

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL



**PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE ADSORCIÓN POR CARBÓN ACTIVADO EN
LECHO FIJO EN LA DECOLORACIÓN DE AGUAS CON AZUL DE METILENO**

Tesis

Para optar el grado de:

INGENIERO AMBIENTAL

Presentado por:

JULCA SALVADOR FRANCISCO ALEJANDRO

Tingo Maria – Perú

2025



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS N° 025-2025-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 11 de febrero 2025, a horas 10: a.m. en la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

“PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE ADSORCIÓN POR CARBÓN ACTIVADO EN LECHO FIJO EN LA DECOLORACIÓN DE AGUAS CON AZUL DE METILENO ”

Presentado por el Bachiller: **JULCA SALVADOR, FRANCISCO ALEJANDRO**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“MUY BUENA”**.

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL** que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 25 de febrero de 2025


Ing. MSc. **ABBY SOLANGE DA CRUZ RODRIGUEZ**
PRESIDENTE


Ing. MSc. **SANDRA L. ZAVALA GUERRERO**
MIEMBRO


Blgo. MSc. **OSCAR A. ROSALES PACHAMANGO**
MIEMBRO




Ing. MSc. **ALBERTO FRANCO CERNA CUEVA**
ASESOR



"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 067 - 2025 - CS-RIDUNAS

El Director de la Dirección de Gestión de Investigación de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Programa de Estudio:

Ingeniería Ambiental

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de Suficiencia Profesional	
-------	---	------------------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE ADSORCIÓN POR CARBÓN ACTIVADO EN LECHO FIJO EN LA DECOLORACIÓN DE AGUAS CON AZUL DE METILENO	JULCA SALVADOR FRANCISCO ALEJANDRO	13 % Trece

Tingo María, 07 de marzo de 2025


UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE GESTIÓN DE LA INVESTIGACIÓN
Dr. Tomas Menacho Mattqui
JEFE

C.C. Archivo

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL



**PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE ADSORCIÓN POR CARBÓN ACTIVADO EN
LECHO FIJO EN LA DECOLORACIÓN DE AGUAS CON AZUL DE METILENO**

Autor	: Julca Salvador Francisco Alejandro
Asesor	: Ing. M. Sc. Cerna Cueva Alberto Franco
Área de investigación	: Ciencia y tecnologías ambientales - PIBIOT
Grupo de investigación	: Ciencia y tecnología ambiental
Línea de investigación	: Tecnologías para reducir la contaminación
Lugar de ejecución	: Laboratorio de recursos hídricos - UNAS
Duración del trabajo	: 6 meses
Financiamiento	: S/.1417.50
FEDU	: No
Propio	: Si
Otros	: No

Tingo Maria – Perú, 2025

DEDICATORIA

A Dios, quien actúa como orientador en la travesía de mi existencia, proporcionándome bendiciones y otorgándome fortaleza para perseguir mis objetivos establecidos sin caer en el error.

A mis padres, Angélica Salvador y Alejandro Julca, por ser mi principal impulsor y fuente de inspiración, dado que mediante su amor, paciencia y respaldo han facilitado la culminación exitosa de cada fase de mi existencia.

A mis hermanas Angelica Julca Salvador y Ana Julca Salvador y mi hermano Alejandro Julca Salvador por proporcionarme su respaldo incondicional, inculcándome la perseverancia y la resiliencia ante las adversidades para alcanzar todos los objetivos establecidos.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por concederme la vida, por nunca abandonarme y por ser mi guía constante, guiándome hacia la ruta correcta para lograr todos mis objetivos. La responsabilidad de cuidar de mi familia y enriquecer mi hogar con bendiciones.

Agradezco a mi alma materna, la Universidad Nacional Agraria de la Selva, por brindarme la oportunidad de desarrollarme tanto académicamente como profesionalmente, en particular a mi asesor el Ing. M.Sc. Alberto Franco Cerna Cueva, por su comprensión y respaldo durante todo el proceso de ejecución de la tesis, asimismo agradezco a todos los miembros del jurado por sus sugerencias, correcciones, tiempo y cortesía.

También quiero agradecer a mis compañeros de estudio y amigos, quienes compartieron conmigo este camino, brindándome apoyo emocional, intercambiando ideas y ayudándome a superar los retos del proceso.

INDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo general	2
1.1.2. Objetivos específicos	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Antecedentes	3
2.1.1. Internacionales	3
2.1.2. Nacionales	8
2.1.3. Locales	9
2.2. Marco Teórico.....	10
2.2.1. Carbón activado	10
2.2.2. Carbón activado granulado (CAG)	10
2.2.3. Estructura del carbón activado	10
2.2.4. Adsorción	10
2.2.5. Isotermas de adsorción	11
2.2.6. Parámetros de operación de Adsorción.....	11
2.2.7. Modelo de Thomas.....	12
2.2.8. Capacidad máxima de adsorción (Qmax)	12
2.2.9. Lecho fijo de adsorción.....	13
2.2.10. Decoloración de aguas	13
2.2.11. Azul de Metileno.....	14
2.2.12. Activación del carbón de coco	14
2.2.13. Coco (<i>Cocos nucifera</i>)	15
2.2.14. Propiedades del carbón activado de coco.....	15
2.2.15. Punto de ruptura	16
III. MATERIALES Y MÉTODOS	17
3.1. Lugar de ejecución	17
3.1.1. Ubicación política de la zona de estudio.....	17
3.1.2. Ubicación geográfica de la zona de estudio.....	17

3.1.3. Clima	17
3.2. Materiales y equipos	18
3.2.1. Materiales	18
3.2.2. Equipos.....	18
3.2.3. Insumos	18
3.2.4. Programas.....	18
3.3. Criterio y análisis del estudio.....	18
3.3.1. Nivel de investigación.....	18
3.3.2. Tipo de investigación	18
3.3.3. Método de investigación	19
3.3.4. Operacionalización de variables	19
3.3.5. Diseño de investigación	19
3.3.6. Población y muestra	20
3.3.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	20
3.3.8. Análisis de datos	21
3.4. Metodología	21
3.4.1. Diseñar el sistema de adsorción por carbón activado en lecho fijo	21
3.4.2. Determinar la capacidad máxima de adsorción del carbón activado de coco y comercial en la decoloración de aguas con azul de metileno bajo diferentes caudales mediante el método de Thomas.....	24
3.4.3. Determinar el punto de ruptura de los dos lechos de adsorción (carbón activado de coco y comercial) en la decoloración de aguas con azul de metileno bajo diferentes caudales	25
3.4.4. Evaluar la relación absorbancia-tiempo de los dos lechos de adsorción considerando el tipo de carbón activado de coco y comercial	26
3.4.5. Determinar la eficiencia de decoloración de aguas con azul de metileno por el carbón activado de coco y carbón comercial a diferentes caudales...	26
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
4.1. Diseño del sistema de adsorción por carbón activado en lecho fijo.	27
4.2. Determinación de la capacidad máxima de adsorción del carbón activado de coco y comercial en la decoloración de aguas con azul de metileno bajo diferentes caudales mediante el método de Thomas.....	29

