

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE REMOCIÓN DE COLORANTE AZOICO DEL
CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO A PARTIR DE PULPA DE CAFÉ

LIZETH GABRIELA ALVAREZ CUBILLOS

DANIELA ALEJANDRA BENAVIDES MORALES

PROYECTO INTEGRAL DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO

DIRECTOR:

FELIPE CORREA MAHECHA I

INGENIERO QUÍMICO

MAGISTER EN MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE

CODIRECTOR

GINNA PAOLA TRUJILLO PÉREZ

MAESTRÍA EN CIENCIAS QUÍMICA

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

BOGOTÁ D.C.

2024

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre
Firma del director

Nombre
Firma del presidente Jurado

Nombre
Firmas del Jurado

Nombre
Firmas del Jurado

Bogotá. D.C. febrero de 2024

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector de Claustro

Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA

Consejero Institucional

Dr. LUIS JAIME GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica

Dra. MARÍA FERNANDA VEGA DE MENDOZA

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Vicerrectora de Investigaciones y Extensión

Dra. SUSAN MARGARITA BENAVIDES TRUJILLO

Secretario General

Dr. JOSÉ LUIS MACÍAS RODRÍGUEZ

Decano de Facultad de Ingenierías

Dra. NALINY PATRICIA GUERRA PRIETO

Director del Departamento de Ingeniería Química

Ing. NUBIA LILIANA BECERRA

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

AGRADECIMIENTOS

Daniela Alejandra Benavides Morales.

Durante estos años de estudio vamos pasando por diferentes etapas, dejando grandes aprendizajes para lo largo de nuestra vida como mi mamá Luz Mariela Morales Cordoba, que siempre estuvo ahí apoyándome en todo lo que hacía y me proponía, enseñándome no sólo el valor de la responsabilidad y el compromiso sino también la humildad, la sencillez y la amabilidad con las personas que se encuentran a mi alrededor; o mi hermana Diana Carolina Benavides Morales que siempre me ha visto como una fuerte y decidida dando un gran apoyo en mis metas, mi papá Rubén Darío Benavides Alfonso (Q.E.P.D) mientras me acompañó me dio grandes lecciones que hoy guardo con mucho amor en mi corazón. Así mismo, encontrado personas que nos ayudarán a construir el camino para ser mejores.

Durante la ejecución de este proyecto, me sentí muy agradecida en primer lugar con mis profes que durante mi carrera estuvieron presentes, como la profe Ginna Trujillo que la conocí en tercer semestre siendo la maestra de química inorgánica y estuvo instruyendo las clases a lo largo de mi cuarto semestre y luego en mi sexto semestre, dejando no sólo una gran imagen en mí, sino en mi familia que me acompañaban en las clases durante el confinamiento, sobre todo mi mamá cuando la profe preguntaba, me encendía el micrófono para que le respondiera, encontrándola nuevamente en este proyecto siendo la Directora de Tesis estando casi que al pie de todo lo que se hacía, demostrando su interés y vocación como maestra para que aprendiéramos y comprendiéramos la importancia de hacer las cosas correctamente. También a mi Director de Tesis Felipe Correa que también lo conocí en séptimo semestre en la clase de cinética y desempeñó un papel crucial en cada instante del desarrollo del proyecto. A mi compañera Leidy Murcia que fue como la hermanita mayor a lo largo de la carrera, la que me enseñó a superarme, a demostrarme que si puedo, que si soy capaz y que todo lo que me propongo lo puedo superar, que a pesar de que aún tenga cosas por las cuales deba mejorar siempre la voy a encontrar. Por otro lado, les doy infinitas gracias a Jeidy Alfonso y Sara Rincón las chicas que se encuentran en el laboratorio, las cuales presenciaron cada logro y error en la fase experimental, al igual que la Ingeniera Jenny Hernández, personas que aparecieron de la nada brindando su mano, con el ánimo de dar siempre lo mejor de sí mismas, dando un gran apoyo y un ambiente ameno durante el uso de las instalaciones.

TABLA DE CONTENIDO

	PÁG.
INTRODUCCIÓN	11
OBJETIVOS	12
1 GENERALIDADES	13
1.1 Cafeto y su fruto	16
1.2 Colorantes	17
<i>1.2.1 Clasificación de Colorantes</i>	17
<i>1.2.2 Colorantes Azo</i>	17
1.3 Uso de colorantes Azoicos	18
1.4 Ubicación	18
2 METODOLOGIA	19
2.1 Caracterización de materia prima	19
<i>2.1.1 Determinación de pH</i>	19
<i>2.1.2 Determinación de humedad</i>	20
<i>2.1.3 Determinación de Ceniza</i>	21
<i>2.1.4 Determinación de Granulometría</i>	22
2.2 Elaboración de carbón activado	23
<i>2.2.1 Determinación del pH del carbón activado</i>	25
<i>2.2.2 Determinación de Humedad de Carbón activado</i>	26
<i>2.2.3 Determinación de la Densidad Aparente</i>	27
<i>2.2.4 Determinación de Ceniza</i>	28
<i>2.2.5 Determinación del Número de Yodo</i>	29
<i>2.2.6 Determinación de Azul de Metileno</i>	31
2.3 Evaluación de la remoción	31
3 ANÁLISIS DE RESULTADOS	33
3.1 Caracterización de materia prima	33
<i>3.1.1 Determinación de pH</i>	33

3.1.2	<i>Determinación de Humedad</i>	34
3.1.3	<i>Determinación de Ceniza</i>	36
3.1.4	<i>Determinación de Granulometría</i>	39
3.2	Caracterización de carbón activado	41
3.2.1	<i>Elaboración del carbón activado</i>	41
3.2.2	<i>Determinación del pH del carbón activado</i>	42
3.2.3	<i>Determinación de Humedad de CA</i>	43
3.2.4	<i>Densidad aparente</i>	44
3.2.5	<i>Determinación de Ceniza</i>	45
3.2.6	<i>Determinación del número de yodo</i>	46
3.2.7	<i>Determinación de azul de metileno</i>	46
3.3	Evaluación de remoción	49
4	CONCLUSIONES	58
	REFERENCIAS	59

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Fruto de café	16
Figura 2. Ubicación Vereda Mesones	18
Figura 3. Determinación de pH	19
Figura 4. Determinación de humedad	20
Figura 5. Determinación de Ceniza	22
Figura 6. Determinación de Granulometría	23
Figura 7. Elaboración de CA	25
Figura 8. Determinación de pH en Carbón Activado	26
Figura 9. Determinación de Humedad CA	27
Figura 10. Determinación de Densidad Aparente CA	28
Figura 11. Determinación de ceniza CA	29
Figura 12. Determinación número de Yodo	30
Figura 13. Determinación de azul de metileno	31
Figura 14. Figura 14 Preparación de soluciones RC	32
Figura 15. Diagrama caja y bigotes para pH de Mp	34
Figura 16. Diagrama caja y bigotes para la humedad de la MP	36
Figura 17. Diagrama caja y bigotes para cenizas de la MP	38
Figura 18. Análisis químico cualitativo de cobre	39
Figura 19. Porcentaje retenido en función de diámetro de partícula	41
Figura 20. Curva de colorante Rojo Congo	50
Figura 21. Curva de Ringbom	51
Figura 22. Curva de calibración para el colorante RC	52
Figura 23. Isoterma de Langmuir Primera réplica (10 min).	55

Figura 24.	Isoterma de Langmuir Segunda réplica (24h).	56
Figura 25.	pH básico de la MP	65
Figura 26.	Humedad de la MP	66
Figura 27.	Presencia de Carbonatos en la MP	66
Figura 28.	Ceniza de coloración verde	67
Figura 29.	Tamices	67
Figura 30.	Impregnación del carbón	68
Figura 31.	Lavados del carbón activado	68
Figura 32.	Cenizas de Carbón activado	69
Figura 33.	Adsorción azul de metileno carbón comercial a una concentración de 1080 ppm	69
Figura 34.	Adsorción azul de metileno carbón elaborado a una concentración de 1080 ppm	70
Figura 35.	Longitud de onda máxima del colorante Rojo Congo	70
Figura 36.	Carbón activado con 40 mL de colorante Rojo Congo a 20 ppm	71
Figura 37.	Separación de partículas de carbón mediante filtro de fibra de vidrio	71

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 <i>Protocolos de Borra de café Arábica</i>	15
Tabla 2 <i>Secado de materia prima</i>	23
Tabla 3 <i>Diseño Experimental</i>	24
Tabla 4 <i>pH de borra de café</i>	33
Tabla 5 <i>Determinación de humedad de la pulpa de café</i>	35
Tabla 6 <i>Determinación de cenizas en la MP</i>	37
Tabla 7 <i>Retención granulométrica</i>	40
Tabla 8 <i>Determinación de pH CA</i>	42
Tabla 9 <i>Determinación del porcentaje de humedad del CA</i>	43
Tabla 10 <i>Densidad aparente en el CA</i>	44
Tabla 11 <i>Determinación de cenizas en el CA</i>	45
Tabla 12 <i>Resultados caracterización CA</i>	48
Tabla 13 <i>Retención de RC periodo de 10 min</i>	53
Tabla 14 <i>Retención de RC periodo de 24 horas</i>	54

RESUMEN

El café es un producto ampliamente consumido en Colombia y en todo el mundo, pero su proceso de producción genera alrededor de 784,000 toneladas de residuos de café. Por lo tanto, para abordar este problema, se utiliza la cáscara de café para producir carbón activado a partir de la pulpa de café, que se compone de lignina, hemicelulosa y celulosa. Así mismo, el carbón activado juega un papel clave en la eliminación de metales pesados y en la solución de los efluentes contaminados, especialmente en la industria textil.

El estudio se llevó a cabo en un cultivo de café en el municipio de Ortega, Tolima, realizando un análisis fisicoquímico de la pulpa de café, observando valores de pH básicos, posiblemente debido a la alta concentración de calcio. La elaboración del carbón activado implicó un diseño factorial para la activación química, variando la concentración de ácido fosfórico y el tiempo de impregnación. A pesar de que el carbón activado resultante no cumplió en su totalidad con los estándares fisicoquímicos a comparación de los carbones comerciales, se determinó que, si tiene capacidad adsorción como se muestra en la evaluación de remoción con el colorante azoico ROJO CONGO, utilizado en la industria textil, indicando un buen rendimiento en la disminución de la concentración en ppm del colorante, lo cual es crucial en aplicaciones para la purificación del agua.

Los resultados detallados proporcionan una comprensión exhaustiva de las propiedades de la pulpa de café, la elaboración del carbón activado y su capacidad para eliminar contaminantes, estableciendo así una base para posibles aplicaciones industriales y mejoras en el proceso.

Palabras clave: *Colorantes azoico, capacidad de absorción, isotermas de adsorción, porcentaje de remoción, residuos agroindustriales, sostenibilidad, café, carbón activado, azul de metileno.*

INTRODUCCIÓN

Se pretende evaluar la capacidad de remoción de colorantes azoicos por medio de un carbón activado obtenido a partir de pulpa de café, correspondiente al epicarpio del fruto del cafeto. La pulpa del café es el primer producto que se obtiene en el procesamiento del grano de café. Este representa alrededor del 29% del peso del fruto. Tiene un alto contenido de materia orgánica como taninos, sustancias pépticas totales, azúcares reductores, azúcares no reductores, cafeína, ácido clorogénico y ácido cafeico total. Considerando la cantidad de compuestos orgánicos que genera la pulpa de café y teniendo en cuenta que, por cada millón de sacos de 60 kg de café almendra que Colombia exporta, se generan 162.900 toneladas de pulpa fresca, que representaría una cantidad equivalente de heces y orina generadas en una población de 868.736 al año. Convirtiéndola en una biomasa residual con alto impacto ambiental pero que ha mostrado un alto interés como materia prima en la producción de carbón activo que puede actuar como un sistema en la remoción de contaminantes orgánicos en aguas residuales.

Los colorantes azoicos son compuestos orgánicos sintéticos difíciles de degradar; sin embargo, son el grupo más grande en niveles de volumen de producción representando un 60 a 70% de los tintes orgánicos producidos en el mundo. Esto debido a su popularidad ya que poseen una síntesis simple y eficaz en comparación con los tintes naturales. Debido a que estos colorantes presentan alta toxicidad para los organismos acuáticos y la salud humana. De acuerdo con esto existe una gran variedad de métodos de eliminación de estos colorantes siendo uno de las principales metodologías la adsorción.

De acuerdo con lo anterior el proyecto de investigación quiere impactar al sexto Objetivo de Desarrollo Sostenible “Agua limpia y saneamiento” que busca “Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos” a partir de la caracterización fisicoquímica de la pulpa de café de la cual se obtendrá un carbón activo. Después de obtener el carbono se evalúa la capacidad adsorbente de colorantes de carácter azoico por parte de este y se compara su eficiencia frente a otros carbonos comerciales.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar la capacidad de remoción de colorante azoico del carbón activado obtenido a partir de pulpa de café.

Objetivos Específicos

- Caracterizar la materia prima (pulpa de café) mediante análisis físicos y químicos.
- Evaluar la influencia de diferentes variables de operación sobre las propiedades del carbón activado obtenido a partir de pulpa de café.
- Comparar la eficiencia de remoción de colorantes azoicos utilizando carbón activado obtenido de pulpa de café con otros adsorbentes comerciales.

1 GENERALIDADES

La adsorción es el proceso por el cual una sustancia adsorbible, que están presentes en el mayor de los casos en fase fluida está en contacto con otra igual o superior grado de condensación, el cual se denomina adsorbente, que se encuentran generalmente en fase sólida [1]. En la historia, los primeros adsorbentes utilizados por el hombre fue el carbón vegetal, material empleado por los egipcios y sumerios como reductor de menas metálicas [2]. Luego, fue usado por Hipócrates y Plinio aplicando el carbón vegetal para tratar una amplia variedad de afecciones, incluyendo epilepsia, clorosis y ántrax [3], al mismo tiempo que los fenicios utilizaban filtros de carbón vegetal para descontaminar el agua que iba destinada al consumo humano [1]. Mucho después, durante la Primera Guerra Mundial, el profesor Zelinsky de la universidad de Moscú propuso como medio de protección contra los gases utilizados en la guerra, máscaras equipadas con filtros rellenos de carbones activados, cuyo uso data hasta el día de hoy como protección del tracto respiratorio en atmósferas contaminadas con gases tóxicos [4].

En el transcurso del tiempo y el desarrollo de la industria textil se ha posicionado como la segunda más contaminante, pues su producción equivale al 20% de las aguas residuales del mundo [5], el cual contiene colorantes en su mayoría azoicos que en su estructura se encuentra la presencia de uno o más enlaces azo ($-N=N-$) en asociación con uno o más anillos aromáticos y que además pueden llevar distintos grupos funcionales como grupos nitro, carboxilos y grupos sulfónicos [6], lo que lo hace resistente a la degradación. Por lo tanto, los tratamientos aplicados para estos efluentes no han sido muy favorables ya que se remueve sólo el 50% de la concentración, dando como resultado, el desecho de cientos de toneladas de colorantes que se dirigen a cuerpos acuáticos [7]. Cobrando interés en el uso de adsorbentes como el carbón activado debido a la nula regeneración de moléculas secundarias[8].

