del índice de biodegradabilidad (ecuación 3)

$$IB = \left(\frac{DBO_5}{DQO} \right) \quad (3)$$

Dónde: IB = índice de biodegradabilidad DQO = Demanda química de oxígeno, DBO₅ = Demanda biológica de oxígeno.

3.2.2. Tratamiento preliminar

3.2.2.1. Elaboración del filtro empacado: El filtro empacado cuenta con una longitud total de 0,221 m, un diámetro de la tubería externa de 2 pulgadas y de la tubería interna de 1 pulgada; la tubería interna se perforó en toda la longitud del tubo con un espaciado de 2 cm entre orificios y finalmente se cubrió el tubo perforado con 6 capas de geotextil NTC 1600 el cual ha sido probado en anteriores estudios arrojando buenos resultados (figura 16) [66].

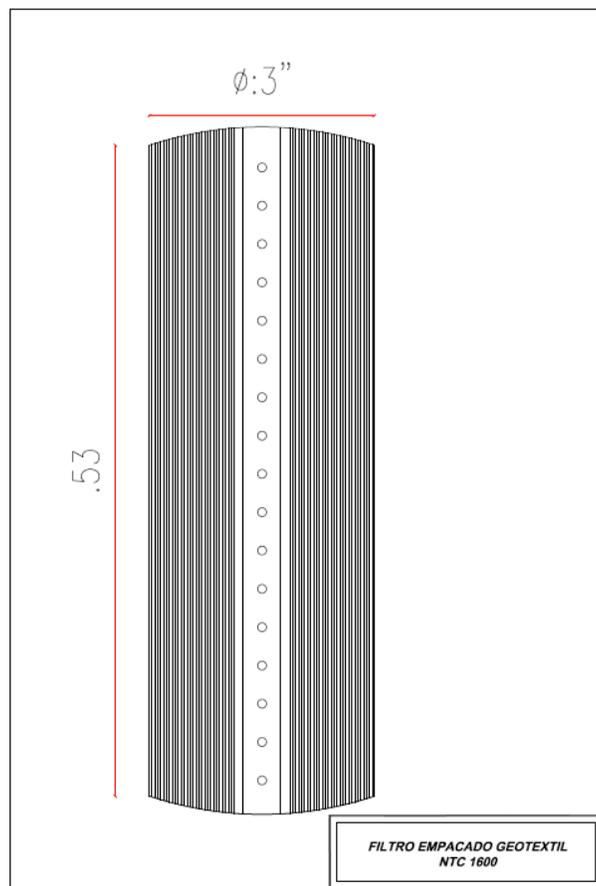


Figura 16. Diseño del filtro empacado

El caudal de entrada al filtro empacado se hizo por medio de una llave ubicada en el tanque sedimentador, suministrando un caudal de 5 mL por segundo. El sistema preliminar de filtración se dispuso de manera horizontal como puede verse en la figura 17

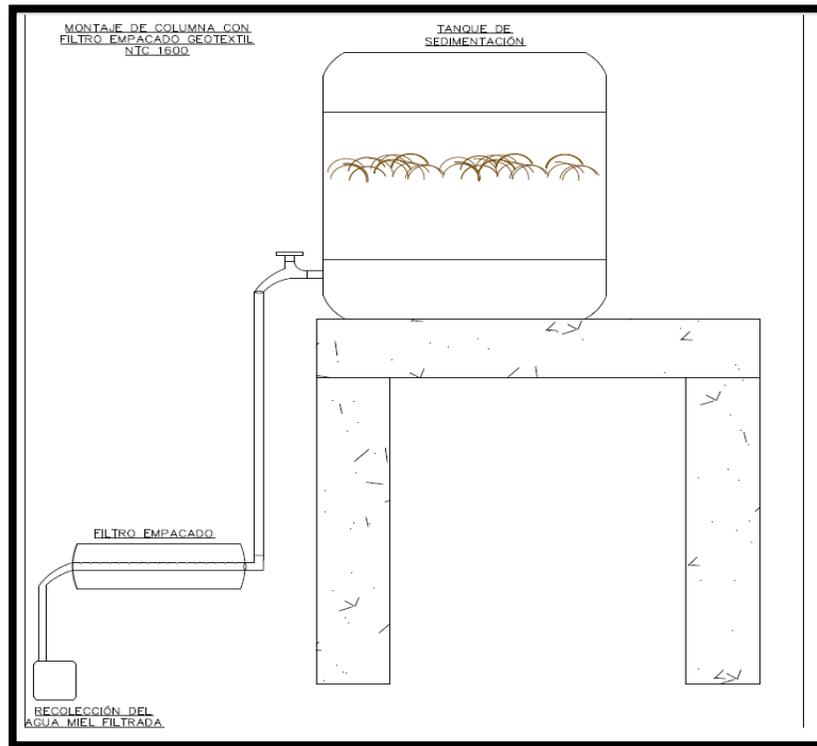


Figura 17. Funcionamiento del filtro empacado

Debido a los resultados obtenidos de sólidos suspendidos del agua miel en este proceso, se hizo necesario implementar técnicas hidráulicas que garantizaran un proceso de filtración más eficiente en la columna de flujo ascendente y que a su vez permitiera determinar de manera más clara la capacidad de adsorción de la borra y por consiguiente la eficiencia remoción de contaminantes de la columna de adsorción de flujo ascendente con borra de café.

3.2.2.2. Neutralización del agua miel

Se midió inicialmente el volumen del agua y esta fue conducida al tanque de homogenización, donde se adicionó una solución con cal hidratada (hidróxido de

calcio) a una concentración a 2,5 M, con el propósito de alcalinizar el flujo de agua miel. Este proceso también permitió dar inicio a la floculación y crear el medio adecuado para que las bacterias degraden con mayor eficiencia la materia orgánica en suspensión [67].

3.2.2.3. Coagulación – floculación y sedimentación

Para determinar la dosis óptima para el proceso de coagulación – floculación del agua miel, se realizaron pruebas de jarras (figura 18) utilizando distintos tipos de coagulantes comerciales como: sulfato de aluminio y cloruro férrico y coagulantes naturales como la moringa al 1%; para los cuales se utilizaron variaciones de 1 mL entre las dosis de los polímero o coagulante en cada jarra, con una mezcla rápida de un minuto, una mezcla lenta de veinte minutos y una sedimentación de 30 minutos , posteriormente se hizo medición de sedimentación de lodos por medio de una cinta métrica. Finalmente se obtuvo una dosis óptima y el coagulante más eficiente [68].

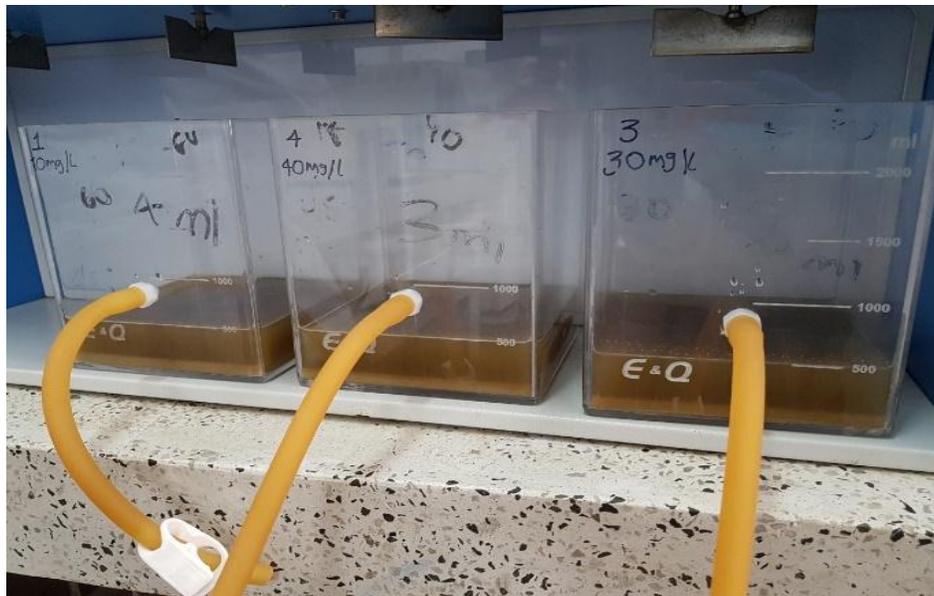


Figura 18. Prueba de jarras para determinar la dosis óptima para el proceso de coagulación – floculación del agua miel

3.2.2.4. Proceso de sedimentación

Este proceso se llevó a cabo en un tanque cilíndrico de diámetro de 60 cm y una profundidad de 44 cm de una capacidad de 20 litros en el cual se llevó a cabo una mezcla rápida de 1 minuto y una mezcla lenta de 20 minutos con el coagulante más eficiente, seguido a esto se realizó un proceso de sedimentación a diferentes intervalos de tiempo, permitiendo la reducción de los coloides en suspensión y materia orgánica a través del proceso de floculación, para posteriormente realizar un primer proceso de filtración.

3.2.3. Proceso de cinética de adsorción

En este estudio de cinética de adsorción se realizó una prueba en discontinuo (batch) donde se definió un tiempo de equilibrio de la adsorción del contaminante en función del tiempo de reacción entre el contaminante y el bioadsorbente [69], es decir el tiempo a partir del cual se satura el bioadsorbente; es importante tener en cuenta que el proceso de cinética se llevó a cabo con el agua resultante de los procesos antes mencionados, ya que esta es el agua que va entrar en contacto con el bioadsorbente dentro de la columna de adsorción.

Este proceso se llevó a cabo en un beaker en donde se utilizaron 5 gramos del material bioadsorbente en contacto con 1 L de agua miel del café; inmediatamente, se colocó en agitación a 50 r.p.m.; este proceso no se hizo a mayor velocidad de agitación para evitar desintegración del bioadsorbente, pero se hizo a una velocidad que garantizara mantener el material en suspensión, de tal manera que se asegurara homogeneidad y buena transferencia de materia entre el sólido (borra de café activada) y el líquido (agua miel).

Luego se monitoreó el proceso, con una aguja hipodérmica tomando muestras de agua del beaker cada 2, 3, 5, 10, 15, 30 minutos hasta que el bioadsorbente alcanzó el punto de equilibrio; cada una de las muestras se filtró para evitar el paso de

pequeñas partículas del bioadsorbente, seguido de la filtración se fijaron las muestras con 2 gotas de HNO_3 al 85% de pureza y se colocó 1 cm^3 de cada muestra en un balón aforado (figura 19).



Figura 19. Muestras pasadas por papel filtro y posteriormente fijadas.

Luego se midió pH, en el cual se encontró aproximadamente entre 1,0 – 2,0 unidades, ya que es un requisito para medición del parámetro DQO, además de garantizar que la muestra no presente cambios o contaminación. Por último, las muestras se almacenaron en recipientes herméticos con su respectiva rotulación, y para su respectivo análisis, se transportaron en un nevera de refrigeración hacia el laboratorio Ambiental de la Corporación regional del Cauca (CRC) [69].

3.3. EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE LA BORRA DE CAFÉ EN UNA COLUMNA DE FLUJO ASCENDENTE

3.3.1. Construcción de la columna de adsorción de flujo ascendente

Para la elaboración de las columnas de adsorción se utilizaron materiales hidrosanitarios y para el monitoreo del efluente materiales de laboratorio, (tabla 9).

Tabla 9. Lista de materiales para la construcción y monitoreo de la columna de adsorción

Actividades	Materiales de construcción	Materiales de laboratorio	Equipos
Construcción columna de adsorción	Tubo PVC 2" ½", 4 tapones PVC 2", uniones 2"x2", pegante de tubería, pegante de tanque, macilla, segueta, acople de manguera, adaptación macho y hembra roscado ½", codo 1½", 1 kg de granito y arena borra de café activada, toldillo.		
Prueba de la columna de adsorción		Botellas rotuladas, conductímetro, cintas indicadoras de pH, ácido nítrico 85%, beaker 1000 mL.	pH metro,

Fuente: Elaboración propia

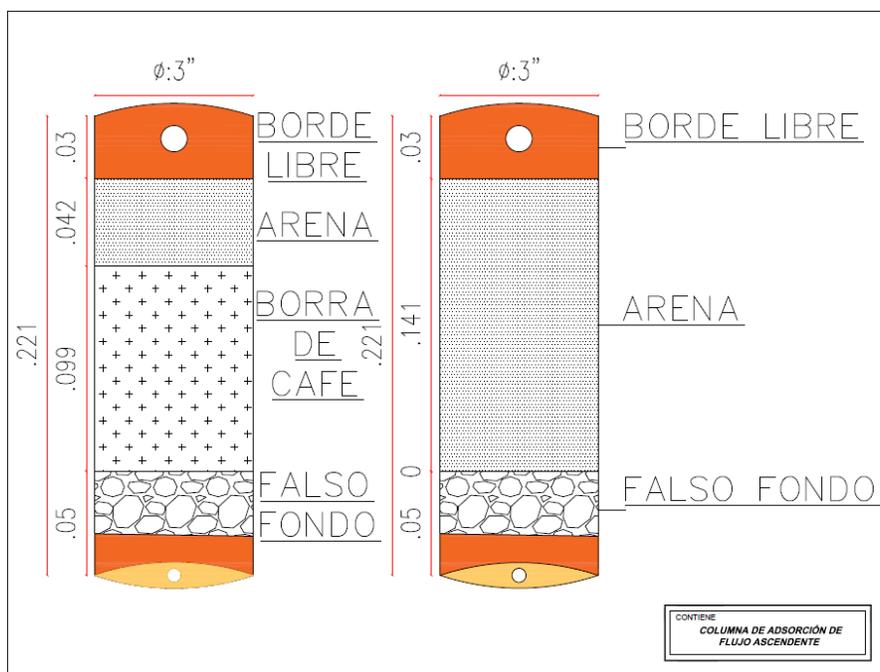


Figura 20. Columna de adsorción con la borra de café

En esta etapa se construyeron dos columnas de adsorción de flujo ascendente a escala piloto (figura 20). Para la columna con el bioadsorbente (A); se escogió un tubo de PVC de diámetro de 3 pulgadas, este se cortó en 4 partes distribuidas así: 5,0 cm de falso fondo, para que la entrada del afluente fuera homogénea, 9,8 cm para ubicar el bioadsorbente equivalente a 200 cm³ de borra de café activada, 4,23 cm de arena y 3,0 cm de borde libre; con una altura total de 22,03 cm de la columna; luego se procedió a la colocación de pequeñas mallas de polipropileno cortadas de acuerdo al diámetro de la tubería. El material fue sellado a presión a través de uniones de 3 pulgadas con el fin de contener la arena y la borra a la altura deseada del lecho filtrante, la salida del efluente se hizo por medio de una manguera de niveles de 5 1/16" (figura 21).