4.3. Determinación del punto de ruptura de los dos lechos de adsorción (carbón activado de coco y comercial) en la decoloración de aguas con azul de metileno bajo diferentes caudales.	35
4.4. Evaluación de la relación absorbancia-tiempo de los dos lechos de adsorción considerando el tipo de carbón activado de coco y comercial.....	39
4.5. Determinación de la eficiencia de decoloración de aguas con azul de metileno por el carbón activado de coco y carbón comercial a diferentes caudales.....	43
V. CONCLUSIONES	47
VI. PROPUESTAS A FUTURO.....	48
VII. REFERENCIAS.....	49
VIII. ANEXOS	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Operacionalización de variables	19
2. Datos iniciales de la solución contaminada.....	25
3. Tipo de carbón activado y tamaño de partículas	27
4. Cálculos del sistema de adsorción por carbón activado en lecho fijo.	27
5. Absorbancia y concentración del lecho de carbón activado de coco a $Q=12\text{ml/min}$	29
6. Absorbancia y concentración del lecho de carbón activado comercial a $Q=12\text{ml/min}$	30
7. Absorbancia y concentración del lecho de carbón activado de coco a $Q=36\text{ ml/min}$	32
8. Absorbancia y concentración del lecho de carbón activado comercial a $Q=36\text{ ml/min}$	33
9. Absorbancia de carbón activado de coco y comercial a $Q=12\text{ ml/min}$	39
10. Absorbancia de carbón activado de coco y comercial a $Q=36\text{ ml/min}$	41
11. Resultado de eficiencia de carbón activado de coco y comercial a $Q=12\text{ ml/min}$	43
12. Resultado de eficiencia de carbón activado de coco y comercial a $Q=36\text{ ml/min}$	44
13. Resultados de operación de adsorción por CC y CAC de repetición 1 a $Q = 12\text{ ml/min}$...	60
14. Resultados de operación de adsorción por CC y CAC de repetición 1 a $Q = 36\text{ ml/min}$...	60
15. Resultados de operación de adsorción por CC y CAC de repetición 2 a $Q = 12\text{ ml/min}$...	61
16. Resultados de operación de adsorción por CC y CAC de repetición 2 a $Q = 36\text{ ml/min}$...	61
17. Resultados de operación de adsorción por CC y CAC de repetición 3 a $Q = 12\text{ ml/min}$...	62
18. Resultados de operación de adsorción por CC y CAC de repetición 3 a $Q = 36\text{ ml/min}$...	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Tabla	Página
1. Fruto del coco	15
2. Punto de ruptura en la adsorción	16
3. Ubicación del laboratorio de hidrología -UNAS	17
4. Diseño de investigación experimental	20
5. Etapas del proceso experimental	23
6. Procedimiento de adsorción por carbón activado en columna de lecho fijo	24
7. Esquema del sistema del sistema de adsorción por carbón activado en lecho fijo.....	28
8. Capacidad máxima de adsorción de CC a un caudal de 12ml/min	30
9. Capacidad máxima de adsorción de CAC a un caudal de 12ml/min.....	31
10. Capacidad máxima de adsorción de CC a un caudal de 36 ml/min	33
11. Capacidad máxima de adsorción de CAC a un caudal de 36 ml/min.....	34
12. Curva de ruptura de adsorción con CC a $q=12\text{ml/min}$	36
13. Curva de ruptura de adsorción con CAC a $q=12\text{ml/min}$	36
14. Curva de ruptura de adsorción con CC a $q=36\text{ ml/min}$	37
15. Curva de ruptura de adsorción con CAC a $q=36\text{ ml/min}$	38
16. Relación de absorbancia vs tiempo del CC y CAC a caudal de 12 ml/min.	40
17. Relación de absorbancia vs tiempo del CC y CAC a caudal de 36 ml/l.	42
18. Azul de metileno.....	55
19. Muestras de experimento de CC y CAC a diferentes tiempos	55
20. Sistema de adsorción por carbón activado en lecho fijo	56
21. Sistema eléctrico de Arduino.....	56
22. Toma de muestra para hallar densidad del carbón activado	57
23. Preparación de la solución contaminada	57
24. Medición de absorbancia	58
25. Medición de pH, salinidad y CE.....	58
26. Columna de lecho fijo saturado	59
27. Código Arduino para caudal.....	59

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue determinar la influencia de los parámetros de operación de adsorción por carbón activado en lecho fijo en la decoloración de aguas con azul de metileno. Se analizaron dos procesos con diferentes caudales en un lecho fijo, el diseño de sistema de adsorción se realizó considerando parámetros como densidad, porosidad, tipo de carbón y caudal. La capacidad máxima de adsorción se determinó mediante el método de Thomas, mientras que el punto de ruptura se evaluó empíricamente. La relación adsorción-tiempo se analizó mediante gráficas de absorbancia, y la eficiencia de decoloración del carbón activado de coco (CC) y el comercial (CAC) se calculó con fórmulas de eficiencia. Los resultados mostraron el diseño de sistema de adsorción del lecho fijo con una altura:77 cm y diámetro:4 cm, capacidades máximas de adsorción de CC (4835.1085 mg/g) y CAC (6064.2443 mg/g) a 12 ml/min; y CC (6612.7653 mg/g) y CAC (6359.2815 mg/g) a 36 ml/min, con puntos de ruptura a las 47 h y 43 h respectivamente y eficiencias del CC 99.42% frente a 99.69% del CAC a un caudal de 12 ml/min y CC 99.60 % y CAC 99.78% a un caudal de 36 ml/min. Se concluyó que tanto el caudal como el tipo de carbón activado son parámetros determinantes que influyen en la operación de adsorción, destacándose que a caudales bajos la eficiencia se mantiene alta por más tiempo, mientras que a caudales altos decrece más rápido.

Palabras clave: Capacidad máxima de adsorción, azul de metileno, lecho fijo.