La biomasa lignocelulósica está constituida por la lignina, la hemicelulosa y la celulosa, que están conformadas por polímeros heterogéneos, ya que la hemicelulosa posee unidades de pentosas (xilosas, arabinosa) y hexosas (manosa, Glucosa, galactosa) [9], que cumplen un papel fundamental en la remoción de metales pesados, pues contienen fenoles, ácidos carboxílicos y otros grupos funcionales que facilitan su afinidad con los iones metálicos [10]. A continuación, la lignina presenta gran capacidad de adsorción debido, por una parte, a los fenoles y otros grupos funcionales presentes en su superficie ayudando a aumentar el carácter ácido de la lignina en

solución acuosa; por otro lado, se debe a las fuerzas de atracción electrostática entre la superficie de la lignina y el ion metálico [11], puesto que los iones son adsorbidos debido al tamaño del radio del ion que. entre más grande. mayor será la fuerza con la que será atraído [12]. Por último, la celulosa contiene una estructura lineal y fibrosa en donde se establecen puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilo de diferentes cadenas de glucosa efectuando resistencia e insolubilidad en el agua produciendo fibras compactas que otorga una alta capacidad de sorción, sobre todo en cationes divalentes [13].

En la actualidad existe una gran cantidad de excedentes orgánicos, provenientes del sector agro, que se caracterizan por presentar compuestos como lignina, hemicelulosa y celulosa, anteriormente mencionados, estos residuos bioadsorbentes de metales pesados tienen como ventaja que muchas veces no tienen costo y están a fácil disposición como, por ejemplo, las cáscaras u otros excedentes de fruta como la manzana, plátano, naranja, tallos de uva, aserrín, cascarilla de arroz y nuez entre otros [12]. Otro de los bioadsorbentes del sector agro es la borra de café el cual contiene de celulosa (40%-49%). hemicelulosa (25%-32%) y lignina (33%-35%), lo que lo hace gran potencial para elaboración de carbón activado a partir de este material lignocelulósico perfilándose como una alternativa a los tratamientos biológicos y químicos tradicionales [14].

Para investigar las propiedades de la cáscara de café, se llevó a cabo una exhaustiva revisión de la literatura Tabla 1, evaluando diversos artículos que abordaban el estudio de distintos tipos de café Arábica. El objetivo principal era analizar los resultados obtenidos por diferentes autores en relación con la cáscara de café y utilizar esta información para realizar una comparación detallada con los resultados obtenidos durante el proceso de preparación del carbón activado.

Tabla 1*Protocolos de Borra de café Arábica*

pH	Humedad base seca	Fibra Cruda	Proteína	Ceniza	Grasa	Taninos	Cafeína	Referencia
	%	%	%	%	%	%	%	
4,21	12,5	36,07	10,63	9,58	5,78	-	2,262	[15]
4,68	17,21	13,79	4,08	1,39 - 3,61	1,57	-	-	[16]
2,70-3,50	17,60 - 23,30	28,00 - 61,00	7,50 - 15,00	8,30	-	1,80 - 8,60	1,30 - 1,50	[17]
-	16,99	21,00	10,00	8,70	-	1,80-8,60	1,30	[18]
-	11,48	16,23	11,48	-	-	-	19,24	[19]
4,50	16,93	15,10	-	8,12	-	3,70	0,75	[20]
-	-	39,50	11,50	-	2,60	3,00 - 5,00	1,50	[21]
2,87 - 3,00	13,00	-	1,40	3,20	-	-	-	[22]
5,36	40	36,99	10,23	10,72	1,7	-	-	[23]
-	17,68	-	10,00 - 12,00	8,90	-	8,60	1,30	[24]

Nota. Resumen de la revisión bibliográfica con respecto a los análisis fisicoquímicos.

1.1 Cafeto y su fruto

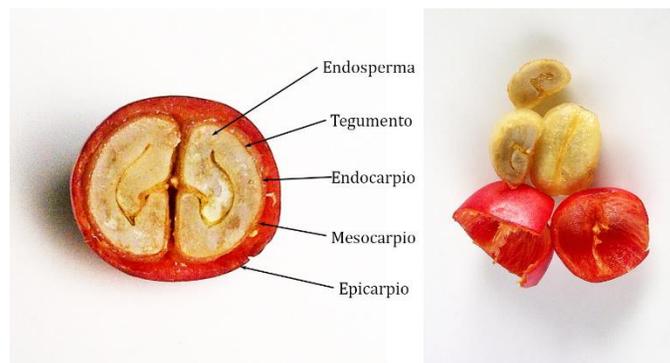
Desde un punto de vista botánico, el café pertenece. de forma ascendente al género *Coffea*, dentro de la familia de las Rubiáceas. Una familia botánica con unos 500 géneros y más de 6.000 especies. Los cafetos presentan formas, tamaños y características muy diferentes[25], tanto así que hay algunos que miden apenas un metro, y otros que pueden llegar a alcanzar a medir en libertad hasta 15 metros. Sin embargo, y con el fin de facilitar la recolección, en las plantaciones se podan entre los dos y los cuatro metros de altura[26].

El fruto del cafeto tiene la apariencia de una cereza pequeña, cuando nace es de color verde y durante los ocho u once meses siguientes, según la especie y la zona de cultivo y maduración, pasa por las distintas tonalidades que van del amarillo al rojo [16].

En el interior de cada cereza o drupa, hay dos semillas con las caras planas enfrentadas y una hendidura central. Cada grano está envuelto por una fina película que recibe el nombre de piel de plata. Ambos granos, a su vez, están cubiertos por el pergamino y mucílago, separado de la piel por la pulpa cómo se visualiza en la ilustración 1 a continuación.

Figura 1.

Fruto de café



Nota. Partes que conforman el fruto de café. Tomado de: S. Rohaya, S. H. Anwar, A. B. Amhar, A. Sutriana, and M. Muzaiifa, “Antioxidant activity and physicochemical composition of coffee pulp obtained from three coffee varieties in Aceh, Indonesia,” in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Institute of Physics, 2023. doi: 10.1088/1755-1315/1182/1/012063.

- **Endospermo:** Es el grano de café como tal, parte del fruto que una vez tostada y molida. se utiliza para la producción de la bebida del café [16].
- **Tegumento:** También llamado piel plateada, es una cubierta o película muy delgada y de color plateado [16].
- **Endocarpio:** Es una cubierta dura que se denomina pergamino o cáscara, una vez que se ha secado la semilla se separa del grano de café [16].
- **Mesocarpio:** Es una sustancia gelatinosa y azucarada que recibe el nombre de baba o mucílago, la cual queda una vez el café es descerezado y se le retira por medio del proceso de fermentación [16].
- **Epicarpio:** Es la cubierta o piel exterior del fruto, conocida como pulpa del café, puede ser de color rojo o amarillo [16].

1.2 Colorantes

Un colorante es generalmente un compuesto orgánico, que tiene la capacidad de teñir o pintar un material, ya sea fibras textiles, cuero, papel, plástico o alimentos, estos colorantes se utilizan a menudo en la industria para añadir color y mejorar la apariencia de diferentes materiales y productos por lo que existen diferentes tipos de colorantes, y su uso puede estar regulado por las autoridades sanitarias en algunos países [27].

1.2.1 Clasificación de Colorantes

La clasificación química de los colorantes puede ser amplia y variada, pero en términos generales, se puede clasificar en dos grandes grupos: colorantes orgánicos e inorgánicos. Los colorantes orgánicos son compuestos que contienen carbono y se dividen en diferentes clases, como los colorantes azo, los colorantes antracénicos, los colorantes antraquinónicos, entre otros. Los colorantes inorgánicos, por su parte, no contienen carbono en su composición y se pueden dividir en diferentes clases, como los colorantes cromáticos, los colorantes de tierras y los colorantes metálicos. Además, según su modo de aplicación, los colorantes también se pueden clasificar en colorantes directos o dispersos, ácidos o alcalinos. Es importante destacar que la clasificación de los colorantes puede variar según el criterio utilizado [16].

1.2.2 Colorantes Azo

Estos compuestos se caracterizan por el grupo funcional (-N=N-) que une dos radicales alquilo o arilos simétricos y/o asimétricos, idénticos o no azoicos. En general, la estructura química de un colorante azo está representada por un esqueleto, los grupos auxocromos, los grupos cromóforos

y los grupos solubles. El color de los colorantes azo está determinado por los enlaces azo y sus cromóforos y auxocromos asociados [16].

1.3 Uso de colorantes Azoicos

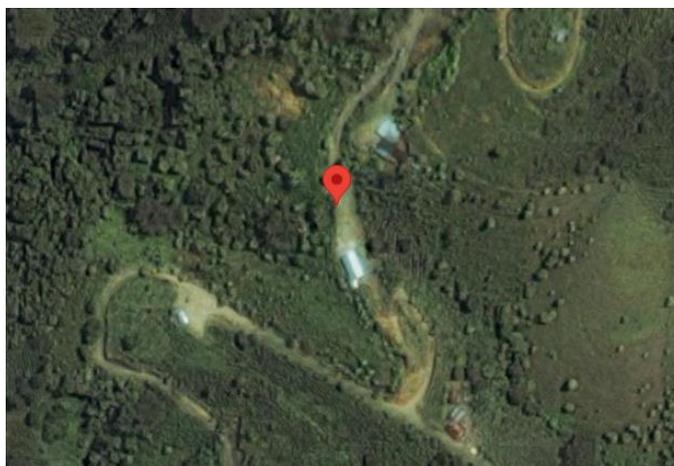
La industria textil los usa, fundamentalmente como tintes para tejidos tanto de tipo natural como artificial y otros materiales como cuero para la industria del calzado y complementos de moda. Las arilaminas, como también se les llama, son de las sustancias colorantes más utilizadas en la industria de la moda, tanto que alcanza al 70% de los tintes utilizados en esta industria. Pero lo todo queda en el sector de la moda, sino que los colorantes azoicos también se utilizan en otros sectores como son alimentos, cosméticos e industria farmacéutica, pinturas [28].

1.4 Ubicación

La recolección de la pulpa de café arábica para la caracterización y obtención del carbón activado fue en el departamento del Tolima exactamente en la vereda Mesones a 2 horas del municipio Ortega con las coordenadas 3.9916268.-75.3419734 en la ilustración 2. Este lugar se encuentra de 1000 a 2000 m.s.n.m. una temperatura promedio de 20°C a 24°C y una clasificación climática de templado semi húmedo. El café recolectado cumple con las condiciones climáticas de este lugar puesto la franja óptima del cultivo para café arábica se encuentra entre 18°C a 22°C.

Figura 2.

Ubicación Vereda Mesones



Nota. Ubicación donde se recolecto la pulpa de café. Tomado de: Google maps.

2 METODOLOGIA

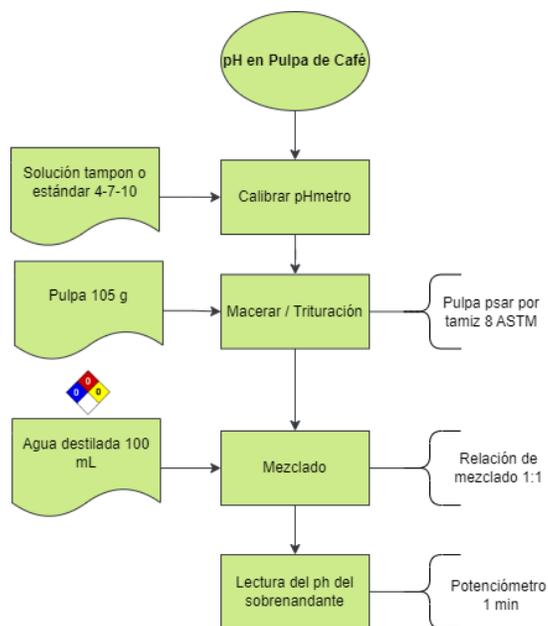
2.1 Caracterización de materia prima

2.1.1 Determinación de pH

El pH es una medida de concentración de protones o iones de hidrógeno. es decir. de la acidez o basicidad en un medio. Para la determinación de pH, se hizo uso de la norma NTC 440 actualizada [29], como se muestra en la figura 3, implementando un potenciómetro marca HANNA previamente calibrado con solución Buffer para no provocar errores de medición. tomando una relación 1:1, de pulpa de café triturado en tres molinos (corona, perter, mortero), mezclado con agua destilada; elaborando el estudio por triplicado para cada caso.

Figura 3.

Determinación de pH



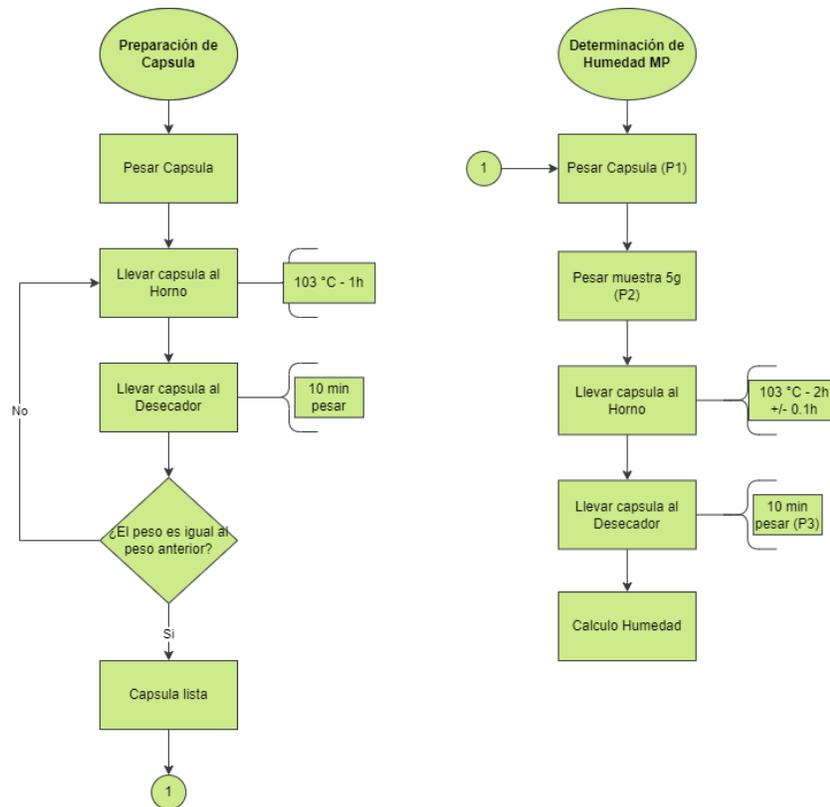
Nota. Protocolo de la determinación de ph siguiendo la norma NTC 440

2.1.2 Determinación de humedad

El porcentaje de humedad hace referencia a la cantidad de agua contenida en una muestra orgánica para la determinación de humedad se realizará según el protocolo NTC 2558 (Café Tostado Y Molido. Determinación Del Contenido De Humedad. Método Por Determinación De La Pérdida En Masa A 103 °C método de rutina) [30]. Al finalizar el ensayo se registran los valores que serán reemplazados en la ecuación (1) para definir los porcentajes de humedad obtenidos durante el ensayo.

Figura 4.