La segunda columna (B) se trabajó en las mismas condiciones de la columna anterior con excepción del bioadsorbente como se puede apreciar en la figura 21, la cual se denominó blanco con el fin de evaluar la eficiencia de remoción de la columna de adsorción con la borra de café activada, garantizando que la adsorción

de contaminantes se realice por el bioadsorbente y no por los demás lechos filtrantes.

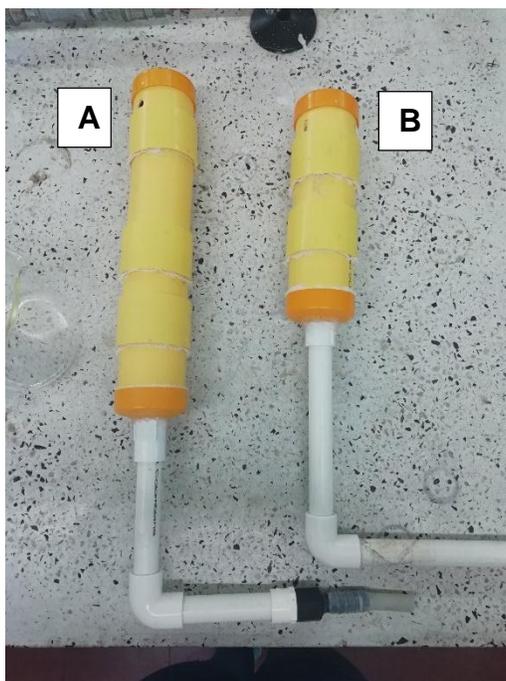


Figura 21. Columnas de adsorción: A) con bioadsorbente, B) Sin el bioadsorbente

3.3.2. Funcionamiento de la columna de adsorción de flujo ascendente

Para esta actividad se tuvo en cuenta los resultados obtenidos del tratamiento preliminar ya que el agua resultante de este proceso se utilizó para la corrida final del sistema. Se contó con dos tanques sedimentadores cada uno con capacidad de 20 L, se alimentaron los tanques hasta alcanzar su capacidad. Seguido a esto se realizó una neutralización de pH entre 6,5 – 7 unidades con hidróxido de cal $\text{Ca}(\text{OH})_2$, en el mismo se agregó 120 mL de sulfato de aluminio como sustancia coagulante, para luego realizar una mezcla rápida por 1 minuto y una mezcla lenta por 20 minutos y finalmente dejar sedimentar por un lapso de 12 horas.

Cumplido el tiempo de sedimentación se utilizaron 32 L de agua miel, este volumen se llevó al tanque homogeneizador, el cual tenía una capacidad de 120 L y se

conectó a las columnas de adsorción por medio de una tubería PVC 1½” , se distribuyó un volumen de 16 L de agua miel para cada una de las columnas, se aforó el caudal con la llave galleta de salida del tanque, para manejar un caudal de 10 mm/s garantizando el tiempo de retención dentro de la columna (figura 21).

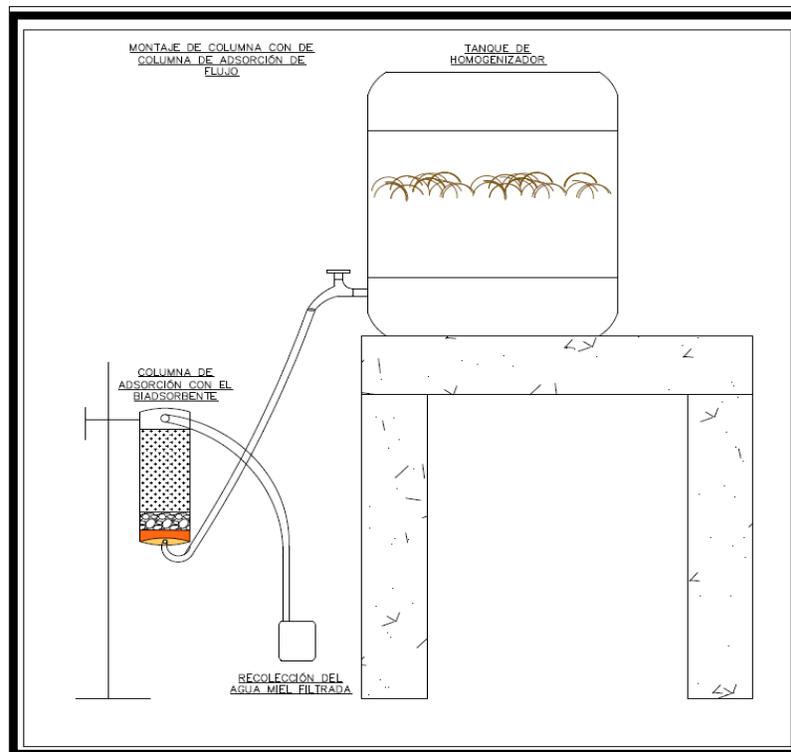


Figura 22. Esquema del funcionamiento de la columna de adsorción de flujo descendente.

3.3.3. Monitoreo de la columna de adsorción de flujo ascendente

El monitoreo de cada una de las columnas se hizo tomando dos muestras puntuales de 1 L por cantidad de agua corrida del efluente para completar finalmente una muestra homogénea, estas se almacenaron en recipientes herméticos debidamente rotulados, las cuales se llevaron al laboratorio de la CRC para la medición de los siguientes parámetros: DBO, DQO, SST; como también se midió SDT durante el monitoreo.

Para evitar alteraciones en la calidad de muestro hasta la llegada al laboratorio de la CRC así conservar las condiciones iniciales de cada una de las muestras, las mismas fueron refrigeradas y transportadas en una nevera portátil a 4 °C de temperatura y en un lapso no mayor de 24 horas [28].

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de las diferentes actividades realizadas, tanto en campo como en laboratorio, para el desarrollo de la investigación. Para llevar un orden específico y paralelo a los objetivos planteados inicialmente se optó por seguir el mismo orden de la metodología del proyecto.

4.1. ANÁLISIS DE LA PRESENCIA DE MESOPOROS DE LA BORRA DE CAFÉ ACTIVADA A TRAVÉS DE DOS MÉTODOS QUÍMICOS

4.1.1. Reconocimiento de campo o zona de estudio

La investigación se ejecutó en el parque TECNICAFÉ y la Empresa SUPRACAFE Colombia S.A. que se ubican en la vereda La Venta, Municipio de Cajibío, localizado al Noroccidente del Departamento de Cauca en la región Andina, a una distancia de 15 kilómetros de la ciudad de Popayán capital del Departamento del Cauca (figura 23).

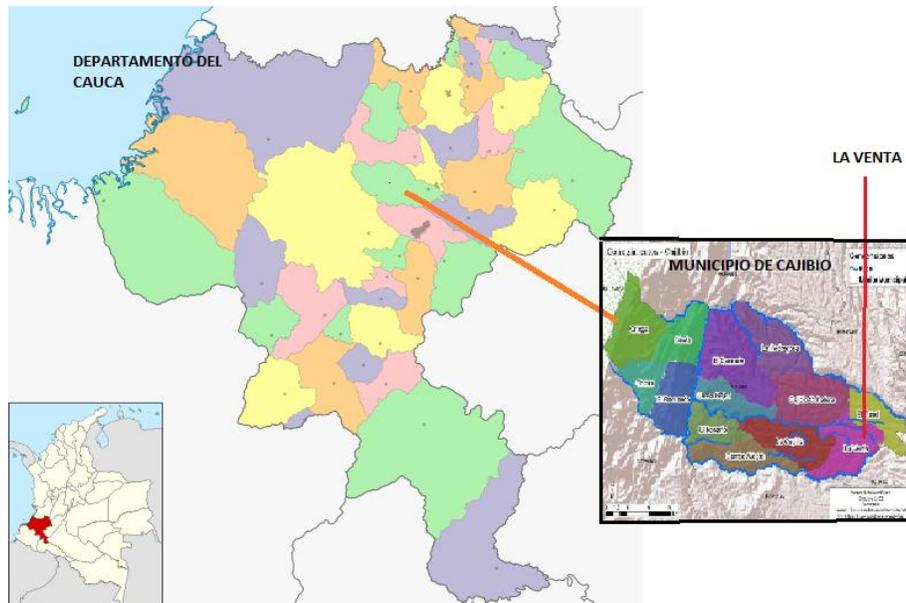


Figura 23. Ubicación geográfica de la zona estudio Empresa Supracafé y TECNICAFÉ

Actualmente el parque TECNICAFÉ y la empresa Supracafé en su proceso de producción y transformación de café, cuentan con un beneficio de tipo ecológico, el

cual consiste en racionalizar el agua durante las operaciones del proceso de beneficio para transformar la café cereza en café pergamino seco (CPS) utilizando menos de 5 litros de agua por cada kilogramo de CPS. Por lo tanto, se generan menores volúmenes de agua residual del café con mayor carga contaminante con una DQO de 3,58 kg por kilogramo de café cereza.

Además, se conoce que los medianos y grandes caficultores utilizan un proceso de beneficio convencional para transformar el fruto en semilla. Durante este proceso se utilizan aproximadamente 40 litros de agua por cada kilogramo de CPS, conjuntamente, se presenta alta contaminación orgánica de 1,74 kg de DQO por kilogramo de café cereza.

Al mismo tiempo, se encontró un tratamiento previo instalado actualmente para el beneficio de café del Parque tecnológico, el cual funciona mediante dos procesos para obtener cafés de alta calidad, de acuerdo con la cadena de producción hacia una zona de fermentación y otra de lavado, cada zona genera su tipo de agua residual con diferentes cargas de contaminantes las cuales son: aguas mieles del proceso de fermentación y agua residual del Lavado del café. Estas dos salidas de agua residual cuentan con dos tipos de sistemas piloto de tratamiento cada uno con dos componentes básicos: proceso de sedimentación y separación de sólidos, bajo el principio de filtración.

Actualmente, Supracafé cuenta con un tipo tratamiento de aguas mieles, en el cual se está evaluando la eficiencia de la borra de café como material bioadsorbente (figura 24), donde se observan tres prototipos de sistema de filtro anaerobio a escala 1:25, con diferentes porcentajes de mezcla (tabla 10). La elección de los porcentajes de mezcla en los filtros 1 y 2, se hizo con la intención de determinar la eficiencia de la borra como bioadsorbente alternativo al carbón activado que se utiliza convencionalmente, por ende, contienen un mayor porcentaje de bioadsorbente; en el filtro 3, se intercambiaron los porcentajes de mezcla con respecto al filtro 1 para poder determinar con mayor rigor la eficiencia de la borra.

Tabla 10. Porcentaje de mezcla en los prototipos

	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3
Mezcla	70% Borra, 30% Arena	70% Carbón Activado, 30% Arena	70% Arena, 30% Borra
Cantidad	700 gr Borra, 300 g Arena	700 gr Carbón Activado, 300 g Arena	700 g Arena, 300 g Borra

Fuente: Tecnicafé



Figura 24. Vista del tratamiento existente para tratar el agua de salida al sistema de las aguas mieles.

Adicionalmente, se indagó acerca del suministro de agua y el volumen total en producción de aguas mieles por temporadas. En época de cosecha, se consumen aproximadamente 7000 litros de agua al día, la cual finalmente se convierte en agua residual que requerirá un tratamiento. El volumen total de producción de aguas mieles de café por cosecha es de 115000 a 120000 L, en la época de no cosecha el caudal es de 2000 L por día. El suministro de agua a la planta de tratamiento de aguas mieles es solo en temporada de cosecha de abril - junio para los siguientes meses: enero - marzo y julio - diciembre no hay riego en toda la planta.