ABSTRACT

The objective of this research was to determine the influence of the operational parameters of absorption due to activated carbon in fixed beds for the discoloration of water with methylene blue. Two processes were analyzed, with different flow rates, in a fixed bed; the design of the absorption system was done taking into account parameters such as density, porosity, the type of carbon, and the rate of flow. The maximum absorption capacity was determined using the Thomas method, while the breaking point was evaluated empirically. The absorption to time relationship was analyzed using absorbency graphs and the efficiencies of the discoloration with the activated carbon from coconut (CC – acronym in Spanish) and with the commercial activated carbon (CAC – acronym in Spanish) were calculated using efficiency formulas. The result revealed that the design of the absorption system from the fixed bed with a height of 77 cm and a diameter of 4 cm had maximum absorption capacities of 4835.1085 mg/g with the CC and 6064.2443 mg/g with the CAC at 12 ml/min and 6612.7653 mg/g with the CC and 6359.2815 mg/g with the CAC at 36 ml/min; with breaking points at 47 h y 43 h, respectively, and efficiencies of 99.42% with the CC, in comparison to 99.69% with the CAC at a flow rate of 12 ml/min, and 99.60 % with the CC and 99.78% with the CAC at a flow rate of 36 ml/min. It was concluded that the flow rate, as much as the type of activated carbon, were determining parameters that influenced the operation of the absorption, highlighting that at low flow rates, the efficiency stayed high for a longer time, while at high flow rates, it decreased faster.

Keywords: Maximum adsorption capacity, methylene blue, fixed bed.

I. INTRODUCCIÓN

La industria textil identificada como la segunda más contaminante del mundo según la Conferencia de la ONU sobre Comercio y Desarrollo (UNCTAD), juega un papel crucial en la problemática ambiental global, especialmente en relación con la contaminación del agua. En las zonas de producción, principalmente en países en desarrollo, las fábricas textiles no solo requieren grandes volúmenes de agua más de 3 000 litros para un par de jeans y aproximadamente 2 700 litros para una camiseta, sino que también liberan efluentes cargados de sustancias químicas y colorantes que persisten en el ambiente, afectando severamente la salud de los ecosistemas acuáticos y las comunidades locales.

Entre los contaminantes más preocupantes se encuentra el azul de metileno, un colorante que, debido a su estructura y propiedades químicas, puede permanecer activo en el agua durante décadas bajo condiciones normales de temperatura y pH. Según D. Cuevas y M. Garzón (2009), la producción anual global de colorantes alcanza aproximadamente 700 000 toneladas, cerca del 10% de estos terminan en cuerpos de agua, impactando negativamente la biodiversidad y la salud pública. Los desechos líquidos generados por la industria textil generalmente contienen elevados niveles de demanda química de oxígeno (entre 800 y 1 600 mg/L), alcalinidad con un pH de 9 a 11, y sólidos totales que varían entre 6 000 y 7 000 mg/L. Esto subraya la importancia crucial de implementar tratamientos eficientes para la depuración de aguas contaminadas (Kuhad, et al., 2004).

Dentro de las soluciones emergentes, la adsorción por carbono activado en lecho fijo se ha demostrado prometedora. Este método explota la estructura porosa del carbón activado, que ofrece una superficie extensa para la captura de moléculas contaminantes. Sin embargo, la eficacia de este proceso varía según parámetros operativos clave como la altura del lecho de carbón, caudal y tipo de carbón activado, que son esenciales para alcanzar la máxima eficiencia de decoloración.

La presente investigación no solo busca contribuir a reducir los niveles de contaminación, adicionalmente los resultados obtenidos podrían servir como fundamento científico para diseñar e implementar tratamientos de agua más eficientes y de menor costo en la industria textil. Al abordar estos parámetros operativos, esta investigación busca contribuir a la conservación de los recursos hídricos y la minimización del impacto ambiental negativo, alineándose con los esfuerzos globales para mejorar la sostenibilidad y la responsabilidad ambiental.

El problema que aborda esta investigación es ¿Cómo influyen los parámetros de operación de adsorción por carbón activado en lecho fijo en la decoloración de aguas con azul de metileno?, por lo expuesto anteriormente se plantea la siguiente hipótesis:

Los parámetros de operación de adsorción por carbón activado en lecho fijo influyen de manera positiva en la decoloración de aguas con azul de metileno.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Determinar la influencia de los parámetros de operación de adsorción por carbón activado en lecho fijo en la decoloración de aguas con azul de metileno.

1.1.2. Objetivos específicos

- Diseñar el sistema de adsorción por carbón activado en lecho fijo.
- Determinar la capacidad máxima de adsorción del carbón activado de coco y comercial en la decoloración de aguas con azul de metileno bajo diferentes caudales mediante el método de Thomas.
- Determinar el punto de ruptura de los dos lechos de adsorción (carbón activado de coco y comercial) en la decoloración de aguas con azul de metileno bajo diferentes caudales.
- Evaluar la relación absorbancia-tiempo de los dos lechos de adsorción considerando el tipo de carbón activado de coco y comercial.
- Determinar la eficiencia de decoloración de aguas con azul de metileno por el carbón activado de coco y carbón comercial a diferentes caudales.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

2.1.1. Internacionales

Parimelazhagan & Rampal (2021), en su artículo “estudios continuos en columna de lecho fijo sobre adsorción-desorción de colorante rojo Congo utilizando adsorbente de hojas de *Nelumbo nucifera* libres e inmovilizadas”, investigó la capacidad de adsorción en soluciones acuosas mediante una columna de lecho fijo en flujo continuo. El polvo de hojas de *N. nucifera* fue fijado en distintos soportes poliméricos, destacando el silicato de sodio como el material más eficiente para la decoloración, alcanzando una eficiencia del 83,64 %. El metanol resultó ser el disolvente más efectivo para la desorción, logrando un 72,87 % de eficiencia. Además, se evaluó la reutilización de los adsorbentes en tres ciclos consecutivos, observándose una disminución significativa en la capacidad de adsorción y eliminación del color después del primer ciclo en ambos tipos de adsorbentes.

Mousavi y Darvishi (2021), en su artículo “Eliminación de azul de metileno utilizando carbón activado preparado a partir de desechos de madera de uva: análisis y modelado del proceso de adsorción”, se evaluó la eficacia del carbón activado derivado de residuos de madera de uva para la adsorción de azul de metileno (MB) en soluciones acuosas. El carbón activado se caracterizó mediante análisis FTIR, BET y SEM, y se optimizaron las variables como la concentración inicial de MB (100-500 mg/L), el pH (3-11), la dosis de adsorbente (0.25-12.25 g/L) y el tiempo de contacto (10-90 minutos) utilizando la metodología de superficie de respuesta. Se logró una eficiencia de decoloración del 98% bajo condiciones de pH 11, concentración de MB de 100 mg/L y dosis de adsorbente de 12.25 g/L. Los datos experimentales se ajustaron al modelo de Langmuir ($R^2=0.99$), indicando adsorción en monocapa, y la cinética se ajustó al modelo de pseudosegundo orden ($R^2=0.99$). Este carbón activado demuestra ser un adsorbente económico y sostenible con un gran potencial para el tratamiento de aguas.