Determinación de humedad



Nota. Protocolo de la determinación de humedad siguiendo la norma NTC 2558

$$\frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} * 100\% \quad (1)$$

En donde

m_0 : es la masa en gramos de la capsula y la tapa

m_1 : es la masa en gramos de la capsula la muestra y la tapa antes del secado

m_2 : es la masa en gramos de la capsula la muestra y la tapa después del secado (7h)

m_3 : es la masa en gramos de la capsula la muestra y la tapa después del secado (1h)

2.1.3 Determinación de Ceniza

Para la determinación de cenizas, se utilizó la norma técnica ASTM internacional E1755 – 01[31], expresado como el porcentaje en masa del residuo que queda después de la oxidación seca. Para su determinación se elaboró en primer lugar el figura 5, utilizando una mufla marca Terrigeno para el desarrollo de este análisis mostrando y de igual forma haciendo uso de la ecuación 2 para la determinación de porcentaje de cenizas presentado en la muestra.

$$\%_{cenizas} = \left[\frac{(m_{ceniza} - m_{crisol})}{(m_{od} - m_{crisol})} \right] \times 100 \quad (2)$$

Donde:

$\%_{ceniza}$: Porcentaje en masa de cenizas, basado en la masa de la muestra secada en horno a 575 °C.

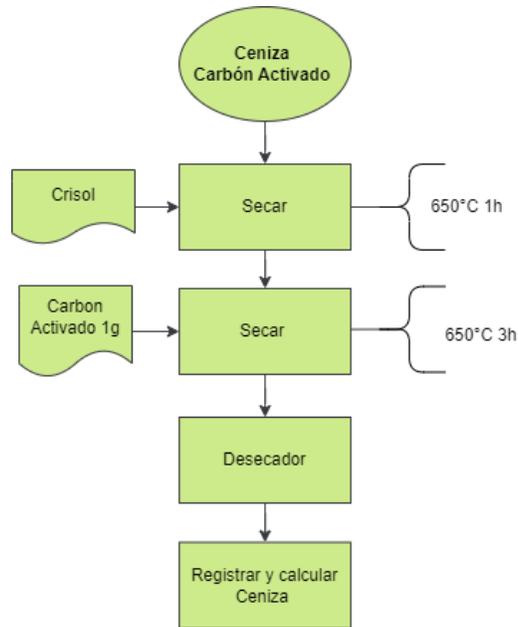
m_{ceniza} : masa de ceniza y crisol.

m_{crisol} : masa de crisol tarado.

m_{od} : masa inicial de muestra seca a 105°C y crisol.

Figura 5.

Determinación de Ceniza



Nota. Protocolo de la determinación de ceniza siguiendo norma técnica ASTM internacional E1755 – 01

2.1.4 Determinación de Granulometría

Los análisis granulométricos se realizan mediante ensayos de laboratorio empleando tamices de diferente numeración, lo que permite estudiar y conocer el tamaño de partícula y sedimentos presentes en una muestra, siguiendo la NTC 2326 [32], visualizando su procedimiento en la figura 6. Así mismo, ocupando un molino marca Corona para triturar la materia prima que será empleada para esta determinación y un horno para eliminar la humedad de la materia prima en su totalidad, obteniendo los resultados observados en la tabla 2, a continuación.

Tabla 2

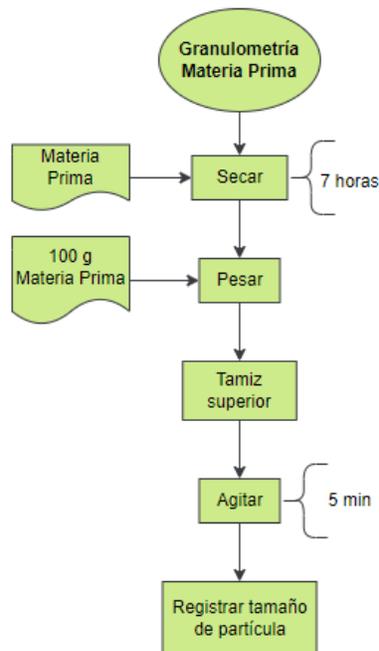
Secado de materia prima

Masa Inicial (g)	Masa final (g)	Humedad (%)
236,9758	120,3676	12,7400
246,8975	119,7893	
246,1267	126,8431	

Nota. Secado de la materia prima para la evaluación granulométrica

Figura 6.

Determinación de Granulometría



Nota. Protocolo de la determinación de humedad siguiendo norma NTC 2636

2.2 Elaboración de carbón activado

Para la elaboración del carbón activado, se utiliza ácido fosfórico (H_3PO_4) para una activación química, realizando así mismo, un diseño factorial como se puede visualizar en la tabla 3. Empleando un Shaker marca Tecnal de 12 espacios, el cual es ideal para el desarrollo, ya que se desarrollarán un total de 12 ensayos.

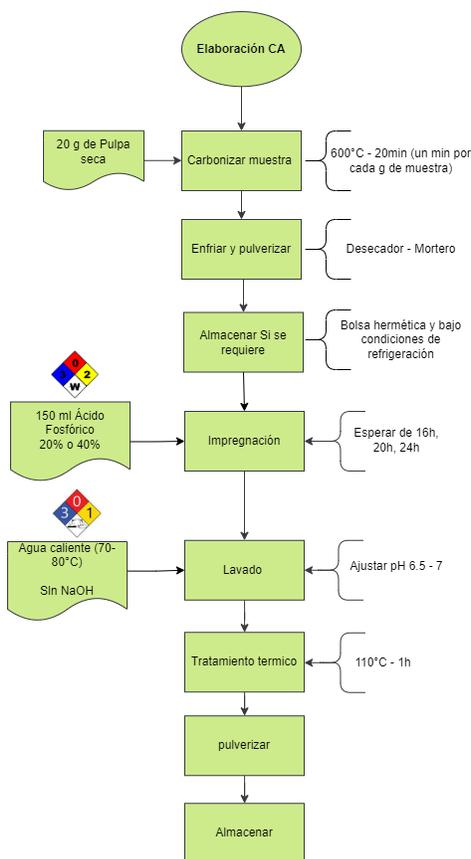
Tabla 3*Diseño Experimental*

# Ensayos	H ₃ PO ₄ % (v/v)	t (h)
1	20%	16
2	20%	16
3	20%	20
4	20%	20
5	20%	24
6	20%	24
7	40%	16
8	40%	16
9	40%	20
10	40%	20
11	40%	24
12	40%	24

Nota. Diseño factorial para la elaboración del carbón activado

Figura 7.

Elaboración de CA



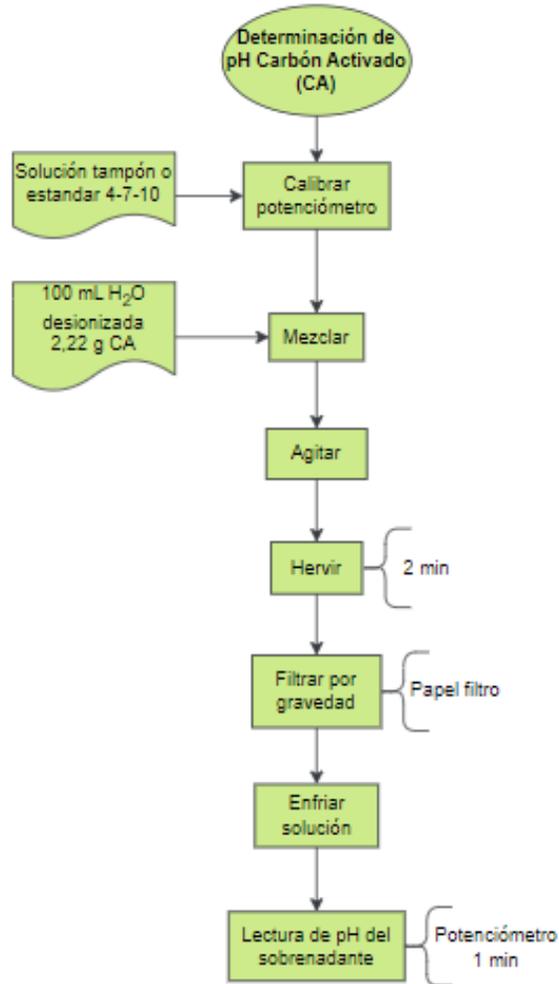
Nota. Protocolo para la elaboración de carbón activado (diseño experimental)

2.2.1 Determinación del pH del carbón activado

La técnica se basa en la medida de la diferencia del potencial originada por la disolución en agua destilada de sustancias presentes en el carbón activado y permite conocer el pH del cualquier carbón activado, en polvo o granular, utilizando para su determinación la norma NTC 4467 [33], encontrando su procedimiento en la figura 8, utilizando un potenciómetro marca HANNA para la estimación del pH y del papel filtro marca Whatman.

Figura 8.

Determinación de pH en Carbón Activado



Nota. Protocolo de la determinación de pH siguiendo norma NTC 4467.

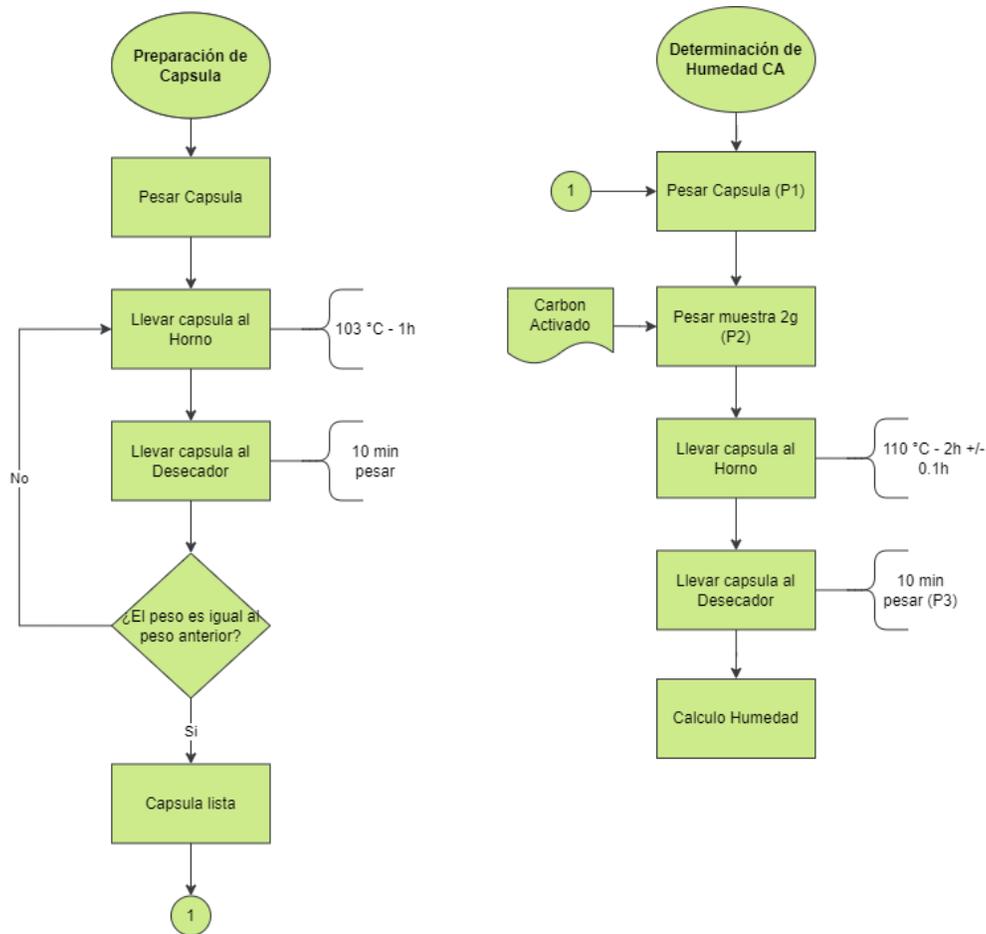
2.2.2 Determinación de Humedad de Carbón activado

La determinación de humedad se realizará según la figura 9 siguiendo la norma NTC 4467 [33], tarando en primer lugar la capsulas que serán utilizadas durante el ensayo, calculando por último el porcentaje de humedad que tiene cada carbón empleando la ecuación 3 a continuación.

$$\%Humedad = \frac{Perdida\ de\ peso}{Peso\ de\ la\ muestra} \times 100\% \quad (3)$$

Figura 9.

Determinación de Humedad CA



Nota. Protocolo de la determinación de humedad en carbón activado siguiendo norma NTC 4467.

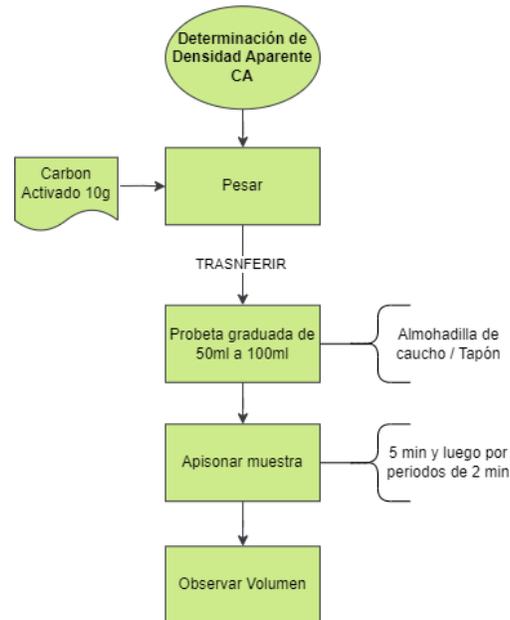
2.2.3 Determinación de la Densidad Aparente

La densidad aparente de un carbón activado es el peso es g/cm^3 del carbón activado en el aire. Para la determinación de la densidad aparente del carbón activado se hará según la figura 10 estipulado por la norma NTC 4467 [33], calculando la densidad aparente en gramos por centímetro cubico (g/cm^3) en base seca como se puede visualizar en la ecuación 4.

$$\text{Densidad aparente} = \frac{(\text{peso de la muestra en g}) \times (100 - \% \text{Humedad})}{\text{volumen de la muestra en g/cm}^3 \times 100} \quad (4)$$

Figura 10.

Determinación de Densidad Aparente CA



Nota. Protocolo de la determinación densidad aparente en CA según norma NTC 4467

2.2.4 Determinación de Ceniza

Para la determinación de ceniza del carbón activado se utilizará la figura 11 realizada mediante la NTC 4467 [33], una mufla marca Terrogeno y la ecuación 5 para la determinación del porcentaje de ceniza que presenta el carbón activado.

$$Ac = \frac{F - G}{B - G} \times 100 \quad (5)$$

En donde

Ac: Cantidad de ceniza expresada en porcentaje.

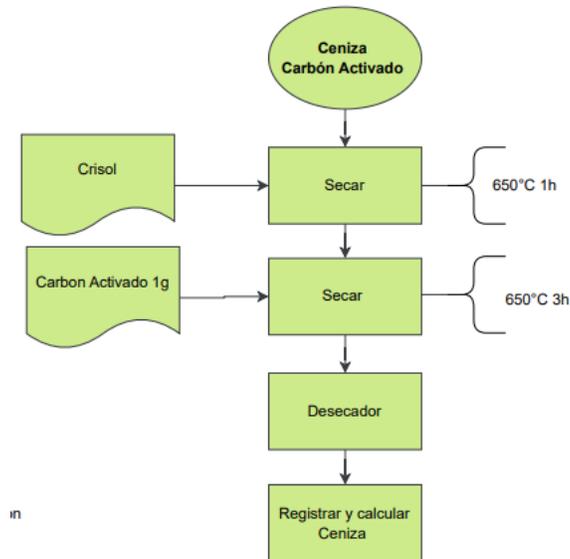
G: Masa de crisol, en g.

B: Masa del crisol con la muestra seca en g.

F: Masa del crisol con la ceniza, en g.

Figura 11.