Entendiendo todo el proceso de beneficio húmedo, es importante resaltar que el parque tecnológico de Supracafé, además de procesos productivos, realiza otras actividades como: blends a medida, innovación y desarrollo tecnológico, visitas formativas y capacitaciones y formaciones en proceso de catación, siendo esta última la generadora de la materia prima utilizada para el desarrollo del proyecto, en este caso borra o cuncho de café, utilizada para la elaboración del bioadsorbente.

4.1.2. Proceso de activación de la borra de café

Este proceso se llevó acabo con el fin de mejorar la eficiencia de remoción de la borra de café. De acuerdo a resultados obtenidos en investigaciones anteriores dentro del mismo proyecto liderado por la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, se decidió trabajar una activación química con ácido fosfórico (H_3PO_4) a una concentración del 50% debido a que los resultados en términos de textura, dureza y tamaño fueron positivos bajo esta concentración (figura 25) [70].



Figura 25. Borra de café activada con ácido fosfórico (H_3PO_4) al 50%.

Por otro lado, se utilizó hidróxido de potasio (KOH) en concentraciones muy bajas (5% y 10%) porque a concentraciones superiores se desintegró el material, debido a la alta basicidad del reactivo (figura 26) [71].



Figura 26. Desintegración de la borra de café activada a altas concentraciones de KOH.

4.1.3. Prueba de azul de metileno para determinación de mesoporos

Teniendo en cuenta la molécula de azul de metileno como adsorbato, se pudo determinar a partir de un análisis estadístico de los resultados obtenidos, el bioadsorbente con mejores propiedades de adsorción para su posterior uso en la columna filtrante. Luego de la activación del bioadsorbente con hidróxido de potasio o ácido fosfórico se procedió a realizar la prueba de azul de metileno teniendo en cuenta que se ha evidenciado que el tamaño de la molécula de este compuesto está relacionada con la presencia de mesoporos [72]. Por otro lado, la prueba de azul de metileno en batch permitió probar la dureza y funcionabilidad de los bioadsorbentes activados ya que la agitación permanente de estos en solución genera desintegración del gránulo inicial.

Dentro de los cálculos se tuvo en cuenta un blanco, el cual puede estar asociado a las pérdidas de azul de metileno, que no están relacionadas a la adsorción de la borra, sino a factores como la evaporación de azul de metileno o adherencia a la superficie del recipiente donde se realizó la prueba en discontinuo. Para este caso

se tuvo en cuenta la diferencia entre la concentración inicial y final del blanco, este resultado se utilizó como factor de corrección para la concentración final de azul de metileno que contiene el bioadsorbente utilizando las ecuaciones 3 y 4 para su respectivo cálculo en cada una de las concentraciones de los agentes químicos obteniendo lo siguiente: (tabla 11).

$$C_i = 3,0 \text{ mg/L}$$

$$C_{fb} = 2,3 \text{ mg/L}$$

$$\text{factor de correccion (blanco)} = 3,0 - 2,3 = 0,7 \text{ mg/L} \quad (1)$$

$$F_{cb} = 0,7 \text{ mg/L}$$

$$C_{fb} = 0,1 \text{ mg/L}$$

$$C_a = 0,7 + 0,1 = 0,8 \text{ mg/L} \quad (2)$$

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de la prueba de remoción de azul de metileno al bioadsorbente a base de borra de café modificada con ácido fosfórico al 50% como se muestra en la tabla 11 se presentó mayor eficiencia en cuanto al porcentaje de remoción del colorante en un 73,3 % y 80%.

Tabla 11. Resultados de azul de metileno ácido fosfórico (H₃PO₄)

	C _i (mg/L)	Muestra	Absorbancia (nm)	C _a (mg/L)	%remoción
Ácido fosfórico	3	Inicial	0,950	3,0	73,3
		Blanco	0,954	2,3	
		Borra	0,066	0,8	
	1	Inicial	0,337	1,0	80,0
		Blanco	0,412	0,9	
		Borra	0,008	0,2	

Fuente: Elaboración propia

Las muestras activadas con hidróxido de potasio, las cuales tuvieron una eficiencia de remoción del colorante en un 20,0% para concentraciones de KOH al 10%, y remociones del 30,0% para concentraciones de KOH al 5% para los dos casos se tuvo una mayor adsorción en las pruebas con menor concentración de azul de metileno como lo muestra la tabla 12.

Tabla 12. Resultados de azul de metileno hidróxido de potasio

Hidróxido de potasio	concentración (mg/L)	Muestra	Absorbancia (nm)	concentración final (mg/L)	% remoción
	3		Inicial	0,872	3,0
Blanco			1,049	0,9	
Borra 5%			0,180	2,6	13,3
Borra 10%			0,083	2,4	20,0
1		Inicial	0,294	1,0	
		Blanco	0,246	0,4	
		Borra 5%	0,046	0,7	30,0
		Borra 10%	0,062	0,8	20,0

Fuente: Elaboración propia

Finalmente los resultados obtenidos indican que el carbón activado más eficiente en términos de remoción es la borra de café activada con ácido fosfórico al 50% en una concentración de 1 ppm de azul de metileno; el grano adsorbe 0,8 mg/L de azul de metileno; resultados similares obtuvieron otras investigaciones: [73], [74].

El índice de azul de metileno es un ensayo de adsorción que indica la capacidad de un sólido poroso de adsorber una molécula que, por su tamaño, no puede acceder a los microporos.

En conclusión, puesto que se adsorbió la molécula de azul de metileno en una cantidad considerable se puede determinar que hay presencia de mesoporos y macroporos, debido a que el tamaño promedio de la molécula de azul de metileno

en solución acuosa oscila entre un tamaño promedio de 2 nm a 50 nm, lo cual hace posible relacionar su adsorción con la presencia y tamaño de poros. También es importante mencionar que además de la adsorción de azul de metileno en mesoporos y macroporos, el proceso de activación con ácido fosfórico posiblemente genero sitios activos en la superficie externa del bioadsorbente dando lugar entonces a una adsorción de la molécula de azul de metileno.

4.2. DETERMINAR LA CINÉTICA DE REACCIÓN DE LA ADSORCIÓN DE DQO DE AGUAS RESIDUALES DEL CAFÉ A TRAVÉS DE LA BORRA DE CAFÉ ACTIVADA MEDIANTE MÉTODOS QUÍMICOS.

4.2.1. Caracterización de las aguas mieles del café

4.2.1.1. Monitoreo de las aguas mieles del café: Con los monitoreos realizados en la finca de la empresa SUPRACAFÉ se logró determinar que el caudal diario generado de aguas residuales en el beneficio oscila entre 115000 L a 120000 L este caudal es en promedio el mismo para cada temporada, en la mayoría de los casos es independiente de la cantidad de café maduro procesado, variando por ende la concentración de parámetros de calidad del agua residual [75]. Por este motivo que las cargas contaminantes variaron en cuanto a las temporadas de menor y mayor cosecha. Por ejemplo, se pudo evidenciar el incremento hasta de 225000 mg/L en DQO y 44400 mg/L en DBO₅, y 2940 NTU turbiedad para épocas de mayor producción.

Con respecto a los parámetros medidos in-situ como el pH, se mantuvo dentro de 3 y 4 unidades, rango esperado de acuerdo a otros autores [76], además se registró un volumen entre 1 y 3 mL de sólidos sedimentables por cada litro de agua; los cuales permitieron determinar que las aguas residuales del café, presentaron bajo porcentaje de sedimentabilidad (figura 27). Debido a esto es necesario implementar procesos como coagulación-floculación en los cuales se desestabilizan los coloides,

para favorecer el proceso aglomeración y posteriormente conseguir la sedimentación de las partículas [77].



Figura 27. Solidos sedimentables por cada litro de agua residual del café

Se pudo evidenciar que los parámetros evaluados, se encuentran por fuera de lo establecido por la Resolución 0631 de 2015 como lo indica la tabla 13, por tanto, los vertimientos del beneficio húmedo de café están generando un impacto a los cuerpos de agua receptores.

Tabla 13. Monitoreos de las agua mieles del café de la empresa Supracafé en cada una de sus temporadas

Temporada	Alta		Media	Baja	Valores permisibles (Resolución 0631)
	Diluido lavado + fermentación	Tanques de fermentación			
pH (unidades)	4,4	4,5	4,43	4,69	5 a 9
Conductividad (mS/cm)	8	8,4	6,5	7	-
Turbidez (NTU)	2940	4440	1530	32,4	-
DBO ₅ (mg/L)	44400	71550	17580	3945	400
SST (mg/L)	4850	8800	1167	530	400
DQO (mg/L)	225000	288000	267500	6490	650
CAUDAL (L/día)	2000	2000	2000	2000	-
SSED (mL/L)	1	2	3	3	10

Fuente: Elaboración propia

Con el fin de discutir a fondo los resultados obtenidos del monitoreo de agua mieles de café producidas por el proceso de beneficio ecológico, para esto se analizaron las concentraciones de la carga contaminante proveniente del tanque de fermentación y también del efluente resultante de la mezcla del tanque de fermentación y de las aguas de lavado, las cuales eran captadas en una canaleta diferente y posteriormente eran unificadas para así ser descargadas al río, sin embargo para temporada media y baja solo se analizó el vertimiento a tratar el cual

corresponde a la canaleta que conduce el efluente total al río, propio de aguas de lavado más fermentación.

A continuación, se analizarán con mayor detalle algunos de los parámetros más relevantes según la resolución 0631 de 2015 [78]:

4.2.1.2. Potencial de hidrógeno (pH): De acuerdo con la resolución 631 de 2015 este parámetro debe estar en un rango entre 5 y 9 unidades de pH, con lo anterior se pudo observar que los datos del efluente están entre 4,4 y 4,69, por lo tanto se encuentran por fuera del rango permitido [78]. El pH es uno de los factores clave en el proceso de adsorción, puesto que la acidez influye considerablemente en la carga neta de la superficie del bioadsorbente [79], [80].

4.2.1.3. Turbidez y Sólidos suspendidos totales (SST): Los SST son los sólidos retenidos al pasar agua a través de un filtro, estos representan la fracción contaminante susceptible de ser eliminada por sedimentación, floculación o filtración [81]. De acuerdo con la tabla 13 se puede observar que el valor de SST sobrepasa el rango establecido en la resolución 0631 de 2015 para este parámetro (400 mg/L,) ya que en temporadas alta, media y media baja oscilan entre 8800 mg/L, 1100 mg/L y 530 mg/L respectivamente.

4.2.1.4. Demanda química de oxígeno (DQO) Demanda biológica de oxígeno (DBO₅): A menudo se miden la DQO y DBO como un rápido indicador de contaminantes orgánicos en el agua y se utilizan como un parámetro indicativo de materia orgánica global biodegradable y no biodegradable. La relación entre la DBO y DQO proporciona una idea de la naturaleza de las de los contaminantes orgánicos existentes en el agua y su facilidad para biodegradarse [82].

De esta manera se pueden determinar la naturaleza de las agua mieles para cada temporada de producción, por medio de la siguiente ecuación DBO_5/DQO es por eso que, en temporada alta y media, los valores del índice de biodegradabilidad

fueron menores 0,2 lo que indica la presencia predominante de contaminantes de naturaleza orgánica no biodegradable y en temporada baja los valores fueron mayores a 0,6 señalando la presencia predominante de contaminación orgánica de naturaleza biodegradable.

La naturaleza de las agua mieles es variable puesto que está relacionada con la composición físico-química de la pulpa y el mucílago, debido a que estos dos elementos proporcionan partículas y componentes orgánicos de complejidad significativa durante el contacto turbulento e intenso con el agua limpia [75], incrementando los valores de carga contaminante y esto posiblemente genera factores limitantes para la degradación microbiana; hay que tener en cuenta que la etapa de biodegradación esta relaciona con la biodisponibilidad la cual depende de factores como pH, temperatura, disponibilidad de oxígeno, disponibilidad de nutrientes y contenido de materia orgánica [58], esta última se encuentra en grandes concentraciones en el agua miel la cual podría estar impidiendo la biodegradabilidad del agua miel.

La resolución 0631 de 2015 establece que para efluentes de beneficio ecológico de café la concentración de DQO debe estar por debajo de 300 mg/l, claramente los resultados obtenidos no están dentro del rango establecido (tabla 13); e incluso para temporada de producción baja duplica el valor permisible. La presencia de materia orgánica se debe al alto contenido orgánico del grano de café. En la cuantificación de la Demanda Química de Oxígeno de los subproductos del proceso de beneficio húmedo de café 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 [58].