Meléndez & Paiz (2021) en su tesis “Diseño de un sistema de columnas de adsorción con carbón activado para el tratamiento de aguas naturales contaminadas con arsénico”, tuvo como propósito desarrollar un sistema de columnas de adsorción diseñado específicamente para eliminar arsénico de aguas contaminadas. Las especificaciones del diseño incluyen un diámetro interno de 0.081 m, una altura del lecho de carbón activado de 2.3 m y una altura total de la columna de 2.7 m. Se utilizó un caudal de 619.8 L/día para un tratamiento de agua residencial, con una eficiencia de remoción del arsénico de aproximadamente 97.6%.

El tiempo de residencia se estableció en 30 minutos. Este diseño se basa en un modelo de 6 columnas conectadas en paralelo, lo que permite tratar grandes volúmenes de agua.

Mejía & Jaimes (2021) en su tesis “Estudio del proceso de adsorción en columna con carbón activado para la disminución de la concentración de barbaloína en *Aloe barbadensis* Miller”, el diseño experimental implicó la utilización de una columna recubierta con carbón activado granulado, variando tanto el flujo de alimentación como la altura del carbón activado. Se calculó que un flujo de 30 mL/min y una altura de carbón de 23 cm resultaron en los resultados más favorables para la decoloración de barbaloína, alcanzando concentraciones de barbaloína de 10 mg/L en el efluente. Estos parámetros de diseño permiten maximizar la eficiencia del proceso de adsorción.

Melgarejo (2021) en su tesis “Comportamiento de la bioadsorción del colorante azul brillante FCF, con la cascarilla de arroz y cáscara de piña, frente al carbón activado utilizado en el tratamiento de aguas residuales en Colombia”, menciona que la investigación relacionada con la adsorción del colorante Azul Brillante FCF pone de manifiesto discrepancias notables entre el carbón activado y los bioadsorbentes obtenidos de desechos agrícolas como la cascarilla de arroz y la cáscara de piña. A pesar de la ausencia de investigaciones concretas sobre la cascarilla de arroz y el Azul Brillante FCF, los estudios realizados con colorantes análogos indican que este bioadsorbente alcanza eficiencia de decoloración que oscilan entre el 86.56% y el 99%. Estos resultados, si bien prometedores, son inferiores a los obtenidos con carbón activado, que alcanza tasas de decoloración de hasta 100%.

Carreño & Jaimes (2020), en su artículo “Diseño preliminar de una unidad piloto de adsorción en continuo”, esta investigación describe el diseño preliminar de una unidad piloto de adsorción en operación continua, enfocada en la eliminación de contaminantes presentes en aguas residuales. El desarrollo del diseño priorizó la altura del lecho de carbón, determinada a partir de variables como el caudal, la densidad, el tiempo de operación y la concentración de los contaminantes. Se definió una altura de lecho de 25 cm para la adsorción de cobalto, y se validó el diseño mediante datos experimentales. El flujo establecido en este diseño fue de 2.85 litros por minuto, logrando resultados satisfactorios en la adsorción del contaminante evaluado.

Estrada Aroca (2023), en su tesis “Estudio de la adsorción de azul de metileno mediante el (*Schoenoplectus californicus*) a través de una columna de lecho fijo”, los estudios en columnas de lecho fijo con totora como adsorbente y análisis por espectroscopía UV-VIS demostraron su eficacia para remover azul de metileno del agua. La composición de

la totora, con fibras y poros, ofrece gran área superficial y múltiples puntos de adsorción, favoreciendo la captación del colorante. Se constató un incremento en la capacidad de adsorción al elevar la concentración inicial del tinte. El modelo de Thomas demostró un adecuado alineamiento con los datos experimentales, evidenciando una correlación que supera el 96.75%, validando su aplicabilidad para describir este proceso. La totora, al ser un recurso natural renovable y accesible, presenta ventajas económicas y ambientales para su uso a gran escala en tratamiento de aguas.

Manjunath & Kumar (2020) en su artículo “Eliminación simultánea de antibióticos y nutrientes mediante una columna de carbón activado de *Prosopis juliflora*: evaluación del rendimiento, efecto de los parámetros operativos y modelado innovador”, esta investigación analizó el comportamiento de la adsorción en sistemas monocomponente (metronidazol, fosfato y nitrato, identificados como MET, PO_4^{3-} y NO_3^-) y multicomponente en una columna de lecho fijo usando carbón activado derivado de *Prosopis juliflora* (PJAC). Se evaluaron varios parámetros operativos, como la altura del lecho (5–15 cm), el caudal de entrada (0.5–2 L/h) y la concentración inicial del adsorbato (25–100 mg/L), observando sus efectos en las curvas de ruptura. Los resultados experimentales se compararon con modelos matemáticos de ruptura, como los de Thomas, Adams-Bohart, Yoon-Nelson y BDST. El modelo de Thomas fue el más efectivo para ajustar los datos, prediciendo características de ruptura para la eliminación de MET, PO_4^{3-} y NO_3^- . Este modelo registró capacidades máximas de adsorción de 9.70, 8.21 y 5.57 mg/g, respectivamente, para cada componente.

Taquieteu et al. (2023), en su artículo científico “Adsorción en lecho fijo de un colorante azoico (naranja de metilo) sobre carbones activados regenerados química y térmicamente”, se evaluó la eficacia del procedimiento de recuperación del carbón activado granular desgastado (SGAC) para la decoloración de tintes. Se compararon las propiedades como porosidad, composición, funcionalidad superficial y rendimiento en adsorción de carbones activados regenerados químicamente (CAR400) y térmicamente (CAR700 y CAR900) en la eliminación del tinte naranja metílico (MO) en un sistema de lecho fijo. El carbón activado CAR400 presentó una microporosidad de 1045 mg/g, similar a la del carbón comercial de referencia (CA), que tenía un valor de 1052 mg/g, aunque CAR400 mostró una menor capacidad de adsorción. Los datos de adsorción se modelaron con las ecuaciones de Thomas, Adams-Bohart y Yoon-Nelson, siendo el modelo de Thomas el que mejor representó las curvas de ruptura. Este modelo también indicó que un aumento en el diámetro de la columna reducía la capacidad máxima de adsorción (q_0).