Determinación de ceniza CA



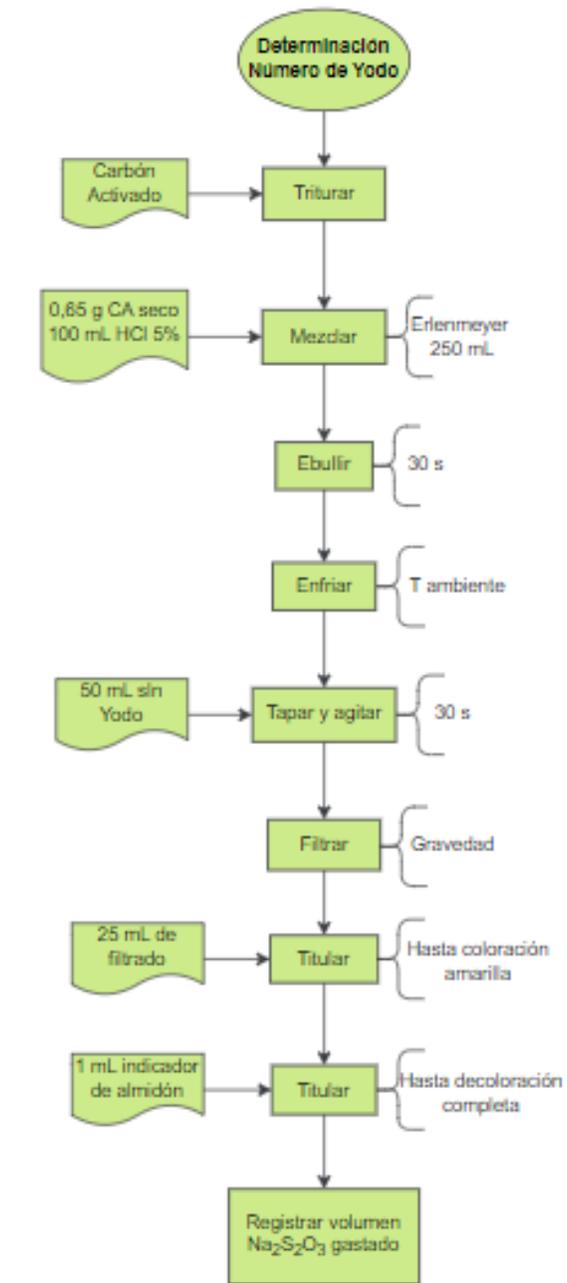
Nota. Protocolo de la determinación ceniza aparente en CA según norma NTC 4467

2.2.5 Determinación del Número de Yodo

Este procedimiento se elaboró siguiendo la figura 10 estipulado en la NTC 4467 [33] para su desarrollo, elaborando varias soluciones para la solución de este procedimiento e identificar las condiciones y calidad que presenta el carbón activado elaborado.

Figura 12.

Determinación número de Yodo



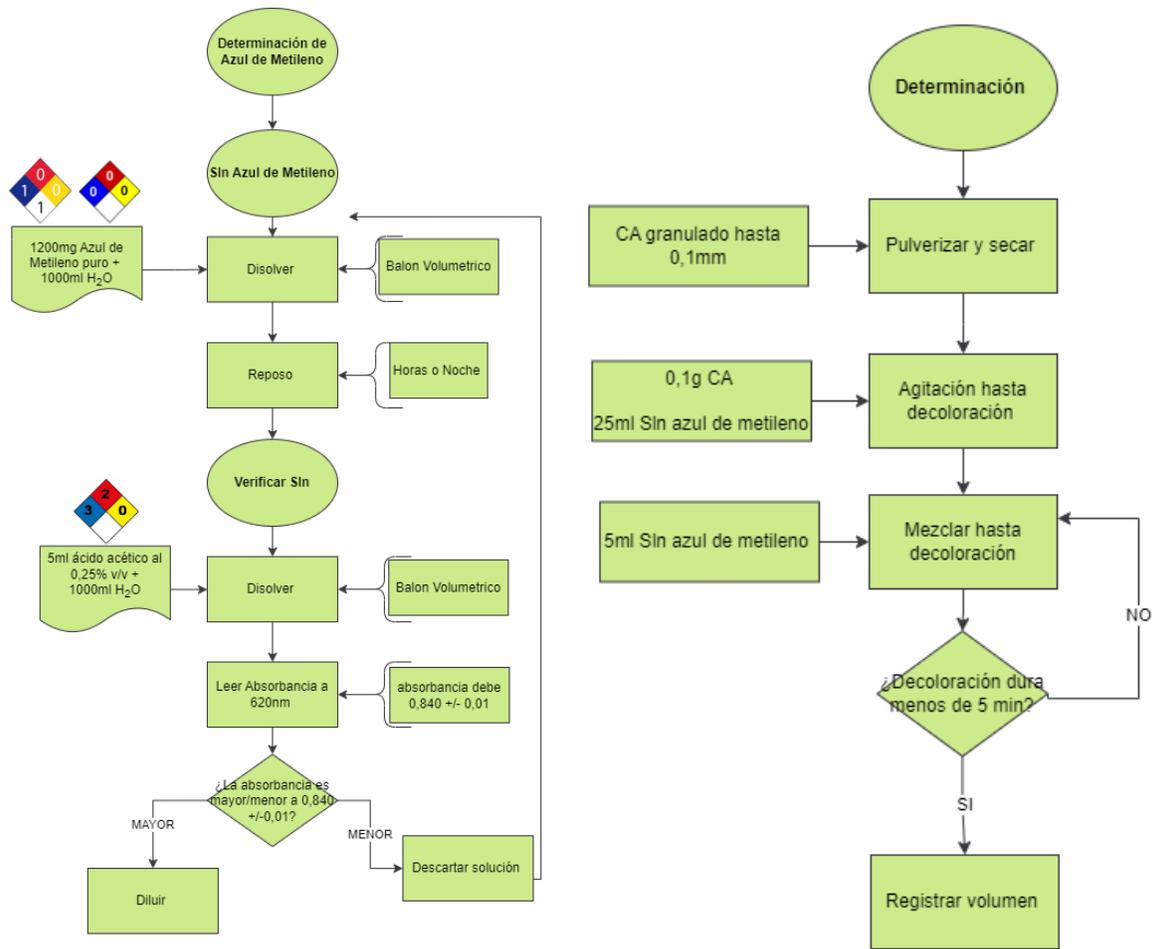
Nota. Protocolo de la determinación número de Yodos en CA según norma NTC 4467

2.2.6 Determinación de Azul de Metileno

Para esta determinación se utilizó NTC 4467 [33] realizando en la figura 13 para la realización, utilizando equipos como espectrofotómetro marca Genesis 3.0 carbón activado comercial marca Merk y un Shaker marca Tecnal de 12 espacios, balanza analítica.

Figura 13.

Determinación de azul de metileno



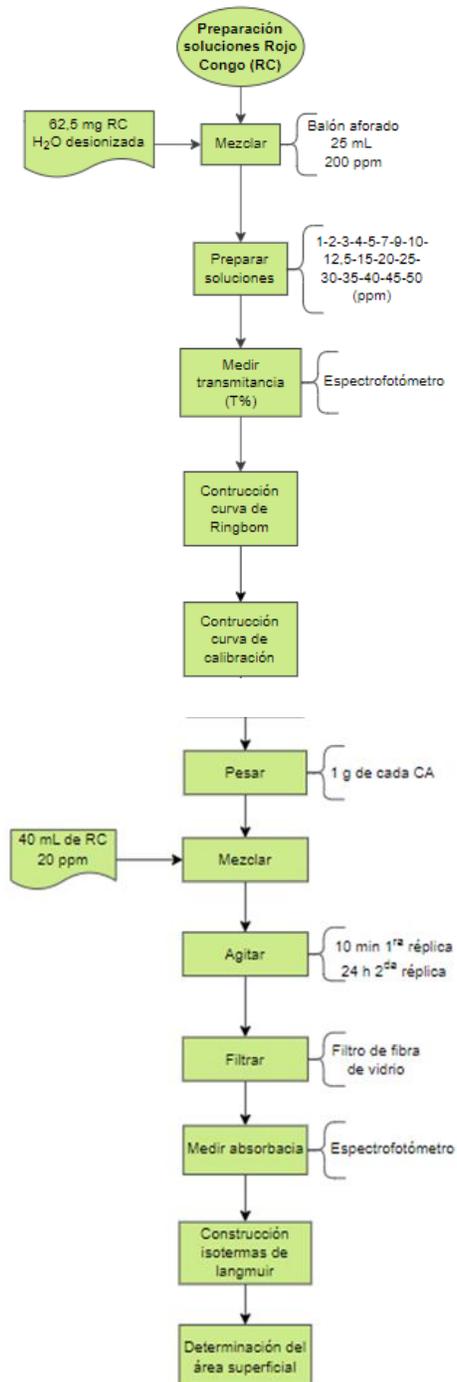
Nota. Protocolo de la determinación de azul de metileno en CA según norma NTC 4467

2.3 Evaluación de la remoción

Se hace uso del colorante ROJO CONGO (RC) para la elaboración del agua sintética como se puede visualizar en la figura 14, utilizando materiales como balanza analítica, espectrofotómetro marca Genesis 3.0, un Shaker marca Tecnal de 12 espacios.

Figura 14.

Preparación de soluciones RC



Nota. Protocolo para la preparación de la curva de Rojo Congo

3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Caracterización de materia prima

3.1.1 Determinación de pH

Según los estudios bibliográficos evidenciados en la tabla 1, la pulpa de café debe tener un pH dentro de un rango de 3 a 5,36, sin embargo, la materia prima utilizada para el estudio está por fuera de los rangos como se puede observar en la tabla 4, tomando en cuenta los diferentes molinos empleados para este estudio.

Tabla 4

pH de borra de café

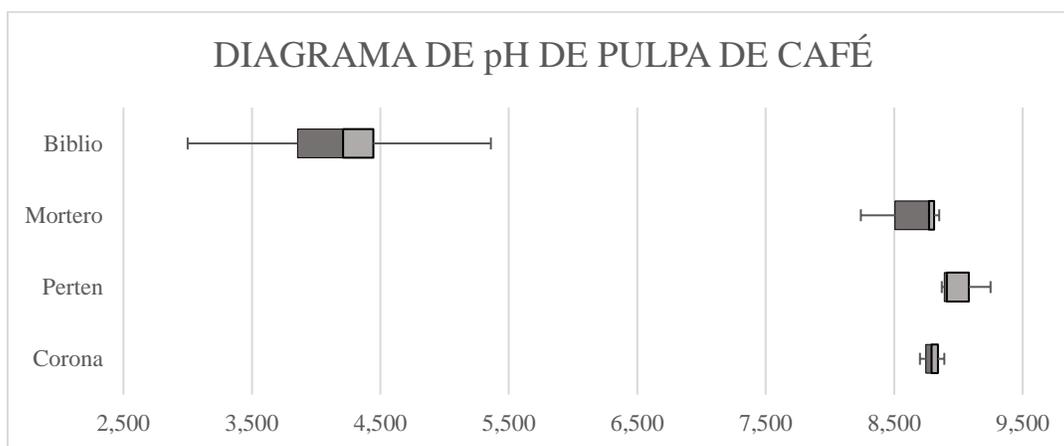
pH			
Tipo de Molino	Corona	Perten	Mortero
Muestra			
1	8,70	8,87	8,24
2	8,79	9,25	8,85
3	8,89	8,91	8,77

Nota. Resultado de pH con diferentes molinos

Según la figura 15, se encuentra que los valores de las medianas para todos los ensayos son diferentes; de igual forma, aunque no se encuentra mucha variabilidad en los pH de los diferentes tipos de molinos, a comparación con el estudio bibliográfico hay una distancia significativa entre los rangos estudiados. Esta variación de datos para los ensayos elaborados en el análisis del pH de pulpa de café pudo ser consecuencia de los fertilizantes utilizados en la zona, produciendo cambios en algunas propiedades físicas y químicas [34], también por la alta concentración de calcio, que es el nutriente de carácter básico más abundante en las plantas después del potasio, o una posible fermentación metanogénica, un tipo de descomposición anaeróbica de la materia orgánica donde el pH puede llegar hasta valores de 10 [35], lo cual podría afectar seriamente la calidad del producto.

Figura 15.

Diagrama caja y bigotes para pH de Mp



Nota. Diagrama caja y bigotes para representar los resultados de pH de la materia prima.

3.1.2 Determinación de Humedad

La determinación de agua en un material o sustancia es considerada como el contenido de humedad, su análisis es de suma importancia para evaluar la calidad del material, ya que influye en la capacidad de procesamiento, al período de conservación, a la usabilidad y a la calidad del producto [36]. Durante la ejecución del diseño metodológico, se acondicionaron en primer lugar las cápsulas sometiéndolas a una temperatura de 103°C por periodos de 1 hora hasta obtener un peso constante, donde al paso de 5 ensayos las cápsulas ya se encuentran en condiciones adecuadas para la realización de la práctica, seleccionando una parte o porción representativa de lo que se desea investigar pesando aproximadamente 5g de muestra en cada cápsula acondicionada. Los ejemplares destinados al desarrollo de este análisis se someten a periodos de calentamiento en horno a 103 °C, por un lapso de 1 hora, retirándose e introduciéndose al desecador para que se enfríe a temperatura ambiente y monitorear su peso, esto con el fin de llegar a un peso constante, que tiene lugar a la 7^{ma} hora, proporcionando los datos utilizados para calcular el porcentaje de humedad reemplazando los valores obtenidos en la ecuación 1, reflejando los resultados de humedad en la tabla 5, y así mismo, realizando un diagrama de caja y bigotes, para describir los valores que toma una variable determinada y evidenciar su distribución de forma visual como se muestra en la gráfica 2, tomando los datos de humedad obtenidos en la evaluación de la materia prima con respecto a la humedad obtenida en los diferentes estudios revelados en la fuente bibliográfica encontrados en la tabla 1.

Tabla 5*Determinación de humedad de la pulpa de café*

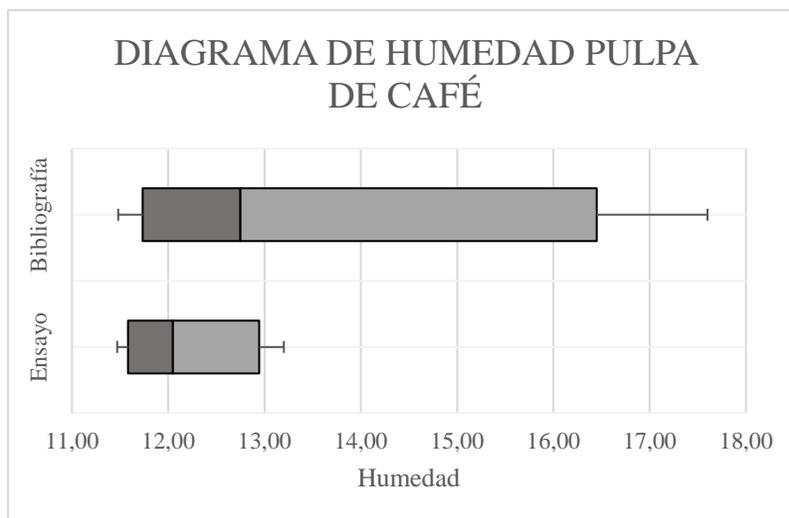
# Ensayos	humedad
	(%)
1	11,8696
2	12,1813
3	11,9145
4	13,2009
Promedio	12,2916
D. Estándar	0,6216
CV	0,0506

Nota. Humedad obtenida de la materia prima

Según la figura 16, se reporta que las medianas son similares para ambos estudios, sin embargo, se denota una mayor dispersión en los datos bibliográficos que en el ensayo estudiado. Así mismo, se comprende que para ambos casos la parte derecha de la caja es mayor que de la izquierda, lo que quiere decir que los valores de humedad comprendidos entre el 50% y 75% de las muestras están más dispersas que el 25% y el 50%. Por otro lado, es posible observar que, para ambos casos, el bigote de la derecha es más largo que el de la izquierda, comprendiendo que, el 25% de los valores bajos de humedad obtenidos están más concentrados que el 25% de los valores altos. Estas variaciones en los datos de humedad en los protocolos bibliográficos de la pulpa de café, pueden verse afectados por el proceso de separación utilizado para el estudio, puesto que la temperatura del secador u horno, la humedad del ambiente y el tiempo de secado, afectan el contenido de agua [37]. Por ende, la menor variación de los resultados en el contenido de agua presente en el ensayo de laboratorio verificando que el promedio de porcentaje de humedad está dentro de los rangos reportado en la literatura estudiada en la tabla 1, demostrando que la humedad se retiró debidamente de la MP facilitando su disposición.