4.2.2 Tratamiento preliminar del agua miel de Café

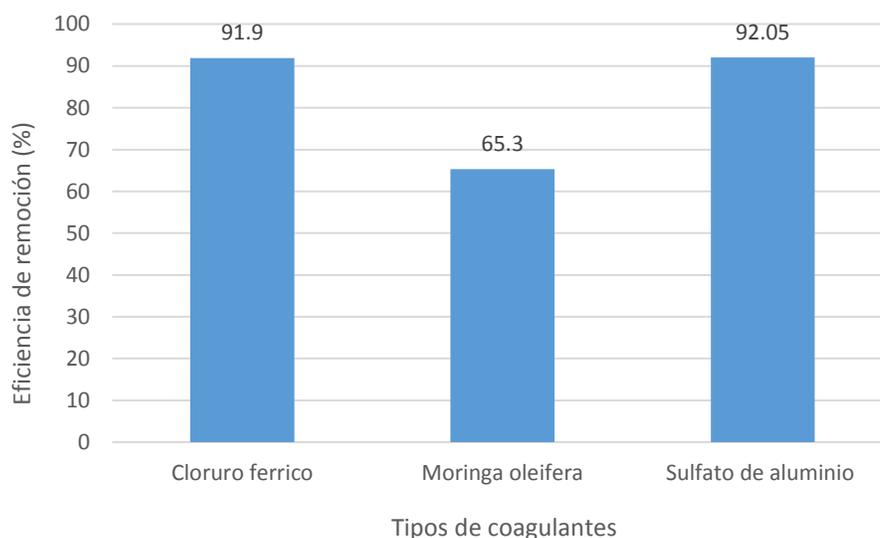
4.2.2.1. Proceso de coagulación – floculación: Debido al bajo porcentaje de sedimentabilidad de las aguas mieles se realizaron pruebas de jarras con tres tipos de coagulantes esto con el fin de determinar la dosis óptima y el coagulante con mayor eficiencia en cuanto a turbiedad y volumen de lodos.

Tabla 14. Dosis óptimas para cada uno de los coagulantes

coagulante	Dosis coagulante (mL)	Turbiedad (NTU)	pH	Conductividad (ms/cm)	Volumen de lodos (cm ³)	Eficiencia de remoción
Cloruro férrico (FeCl ₃)	Condiciones iniciales	6540	3,7	297	0	0
	1	527	5,16	5,3	151,29	91,9
	2	888	5,02	5,2	151,29	86,4
	3	621	4,95	5,15	151,29	90,5
	4	971	5,05	5,32	151,29	85,2
Moringa oleífera	Condiciones iniciales	2940	4,43	8,00	0	0
	2	1064	4,24	11,0	196,7	63,8
	4	1050	4,21	15,5	196,7	64,3
	6	1260	4,19	18,5	196,7	57,1
	8	1020	4,21	22,2	196,7	65,3
Sulfato de aluminio	Condiciones iniciales	6540	3,7	297	0	0
	1	890	5,16	5,28	151,3	86,4
	2	708	5,02	5,19	151,3	89,17
	3	520	4,95	5,16	181,5	92,05
	4	610	5,05	5,33	166,4	90,7

Fuente: Elaboración propia

Con esta prueba se pudo determinar que los mejores coagulantes con respecto a la eficiencia de remoción son el sulfato de aluminio con una dosis del coagulante de 3 ml y una eficiencia de remoción del 92,05%, el cloruro férrico con una dosis de 1 ml y una eficiencia de 91,9%, por otro lado, la moringa oleífera que tuvo una eficiencia del 65,3% en una dosis de 8 ml (grafica 1). En cuanto al volumen de lodos determinado en la prueba de jarras el sulfato de aluminio es el coagulante más eficiente.



Grafica 1. Eficiencia de remoción de cada uno de los coagulantes con su dosis óptima

De acuerdo con el tipo de agua residual (aguas mieles) que se genera en el beneficio ecológico del café, estas poseen características orgánicas particulares debido a que esta adquiere las características de la pulpa y el mucilago, los cuales son denominados como subproductos orgánicos. Las partículas coloidales que aportan turbiedad al agua en su gran mayoría son partículas coloidales orgánicas y estas mediante la coagulación presentan aglomeración y así facilitan su sedimentación, lo que favorece al tratamiento posterior de estas aguas, es decir la columna de adsorción no se colmate, mejorar su eficiencia y su carrera de filtración [83].

4.2.2.2. Filtro empacado: Posterior al proceso de coagulación-floculación y sedimentación se procedió a pasar el agua por el filtro empacado, con el fin de eliminar materiales de mayor tamaño ya formadas en el proceso de coagulación-floculación que no fueron sedimentados en los procesos anteriores. Con el fin de evaluar la eficiencia del filtro empacado en cuanto a la turbiedad se monitoreó dicho parámetro antes y después del sistema. Se obtuvo una eficiencia de remoción del 82,68 %, lo cual indica que hay una disminución considerable de partículas suspendidas en el agua, demostrando así la importancia de implementar un sistema preliminar que retenga partículas suspendidas de mayor tamaño con el fin de evitar la colmatación de la columna de adsorción (figura 28).



Figura 28. Filtro empacado

4.2.3. Estudio cinético del proceso de adsorción

Teniendo en cuenta los objetivos establecidos en este trabajo de investigación, se decidió trabajar esta prueba con la borra de café activada con H_3PO_4 y KOH , se realizaron ensayos en discontinuo, montando varias muestras de agua miel con el bioadsorbente en diferentes tiempos, en el cual se evaluó el efecto del tiempo de contacto necesario para alcanzar el punto de equilibrio. Durante estos ensayos se observó que una de las muestras presentó un efluente más claro que las demás muestras.

Por lo anterior se decidió trabajar la prueba de cinética de adsorción con un tiempo máximo de 2 horas, con 5 gramos del bioadsorbente y 0,6 L de agua miel para determinar la cinética de adsorción como se observa en la figura 25.



Figura 29. Prueba de cinética de adsorción de la borra de café activada con H_3PO_4

Para los datos experimentales, obtenidos de la prueba de cinética de adsorción se realizó un análisis de error con el propósito de encontrar el modelo cinético que mejor se ajustó los datos experimentales se consideró el coeficiente de determinación: suma de errores cuadrados (ecuación 4).

$$SSE = \sum(q_t - q_c)^2 \quad (4)$$

Dónde: q_t = valor experimental, q_c = valor calculado con la ecuación matemática del modelo cinético

Posteriormente, con los valores obtenidos después de realizar su análisis de error se grafica los valores experimentales (q_t) vs tiempo (t) donde se utilizó las ecuaciones de Pseudo primer orden (ecuación 5) y Pseudo segundo orden (ecuación 6).

$$q_t = 1,326227(1 - e^{-0,157645t}) \quad (5)$$

$$q_t = \frac{0,3t}{1 + 0,195t} \quad (6)$$

Dónde: q_t = valores experimentales, t = tiempo.

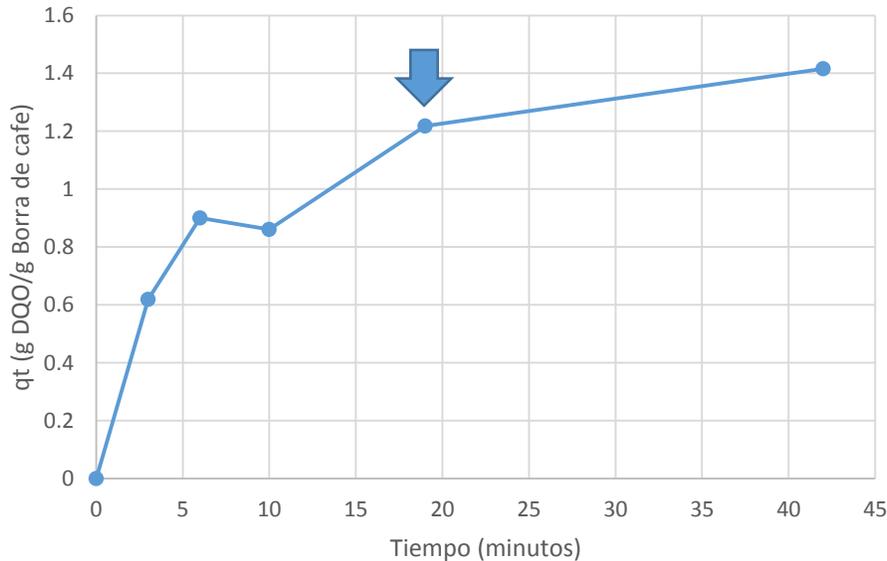
Los resultados obtenidos después de haber realizado el monitoreo de la prueba de cinética de adsorción y el respectivo análisis de error con respecto al parámetro DQO se observan en la tabla 15

Tabla 15. Monitoreo de la prueba de cinética con respecto al parámetro DQO

Muestra	Tiempo (min)	DQO (mg/L)	Vol. remanente (L)	DQO remanente (g)	q_t (g/g)
0	0	255	0,600	153,00	0
1	3	242,5	0,585	141,86	0,62
2	6	240	0,570	136,80	0,90
3	10	250	0,550	137,50	0,86
4	19	245	0,535	131,07	1,22
5	42	250	0,510	127,50	1,42

Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 2 se puede observar que el tiempo de equilibrio del bioadsorbente es a los 19 minutos, debido a que el bioadsorbente ya no adsorbe más, es decir se colmata. Por lo tanto el mecanismo de retención ocurre inicialmente con la migración del adsorbato desde la solución a la superficie del bioadsorbente [51].



Gráfica 2. Adsorción del bioadsorbente con respecto al tiempo

Con el fin de comprobar si el proceso de adsorción de materia orgánica sobre la borra de café activada se ajusta a uno de los modelos cinéticos, se realizó el ajuste no lineal de los datos experimentales a cada uno de los modelos para así establecer cuál de ellos predice con mayor exactitud la cinética de adsorción.

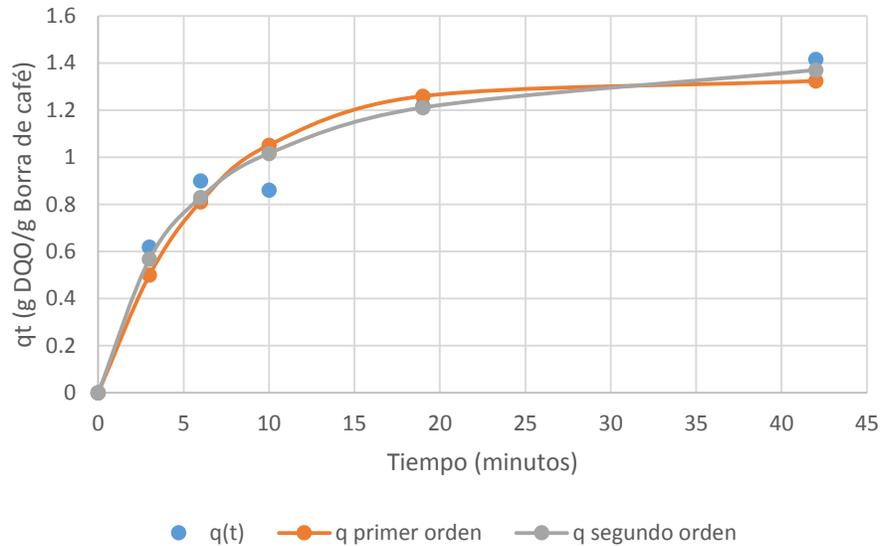
En los resultados obtenidos en dicho ajuste, los datos reportados no se ajustan de forma aceptable al modelo Pseudo primer orden, lo que se corrobora con los bajos coeficientes de correlación encontrados como la suma de cuadrados es 0.069, el R^2 es 0.916 el valor de p es 0.003. En cambio, el modelo Pseudo segundo orden, es el que presenta un mejor ajuste de los datos experimentales, como se observa en la tabla 16.

Tabla 16. Coeficientes ajuste de los modelos cinéticos Pseudo primer orden y Pseudo segundo orden

Datos experimentales		Pseudo primer orden		Pseudo segundo orden		
Tiempo (minutos)	q_t	q_{c1}	Error ₁	q_{c2}	Error ₂	
0	0	0	0	0	0	
3	0,619	0,500	0,014	0,568	0,003	
6	0,900	0,811	0,008	0,830	0,005	
10	0,861	1,052	0,036	1,017	0,024	
19	1,218	1,260	0,002	1,211	0,000	
42	1,417	1,324	0,009	1,371	0,002	
SSE			0,069	SSE		0,034

Fuente: Elaboración propia

El modelo Pseudo segundo orden, presenta una pendiente inicial, evidenciando que la adsorción es mucho más rápida que la del modelo Pseudo primer orden, lo cual se puede observar en la gráfica 3. Se puede asumir que los sitios de adsorción del bioadsorbente y la molécula que se está adsorbiendo son muy fuertes, debido a la concentración de sustancias que puede tener alrededor del adsorbente y se disminuya rápido, se puede asumir que no hay limitaciones por difusión, es decir una vez se adsorbe la molécula, vienen otros tipos de moléculas y se adsorben lo cual está limitado entre la molécula (adsorbato) y el sitio de adsorción. Además se puede decir que probablemente no hay una simple atracción electrostática entre el adsorbente esto es probablemente una adsorción por reacción química es decir no es una fisisorción si no quimisorción [84].