Fagbayigbo et al. (2020), en su artículo “Adsorción de ácido perfluorooctanoico (PFOA) y sulfonato de perfluorooctano (PFOS) del agua utilizando biomasa de hojas (*Vitis vinifera*) en un estudio de columna de lecho fijo”, esta investigación se centró en la adsorción de ácido perfluorooctanoico (PFOA) y sulfonato de perfluorooctano (PFOS) en carbones activos modificados (AC- H_3PO_4) derivados de biomasa de hojas de *Vitis vinifera*, utilizando una columna de lecho fijo. El carbón activado, con un tamaño de partícula homogéneo superior a 64 μm , se empleó en experimentos con ajustes en los parámetros experimentales, como la concentración inicial (C_i) de la solución, la altura del lecho, la masa del adsorbente y el flujo, con el fin de optimizar la eficiencia de adsorción. Se determinaron el tiempo de ruptura y saturación a partir de los datos experimentales, y los modelos de Adams-Bohart, Thomas y Yoon-Nelson se aplicaron para su análisis. Según el modelo de Thomas, las capacidades máximas de adsorción fueron de 159.61 mg/g para PFOA y 208.64 mg/g para PFOS. Los resultados mostraron que un mayor caudal de flujo mejoró la eficiencia de utilización fraccional del lecho (FBU).

Ebrahim & Mustafa (2024), en su artículo científico “Utilización del modelo Thomas para predecir las curvas de desglose para la adsorción y el intercambio iónico”, menciona que se desarrolló un software utilizando MATLAB 7.0 para resolver el modelo de Thomas. Para validar su efectividad, se realizaron cuatro experimentos destinados a comprobar la capacidad del modelo para predecir las curvas de ruptura en procesos de adsorción e intercambio iónico. Los experimentos incluyeron la sorción de o-cresol del agua con carbón activado, ácido acético del aire con carbón activado, fenol del agua mediante zeolita natural y tricloroetileno del aire utilizando zeolita-5A. Los resultados mostraron una excelente concordancia entre los datos experimentales y las predicciones del modelo.

Silva et al. (2020), en su artículo “Fibras de carbón activado con H_3PO_4 de gran área superficial a partir de fibras de pseudotallo de banano: estudios de adsorción del colorante azul de metileno en sistemas de lecho fijo y por lotes”, se presentó la elaboración y evaluación de fibras de carbón activado (FCA) derivadas del pseudotallo de plátano. Las FCA se produjeron mediante pirólisis lenta utilizando dos métodos: (i) impregnación directa de la materia prima con H_3PO_4 y pirólisis (FCA I), y (ii) carbonización hidrotermal inicial (HTC) de la materia prima, seguida de impregnación con H_3PO_4 y pirólisis (FCA II). La caracterización mostró que FCA II tenía una mayor área superficial BET (1975 m^2/g) en comparación con FCA I (1436 m^2/g), además de una mayor uniformidad de microfibras y una superficie más ácida. FCA II se utilizó para la adsorción del colorante azul de metileno (MB) en sistemas de baño y lecho fijo. Los datos experimentales se ajustaron bien a los modelos cinéticos de pseudo primer

orden, pseudo segundo orden y Elovich, y a los modelos de equilibrio de Langmuir, Freundlich y Dubinin-Radushkevich. Los modelos de adsorción en lecho fijo de Thomas y Yoon-Nelson también mostraron un buen ajuste. Los resultados indicaron una alta capacidad de adsorción en monocapa para MB sobre FCA II, con un valor de $Q_m=728.9$ mg/g, y el proceso fue identificado como espontáneo y exotérmico. En los estudios de lecho fijo, la capacidad máxima de adsorción fue de 714.0 mg/g, con un tiempo de agotamiento de 512.4 minutos, y coeficientes de determinación (R^2) superiores a 0.99 para los modelos de Thomas y Yoon-Nelson.

Mora (2020), en su artículo “Adsorción de plomo (II) con carbón activado a partir de semillas de eucalipto”, analiza la capacidad de adsorción del carbón activado obtenido a partir de semillas de eucalipto para la remoción de plomo (II) en soluciones acuosas. Los resultados muestran que un aumento en el caudal provoca una disminución notable en el tiempo de ruptura, indicando una menor eficacia del carbón activado en condiciones de flujo elevado. Se realizaron estudios considerando diferentes parámetros, incluido el caudal del fluido, que afecta tanto el tiempo de ruptura como la eficiencia general del proceso de adsorción.

Vera & Juera (2020), en su artículo “Estudio experimental y simulación dinámica de la biosorción de metales pesados utilizando cáscara de cacao en columna de lecho fijo”, el objetivo de la investigación fue evaluar la capacidad de adsorción de metales pesados (Pb^{2+} y Cd^{2+}) utilizando cáscara de cacao como material biosorbente en columnas, analizando el impacto del flujo sobre las curvas de ruptura. Se realizaron experimentos en columnas variando los flujos y cuantificando las concentraciones iniciales y finales de los metales. Para comparar los resultados experimentales con modelos teóricos, se emplearon simulaciones. Los resultados indicaron que un aumento en el volumen reducía el tiempo hasta el punto de ruptura, lo que afectaba negativamente la eficiencia del proceso. Sin embargo, las simulaciones mostraron una buena correlación con los datos experimentales, sugiriendo que la cáscara de cacao es un material efectivo para la biosorción de metales pesados.

Gómez & Menéndez (2023), en su artículo “Adsorción de azul de metileno en medio acuoso utilizando carbón activado derivado del endocarpo de coco”, consistió en examinar la evaluación entre la absorbancia y el tiempo, evidenciando que el carbón de coco presenta una tasa inicial de adsorción más acelerada en comparación con el carbón comercial. Asimismo, se examina la capacidad de adsorción del carbón derivado del endocarpo de coco en comparación con el carbón comercial. Se realizó una evaluación de la determinación entre la absorbancia y el tiempo, evidenciando que el carbón de coco presenta una tasa inicial de adsorción más acelerada en comparación con el carbón comercial. Esta

conducta es resultado de la amplia superficie y porosidad del carbón de coco, lo que facilita una adsorción más eficaz del azul de metileno en los primeros minutos del procedimiento.

Valenzuela & Torres (2020), en su artículo “Decoloración de colorantes azóicos (A5 y R40) con carbón activado de cáscara de nuez”, esta investigación comparó diferentes carbones activados derivados de residuos agrícolas, como cáscara de nuez y cáscara de coco, en la decoloración de colorantes azoicos. El objetivo fue establecer cuál adsorbente era más eficiente en función de la capacidad de adsorción. La metodología incluyó activación térmica y química, pruebas de adsorción con soluciones de colorantes y análisis espectrofotométrico de los resultados. Se observó que el carbón activado de coco presentó mayor eficiencia (92%) en la decoloración de colorantes, en comparación con la cáscara de nuez (85%). Se concluyó que el uso de residuos agrícolas para la producción de carbón activado representa una opción sostenible y eficaz para la decoloración de aguas residuales.