Figura 16.

Diagrama caja y bigotes para la humedad de la MP



Nota. Diagrama caja y bigotes para representar los resultados de humedad de la materia prima

3.1.3 Determinación de Ceniza

El contenido de cenizas en la biomasa es un término analítico equivalente al residuo inorgánico que queda después de calcinar la materia orgánica [38], acondicionando en primer lugar 3 crisoles a una temperatura 575 °C hasta llegar a peso constante, luego de tener los crisoles acondicionados se procedió a evaluar la materia prima introduciendo 1g de la pulpa de café en cada crisol y colocando el recipiente y el contenido en la mufla graduándola a una temperatura de 575 °C durante 3 horas hasta llegar a un peso constante, haciendo uso de la ecuación 2 para el cálculo del porcentaje de ceniza obtenida en los ensayos realizados.

En el transcurso de esta determinación, se realizó un primer ensayo, obteniendo un promedio del porcentaje de cenizas de 11,75%, lo cual representa un resultado bastante elevado, por lo que se optó por hacer una prueba de contenido de carbonatos adicionando unas gotas de ácido clorhídrico (HCL) en la materia prima calcinada, observando la presencia de carbonatos ya que las cenizas al estar en contacto con HCl presentan efervescencia; de esta manera, se elaboró una segunda prueba con 8 crisoles, por un tiempo de calcinación de 4 horas, obteniendo un valor promedio de 12,68% y una tercera prueba por un tiempo de calcinación de 7 horas con un resultado de 11,05%, comprendiendo la aún existencia de carbonatos en la determinación de la ceniza en estos últimos dos ensayos, lo que podría confirmar una de las posibles razones del pH básico en la pulpa de café.

Por tanto, se realizó nuevamente el procedimiento con el fin de que las cenizas estén dentro del rango establecido en bibliografía, esta vez durante un tiempo de calcinación de 20 horas encontrando los resultados de esta última prueba en la tabla 6.

Tabla 6

Determinación de cenizas en la MP

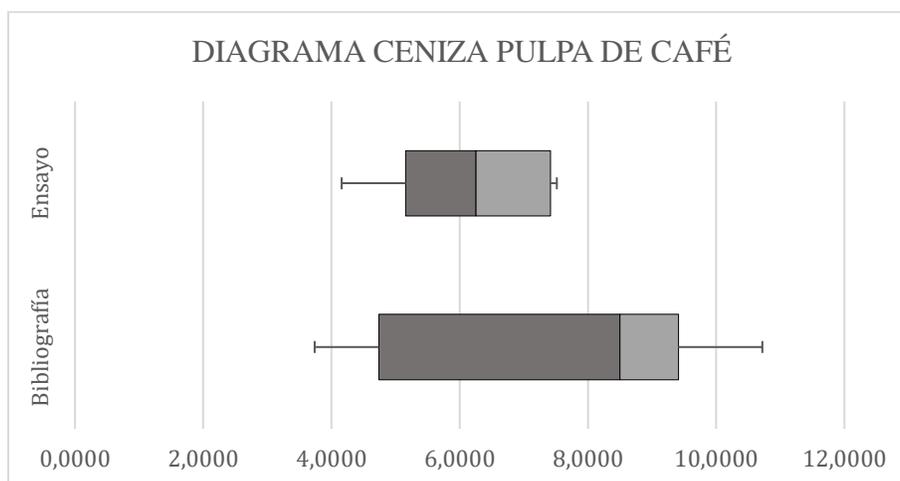
# Ensayo	%ceniza
	% masa
1	7,1232
2	7,5145
3	5,0838
4	5,3825
Promedio	6,2760
D. Estándar	1,2209
CV	0,1945

Nota. Resultados en la determinación de cenizas de la materia prima

Según los resultados obtenidos en la determinación de cenizas, visualizados en la figura 17, se detecta una similitud en el valor de las medianas, verificando que el contenido de cenizas de la MP estudiada se encuentra dentro de los rangos encontrados en bibliografía. De igual forma, se refleja que la parte izquierda de la caja de los protocolos bibliográficos es mayor que la de la derecha; lo que quiere decir que los valores de contenido de ceniza comprendidos entre el 25% y el 50% de los estudios están más dispersos que entre el 50% y el 75%, de igual forma, se puede evidenciar que el bigote de la derecha es más corto que el de la izquierda, demostrando que el 25% de los valores altos de cenizas hallados están más concentrados que el 25% de los valores bajos; estas variaciones en los datos de cenizas establecidos en protocolos bibliográficos de la pulpa de café, pueden verse afectados por el proceso de calcinación utilizado para el estudio, puesto que la temperatura de la mufla y el pretratamiento, pueden alterar notoriamente los resultados. Para las cifras halladas durante la determinación de cenizas de MP se puede observar que la parte izquierda de la caja es del mismo tamaño del de la derecha, es decir, que los valores de cenizas comprendidos entre el 25% y el 50% de las muestras tienen la misma dispersión que entre el 50% y el 75%, sin embargo, El bigote de la derecha es más corto que el de la izquierda, comprendiendo que el 25% de los valores altos de cenizas obtenidos están más concentrados que el 25% de los valores bajos.

Figura 17.

Diagrama caja y bigotes para cenizas de la MP



Nota. Diagrama caja y bigotes para representar los resultados de Ceniza de la materia prima

Por otro lado, al culminar con el procedimiento de determinación de cenizas, se percibió una tonalidad verde en las cenizas de la MP, lo que pudo ser causado por un metal empleado dentro de la agricultura, siendo este el cobre, ya que, este compuesto además de ser un aliado para el desarrollo de la planta actúa como fungicida y bactericida, ya que presenta acción protectora, que actúa sobre 6 diferentes estructuras y/o procesos de la célula del hongo [39]. Lo cual para su confirmación se elaboró un análisis químico cualitativo de cationes del grupo II siguiendo los procedimientos de las guías de química inorgánica de la Universidad de América [40] para encontrar la presencia de cobre en las cenizas de la MP, encontrando que no hay presencia de cobre en las cenizas ya que no se formó precipitado color rojo como se puede visualizar en la figura 18 a continuación.

Figura 18.

Análisis químico cualitativo de cobre



Nota. Evidencia fotográfica del ensayo de ausencia/presencia de cobre en las cenizas.

3.1.4 Determinación de Granulometría

Los estudios granulométricos de la pulpa de café son de gran importancia para sus diversas operaciones unitarias de transporte, manejo, y almacenamiento; especialmente para aquellas actividades que estén relacionadas con el manejo y análisis de sus compuestos bioactivos en el laboratorio a causa de sus propiedades de cohesión, segregación y extracción [41]. Para el desarrollo de este análisis, se seca en primer lugar toda la materia prima como se muestra en la ilustración 2, por un periodo de 7 horas observado en la determinación de humedad, así mismo, ejecutando el método de cuarteo, es decir, tomando una muestra representativa de la MP moliendo aproximadamente 100 g de muestra encontrado en las instalaciones de la Universidad de América, vaciando la muestra en la parte superior del tamiz, desde aquel con mayor tamaño de rendija, agitándose por 5 minutos y haciendo el ensayo por duplicado. En la tabla 7, se pueden visualizar los resultados de los pesos obtenidos para cada una de las mallas, haciendo el análisis de las dos replicas realizadas y calculando el porcentaje retenido.

Tabla 7*Retención granulométrica*

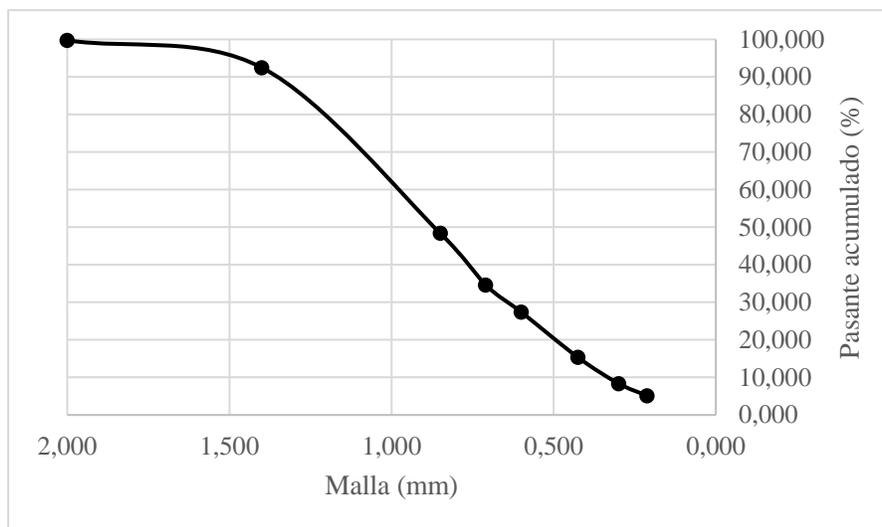
Diámetro	Masa 1 Retenida	Masa 2 Retenida	Retenido	Retenido acumulado
Dp (mm)	(g)	(g)	%	%
2,000	0,280	0,300	0,279	0,279
1,400	7,270	8,000	7,249	7,528
0,850	44,200	44,000	44,072	51,600
0,710	13,800	13,700	13,760	65,360
0,600	7,270	7,210	7,249	72,609
0,425	12,090	12,010	12,055	84,664
0,300	6,970	6,810	6,950	91,614
0,212	3,260	4,000	3,251	94,865
Fondo	5,150	3,960	5,135	100,000
Masa Total	100,290	99,990	100,000	

Nota. Retención granulométrica presentada en la materia prima

Según la tabla anterior, se puede observar que la malla con mayor porcentaje de retención fue aquella con diámetro de 0,850 mm con un valor de 44,072%, seguido de la malla con diámetro de 0,710 mm que tuvo una puntuación de 13,750%, y por último la malla de diámetro 7,270 mm y 0,600 mm teniendo un porcentaje de retención más o menos de 7%. Concluyendo de esta manera que la mayoría de retenidos de pulpa de café presentan un tamaño granulométrico de entre 0.1 a 1,4 mm. Así mismo, para analizar esta distribución de partícula de forma visual se elaboró la figura 19, para el análisis de granulométrico que presenta la materia prima, observando que la pulpa de café posee características de partículas gruesa ya más del 50% queda retenido antes del tamiz 200 es decir de 0,2 mm de apertura.

Figura 19.

Porcentaje retenido en función de diámetro de partícula



Nota. Diagrama de porcentaje retenido en función de diámetros de partícula resultados obtenido de la granulometría.

3.2 Caracterización de carbón activado

3.2.1 Elaboración del carbón activado

El carbón activado es aquel material que está elaborado con materia carbonizada de origen vegetal o mineral. Su denominación “activado” se debe a que la materia carbonizada presenta un elevado y variado grado de porosidad que abarca una considerable superficie interna y un cierto contenido de grupos químicos superficiales contribuyendo a la capacidad para adsorber ciertas sustancias [42], por lo tanto, para la elaboración del carbón activado, se tomó en primer lugar la materia prima (MP) seca y triturada, carbonizándola a una temperatura de 500°C por un tiempo de 40 min en mufla, luego equilibrándola térmicamente y pulverizándola en mortero como se muestra en la ilustración 5. Ejecutando el diseño factorial pesando 25g de carbón, adicionándole 150mL de ácido fosfórico (H_3PO_4) para su activación química al 20% y al 40% que según Girgis en su artículo era conveniente utilizar estas concentraciones [43], debido a que a mayor concentración más residuos de fósforo en el sólido [44], tomando tiempos de impregnación de 16, 20 y 24 horas, en constante agitación.

Por consiguiente, se procede a realizar lavados, con el fin de que el carbón se encuentre dentro de un rango de pH de 6,5 a 7,5; los carbones previamente neutralizados deben ser sometidos a un

tratamiento térmico de 110 °C, durante aproximadamente 16 horas o noche para así remover toda la humedad presente. Por último, con ayuda de un mortero, las muestras de CA se pulverizan para ser almacenadas en bolsas herméticas, para su evaluación fisicoquímica como lo son análisis de pH, humedad, ceniza, densidad aparente, determinación del número de yodo y finalmente el índice de azul de metileno.

3.2.2 *Determinación del pH del carbón activado*

La capacidad de adsorción del carbón activado no sólo depende de la porosidad o del área superficial, también dependen de los grupos químicos presentes en la superficie, debido a que la presencia de heteroátomos en las capas de carbono, puede llegar coexistir grupos superficiales de carácter ácido y básico, que afectan el carácter hidrófobo del CA[45]. Por lo tanto, para tener un pH adecuado del CA elaborado con anterioridad se utiliza una técnica basada en la medida de la diferencia de potencial originada por la disolución en agua destilada de sustancias presentes en el carbón activado que permite conocer el pH de cualquier CA.

Tabla 8

Determinación de pH CA

	H ₃ PO ₄ % (v/v)	t (h)	pH
1	20%	16	6,59
2	20%	16	6,23
3	20%	20	6,15
4	20%	20	6,48
5	20%	24	6,50
6	20%	24	6,84
7	40%	16	6,24
8	40%	16	6,91
9	40%	20	6,66
10	40%	20	6,84
11	40%	24	6,16
12	40%	24	6,79

Nota. Determinación de pH de cada carbón activado elaborado

Según los resultados obtenidos en la tabla 8, se puede observar que el carbón se encuentra completamente neutro, ya que este debe estar dentro de un rango de pH de 6,5 a 7,5, con el fin de

que el microporo del carbón no quede tapado con ácidos o bases que puedan afectar la adsorción en el momento de su evaluación.

3.2.3 *Determinación de Humedad de CA*

En el carbón activado, los contenidos de humedad se deben principalmente a las condiciones ambientales y de almacenamiento, pues al ser un sólido poroso adsorbente retiene la humedad del aire en su superficie [46]. Pesando aproximadamente 2 g de la muestra con precisión, secándola en horno a una temperatura de 110 °C por un tiempo de 2 h, terminado este tiempo el carbón activado seco se deja enfriar en desecador, esperando a que llegue a temperatura ambiente y posteriormente registrando su peso rápidamente, reemplazando los resultados en la ecuación (3) para conocer el porcentaje de humedad que tienen los carbones elaborados

Tabla 9

Determinación del porcentaje de humedad del CA

# Ensayo	%humedad
	%masa
1	6,7779
2	6,4257
3	5,7081
4	5,9184
5	6,0746
6	5,6023
7	4,9515
8	6,4122
9	6,7218
10	5,7720
11	6,0248
12	5,4107
Promedio	5,9833
D. Estándar	0,5418
CV	0,0905

Nota. Determinación de humedad presente en el carbón activado elaborado

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, el contenido de humedad del carbón activado puede llegar a tener un porcentaje de 5% al 10% [47], denotando que los resultados obtenidos en porcentaje de humedad en la tabla 10, presentan un promedio de

6%, lo cual cumplen con el rango estipulado en la bibliografía. De igual forma se observa que el coeficiente de variación tiene un valor del 9% lo que indica que el promedio es representativo con respecto al conjunto de datos obtenidos.