Grafica 3. Modelos cinéticos de la borra de café activada con ácido fosfórico (H_3PO_4)

4.3. EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE REMOCIÓN DE LA BORRA DE CAFÉ EN UNA COLUMNA DE FLUJO ASCENDENTE

Para la evaluación de la capacidad de remoción de la borra de café en la columna de adsorción con el bioadsorbente y sin el bioadsorbente se realizó el siguiente montaje (figura 30).



Figura 30. Funcionamiento de la columna de adsorción de flujo descendente

La tabla 17 presenta los resultados obtenidos para cada parámetro según el tiempo de circulación del agua miel en el monitoreo realizado para la columna con el bioadsorbente

Tabla 17. Monitoreo de la columna de adsorción con el bioadsorbente

Número de muestra	Hora (min)	Muestra compuesta	Conductividad eléctrica (ms/cm)	SDT (g/L)	pH	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)
0	0:00	Agua miel después de tratamiento preliminar	2,40	0,92	12,065	5020	1253	3597
2	0:10	Dos primeros litros corrida del filtro	2,39	1,18	9,269	7110	730	4020
10	0:55	Quinto y sexto litro de corrida del filtro	2,46	1,23	11,611	5250	210	3540
18	1:40	Octavo y noveno litro de corrida del filtro	3,32	1,45	11,721	5370	180	3630

Fuente: Elaboración propia

De igual manera, para la columna de adsorción sin el bioadsorbente se registraron los valores para cada parámetro según el tiempo de circulación del agua miel (tabla 18)

Tabla 18. Monitoreo de la columna de adsorción sin bioadsorbente

Número de muestra	Hora (min)	Muestra compuesta	Conductividad eléctrica (ms/cm)	SDT (g/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)
0	0:00	Agua miel después de tratamiento preliminar	3,26 mS	1,68	5560	1886	3597
2B	0:10	Dos primeros litros corrida del filtro	3,50 mS	1,75	5280	1560	3435
10B	0:55	Quinto y sexto litro de corrida del filtro	3,77 mS	1,88	5150	144	3270
18B	1:40	Octavo y noveno litro de corrida del filtro	3,83 mS	1,90	5270	128	3570

Fuente: Elaboración propia

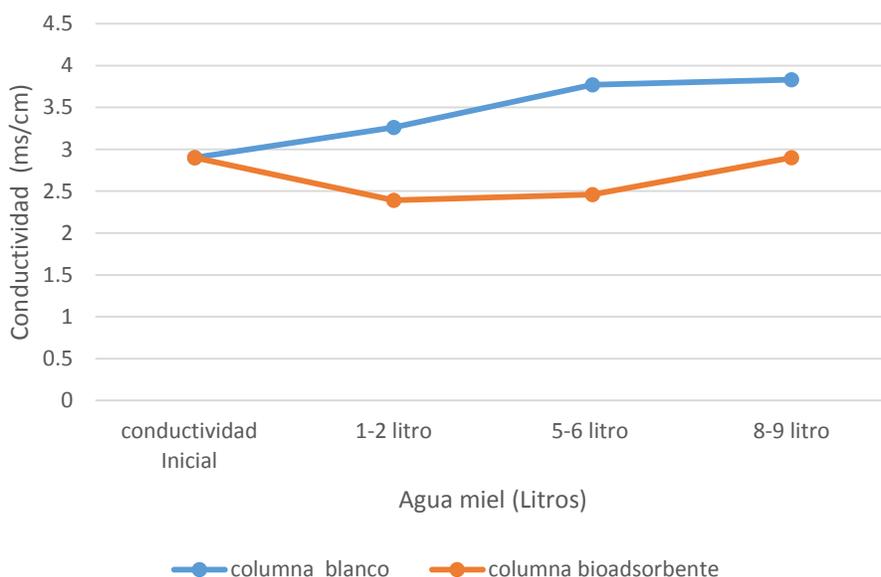
De acuerdo con los resultados reportados en la tabla 17 y 18 se puede emitir el siguiente análisis comparativo por parámetro y tipo de columna de adsorción:

4.3.1. Conductividad eléctrica y SDT monitoreo de las columnas de adsorción con el bioadsorbente y sin el bioadsorbente.

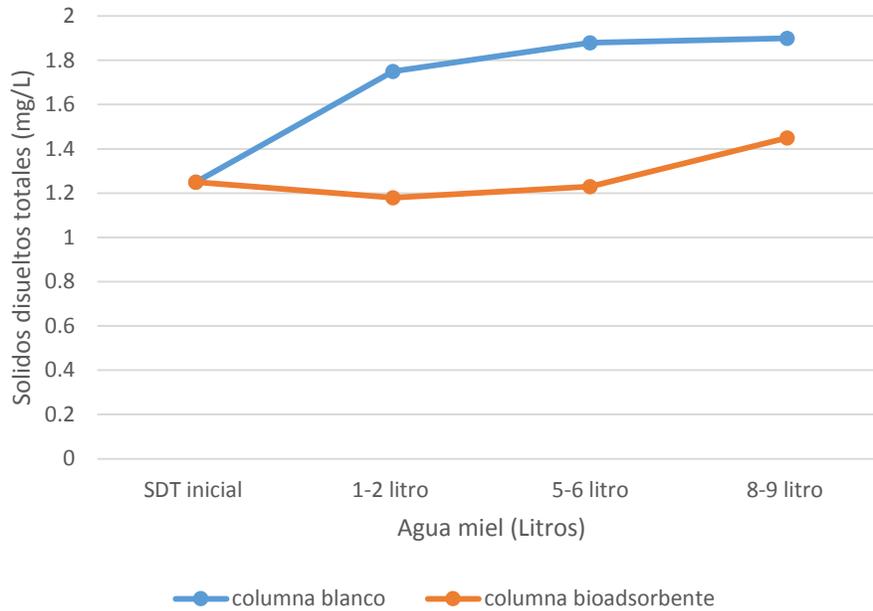
Los parámetros de conductividad y sólidos disueltos totales, están directamente relacionados, por esta razón a medida que incrementó su conductividad, también incrementó la presencia de sólidos disueltos totales (SDT) [85], como se puede observar en las gráficas 4 y 5 presentan un comportamiento similar para el filtro blanco en cuanto a una tendencia creciente de estos dos parámetros, esto se debe principalmente a la presencia de sales y minerales, los cuales pueden ser originados

por el material rocoso usado en el filtro como lo es el granito y la arena ya que estos tienen un alto contenido de sales, calcio o magnesio.

Se pudo observar inicialmente una pequeña disminución de los dos parámetros, tanto de los SDT, como de la conductividad en el filtro compuesto por bioadsorbente (gráficas 4 y 5), y posteriormente en las últimas muestras se presentó un aumento de los parámetros, esto puede indicar que posiblemente hubo una adsorción de SDT, al inicio de la circulación del agua residual, pero ya este material en el interior del bioadsorbente desarrollo diferentes reacciones que degradaron la borra, disolviendo compuestos al entrar en contacto con el agua.



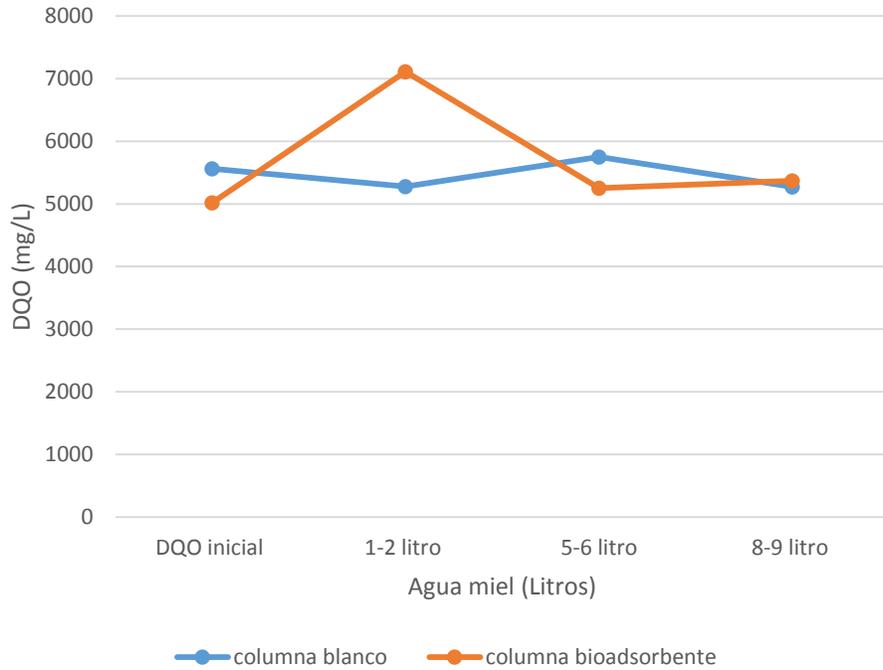
Gráfica 4. Conductividad eléctrica del agua miel corrida por la columna de adsorción



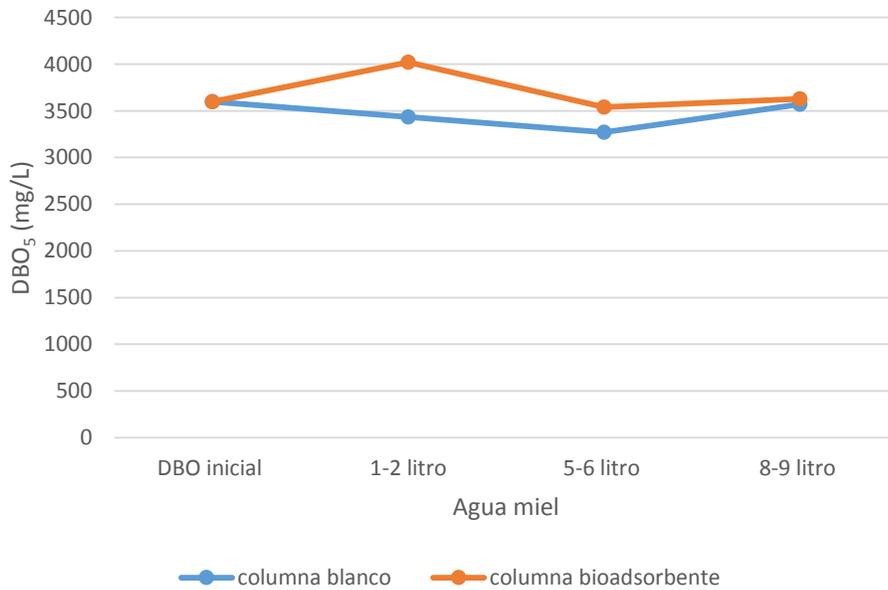
Gráfica 5. Sólidos disueltos totales del agua miel corrida por la columna de adsorción

4.3.2 Demanda química de oxígeno (DQO) Demanda biológica de oxígeno (DBO₅) monitoreo de las columnas de adsorción con el bioadsorbente y sin el bioadsorbente.

Como se puede evidenciar en las gráficas 6 y 7 los parámetros de DQO Y DBO presentaron un aumento inicial, que puede ser atribuido a un posible desprendimiento de materia orgánica desde la superficie del adsorbente. Esto también se evidenció en las mediciones de sólidos suspendidos, los cuales presentaron una mayor concentración cuando se utilizó el lecho de bioadsorbente [86].



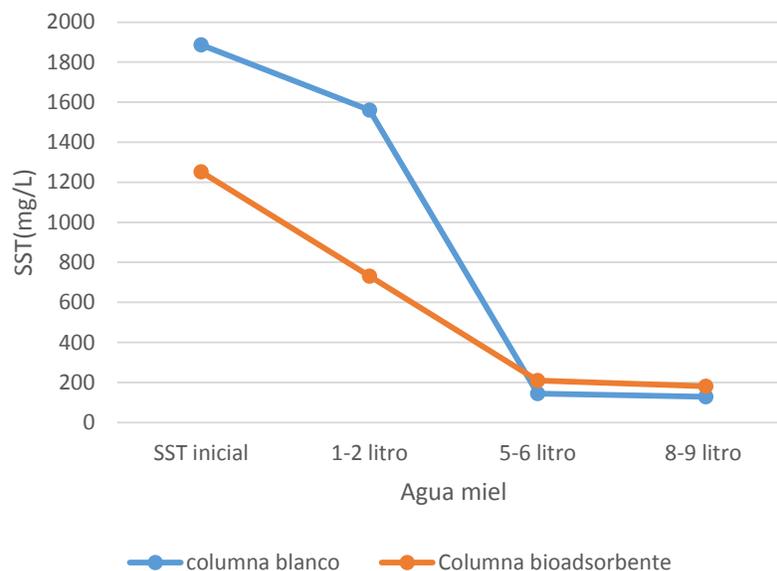
Gráfica 6. Demanda química de oxígeno (DQO) del agua miel corrida por la columna de adsorción



Gráfica 7. Demanda biológica de oxígeno (DBO) del agua miel corrida por la columna de adsorción

4.3.3 Sólidos suspendidos totales (SST) monitoreo de las columnas de adsorción con el bioadsorbente y sin el bioadsorbente

Se puede observar en la gráfica 8 que los sólidos suspendidos disminuyen considerablemente en las dos columnas, ya que la columna con el bioadsorbente tuvo una eficiencia de remoción del parámetro del 85,6 % y la columna sin el bioadsorbente una eficiencia de remoción del 93,2 % blanco notándose una mejor remoción en la columna blanco, lo cual permite determinar que la disminución de los sólidos suspendidos totales se está dando por los materiales rocosos en este caso el granito y la arena y no por el bioadsorbente [49].