2.1.2. Nacionales

Santillán (2020), en su tesis “Eficiencia del carbón activado obtenido del endocarpo de coco (*Cocos nucifera*), para la reducción de color y turbiedad en el agua de esorrentía del sector San Lorenzo - Moyobamba 2018”, el objetivo de la investigación fue evaluar la eficiencia del carbón activado derivado del endocarpo de coco en la reducción de turbidez y decoloración del agua de esorrentía. El carbón activado se elaboró mediante una carbonización a 700 °C durante 30 minutos con ácido fosfórico al 85% como activante. Se realizaron cuatro tratamientos, tres con distintas dosis de carbón activado (100 g, 50 g y 25 g) y un testigo sin tratamiento, utilizando un diseño experimental completamente al azar con tres repeticiones, filtrando 1 litro de agua por tratamiento. Los resultados indicaron que el tratamiento con 100 g de carbón activado alcanzó una eficiencia del 97.56% en la reducción del color y 97.11% en la turbidez, cumpliendo con los límites máximos establecidos para agua potable según la normativa peruana. La conclusión fue que el carbón activado obtenido del endocarpo de coco es una solución eficiente y sostenible para la purificación del agua, especialmente útil en zonas rurales con recursos limitados.

Cárdenas & Uribe. (2023), en su artículo “Decoloración de efluentes textiles que contienen colorantes reactivos mediante el método de electro-oxidación con electrodos de titanio”, en esta investigación se utilizó el método de electro-oxidación para la decoloración de efluentes generados durante el teñido de algodón con colorantes reactivos. El proceso empleó electrodos de malla, con un cátodo de titanio y un ánodo de titanio recubierto con rutenio e iridio. Se evaluaron dos configuraciones de reactores: uno de compartimiento único y otro de doble compartimiento, separado por una membrana de intercambio iónico, con

el fin de comparar su eficiencia en la eliminación de colorantes como Corafix Blue Mers 150%, Corafix Golden Yellow Mer 150% y Corafix Red Me-4B 150%. Se monitorizó la concentración de colorante y cloro mediante espectrofotometría UV-Visible. En los ensayos de laboratorio, el reactor de doble compartimiento mostró una mayor eficiencia, alcanzando un 95.9% de decoloración en un efluente simulado con 300 mg/L de colorante rojo. En la fase piloto, el tratamiento de efluentes reales logró una decoloración del 99.1%. Finalmente, el efluente tratado fue reutilizado en una prueba de teñido, obteniendo resultados de calidad de color adecuados para la industria textil.

Heredia (2018), en su tesis “Proceso de decoloración de los efluentes del teñido de algodón mediante carbón activado en una columna empacada”, muestra resultados del análisis de adsorción de colorantes directos individuales señalaron la necesidad de reducir previamente la concentración de los efluentes textiles antes de someterlos al tratamiento con carbón activado en la columna. Asimismo, se identificó una relación cuantificable entre el avance y la eficiencia del proceso de adsorción, en función de variables clave como la concentración inicial del afluente (C_i), el área, el tiempo de permanencia y el tiempo de servicio. Las ecuaciones desarrolladas para estimar el avance y la eficiencia, ajustadas mediante regresión no lineal multivariable, mostraron un alto coeficiente de determinación ($R^2 > 0,95$) en la decoloración de colorantes, destacando la precisión del modelo propuesto.

2.1.3. Locales

Alania (2021), en su tesis “Producción de carbón activado a partir de residuos de cajonerías”, esta investigación se centró en la producción de carbón activado a partir de residuos agrícolas locales, como cáscaras de coco, y en evaluar su eficacia para adsorber compuestos responsables de la coloración en soluciones acuosas. El proceso incluyó una carbonización a 700 °C seguida de activación química con ácido fosfórico al 85%. La eficiencia del carbón activado se evaluó a través de pruebas de adsorción con azul de metileno y otros colorantes. Los resultados indicaron que el carbón activado producido logró una eficiencia superior al 95% en la remoción de colorantes orgánicos, destacándose por su alta capacidad de adsorción. Además, se demostró que es una alternativa económicamente viable y ambientalmente sostenible en comparación con los carbones comerciales. Se concluyó que el uso de residuos agrícolas locales para producir carbón activado es una solución eficiente y ecológica para la decoloración, especialmente en regiones rurales como Tingo María.

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Carbón activado

El carbón activado constituye una forma modificada de carbono que ha sido tratada para formar millones de poros diminutos entre los átomos de carbono, resultando en una amplia superficie disponible para la adsorción o reacciones químicas (Dias et al., 2007).

El carbón activado constituye un material altamente poroso que se emplea para la adsorción una amplia variedad de sustancias, desde gases hasta líquidos. Su alta superficie específica lo hace muy eficiente para la eliminación de contaminantes en procesos de purificación (Gupta & Suhas, 2009).

2.2.2. Carbón activado granulado (CAG)

Se trata de un material carbonoso con una estructura altamente porosa, fabricado en diferentes tamaños de partícula mediante procesos de activación física o química de materias primas con alto contenido de carbono. Su alta porosidad y amplia superficie interna le otorgan una notable capacidad de adsorción, lo que lo convierte en una herramienta eficiente para la eliminación de impurezas y contaminantes en el tratamiento de agua y gases (Plaza, 2015).

2.2.3. Estructura del carbón activado

El carbón activado es un material carbonoso de alta porosidad, caracterizado por una estructura jerárquica de poros que se clasifican en microporos (diámetro < 2 nm), mesoporos (2-50 nm) y macroporos (> 50 nm). Esta clasificación de poros le confiere una superficie específica considerable y una capacidad de adsorción adaptable. Además, su superficie interna contiene grupos funcionales como carboxilos, hidroxilos y carbonilos, los cuales pueden modificarse químicamente para optimizar su desempeño en aplicaciones específicas (Heidarinejad, Z et al., 2020).

2.2.4. Adsorción

La adsorción es una actividad en la que átomos, iones o moléculas de una sustancia, se fijan a la superficie de un material adsorbente, lo que resulta en una acumulación de concentración en la interfaz entre la fase adsorbida y el adsorbente (Ruthven, 1984).

La adsorción denota la acumulación de moléculas provenientes de un fluido en la superficie de un sólido. Es un fenómeno de superficie que involucra fuerzas físicas o químicas entre las moléculas del fluido y los átomos del sólido (Bansal & Goyal, 2005).

2.2.5. Isotermas de adsorción

Son expresiones matemáticas que modelan cómo las moléculas de una sustancia quedan atrapadas y se distribuyen dentro de la etapa líquida y la superficie del adsorbente en balance a una temperatura fija (Foo & Hameed, 2010).

Una isoterma de adsorción es una representación gráfica que muestra la relación entre la cantidad de sustancia adsorbida por unidad de peso del adsorbente y la presión o concentración de dicha sustancia en la fase fluida, manteniendo constante la temperatura durante el proceso (Thommes et al., 2015).