3.2.4 Densidad aparente

La densidad aparente es la masa de carbón por unidad de volumen. A mayor densidad global, mayor capacidad para eliminar un adsorbato por unidad de volumen de adsorbente [48]. La densidad aparente de un carbón activado es el peso en g/cm³ del carbón activado en el aire, pesando 10 g de carbón en una probeta de graduada de 50 ml o 100 ml se presiona suavemente durante un tiempo de 5 minutos con una almohadilla de caucho y se registra volumen en la tabla 10 obtenida utilizando la ecuación 4 para desarrollo.

Tabla 10

Densidad aparente en el CA

#Ensayos	D.A
	g/mL
1	0,3586
2	0,3605
3	0,3368
4	0,3364
5	0,3614
6	0,3373
7	0,3656
8	0,3601
9	0,3337
10	0,3371
11	0,3615
12	0,3640
Promedio	0,3511
D. Estándar	0,0132
CV	0,0377

Nota. Determinación de la densidad aparente presente en los carbones activado elaborado experimentalmente

Según la revista en línea de Carbotecnia, indica carbón activado lignítico tiene una mayor proporción de macroporos, su densidad aparente se encuentra entre 0,35 a 0,42 [49]. Analizando el promedio de la da en los resultados expresados en la tabla 12 se pudo observar que los carbones tienen una densidad promedio de 0,3511 g/cm³, cuyo valor es clasificado con el carbón activado lignítico mencionado anteriormente, por otro lado, se puede visualizar que el coeficiente de variación 0,037% indicado que el promedio es representativo con respecto a los datos registrados durante su evaluación.

3.2.5 Determinación de Ceniza

Las cenizas contenidas en carbón activado (CA) es la suma de compuestos que no se pierden cuando el carbón es sometido a calcinación [38]. Para este análisis, se tararon en primer lugar los 12 crisoles en mufla, a una temperatura de 650°C hasta que llegue a peso constante, posteriormente se pesa aproximadamente 1 g de cada CA registrando su peso en balanza analítica, llevándola a calcinación a una temperatura de 650 °C por un tiempo de 8h. Terminado este tiempo los crisoles se llevan a desecador para que se enfríen a temperatura ambiente, registrando su peso final y así mismo calculando el porcentaje de cenizas por medio de la ecuación 5.

Tabla 11

Determinación de cenizas en el CA

#Ensayos	%ceniza
	%masa
1	2,2568
2	5,8696
3	3,0510
4	3,1726
5	2,6995
6	3,1464
7	5,9645
8	3,5966
9	3,2201
10	2,1666
11	2,7993
12	3,4756
Promedio	3,4515
D. Estándar	1,2299
CV	0,3563

Nota. Determinación de ceniza del carbón activado elaborado

Según los resultados obtenidos en la tabla 11, se pudo visualizar que el coeficiente de variación tuvo un valor igual a 1,2299% indicado que el promedio es representativo con respecto a los datos registrados durante la práctica, ya que el porcentaje de cenizas obtenido tuvo un promedio de 3,4515% un porcentaje que cumple con los rangos establecidos en el libro de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación donde estipula que el contenido de cenizas en el carbón vegetal varía desde alrededor del 0,5% a más del 5% [50].

3.2.6 Determinación del número de yodo

El número de yodo está definido como los miligramos de yodo adsorbidos por un gramo de carbón; el carbón tiene la capacidad de adsorber yodo en una solución acuosa durante un tiempo de contacto bajo condiciones específicas [51]. Sin embargo, en la práctica de laboratorio se dispuso a no seguir con esta determinación hasta su totalidad debido a que el carbón activado elaborado no cumple con las condiciones necesarias para pasar por este procedimiento puesto que a comparación de un carbón comercial no tiene los procesos especializados para cumplir con los rangos establecidos en la norma.

3.2.7 Determinación de azul de metileno

Se puede determinar cuánta sustancia puede retener el carbón activado al adsorber el azul de metileno, siendo de suma importancia en aplicaciones donde la capacidad de adsorción es una propiedad clave, como en la purificación de agua y la adsorción de contaminantes [33]. Para este procedimiento se disolvió una cantidad equivalente a 1080 mg de azul de metileno en 1000 mL de agua desionizada en un balón volumétrico. Esta solución se diluye con 5 mL de ácido acético al 0,25% en un balón aforado de 100 mL, midiendo la absorbancia a 620 nm utilizando un espectrofotómetro, cuyo resultado debe ser igual a 0,840, valor que durante la práctica fue de 0,824 un resultado aceptable para la solución. Posteriormente a pesar de que en la norma se deben pesar 0,1g de cada carbón activado elaborado con 5 mL de azul de metileno para que la decoloración se presente, se tomó solamente un carbón activado elaborado comparándolo con el carbón comercial, notando que el carbón elaborado no tiene la capacidad de adsorber la concentración estipulada en la norma a comparación del carbón comercial que decoloró la solución totalmente, esto debido posiblemente a los procesos especializados y al tamaño de partícula. Por ende, se desarrolló la determinación con una concentración de azul de metileno igual a 6 ppm haciendo adiciones de 5 mL hasta que el carbón quede totalmente saturado registrando el volumen utilizado en la tabla 6,

donde se puede visualizar que el carbón que estuvo con una concentración de 20% v/v de H_3PO_4 y un tiempo de impregnación de 16 h, obtuvo una saturación a los 35 mL de azul de metileno, en comparación de los demás que no llegaron ni a los 30 mL, lo cual pudo ser a causa del tamaño de partícula que presentaron los carbones ya que entre menor sea el tamaño de partícula tendrá mayor área de adsorción.

Tabla 12*Resultados caracterización CA*

Pruebas	H₃PO₄ % (v/v)	t (h)	pH	Humedad (%)	Ceniza (%)	Densidad aparente (g/mL)	Azul de metileno 6ppm (mL)
1	20	16	6,59	6,7779	2,2568	0,3586	35
2	20	16	6,23	6,4257	5,8696	0,3605	29
3	20	20	6,15	5,7081	3,0510	0,3368	27
4	20	20	6,48	5,9184	3,1726	0,3364	27
5	20	24	6,50	6,0746	2,6995	0,3614	27
6	20	24	6,84	5,6023	3,1464	0,3373	27
7	40	16	6,24	4,9515	5,9645	0,3656	20
8	40	16	6,91	6,4122	3,5966	0,3601	25
9	40	20	6,66	6,7218	3,2201	0,3337	20
10	40	20	6,84	5,7720	2,1666	0,3371	22
11	40	24	6,16	6,0248	2,7993	0,3615	25
12	40	24	6,79	5,4107	3,4756	0,3640	25

Nota. Resultados de los análisis fisicoquímicos realizados al carbón activado elaborado

3.3 Evaluación de remoción

En la industria Textil, cada año se producen aproximadamente 70.000.000 de toneladas de diversos tintes textiles y alrededor del 10% de esta cantidad se introduce en las masas de agua como efluentes, produciendo el 20% de la contaminación al medio acuático, siendo los tintes azoicos uno de los más significativos que se obtienen durante la producción [52], así mismo, encontrando una concentración de hasta 200 ppm (mg L^{-1}) en dichos efluentes [53]. Por lo tanto, para evaluar el rendimiento de remoción de los carbones activados elaborados anteriormente se hace uso del colorante ROJO CONGO (RC) un tinte diazo, reconocido como cancerígeno pues en su estructura contiene una amina aromática haciéndolo resistente a la degradación natural [54]. Preparando 250 mL de agua industrial sintética a una concentración de 200 ppm de colorante RC y a partir de esta disolución principal se preparan varias disoluciones con concentraciones de 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 10, 12,5, 15, 20, 25 ppm así sucesivamente hasta 50 ppm empleando agua desionizada para aforar las diluciones en balones aforados de 50 mL, como se puede visualizar en la figura 20 encontrada en los anexos, realizando a continuación un barrido espectral en un rango de 315 nm a 1100 nm con la dilución de 10 ppm en un espectrofotómetro con el fin de hallar la longitud de onda máxima (λ_{max}) a la cual se logra mayor absorbancia repitiendo el procedimiento tres veces el mismo día, el cual tuvo un valor de 498 nm, cifra que cumple con la longitud de onda hallada por G. Vijayaraghavan y S. Shanthakumar en su artículo de eliminación del tinte rojo Congo mediante un coagulante biopolimérico natural [55].

Figura 20.

Curva de colorante Rojo Congo

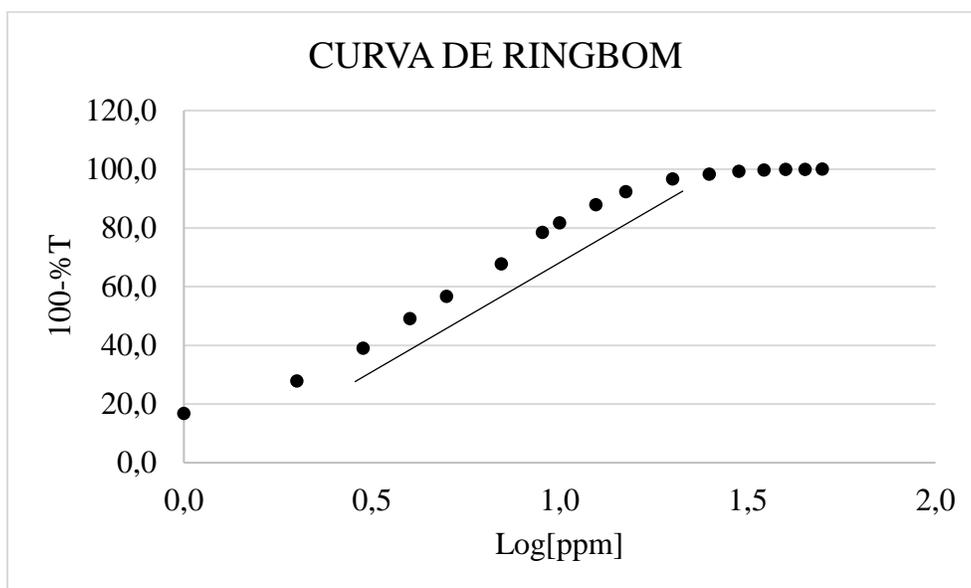


Nota. Diluciones a diferentes concentraciones en ppm de colorante RC.

Teniendo λ_{\max} de 498 nm, se determina el intervalo óptimo de concentraciones en el que el sistema cumple la ley de Beer que está relacionada con el efecto de la concentración de la muestra sobre la absorción, construyendo en primer lugar la curva de Ringbom, midiendo el porcentaje de transmitancia (%T) y tomando la λ_{\max} definida, obteniendo la figura 21, con las 17 disoluciones de concentraciones conocidas preparadas con anterioridad, empleando como blanco agua desionizada pues fue utilizado como solvente al preparar las dichas disoluciones.

Figura 21.

Curva de Ringbom

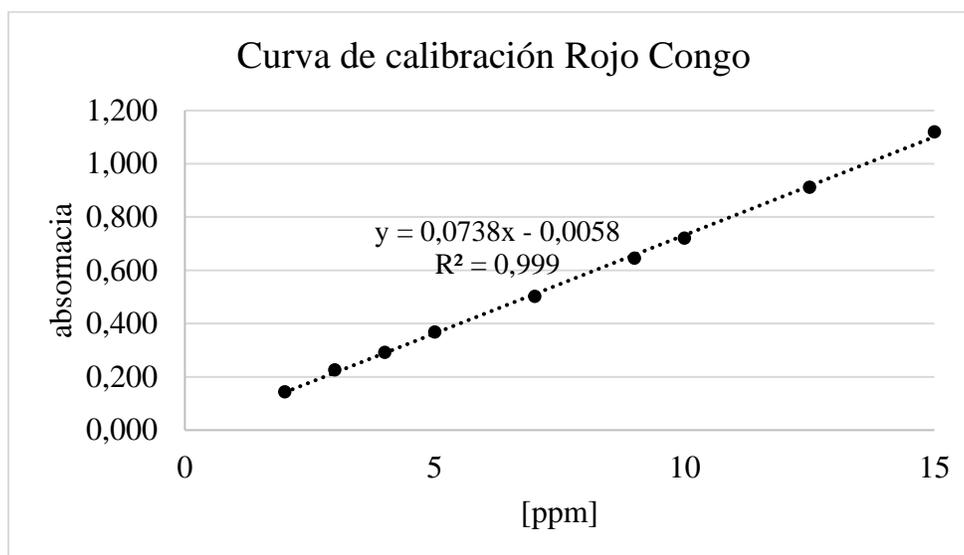


Nota. Representación gráfica de los resultados de la curva de Ringmon.

Según la figura 21, se puede visualizar una linealidad entre el eje 100-% T en función del log [ppm], que demuestra la capacidad del procedimiento analítico para producir resultados de ensayo proporcionales a la concentración [56], observando que el intervalo óptimo de concentraciones durante el comportamiento lineal se encuentra desde 2 ppm hasta una concentración de aproximadamente 15 ppm. Permitiendo la construcción de la curva de calibración midiendo las absorbancias de las disoluciones patrón encontradas en el intervalo óptimo con la λ_{max} definida de 498 nm, para elaborar las determinaciones cuantitativas visualizadas en la gráfica 6.

Figura 22.

Curva de calibración para el colorante RC



Nota. Grafica de Curva de calibración Rojo Congo.

Cumpliendo la ley de Lambert-Beer en la figura 22, se observa que el coeficiente de correlación de las muestras estudiadas tiene un valor de $R^2 = 0,999$, lo que nos indica que la curva tiene una linealización cercana a la ideal. Mediante este análisis de regresión por el método de mínimos cuadrados y el programa de Excel se permite obtener la ecuación de la recta del tipo $y = mx + b$, ecuación 6, para determinar la cantidad de adsorción que obtuvieron los carbones al estar en contacto con el tinte.

$$y = 0,0738x - 0,0058 \quad (6)$$

Con la ecuación de la recta definida se procede a evaluar la capacidad de adsorción que tiene el carbón activado con el tinte RC de concentración de 20 ppm, para esto se pesa aproximadamente 1 g de cada uno de los carbones elaborados, y así mismo se le adicionan 40 mL de colorante RC a la concentración mencionada, estando en agitación constante, haciendo dos réplicas de este procedimiento, el primero durante un tiempo de 10 min y el otro por un periodo de 24 horas, para ayudar a la adsorción y así determinar la cantidad adsorbida. Posteriormente se toma con una jeringa un poco del fluido, eliminando las partículas de CA por medio de un filtro de fibra de vidrio para medir la absorbancia del filtrado y así verificar con la ecuación de la recta la cantidad de

colorante que adsorbió el carbón como se muestra en la tabla 13 en la primera réplica y la tabla 14 en la segunda réplica.