Gráfica 8. Sólidos suspendidos totales del agua miel corrida por la columna de adsorción

Debido a los resultados obtenidos en el monitoreo de la columna de adsorción con el bioadsorbente, se observa que estos no son favorables en cuanto a remoción de DBO, DQO, conductividad y SDT. Los cuales presentaron un aumento en comparación con el filtro blanco, se realizó una prueba de desintegración del material adsorbente (tabla 19).

Tabla 19. Resultados prueba de desintegración del bioadsorbente

TIEMPO (minutos)	DQO (mg/L)	SDT (g/L)	CONDUCTIVIDAD (ms/cm)
2,5	0	20,4	40,6
5	1,31	21,4	42,3
10	3,05	23,4	44,8
15	7,19	24	49,1
20	14,6	24,5	49,3
25	17,2	24,7	49,6
30	23,1	24,7	49,6

Fuente: elaboración propia

En esta prueba uno de los aumentos más significativos se presentó en los parámetros de conductividad y los SDT, los cuales aumentaron de forma con el paso del tiempo, permitiendo determinar que el bioadsorbente se está desintegrando. La conductividad se define como la capacidad que tienen las sales inorgánicas en solución para conducir la corriente eléctrica [87] y su aumento infiere un aporte de materia inorgánica o sales inorgánicas [88] la cual está siendo liberada por el bioadsorbente, posiblemente debido al proceso de carbonización al que se sometió la borra o cuncho de café, propinando así una desnaturalización del material, convirtiéndolo en materia inorgánica en este caso en forma de cenizas, al liberar el bioadsorbente estas partículas aumenta la conductividad y los sólidos debido a la naturaleza granular de la borra [50].

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- ❖ El mayor porcentaje de remoción es obtenido por el bioadsorbente preparado con ácido fosfórico al 50% y las diferencias de remoción en aumentos de concentración de soluto en solución son muy pequeñas.
- ❖ El ajuste de los datos experimentales obtenidos del proceso de cinética de adsorción, los diferentes modelos seleccionados en esta investigación, demuestra que el modelo de Pseudo segundo orden es el que mejor describe la cinética de la adsorción de materia orgánica sobre la borra de café activada con ácido fosfórico.
- ❖ La borra de café, utilizada en el proceso para el tratamiento de aguas residuales del beneficio húmedo del café, presenta resultados satisfactorios en cuanto a remoción de SST, pero no sucede lo mismo con los parámetros DBO₅ y DQO, los cuales no presentaron disminución después del proceso de filtración.
- ❖ Las aguas residuales que se producen durante el proceso de beneficio húmedo del fruto del café poseen características fisicoquímicas particularmente agresivas con el medio ambiente: pH bajo, acidez alta y concentraciones de materia orgánica altas, que corresponden a poderes contaminantes entre 60 y 240 veces superiores a las aguas residuales domésticas.
- ❖ El agua residual del café presenta un comportamiento variable en cuanto a su oxidación orgánica presentando un cambio en el índice de biodegradabilidad para temporada alta, media y baja.

5.2. RECOMENDACIONES

- ❖ Se recomienda realizar otros estudios para evaluar la temperatura de secado sobre el proceso de activación química del bioadsorbente con los dos agentes químicos debido que a mayor temperatura se pudieron haber obtenido mejores eficiencias del material adsorbente.
- ❖ Para que el sistema de filtración cumpla con los parámetros del artículo 9 de la Resolución 631 de 2015, se debe aumentar el tiempo de retención hidráulica para que se puede observar mayor eficiencia de remoción en materia orgánica y realizar los respectivos aforos para fijar el caudal de entrada.
- ❖ Es importante controlar los valores de pH en un rango entre 4 y 6,5 unidades puesto que valores muy altos pueden generar deterioro al material adsorbente.
- ❖ Debido a las características fisicoquímicas de las aguas mieles es importante realizar un tratamiento preliminar constituido por un proceso de coagulación - floculación y filtro empacado, esto con el fin de disminuir las altas concentraciones de SDT y de esta forma evitar la colmatación de la columna de adsorción.
- ❖ Evaluar la remoción de otros parámetros en la borra de café activada con los dos agentes químicos debido que en esta investigación no se presentó buenos resultados de remoción de los parámetros de DBO₅ y DQO.
- ❖ Realizar un estudio con la borra de café activada con los dos agentes químicos con otro tipo de agua residual para observar mejores eficiencias en otros tipos de contaminantes.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] «La Gente del Café | Café de Colombia». [En línea]. Disponible en: http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/la_tierra_del_cafe/la_gente_del_cafe/. [Accedido: 23-oct-2018].
- [2] «Digital repository of the National Coffee Research Centre - CENICAFE: 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». [En línea]. Disponible en: <http://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/659>. [Accedido: 23-oct-2018].
- [3] G. I. Puerta Q. y S. Rios A., «Composición química del mucílago de café según el tiempo de fermentación y refrigeración», *Chemical composition of coffee mucilage according to the time of fermentation and refrigeration*, sep. 2014.
- [4] «Posibles Usos Alternativos de Los Residuos Del Cafe», *Scribd*. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/presentation/106694810/Posibles-Usos-Alternativos-de-Los-Residuos-Del-Cafe>. [Accedido: 23-oct-2018].
- [5] C. E. E. Tiempo, «Siete de cada diez municipios no tratan sus aguas residuales», *El Tiempo*, 22-mar-2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/tratamiento-de-aguas-residuales-en-colombia-69962>. [Accedido: 23-ago-2018].
- [6] «Tratamiento_Aguas_Residuales-Zapata_N.pdf». [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/341075399/Tratamiento-Aguas-Residuales-Zapata-N-pdf>. [Accedido: 23-oct-2018].
- [7] José Enrique Guzmán Straube, «Efecto de cinco dosis de hidróxido de calcio en el tratamiento de aguas residuales del beneficiado húmedo del café, en Cooperativa Loma Linda, El Palmar, Quetzaltenango, durante el periodo cafetalero 2006-2007 - Buscar con Google», oct-2012. [En línea]. Disponible en: <https://biblio3.url.edu.gt/Tesario/2012/06/17/Guzman-Jose.pdf>. [Accedido: 23-oct-2018].

- [8] D. López Castillo, «Efecto del vertido directo de las aguas mieles en la calidad físico-química del agua de la Subcuenca del Río Jigüina, Jinotega», *Revista Científica de FAREM- Esteli*, vol. 1, pp. 5-16, jun. 2012.
- [9] C. A. Ramirez G., C. E. Oliveros T., y J. R. Sanz U., «Manejo de lixiviados y aguas de lavado en el proceso de beneficio húmedo del café», *Management of leachates and waste waters coming from wet coffee processing*, jul. 2015.
- [10] «Informe exclusivo: males que aquejan a la caficultura en Colombia». [En línea]. Disponible en: <https://www.elpais.com.co/economia/informe-exclusivo-males-que-aquejan-a-la-caficultura-en-colombia.html>. [Accedido: 23-oct-2018].
- [11] «Economía cafetera y desarrollo económico en Colombia», *Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano*. [En línea]. Disponible en: <https://www.utadeo.edu.co/es/publicacion/libro/publicaciones/235/economia-cafetera-y-desarrollo-economico-en-colombia>. [Accedido: 23-oct-2018].
- [12] «Aprovechamiento De Los Residuos Sólidos Provenientes Del Beneficio Del Café, En El Municipio De Betania Antioquia: Usos Y Aplicaciones», *Infocafes*, 26-jun-2017. [En línea]. Disponible en: <http://infocafes.com/portal/biblioteca/aprovechamiento-de-los-residuos-solidos-provenientes-del-beneficio-del-cafe-en-el-municipio-de-betania-antioquia-usos-y-aplicaciones/>. [Accedido: 23-oct-2018].
- [13] «Nuestro Café | Federación Nacional de cafeteros». [En línea]. Disponible en: https://cauca.federaciondecafeteros.org/fnc/nuestro_cafe/category/118. [Accedido: 23-oct-2018].
- [14] R. C. Cárdenas Garzón y J. E. Ortiz Prieto, «Manejo integrado del recurso agua en el beneficio húmedo del café, para la Asociación de Productores de Café “Acafeto” en el municipio de Fresno, departamento del Tolima», mar. 2014.
- [15] A. P. Ramirez, S. Giraldo, E. Flórez, y N. Acelas, «Preparación de carbón activado a partir de residuos de palma de aceite y su aplicación para la remoción de colorantes», *Revista Colombiana de Química*, vol. 46, n.º 1, pp. 33-41, abr. 2017.
- [16] M. Pirsahab *et al.*, «Preparation of the activated carbon from India shrub wood and their application for methylene blue removal: modeling and optimization», *Desalination and Water Treatment*, feb. 2015.

- [17] Y. M. Rodríguez, L. P. Salinas, C. A. Ríos, y L. Y. Vargas, «Adsorbentes A Base De Cascarilla De Arroz En La Retención De Cromo De Efluentes De La Industria De Curtiembres», *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, vol. 10, n.º 1, pp. 146-156, jun. 2012.
- [18] V. Ospina, R. Buitrago-Sierra, y D. López, «Preparation and characterization of activated carbon from castor de-oiled cake», vol. 17, pp. 75-84, ene. 2014.
- [19] N. Rodríguez Valencia, «Estudio de un biosistema integrado para el postratamiento de las aguas residuales del café utilizando macrófitas acuáticas.», *Riunet*, abr. 2009.
- [20] «Beneficiado Húmedo de Café», *Engormix*. [En línea]. Disponible en: <https://www.engormix.com/agricultura/articulos/beneficiado-humedo-cafe-t30188.htm>. [Accedido: 24-oct-2018].
- [21] «Tratamiento aguas residuales Beneficio - Anacafé». [En línea]. Disponible en: https://www.anacafe.org/glifos/index.php/Tratamiento_aguas_residuales_Beneficio. [Accedido: 29-nov-2018].
- [22] «Productores disponen de cada vez más opciones para manejar y reducir aguas residuales del café | Federación Nacional de cafeteros». [En línea]. Disponible en: https://www.federaciondecafeteros.org/clientes/es/sala_de_prensa/detalle/productores_disponen_de_cada_vez_mas_opciones_para_manejar_y_reducir_aguas/. [Accedido: 24-oct-2018].
- [23] K. J. Peña H, L. Giraldo, y J. C. Moreno, «Preparación De Carbón Activado A Partir De Cáscara De Naranja Por Activación Química. Caracterización Física Y Química», *Revista Colombiana de Química*, vol. 41, n.º 2, pp. 311-323, ago. 2012.
- [24] C. Lavado Meza, M. del R. Sun Kou, y N. Recuay Arana, «Remoción de cromo (VI) empleando carbones preparados por activación química a partir de las astillas de eucalipto», *Revista de la Sociedad Química del Perú*, vol. 78, n.º 1, pp. 14-26, ene. 2012.
- [25] A. Daza y F. Arturo, «Borra de café como material adsorbente para la remoción de cromo (III)», *instname:Universidad Libre*, mar. 2018.

- [26] «Historia del Café | Café de Colombia». [En línea]. Disponible en: http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre_el_cafe/el_cafe/el_cafe/. [Accedido: 24-oct-2018].
- [27] «cafe2», *Café Barseel*. .
- [28] «Un Café Sobresaliente | Café de Colombia». [En línea]. Disponible en: http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/el_cafe_de_colombia/un_cafe_sobresaliente/. [Accedido: 25-oct-2018].
- [29] M. Gotteland y S. de Pablo V, «ALGUNAS VERDADES SOBRE EL CAFÉ», *Revista chilena de nutrición*, vol. 34, n.º 2, pp. 105-115, jun. 2007.
- [30] D. Echeverri, L. Buitrago, F. Montes, I. Mejía, y M. del P. González, «Coffee for cardiologists», *Revista Colombiana de Cardiología*, vol. 11, n.º 8, pp. 357-365, abr. 2005.
- [31] «La Gente del Café | Café de Colombia». [En línea]. Disponible en: http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/la_tierra_del_cafe/la_gente_del_cafe/. [Accedido: 27-dic-2018].
- [32] R. G. G. Cáceres y É. S. O. Escobar, «Caracterización de las cadenas de valor y abastecimiento del sector agroindustrial del café», *Cuadernos de Administración*, vol. 19, n.º 31, pp. 197-217, 2006.
- [33] «Proveedores de Café Colombiano | Café de Colombia». [En línea]. Disponible en: http://www.cafedecolombia.com/clientes/es/proveedores_de_cafe_colombiano/. [Accedido: 27-dic-2018].
- [34] «Tostación | Café de Colombia». [En línea]. Disponible en: http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre_el_cafe/el_cafe/industrializacion/tostacion_/. [Accedido: 27-dic-2018].
- [35] M. Y. O. Dueñas, «Análisis del perfil de las cadenas productivas del café, el cacao, la pitahaya y el limón Tahití, desde un enfoque de internacionalización, innovación y responsabilidad social empresarial en Bucaramanga.», *I+D Revista De Investigaciones*, vol. 6, n.º 2, pp. 76-99, dic. 2015.
- [36] «Colombia tiene tres nuevos campeones nacionales: barista, catador y de cafés filtrados | Federación Nacional de cafeteros». [En línea]. Disponible en:

https://www.federaciondecafeteros.org/clientes/es/sala_de_prensa/detalle/colombi_a_tiene_tres_nuevos_campeones_nacionales_barista_catador_y_de_cafes_/.