2.2.6. Parámetros de operación de Adsorción

- **Caudal**

El caudal se define como "el volumen de agua que fluye a lo largo de una sección transversal de un río o canal durante la unidad de tiempo". Esta definición adquiere particular relevancia en el marco de investigaciones en el ámbito de los estudios hidrológicos y ambientales (Martínez, 2006).

El caudal se define como el volumen de líquido que fluye cada unidad de tiempo en un sistema o elemento determinado, siendo su fórmula general volumen / tiempo. Comúnmente se cuantifica en unidades de volumen divididos por unidades de tiempo, tal como los metros cúbicos por segundo (m^3/s) (Sosa, 2015).

- **Tipo de carbón activado**

- a) **Carbón activado de coco (CC)**

Corresponde a una variedad de carbón activado derivada de las cáscaras de coco a través de un proceso de carbonización y activación. Debido a su alta microporosidad y gran área superficial, este tipo de carbón es ampliamente utilizado en la captura superficial de compuestos orgánicos e inorgánicos en tratamientos de agua y aire, así como en aplicaciones de purificación de gases (Kumar et al., 2020).

El carbón de coco se obtiene de la carbonización de cáscaras de coco, seguido de un proceso de activación que desarrolla su estructura porosa. Este material adsorbente presenta una alta capacidad de captura superficial y Es ampliamente reconocido por su eficacia en la eliminación de contaminantes, atribuida a su bajo contenido de cenizas, elevada dureza y notable estabilidad química (Shrestha et al., 2021).

El carbón de coco es un producto obtenido al procesar las cáscaras de coco para crear un material altamente poroso. Se utiliza principalmente como medio filtrante

en sistemas de purificación de agua y aire, gracias a su efectividad en la exclusión de impurezas y contaminantes (Condor & Maza, 2020).

b) Carbón activado comercial (CAC)

El carbón activado comercial se reconoce como un adsorbente extensamente empleado, disponible en una variedad de formatos como polvo y tabletas, gránulos o pellets. Se produce a partir de materiales orgánicos ricos en carbono, como madera, carbón o cáscaras de coco, que se activan mediante métodos físicos o químicos para desarrollar una estructura altamente porosa, lo que le otorga una gran capacidad de captura superficial para una amplia variedad de contaminantes (Dias et al., 2007).

El carbón activado comercial se describe como un adsorbente elaborado bajo condiciones controladas, destacándose por su extensa área superficial, distribución específica de poros y composición química de la superficie. Gracias a su efectividad en la eliminación de compuestos orgánicos e inorgánicos, se utiliza en diversas aplicaciones industriales, como la purificación de agua, el tratamiento de gases y procesos de separación (Gupta & Suhas, 2009).

2.2.7. Modelo de Thomas

El Modelo de Thomas se basa en la cinética de adsorción de segundo orden y propone que el procedimiento se alinea con la isoterma de Langmuir, lo cual posibilita la predicción de las curvas de ruptura en sistemas adsorptivos. Este modelo se caracteriza por su utilidad en la estimación de la capacidad máxima de adsorción y el rendimiento teórico de una columna, ofreciendo una solución analítica que promueve su implementación en investigaciones experimentales y diseño industrial (Vera. et al., 2018).

Este modelo ilustra la dinámica del proceso de adsorción, teniendo en cuenta que la dispersión axial del fluido es insignificante, lo que sugiere que la transferencia de masa en la interfaz constituye el factor restrictivo. La ecuación esencial del Modelo de Thomas se emplea para determinar el tiempo de agotación del lecho y se aplica a una variedad de contaminantes en investigaciones ambientales. Se distingue por su simplicidad y eficacia en la predicción del comportamiento dinámico de las columnas (Mustafa & Ebrahim, 2010).

2.2.8. Capacidad máxima de adsorción (Q_{max})

La capacidad máxima de captura superficial hace alusión a la cantidad completa de sustancia retenida que un adsorbente puede almacenar en sus sitios activos, bajo condiciones de equilibrio y saturación. Esta capacidad se determina a partir de modelos de

isotermas de captura superficial, como Langmuir y Freundlich, y es una medida clave de la eficiencia de un adsorbente (Ruthven, 1984).

La capacidad máxima de adsorción hace referencia al volumen máximo de sustancia que un adsorbente puede retener por unidad de peso, habitualmente expresado en mg/g. Este parámetro es fundamental para determinar la eficacia de un adsorbente en la remoción de contaminantes, decoloración de tintes y está influenciado por factores como las propiedades del adsorbente, la naturaleza de la sustancia retenida y las condiciones experimentales (Foo & Hameed, 2010).

2.2.9. Lecho fijo de adsorción

Un lecho fijo de captura superficial es un sistema en el que el adsorbente se coloca en una columna, permitiendo que el fluido que contiene la sustancia retenida pase a través de esta. A medida que el fluido fluye, las moléculas de la sustancia retenida se adsorben en la superficie del adsorbente. Este proceso es ampliamente utilizado en la purificación de gases y líquidos (Crittenden et al., 2012).

El lecho fijo de captura superficial se refiere a una configuración en la que el adsorbente se empaqueta en una columna, y la sustancia retenida se elimina del fluido mientras este pasa a través del lecho. La operación en lecho fijo es eficiente para procesos de separación debido a la alta eficiencia de contacto entre el adsorbente y la sustancia retenida (Marsh & Rodríguez, 2006).

Un lecho fijo de adsorción es una configuración comúnmente utilizada en procesos de ingeniería y tratamiento para la remoción de contaminantes, decoloración de tintes, purificación o separación de mezclas gaseosas o líquidas mediante el uso de un adsorbente. En un lecho fijo, el adsorbente se empaca en una columna a través de la cual el fluido que contiene el adsorbato fluye de manera continua. Este tipo de sistema resulta particularmente eficaz para aplicaciones industriales que requieren un monitoreo constante y eficiente de la calidad de un flujo de producto (Ortega. et al, 2013).

2.2.10. Decoloración de aguas

La decoloración de aguas es el proceso de eliminación de sustancias colorantes, como tintes y compuestos orgánicos, estas sustancias existen en las aguas residuales. Este proceso se realiza comúnmente mediante métodos físicos, químicos y biológicos, siendo la captura superficial con carbón activado uno de los más efectivos (Robinson et al., 2001).

La decoloración de aguas constituye un componente crucial en el manejo de aguas residuales, particularmente en sectores industriales como el textil y el papelerero, donde

se liberan grandes cantidades de compuestos colorantes. La decoloración se logra mediante procesos como la coagulación-floculación, oxidación avanzada, adsorción y captura superficial, con el objetivo de eliminar o reducir los agentes contaminantes que deterioran la pureza del agua. (Kunz et al., 2002).