Tabla 13

Retención de RC periodo de 10 min

Ensayo de retención rojo Congo				
		ecuación	vol = 40 mL	0,04
ensayo	abs filtrado	ppm filtrado	ppm inicial	inicial - final
1	0,904	12,3	20	7,7
2	0,640	8,8	20	11,2
3	0,781	10,7	20	9,3
4	1,135	15,5	20	4,5
5	0,995	13,6	20	6,4
6	1,045	14,2	20	5,8
7	0,386	5,3	20	14,7
8	0,731	10,0	20	10,0
9	1,345	18,3	20	1,7
10	1,184	16,1	20	3,9
11	1,126	15,3	20	4,7
12	1,306	17,8	20	2,2

Nota. Primera réplica realizada para analizar la capacidad de adsorción que tienen los carbones realizados durante la experimentación

Tabla 14*Retención de RC periodo de 24 horas*

Ensayo de retención rojo congo				
		ecuación	vol = 40 mL	0,04
ensayo	abs filtrado	ppm filtrado	ppm inicial	inicial - final
1	1,040	14,2	20	5,8
2	0,630	8,6	20	11,4
3	0,953	13,0	20	7,0
4	1,245	16,9	20	3,1
5	1,170	15,9	20	4,1
6	1,116	15,2	20	4,8
7	0,511	7,0	20	13,0
8	0,708	9,7	20	10,3
9	1,305	17,8	20	2,2
10	1,342	18,3	20	1,7
11	1,274	17,3	20	2,7
12	1,257	17,1	20	2,9

Nota. Segunda réplica realizada para analizar la capacidad de adsorción que tienen los carbones realizados durante la experimentación

El isoterma de Langmuir se basa en la hipótesis de que los centros activos de adsorción son equivalentes y que la adsorción se restringe a una monocapa, este se puede expresar en función de la concentración del adsorbato y la cantidad de material adsorbido, aplicándose a diferentes procesos de adsorción, como la química de superficies, la tensión superficial, la catalización o la adsorción de diferentes sustancias en carbón activado [57]. A partir, de la diferencia de las concentraciones iniciales ($C_{inicial}$) y final $E_{equilibrio}$ del colorante RC en cada matraz, el volumen de disolución empleado (V_{sol}) convertido a litros (0,04 L) y la masa de carbón activado utilizada (m_c 1 g) se puede calcular N , que es el número de moles adsorbidos por gramo de adsorbente por medio de la ecuación 7 [58].

$$N = V_{sol} \cdot \frac{C_{inicial} - C_{Equilibrio}}{m_c} \quad (7)$$

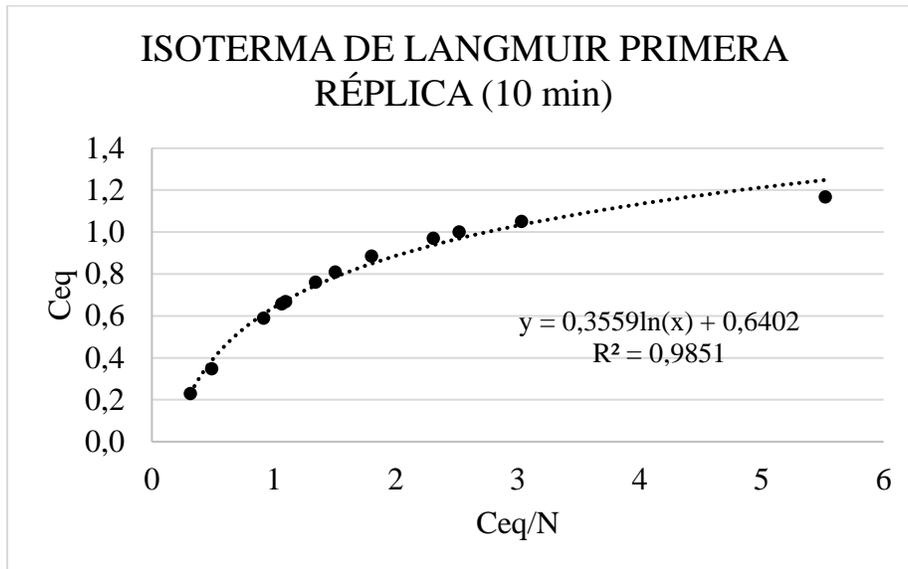
Suponiendo que N_{max} es la cantidad máxima de adsorbato que se adsorbe en un gramo de carbón activado, el grado de recubrimiento θ resulta del $\theta = N/N_{max}$, reescribiéndose en la ecuación 8, la cual corresponde a la ecuación de la recta en el Isoterma de Langmuir, donde $1/N_{max}$ es igual

a la pendiente y de igual forma, a partir de la tabla 13 se establece la figura 23 para la primera réplica con duración de 10 min y la tabla 14 para la segunda réplica que tuvo un periodo de remoción de 24 horas estableciendo así mismo la figura 24 en el Isoterma Langmuir donde se encuentra $C_{Equilibrio}/N$ en función de $C_{Equilibrio}$ de los dos intentos establecidos para la evaluación de remoción [58].

$$\frac{C}{N} = \frac{C}{N_{max}} + \frac{1}{KN_{max}} \quad (8)$$

Figura 23.

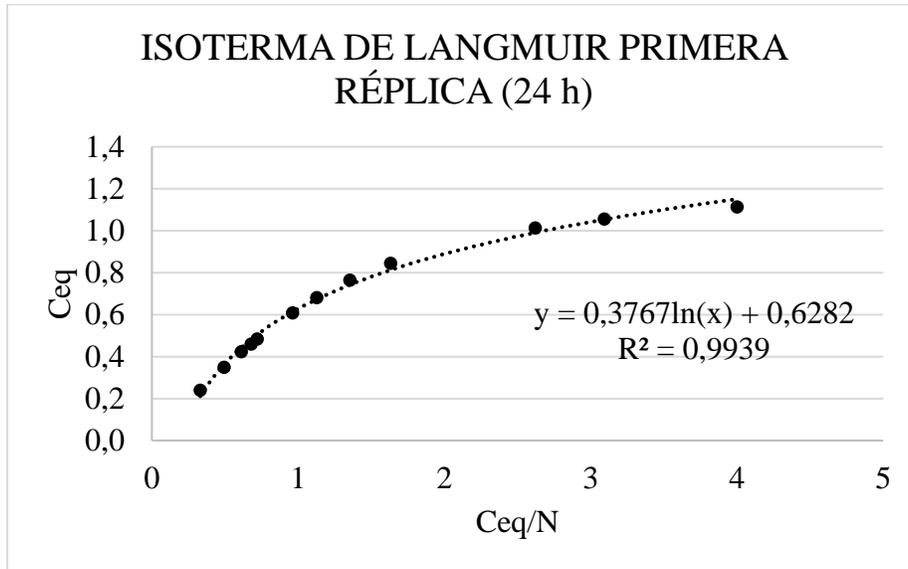
Isoterma de Langmuir $C_{Equilibrio}/N$ en función de $C_{Equilibrio}$ Primera réplica (10 min).



Nota. Grafica de la isoterma de Langmuir en función de la constante de equilibrio primera replica.

Figura 24.

Isoterma de Langmuir $C_{Equilibrio}/N$ en función de $C_{Equilibrio}$ Segunda réplica (24h).



Nota. Grafica de la isoterma de Langmuir en función de la constante de equilibrio Segunda replica.

Según los resultados obtenidos en las dos réplicas se puede entender que los carbones que estuvieron en un tiempo de remoción por un periodo 24 horas obtuvieron un coeficiente de correlación igual a $R^2 = 0,9939$ indicando que la curva tiene una linealización cercana a la ideal, en comparación con la réplica que estuvo en tiempo de remoción de 10 min que obtuvo una correlación de $R^2 = 0,9851$ reflejando que a pesar de que la linealización pudo haber estado cerca a la ideal demuestra que el tiempo de remoción no fue suficiente para la adsorción del tinte, por lo tanto, los resultados no pudieron ser los mejores.

Considerando los resultados obtenidos con anterioridad en la capacidad de remoción se observó que el carbón número 7, que estuvo a condiciones de activación de 40% de H_3PO_4 , por un tiempo de impregnación de 16 horas tuvo la mejor adsorción frente a los demás carbones evaluados teniendo una adsorción de 14,7 ppm en la primera replica y una adsorción de 13,0 ppm en la segunda replica, el cual estuvo parcialmente cercano al carbón comercial ya que este tuvo un valor de adsorción de 16,2 ppm, teniendo en cuenta que la cantidad de carbón comercial utilizado para la evaluación de remoción fue de 0,1 g. Así mismo, el carbón número 2 que estuvo en condiciones de activación de 20% de H_3PO_4 , por un tiempo de impregnación de 16 horas tuvo una adsorción

de 11,2 ppm en la primera réplica y en la segunda replica obtuvo una cifra de 11,4 ppm adsorbidos lo que representa un buen rendimiento frente a los demás ensayos

Por último, el área específica del carbón activado es el área superficial total de un gramo de adsorbente, calculándolo como se muestra en la ecuación 9, donde σ corresponde al área sugerida del poro del adsorbente por cada molécula adsorbida y asume un valor de $2,1 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ (21 \AA^2). N_0 es el número de Avogadro y N_{max} es calculada a partir de la ecuación de la recta de la isoterma de Langmuir presentada en la ecuación 8 [57].

$$A = N_{\text{max}} \cdot N_0 \cdot \sigma \quad (9)$$

Hallando el resultado de N_{max} igual a 2,81 mmol/g calculado mediante la ecuación de la pendiente en el isoterma de Langmuir y reemplazando los valores en la ecuación 9 se deduce que el área específica para los carbones activados en el desarrollo del proyecto tuvo un valor de $355 \text{ m}^2/\text{g}$, cuyo valor se encuentra dentro del intervalo usual para adsorbentes constituidos por partículas pequeñas y porosas ya que están entre 10 y $1.000 \text{ m}^2/\text{g}$ como lo expone Carl C. W. Garland, J. W. Nibler, y D. P. Shoemaker en su libro experimentación en fisicoquímica [59].

4 CONCLUSIONES

Se caracterizó la pulpa de café mediante métodos físicos y químicos, revelando un pH fuera de los rangos bibliográficos. La humedad promedio fue del 12,29%, y se realizaron ensayos para aproximar el contenido de cenizas a la literatura. Se identificó un complejo de cobre por la coloración verdosa en las cenizas. El estudio granulométrico indicó que más del 50% de las partículas son gruesas, reteniéndose antes del tamiz 200 (0,2 mm). Estos resultados ofrecen una detallada comprensión de las propiedades de la pulpa de café analizada.

Se evaluó el carbón activado tras neutralización con agua desionizada hasta alcanzar un pH de 6,5 a 7,5, mostrando una humedad promedio del 6%, cenizas promedio del 3,4515%, y una densidad promedio de 0,3511 g/cm³, en línea con los rangos literarios. Aunque no se completó la determinación del número de yodo para la capacidad de adsorción, se observó que el carbón elaborado no alcanzó la capacidad de un carbón comercial. Finalmente, mediante la prueba de azul de metileno con una concentración de 6 ppm, se identificó que el carbón activado con mejor rendimiento fue el elaborado con un 20% de H₃PO₄ durante 16 horas de activación.

Se determinó la eficiencia del carbón activado evaluándose mediante la adsorción del colorante Rojo Congo, donde se construyó una curva de Ringbom midiendo el porcentaje de transmitancia (%T) a una longitud de onda máxima de 498 nm. Así mismo, se elaboró una curva de calibración a partir de la cual se obtuvo la ecuación de la recta para calcular la cantidad de colorante que adsorbieron de los carbones permitiendo la construcción de las isothermas de Langmuir, hallando que el carbón número 7, activado al 40% de H₃PO₄ durante 16 horas, mostró la mejor adsorción, con valores de 14,7 ppm y 13,0 ppm en réplicas de 10 minutos y 24 horas, respectivamente, acercándose al carbón comercial que tuvo una adsorción de 16,2 ppm con una cantidad de 0,1 g utilizado para la evaluación, con un área superficial de 355 m²/g.

REFERENCIAS

- [1] C. Valenzuela Calahorro, “Adsorción,” *Academia de Ciencias Matemáticas, Físico-Químicas y Naturales de Granada*, 2005.
- [2] H.-Peter. Degischer and Brigitte. Kriszt, *Handbook of cellular metals : production, processing, applications*. Wiley-InterScience, 2002.
- [3] A. Da, “Adsorption from theory to practice,” 2001.
- [4] “dabrowski a. - adsorption and its applications in industry and environmental protection, vol. i (1999)(1060s)”.
- [5] Lucas Peces Coloma, “La industria textil es la segunda más contaminante después de la petrolera,” Fundación vida Sostenible.
- [6] J. S. Chang and Y. C. Lin, “Fed-batch bioreactor strategies for microbial decolorization of azo dye using a *Pseudomonas luteola* strain,” *Biotechnol Prog*, vol. 16, no. 6, pp. 979–985, 2000, doi: 10.1021/bp000116z.
- [7] J. Torres-Pérez, M. Solache-Ríos, and A. Colín-Cruz, “Sorption and desorption of dye remazol yellow onto a Mexican surfactant-modified clinoptilolite-rich tuff and a carbonaceous material from pyrolysis of sewage sludge,” *Water Air Soil Pollut*, vol. 187, no. 1–4, pp. 303–313, Jan. 2008, doi: 10.1007/s11270-007-9518-6.
- [8] D. Prahas, Y. Kartika, N. Indraswati, and S. Ismadji, “Activated carbon from jackfruit peel waste by H₃PO₄ chemical activation: Pore structure and surface chemistry characterization,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 140, no. 1–3, pp. 32–42, Jul. 2008, doi: 10.1016/j.cej.2007.08.032.
- [9] T. E. Timell, S.-V. Berlin, and H. Gmbh, “Springer Series in Wood Science.”
- [10] J. A. V. J. G. C. Q. M. Viviana Eloisa Gomez Rengif, “Lignina Como Adsorbente De Metales Pesados,” vol. 7, pp. 74–85, 2013.
- [11] A. E. Navarro, K. P. Ramos, K. Campos, and H. J. Maldonado, “Elucidacion Del Efecto Del Ph En La Adsorción De Metales Pesados Mediante Biopolímeros Naturales: Cationes Divalentes Y Superficies Activas.”

- [12] Dr. G. B.-G. Dra. M. C.-H. Dra. M. Á. M. L. Dr. I. L. R. R. A. R.-G. Dra. Inés de la C. Alomá-Vicente, “Panorama general en torno a la contaminación del agua por níquel. La biosorción como tecnología de tratamiento,” 2013.
- [13] S. Malamis and E. Katsou, “A review on zinc and nickel adsorption on natural and modified zeolite, bentonite and vermiculite: Examination of process parameters, kinetics and isotherms,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 252–253, pp. 428–461, May 05, 2013. doi: 10.1016/j.jhazmat.2013.03.024.
- [14] P. Esquivel and V. M. Jiménez, “Functional properties of coffee and coffee by-products,” *Food Research International*, vol. 46, no. 2, pp. 488–495, May 2012, doi: 10.1016/j.foodres.2011.05.028.
- [15] A. Productividad and Agroproductividad, “Caracterización Química Y Nutricional De La Pulpa De Café (Coffea Arabica L.) Chemical And Nutritional Characterization Of Coffee Pulp (Coffea arabica L.),” 2018.
- [16] S. Rohaya, S. H. Anwar, A. B. Amhar, A. Sutriana, and M. Muzaiifa, “Antioxidant activity and physicochemical composition of coffee pulp obtained from three coffee varieties in Aceh, Indonesia,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics, 2023. doi: 10.1088/1755-1315/1182/1/012063.
- [17] C. Colodel, L. H. Reichembach, and C. L. O. Petkowicz, “Value-Added Products from Agricultural Wastes: Pectins from Cocoa Husk, Coffee Pulp, Soybean Hulls and Grape Pomace,” 2023, pp. 43–86. doi: 10.1007/978-981-19-8774-8_3.
- [18] J. C. J. Z. Hosam Elhalis, “Artículo 4. Coffee fermentation_ Expedition from traditional to controlled process and perspectives for industrializationpdf,” 2023.
- [19] E. M. Peña-Lucio, L. Londoño-Hernández, J. A. Ascacio-Valdes, M. L. Chavéz-González, O. E. Bankole, and C. N. Aguilar, “Use of coffee pulp and sorghum mixtures in the production of n-demethylases by solid-state fermentation,” *Bioresour Technol*, vol. 305, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.biortech.2020.123112.