[Accedido: 27-dic-2018].

[37] Y. L. Salazar, M. G. Arango, y E. T. Ocampo, «Proyección de cifras de producción de café colombiano utilizando cadenas de Markov», *1*, vol. 9, n.º 1, pp. 83-97, jul. 2013.

[38] L. FM, «Cafeteros le apuestan a incrementar el consumo de café en Colombia», 03-oct-2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.lafm.com.co/economia/cafeteros-le-apuestan-incrementar-el-consumo-de-cafe-en-colombia>. [Accedido: 27-dic-2018].

[39] Y. García Güiza, «Establecimiento de un sistema filtro para tratamiento de aguas mieles en una finca del municipio de Ibagué, promoviendo los tres pilares de producción y sostenibilidad (económico, social y ambiental).», oct. 2017.

[40] I. F. Fajardo P. y J. R. Sanz U., «Evaluación de la calidad física del café en los procesos de beneficio húmedo tradicional y ecológico BECOLSUB», *Physical quality evaluation of coffee in the wet traditional and ecological processing BECOLSUB*, jun. 2004.

[41] www.revistavirtualpro.com, «Manejo de residuos en la agroindustria cafetera». [En línea]. Disponible en: <http://www.revistavirtualpro.com/biblioteca>. [Accedido: 25-oct-2018].

[42] N. Rodriguez V. y D. A. Zambrano F., «Los subproductos del café : Fuente de energía renovable», *Coffee by products : Source of renewable energy*, may 2013.

[43] C. Ambiente Campo Y., «Café, Campo y Ambiente: ¿Cuánto es un quintal de café y que transformación sufre?», *Café, Campo y Ambiente*, 04-nov-2013. .

[44] «“Aguas Mieles Del Cafe”, Una Oportunidad De Nutrición No Explorada», *Café Orgánico Marcala S.A. (COMSA)*., 11-dic-2012. [En línea]. Disponible en: <http://www.comsa.hn/aguas-mieles-del-cafe-una-oportunidad-de-nutricion-no-explorada/>. [Accedido: 23-nov-2018].

[45] U. Trujillo y E. Yuliet, «Identificación de impactos ambientales relacionados con el beneficio húmedo del café en la vereda de tres esquinas (Huila)», *La Nacion*,

«Noticia Regional,» *Huila el primer productor de café a nivel Nacional*, p. 5, 17 Enero 2015., mar. 2017.

[46] M. G. Valladares-Cisneros, C. V. Cárdenas, P. de la C. Burelo, y R. M. M. Alemán, «Adsorbentes no-convencionales, alternativas sustentables para el tratamiento de aguas residuales», 1, vol. 16, n.º 31, pp. 55-73, 2017.

[47] A. L. Grisales Motato y W. Rojas Arrieta, «Obtención de carbón activado a partir de activación química de pulpa de café y su aplicación en la remoción de colorantes en aguas residuales industriales», 2016.

[48] H. E. G. Mora, «Carbón Activado: Estudio proceso químico con 3 maderas».

[49] D. N. de Bibliotecas, J. M. Ramos Rincón, J. M. Ramos Rincón, y J. M. Ramos Rincón, «Estudio del proceso de biosorción de colorantes sobre Borra (Cuncho) de café», masters, Universidad Nacional de Colombia, 2010.

[50] S. J. Cárdenas Salazar y J. C. Ortega Revilla, «Modelamiento y simulación de una columna de adsorción de lecho fijo para la remoción de Cr (Vi) de soluciones acuosas utilizando aserrín como adsorbente», *Universidad Nacional de San Agustín*, 2015.

[51] M. L. P. Bedoya y L. E. V. Villamizar, «Modelamiento De La Cinética De Bioadsorción De Cr (Iii) Usando Cáscara De Naranja», *DYNA*, vol. 76, n.º 160, pp. 95-106, oct. 2009.

[52] «2010-6.pdf». .

[53] «Modelo Matemático De Una Columna De Adsorción», *Blog De Ingeniería Química*, 27-abr-2013. .

[54] L. Marcela Parra Rodriguez, «Operación de un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) hasta alcanzar el estado estable», oct. 2018.

[55] G. L. C. Calvachi y R. M. R. Ramos, «Evaluación de la eficiencia de reactores de lecho fijo utilizando aguas mieles residuales de trapiches artesanales», *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 19, n.º 1, pp. 25-38, jun. 2009.

[56] J. M. M. Díaz, «Turbidez y sólidos en suspensión de las aguas de escorrentía susceptibles de ser utilizadas en la recarga artificial del acuífero granular profundo subyacente a la ciudad de San Luis de Potosí (México)», *Boletín geológico y minero*, vol. 120, n.º 2, pp. 169-184, 2009.

- [57] «Caracterización del agua residual», *Ingeniería ambiental para el sector industrial*, 05-sep-2014. .
- [58] M. A. Restrepo, «El beneficio ecológico del café en Colombia», 1, n.º 42, 1999.
- [59] P. de la R. Colombia, «Decreto 2811 de 1974 Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente», *instname:Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres*, dic. 1974.
- [60] «DECRETO 1594-1984 usos del agua y residuos líquidos | Actualidades en el sector del tratamiento de aguas | Novedades | OPT Ingeniería S.A.S.» [En línea]. Disponible en: http://aguas.opt-ing.com/recursos-catalogos-blog/actualidades-aguas/decreto_1594-1984. [Accedido: 06-dic-2018].
- [61] «Decreto 3930 de 2010 | Secretaría Distrital del Hábitat». [En línea]. Disponible en: <https://www.habitatbogota.gov.co/decreto-3930-2010>. [Accedido: 06-dic-2018].
- [62] «Resolución 631 de 2015 - Parámetros vertimientos - Red de Desarrollo Sostenible de Colombia». [En línea]. Disponible en: <https://www.rds.org.co/es/recursos/resolucion-631-de-2015-parametros-vertimientos>. [Accedido: 06-dic-2018].
- [63] «Resolucion 2115 de 2007 Calidad del agua potable.» [En línea]. Disponible en: <http://confia.com.co/index.php/normas-y-decretos/item/32-resolucion-2115-de-2007-calidad-del-agua-potable>. [Accedido: 06-nov-2018].
- [64] M. Pirsahab *et al.*, «Preparation of the activated carbon from India shrub wood and their application for methylene blue removal: modeling and optimization», *Desalination and Water Treatment*, vol. 57, n.º 13, pp. 5888-5902, mar. 2016.
- [65] «Guí-a para el Monitoreo de Vertimientos, Aguas Superficiales y Aguas Subterráneas - Observatorio Ambiental de Bogotá». [En línea]. Disponible en: <http://oab.ambientebogota.gov.co/es/documentacion-e-investigaciones/resultado-busqueda/gui-a-para-el-monitoreo-de-vertimientos-aguas-superficiales-y-aguas-subterranas>. [Accedido: 25-oct-2018].
- [66] M. A. Luna-Imbacuán, J. E. Fernández-Mera, y J. R. Caicedo-Bejarano, «Open Journal Systems».

- [67] «Tratamiento aguas residuales Beneficio - Anacafé». [En línea]. Disponible en:
https://www.anacafe.org/glifos/index.php/Tratamiento_aguas_residuales_Beneficio
. [Accedido: 25-oct-2018].
- [68] «Prueba de Jarras». [En línea]. Disponible en:
<http://www.isa.ec/index.php/va-viene/entry/prueba-de-jarras>. [Accedido: 25-oct-2018].
- [69] D. N. de Bibliotecas, J. M. Ramos Rincón, J. M. Ramos Rincón, y J. M. Ramos Rincón, «Repositorio institucional UN», masters, Universidad Nacional de Colombia, 2010.
- [70] D. G. Gomez y M. E. González, «APROVECHAMIENTO DE LA BORRA DE CAFÉ (CUNCHO) PARA LA ADSORCION DE MERCURIO EN UN ENTABLE MINERO DEL MUNICIPIO DE SUAREZ CAUCA.» 2018.
- [71] «Quimica Whitten Quinta Edicion PDF | Descargar Libros Gratis». [En línea]. Disponible en: <https://www.dasumo.com/libros/quimica-whitten-quinta-edicion-pdf.html>. [Accedido: 23-nov-2018].
- [72] C. Nunes y M. Guerreiro, «Estimation of surface area and pore volume of activated carbons by methylene blue and iodine numbers», *Quimica Nova*, vol. 34, pp. 472-476, ene. 2011.
- [73] A. P. R. Muñoz, S. G. Ardila, E. F. Yepes, y N. Y. A. Soto, «Preparación de carbón activado a partir de residuos de palma de aceite y su aplicación para la remoción de colorantes», *Revista Colombiana de Química*, vol. 46, n.º 1, pp. 33-41, ene. 2017.
- [74] A. R. A. Arrieta, A. J. L. Rangel, y M. C. R. Castilla, «Removal of methylene blue from aqueous solutions using cassava peel (*Manihot esculenta*) modified with phosphoric acid // Remoción de azul de metileno de soluciones acuosas utilizando cáscara de yuca (*Manihot esculenta*) modificada con ácido fosfórico», *Prospectiva*, vol. 15, n.º 2, pp. 60-73, jul. 2017.
- [75] «Demanda Química De Oxígeno Y Nitrógeno Total, De Los Subproductos Del Proceso Tradicional De Beneficio Húmedo Del Café - PDF». [En línea]. Disponible en: <https://docplayer.es/34454351-Demanda-quimica-de-oxigeno-y-nitrogeno-total->

de-los-subproductos-del-proceso-tradicional-de-beneficio-humedo-del-cafe.html.

[Accedido: 29-nov-2018].

[76] «Aguas residuales del café – Aguas Sanitarias S.A.S». .

[77] D. Trujillo, L. F. Duque, J. S. Arcila, A. Rincón, S. Pacheco, y O. F. Herrera, «Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano», *Revista ION*, vol. 27, n.º 1, pp. 17-34, jun. 2014.

[78] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, «Resolución 631 de 2015 - Parámetros vertimientos - Red de Desarrollo Sostenible de Colombia». [En línea]. Disponible en: <https://www.rds.org.co/es/recursos/resolucion-631-de-2015-parametros-vertimientos>. [Accedido: 29-nov-2018].

[79] J. A. Posada G., G. Roldán P., y J. J. Ramírez R., «Caracterización físico-química y biológica de la calidad de aguas de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, Antioquia, Colombia», *Revista de Biología Tropical*, vol. 48, n.º 1, pp. 59-70, mar. 2000.

[80] A. M. Carvajal-Bernal, F. Gómez, L. Giraldo, y J. C. M.- Piraján, «Modificación química de carbones activados y su efecto en la adsorción de compuestos fenólicos», *Ingeniería Y Competitividad*, vol. 17, n.º 1, pp. 109-119, jun. 2015.

[81] E. Works, «Los sólidos en el agua; maneje sus sólidos y mejore su efluente». [En línea]. Disponible en: <https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/los-solidos-en-el-agua-maneje-sus-solidos-y-mejore-su-efluente>. [Accedido: 29-nov-2018].

[82] M. N. G. Delgado, C. O. Barrenetxea, A. P. Serrano, J. M. A. Blanco, Y F. J. R. Vidal, *Contaminación ambiental: una visión desde la química*. Editorial Paraninfo, 2004.

[83] L. Marcó, R. Azario, C. Metzler, y M. del C. García, «Turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadas a partir de fuentes superficiales. Propuestas a propósito del estudio del sistema de potabilización y distribución en la ciudad de Concepción del Uruguay, Entre, Ríos, Argentina», *Ingeniería sanitaria y ambiental*, n.º 77, pp. 62-9, dic. 2004.

[84] D. Navarro Santos, G. Cruz Cerro, J. Rimaycuna Ramírez, J. L. Solís, R. Keiski, y M. M. Gómez, «Adsorción de azul de metileno en medio acuoso empleando

carbones activados y carbones activados modificados con nanopartículas de ZnO», *Revista de la Sociedad Química del Perú*, vol. 82, n.º 1, pp. 61-71, ene. 2016.

[85] «Significado de Conductividad eléctrica - Qué es, Concepto y Definición». [En línea]. Disponible en: <https://www.significados.com/conductividad-electrica/>. [Accedido: 05-dic-2018].

[86] N. García-Rojas, P. Villanueva-Díaz, E. Campos-Medina, y A. Velázquez-Rodríguez, «Análisis de la adsorción como método de pulimiento en el tratamiento de aguas residuales», *Quivera. Revista de Estudios Territoriales*, vol. 14, n.º 1, pp. 109-129, 2012.

[87] «Conductividad Eléctrica». [En línea]. Disponible en: <http://www.guemisa.com/ambien/docus/Conductividad%20Electrica.htm>. [Accedido: 05-dic-2018].

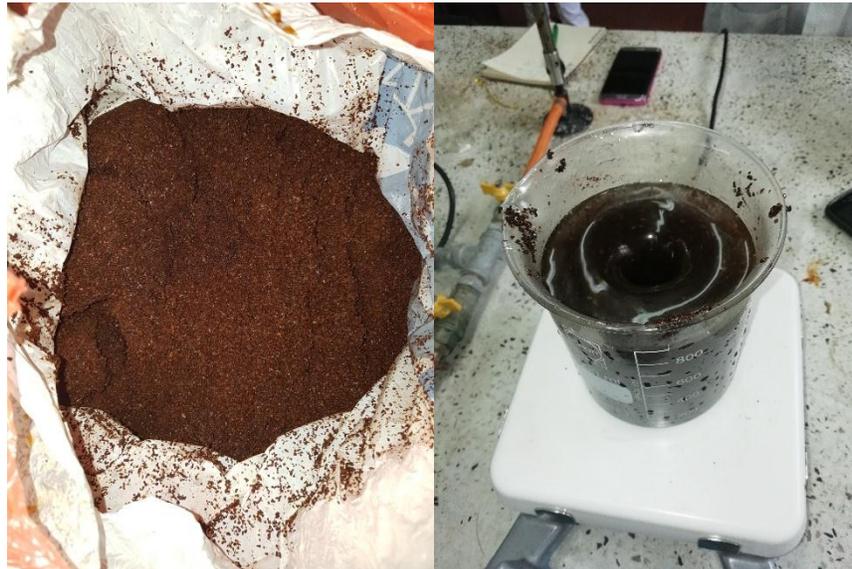
[88] «Q. Analítica Amb.» [En línea]. Disponible en: http://www4.ujaen.es/~mjayora/Analitica_ambiental.htm. [Accedido: 05-dic-2018].

ANEXOS

Anexo 1. Reconocimiento de campo o zona de estudio



Anexo 2. Recolección y lavado de materia prima



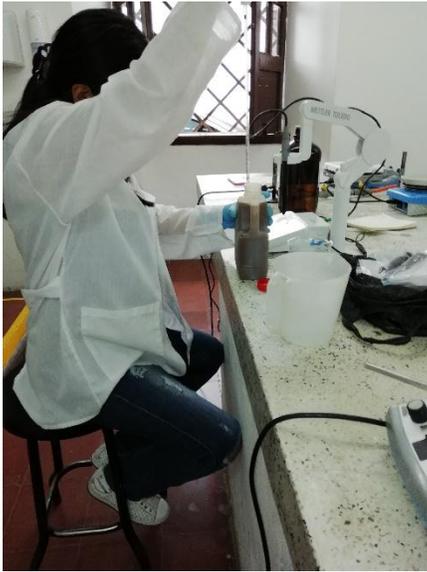
Anexo 3. Activación de la borra de café



Anexo 4. Prueba de azul de metileno



Anexo 5. Monitoreo de las aguas mieles

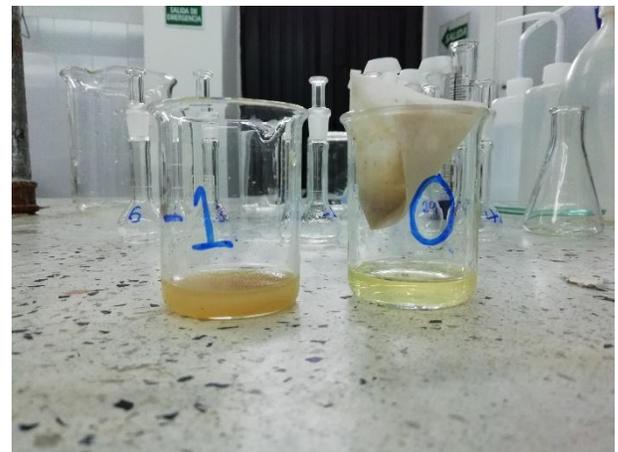
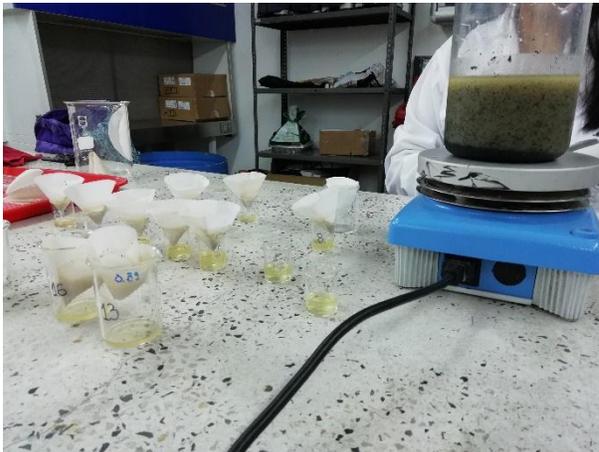


Anexo 6. Tratamiento preliminar del agua miel





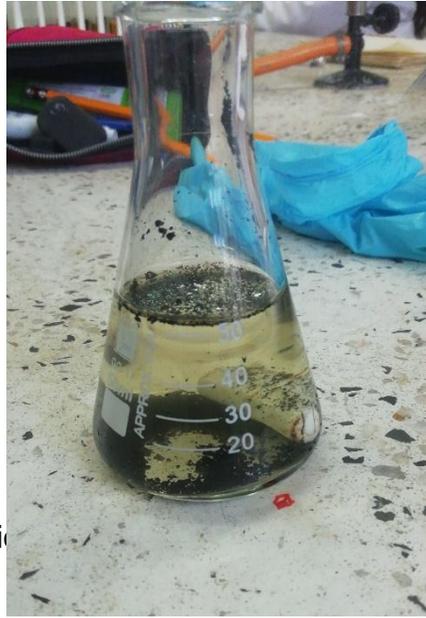
Anexo 7. Prueba de cinética de adsorción



Anexo 8. Construcción y monitoreo de columna de absorción



Anexo 9. Prueba de desintegración del material adsorbente



laboratori

Reporte N° 265

 CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL CAUCA LABORATORIO AMBIENTAL	Código: FT-PDPA-LA027	
	Fecha: 13/02/2013	
	Versión: 3	
	Página 1 de 1	
REPORTE DE RESULTADOS – MUESTRA DE AGUA-		

Fecha: Julio 11 de 2018.

Cliente: Universidad Autónoma del Cauca	Solicitud N°: 220
Dirección: Calle 5, carrera 4, esquina, Popayán	Teléfono: 3148014881
Municipio de muestreo: Popayán	Fecha de Recepción: Junio 26 de 2108.
	Fecha de Análisis: Junio 26 a julio 6.

Muestreo:

Plan de Muestreo N°	N/A
Fecha de Muestreo	N/A
Lugar de Muestreo	N/A
Procedimiento de muestreo	N/A
Condiciones ambientales	N/A

Identificación de la Muestra

Código Muestra	Sitio de Muestreo
0704	Muestra 2, finca Supra Café
0705	Muestra 3, finca Supra Café

Resultados laboratorio:

Variable	Método	Unidad	Resultados	
			0704	0705
DBO ₅	SM5210B/SM4500-OG	mg/L	44400	71550
SST	SM2540D	mg/L	4850	8800

Observaciones:

-Los resultados que se relacionan en este Informe hacen referencia únicamente a las muestras analizadas. -Este documento no puede ser reproducido parcial o totalmente sin la debida autorización del Laboratorio Ambiental.


DIEGO ZULUAGA VERA
Responsable Laboratorio Ambiental

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CAUCA - NIT: 891.501.685 - 4
Carrera 7 # 1n - 28 Edificio Edgar Negret Dueñas
Pbx: 833 32 32 Fax: 092 - 6203251
Línea verde: 018000932855
Popayán - Cauca - Colombia
www.crc.gov.co



Laboratorio: Vivero CRC, Vereda González, Popayán Telefax: 8333232 Ext. 231

Reporte N° 269

	CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL CAUCA LABORATORIO AMBIENTAL REPORTE DE RESULTADOS – MUESTRA DE AGUA-	Código: FT-PDPA-LA027
		Fecha: 13/02/2013 Versión: 3 Página 1 de 1

Fecha: Julio 11 de 2018.

Cliente: Universidad Autónoma del Cauca Dirección: Calle 5, carrera 4, esquina, Popayán	Solicitud N°: 224 Teléfono: 3148014661
Municipio de muestreo: Popayán	Fecha de Recepción: Junio 29 de 2108. Fecha de Análisis: Junio 29 a julio 6.

Muestreo:

Plan de Muestreo N°	N/A
Fecha de Muestreo	N/A
Lugar de Muestreo	N/A
Procedimiento de muestreo	N/A
Condiciones ambientales	N/A

Identificación de la Muestra

Código Muestra	Sitio de Muestreo
0720	Muestra 4, finca supracafé
0721	Muestra 5, finca supracafé

Variable/Método/Unidad:

Variable	Método	Unidad	Resultados	
			0720	0721
DBO ₅	SM5210B/SM4500-OG	mg/L	17580	15300
SST	SM2540D	mg/L	1167	1100

Observaciones:

-Los resultados que se relacionan en este informe hacen referencia únicamente a las muestras analizadas. -Este documento no puede ser reproducido parcial o totalmente sin la debida autorización del Laboratorio Ambiental.

DIEGO ZULUAGA VERA
 Responsable Laboratorio Ambiental

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CAUCA - NIT: 891.501.885 - 4
 Carrera 7 # 1n - 28 Edificio Edgar Negret Dueñas
 Pbx: 833 32 32 Fax: 092 - 8203251
 Línea verde: 018000932855
 Popayán - Cauca - Colombia
 www.crc.gov.co



Laboratorio: Vivero CRC, Vereda González, Popayán Telefax: 8333232 Ext. 231

Reporte N° 331

	CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL CAUCA LABORATORIO AMBIENTAL REPORTE DE RESULTADOS – MUESTRA DE AGUA-	Código: FT-PDPA-LA027
		Fecha: 13/02/2013
		Versión: 3
		Página 1 de 2

Fecha: Agosto 16 de 2018.

Cliente: Universidad Autónoma del Cauca Dirección: Calle 5, carrera 4, esquina, Popayán	Solicitud N°: 270 Teléfono: 3148014661
Municipio de muestreo: Popayán	Fecha de Recepción: Agosto 10 de 2108. Fecha de Análisis: Agosto 10 a agosto 15.

Muestreo:

Plan de Muestreo N°	N/A
Fecha de Muestreo	N/A
Lugar de Muestreo	N/A
Procedimiento de muestreo	N/A
Condiciones ambientales	N/A

Identificación de la Muestra

Código Muestra	Sitio de Muestreo
0874	Muestra 0
0875	Muestra 2
0876	Muestra 10
0877	Muestra 18
0878	Muestra 0M
0879	Muestra 0B
0880	Muestra 2B
0881	Muestra 10B
0882	Muestra 18B

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CAUCA - NIT: 891.501.885 - 4
 Carrera 7 # 1n - 28 Edificio Edgar Negret Dueñas
 Pbx: 833 32 32 Fax: 092 - 8203251
 Línea verde: 018000932855
 Popayán - Cauca - Colombia
www.crc.gov.co



Laboratorio: Vivero CRC, Vereda González, Popayán Telefax: 8333232 Ext. 231

Reporte N° 331

	CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL CAUCA LABORATORIO AMBIENTAL	Código: FT-PDPA-LA027
		Fecha: 13/02/2013
		Versión: 3
		Página 2 de 2

Variable/Método/Unidad:

Variable	Método	Unidad
DBO ₅	SM5210B/SM4500-OG	mg/L
DQO	SM5220D	mg/L
SST	SM2540D	mg/L

Resultados laboratorio:

Código Muestra	Resultado		
	DBO ₅	DQO	SST
0874	3597	5020	1253
0875	4020	7110	730
0876	3540	5250	210
0877	3630	5370	180
0878	3945	6490	530
0879	3270	5560	1886
0880	3435	5280	2160
0881	3270	5750	144
0882	3570	5270c	128

Observaciones:

-Los resultados que se relacionan en este Informe hacen referencia únicamente a las muestras analizadas.
 -Este documento no puede ser reproducido parcial o totalmente sin la debida autorización del Laboratorio Ambiental.

DIEGO ZULUAGA VERA
 Responsable Laboratorio Ambiental

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CAUCA - NIT: 891.501.885 - 4
 Carrera 7 # 1n - 28 Edificio Edgar Negret Dueñas
 Pbx: 833 32 32 Fax: 062 - 8203251
 Línea verde: 018000932855
 Popayán - Cauca - Colombia
www.crc.gov.co



Laboratorio: Vivero CRC, Vereda González, Popayán Telefax: 8333232 Ext. 231