- [20] R. C. Campos, V. R. A. Pinto, L. F. Melo, S. J. S. S. da Rocha, and J. S. Coimbra, “New sustainable perspectives for ‘Coffee Wastewater’ and other by-products: A critical review,” *Future Foods*, vol. 4. Elsevier B.V., Dec. 01, 2021. doi: 10.1016/j.fufo.2021.100058.
- [21] B. Janissen and T. Huynh, “Chemical composition and value-adding applications of coffee industry by-products: A review,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 128. Elsevier B.V., pp. 110–117, 2018. doi: 10.1016/j.resconrec.2017.10.001.
- [22] L. H. Reichembach and C. L. de Oliveira Petkowicz, “Extraction and characterization of a pectin from coffee (*Coffea arabica* L.) pulp with gelling properties,” *Carbohydr Polym*, vol. 245, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.carbpol.2020.116473.
- [23] M. Machado *et al.*, “Bioactive Potential and Chemical Composition of Coffee By-Products: From Pulp to Silverskin,” *Foods*, vol. 12, no. 12, Jun. 2023, doi: 10.3390/foods12122354.
- [24] P. S. Murthy and M. Madhava Naidu, “Sustainable management of coffee industry by-products and value addition - A review,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 66. pp. 45–58, Sep. 2012. doi: 10.1016/j.resconrec.2012.06.005.
- [25] “El cafeto: partes y características de la planta de café | Mundo Cafeto.” Accessed: Aug. 29, 2023. [Online]. Available: <https://mundocafeto.com/planta/el-cafeto/>
- [26] “Cafeto, fruto y grano - AECafé.” Accessed: Aug. 29, 2023. [Online]. Available: <https://www.asociacioncafe.com/cafeto-fruto-y-grano/>
- [27] S. A. B. de C. V. Grupo Pochteca, “Colorantes: ¿Qué son? Tipos y usos,” Grupo Pochteca.
- [28] Instituto colombiano de Normas técnicas y certificación (ICONTEC), “NTC-440-productos-alimenticios-metodos-de-ensayo”.
- [29] Editada por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), “Café Tostado Y Molido. Determinación Del Contenido De Humedad. Método Por Determinación De La Pérdida En Masa A 103 °C (Método De Rutina).”
- [30] World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee, “Standard Test Method for Ash in Biomass 1,” *E1755*, 2020, doi: 10.1520/E1755-01R20.

- [31] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC, “Norma Técnica Ntc Colombiana 2326,” 1987.
- [32] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), “Productos Químicos Industriales. Carbón Activado. Métodos De Ensayo,” 1998.
- [33] G. Heerema, C. L. Noguera, J. Vicent, and L. Palacios, “Universidad Politécnica DE VALENCIA ‘Estudio a corto plazo de los efectos sobre el suelo del incendio forestal en el Parc Natural del Montgó de septiembre del 2014’ trabajo final de grado Autora.”
- [34] Gobierno de Chile Ministerio de energías, “Manual de biogás,” 2011.
- [35] Patrick Kaltenbach, “Determinación del contenido de humedad,” Mettler Toledo.
- [36] C. R. J. D. I. Pinzón Ruidiaz, “Diseño Conceptual De La Extracción De Celulosa Presente En La Borra De Café Por Medio De Una Digestión Kraft,” 2022.
- [37] D. Lezama, M. del Rosario, R. Hernández Teresita, R. Avelizapa Luz Irene, J. Juárez María Antonieta Rocío, and E. Ruvalcaba Vidal, “Calidad bromatológica y fisicoquímica de Moringa (*Moringa oleifera* Lam) producidas en la zona centro de Veracruz Bromatological and physicochemical quality of Moringa (*Moringa oleifera* Lam) produced in the central zone of Veracruz.”
- [38] ADAMA Perú, “El cobre como fungicida hacia el futuro | ADAMA Perú.” Accessed: Nov. 23, 2023. [Online]. Available: <https://www.adama.com/peru/es/actualidad-adama/el-cobre-como-fungicida-hacia-el-futuro>
- [39] A. A. Castillo Aguirre, “GUIAS_QUIMICA_INDUSTRIAL_INORGÁNICA_EXPERIMENTAL_FUA_2015,” pp. 14–18, 2015.
- [40] K. C. A. P. E. M. T. Laura Esther Rojas Martínez, “Visibilidad Thomson Reuters Fuente Académica de EBSCO Indice Bibliográfico Nacional - PUBLINDEX (Categoría A2) Scientific electronic library on line”.

- [41] M. M.-T. R. C. A.-T. M. del C. D.-B. Julio Alberto Solís-Fuentes, “Obtención de carbón activado a partir de residuos agroindustriales y su evaluación en la remoción de color del jugo de caña,” *iencia Ed. (IMIQ) vol. Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ) 27(1)*, pp. 36–48, 2012.
- [42] B. S. Girgis, L. B. Khalil, and T. A. M. Tawfik, “Activated Carbon from Sugar Cane Carbonization in the Presence of Inorganic Acids Bagasse,” 1994.
- [43] L. G. J. C. M. Karen J. Peña H, “PREPARATION OF ACTIVATED CARBON FROM ORANGE PEEL BY CHEMICAL ACTIVATION PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERIZATION,” *Universidad Nacional de Colombia*, Jul. 2016.
- [44] P. Rodríguez, L. Giraldo, and J. C. Moreno, “INFLUENCIA DEL pH SOBRE LA ADSORCIÓN EN CARBÓN ACTIVADO DE Cd(II) Y Ni(II) DESDE SOLUCIONES ACUOSAS INFLUENCE OF THE pH ON THE ADSORPTION IN ACTIVATED CARBON OF Cd(II) Y Ni(II) FROM AQUOEIOUS SOLUTIONS INFLUÊNCIA DO PH SOBRE A ADSORÇÃO EM CARVÃO ATIVADO DE Cd(II) E Ni(II) DESDE SOLUÇÕES ACUOSAS Fisicoquímica e Inorgánica,” 2010.
- [45] W. M. R.-G. L. C. M.-S. D. A. B.-M. L. G. J. C. M.-P. Nelson G. Rincón-Silva, “Obtención de carbones activados a partir de semillas de eucalipto, por activación química con H₃ PO₄. Caracterización y evaluación de la capacidad de absorción de fenol desde solución acuosa.,” vol. Volumen 16, No. 1, pp. 207–219, 2014, [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=291331195017>
- [46] FAO, “Recuperación de subproductos de la carbonización de latifoliadas,” *Métodos simples para fabricar carbón vegetal*, pp. 120–129, 1983, Accessed: Nov. 23, 2023. [Online]. Available: <http://www.fao.org/3/X5328s/X5328S00.htm>
- [47] Textos científicos, “EL CARBÓN ACTIVO COMO ADSORBENTE.”
- [48] P. De John, “AR-002 Diferencias entre el CA lingítico y el bituminoso,” *Carbotecnia S.A*, 2007.
- [49] FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, *Métodos simples para fabricar carbón vegetal*, M-37., vol. ISBN 92-5-301328-1. 1983.
- [50] Antonio F. Marcilla Gomis, “Carbón activado a partir de cáscara de almendra,” 1982.

- [51] S. H. Hashemi and M. Kaykhaii, “Azo dyes: Sources, occurrence, toxicity, sampling, analysis, and their removal methods,” in *Emerging Freshwater Pollutants: Analysis, Fate and Regulations*, Elsevier, 2022, pp. 267–287. doi: 10.1016/B978-0-12-822850-0.00013-2.
- [52] K. Pakshirajan, A. Sivasankar, and N. K. Sahoo, “Decolourization of synthetic wastewater containing azo dyes by immobilized *Phanerochaete chrysosporium* in a continuously operated RBC reactor,” *Appl Microbiol Biotechnol*, vol. 89, no. 4, pp. 1223–1232, Feb. 2011, doi: 10.1007/s00253-010-2906-7.
- [53] M. Harja, G. Buema, and D. Bucur, “Recent advances in removal of Congo Red dye by adsorption using an industrial waste,” *Sci Rep*, vol. 12, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1038/s41598-022-10093-3.
- [54] G. VIJAYARAGHAVAN and S. SHANTHAKUMAR, “REMOVAL OF CONGO RED DYE USING A NATURAL BIO-POLYMERIC COAGULANT,” Researchgate.
- [55] Apvma, “GUIDELINES FOR THE VALIDATION OF ANALYTICAL METHODS FOR ACTIVE CONSTITUENT, AGRICULTURAL AND VETERINARY CHEMICAL PRODUCTS,” 2004. [Online]. Available: <http://www.apvma.gov.au>
- [56] A. d. Q. F. Avanzada, “Tema 7. Superficies sólidas: adsorción y catálisis heterogénea,” Valencia, 2016.
- [57] Ginna Paola Trujillo. Julia Amanda Tovar Barrios. Melba Fanny Fernández., “FISICOQUÍMICA EXPERIMENTAL GUÍA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO FACULTAD DE CIENCIAS Y HUMANIDADES PROGRAMA: INGENIERÍA QUÍMICA DEPARTAMENTO: QUÍMICA NOMBRE ASIGNATURA: FISICOQUÍMICA EXPERIMENTAL CODIGO: 0326,” Bogotá D.C, 2020.
- [58] C. W. Garland, J. W. Nibler, and D. P. Shoemaker, *Experiments in physical chemistry*. McGraw-Hill Higher Education, 2009.

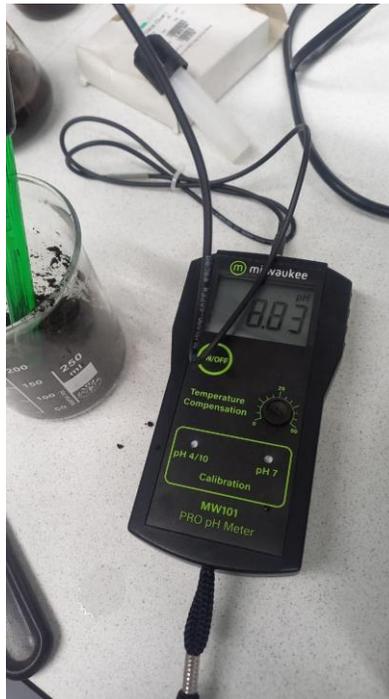
EVIDENCIA FOTOGRÁFICA

Caracterización de materia prima

- *Determinación de pH*

Figura 25.

pH básico MP



Nota. La fotografía demuestra el pH básico de la materia prima utilizando un potenciómetro para su determinación

- *Humedad*

Figura 26.

Humedad de la MP



Nota. La fotografía evidencia la humedad obtenida de la materia prima

- *Cenizas*

Figura 27.

Presencia de Carbonatos en la MP



Nota. La fotografía demuestra la presencia de carbonatos al añadirle gotas de HCl a las cenizas de la pulpa de café

Figura 28.

Ceniza de coloración verde



Nota. Cenizas de coloración verdosa lo cual puede ser debido a contenido de cobre en la pulpa de café

- **Granulometría**

Figura 29.

Tamices



Nota. Mallas utilizadas para determinar el tamaño de partícula que presenta la materia prima

Elaboración carbón activado

Figura 30.

Impregnación del carbón



Nota. La foto evidencia el momento en el que la materia prima previamente carbonizada es distribuida a los Erlenmeyer para ser activadas por medio de H_2PO_4 en constante agitación

Figura 31.

Lavados del carbón activado



Nota. Neutralización de los carbones activados con agua desionizada

- *Determinación de cenizas Carbón activado*

Figura 32.

Cenizas de Carbón activado

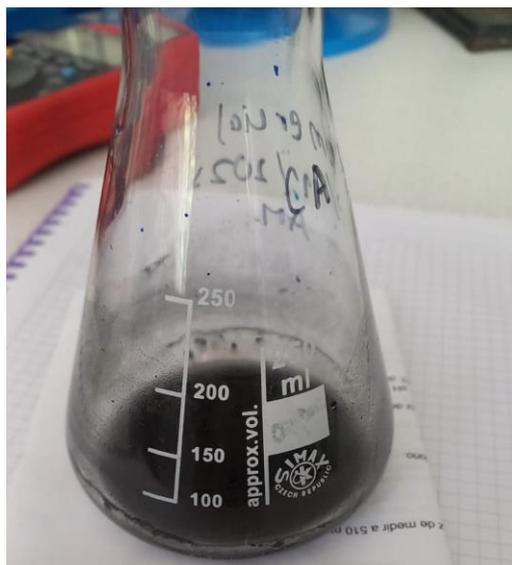


Nota. La fotografía representa las cenizas del carbón activado elaborado

- *Determinación de azul de metileno*

Figura 33.

Adsorción azul de metileno carbón comercial a una concentración de 1080 ppm



Nota. La fotografía la adsorción presentado por el carbón activado comercial al estar en contacto con azul de metileno de concentración 1080.

Figura 34.

Adsorción azul de metileno carbón elaborado a una concentración de 1080 ppm



Nota. La fotografía la adsorción presentado por el carbón activado desarrollado experimentalmente al estar en contacto con azul de metileno de concentración 1080.

Evaluación de remoción

Figura 35.

Longitud de onda máxima del colorante Rojo Congo



Nota. Longitud de onda del colorante Rojo Congo evidenciada durante su evaluación.

Figura 36.

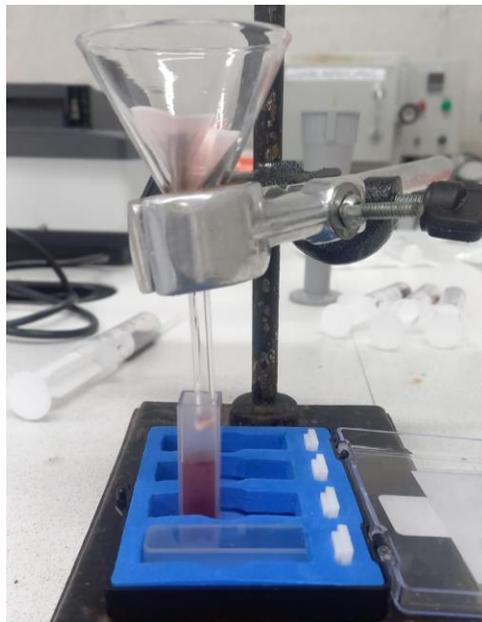
Carbón activado con 40 mL de colorante Rojo Congo a 20 ppm



Nota. La fotografía representa el momento en el que el carbón realizado es evaluado con el colorante Rojo Congo

Figura 37.

Separación de partículas de carbón mediante filtro de fibra de vidrio



Nota. La fotografía representa la separación por filtración del carbón activado con el colorante Rojo Congo para evaluar la eficiencia de adsorción