Castro & Durán (2014) indica que este proceso consiste en la eliminación de colorantes y otras sustancias que tiñen el agua, con el objetivo de mejorar su calidad y hacerla adecuada para su uso o disposición segura. La coloración en el agua puede ser causada por contaminantes naturales, como los compuestos húmicos y fúlvicos, así como por contaminantes de origen humano, como colorantes y productos químicos generados por procesos industriales.

2.2.11. Azul de Metileno

El tinte catiónico azul es un tinte de coloración intensa que se utiliza comúnmente como agente colorante en diversos campos, incluidos la biología, la medicina y la industria textil. Su estructura molecular le permite adsorberse fácilmente en superficies, lo que lo convierte en un compuesto modelo en estudios de captura superficial (Garg et al., 2004).

El tinte catiónico azul es un compuesto químico aromático heterocíclico con una estructura molecular $C_{16}H_{18}N_3S$, que constituye parte de la familia de los fenotiazínicos, ampliamente utilizado como marcador y reactivo químico debido a sus propiedades colorantes. Es soluble en agua y tiene la capacidad de ser adsorbido por diversos materiales, lo que lo hace útil en la investigación de procesos de captura superficial y en aplicaciones ambientales, como la remoción de contaminantes en aguas residuales (Crini, 2006).

2.2.12. Activación del carbón de coco

La activación del carbón activado es una actividad en la que mediante el cual se incrementa la porosidad y, por lo tanto, la superficie específica del carbón. Esto se logra mediante la oxidación controlada del carbón precursor, usando agentes físicos (como vapor o CO_2) o químicos (como ácido fosfórico o hidróxido de potasio), permitiendo así que el carbón desarrolle una estructura altamente porosa apta para la captura superficial (Ioannidou & Zabaniotou, 2007).

La activación del carbón involucra la creación de una red de microporos y mesoporos en la estructura del carbono, aumentando así su capacidad de captura superficial. Este proceso puede ser llevado a cabo por activación física, que implica el uso de altas temperaturas en presencia de gases oxidantes, o por activación química, que involucra la

impregnación del precursor con agentes químicos y su posterior carbonización (Guo & Lua, 2000).

2.2.13. Coco (*Cocos nucifera*)

Fruta tropical producida por la palmera cocotera, que se cultiva principalmente en regiones costeras de países tropicales. Esta fruta es una fuente valiosa de productos comestibles, fibras y materiales utilizados en una variedad de industrias, desde la alimentaria hasta la cosmética y la producción de carbón activado (Ghosh et al., 2021).

El coco es caracterizado por su cáscara dura, pulpa blanca comestible y agua de coco en su interior. Además de su importancia nutricional, el coco y sus subproductos, como el aceite y la cáscara, tienen múltiples usos en la industria alimentaria, cosmética, farmacéutica y agrícola (Moghadam et al., 2020).

Taxonomía del Coco:

Reino	: Plantae
Familia	: Arecaceae
Subfamilia	: Arecoideae
Género	: Cocos
Especie	: Cocos nucifera



Figura 1. Fruto del coco

2.2.14. Propiedades del carbón activado de coco

La característica distintiva del carbón activado de coco es su elevada microporosidad., gran área superficial y baja concentración de cenizas, lo que lo hace altamente eficiente en la captura superficial de compuestos orgánicos e inorgánicos. Además, debido a su

origen vegetal, presenta una alta dureza y estabilidad mecánica, lo que lo convierte en un material adecuado para aplicaciones en la purificación de agua y aire (Kumar et al., 2020).

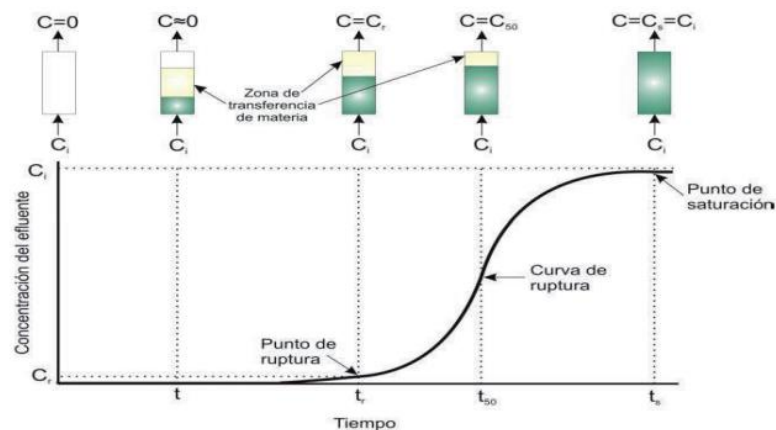
El carbón activado de coco posee propiedades adsorbentes sobresalientes, como una alta capacidad de captura superficial y una gran eficiencia para eliminar contaminantes como metales pesados, compuestos orgánicos y colorantes. Estas propiedades se atribuyen a su estructura porosa, alta área superficial y a la existencia de diversas funciones químicas en su superficie que favorecen la interacción con las moléculas de los contaminantes (López R. et al., 2021).

El carbón activado es hidrófobo por su baja afinidad con el agua, lo que favorece la adsorción de gases en ambientes húmedos y la captura de especies disueltas. Sin embargo, los grupos funcionales en su superficie pueden reaccionar con el agua, modificando su hidrofobicidad. La oxidación introduce grupos hidroxilo (OH^-), carbonilo (RCHO) y carboxilo (RCOOH), confiriéndole carácter anfótero, es decir, propiedades ácidas y básicas, clave para la adsorción de diversas moléculas (Luna et al., 2007)

2.2.15. Punto de ruptura

Se define un punto de ruptura cuando la concentración del adsorbato en el efluente alcanza un valor específico, generalmente expresado como un porcentaje de la concentración inicial. Este momento indica que la zona de transferencia de masa (MTZ) ha llegado al extremo de la columna, marcando una disminución significativa en la eficiencia del adsorbente para eliminar los contaminantes (Moreno, et al. 2019).

Representa el instante en que un adsorbente alcanza su capacidad de adsorción máxima en un proceso de adsorción continua, y la concentración del adsorbato en la fase fluida (líquida o gaseosa) empieza a incrementarse de manera significativa (Valencia & Castellar, 2013).



Fuente: V. Taty (2009)

Figura 2. Punto de ruptura en la adsorción

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

3.1.1. Ubicación política de la zona de estudio

Se desarrolló dentro de la Universidad Nacional Agraria de la Selva en el laboratorio de recursos hídricos, ubicadas:

Distrito. : Rupa Rupa
Provincia. : Leoncio Prado
Región. : Huánuco

3.1.2. Ubicación geográfica de la zona de estudio

El laboratorio de recursos hídricos, está situada geográficamente en el sistema de geoprocésamiento UTM WGS84 18L cuyas coordenadas están en UTM, como se ilustra en la figura 3.

Laboratorio de recursos hídricos : E: 390265 N: 8970827 (m)

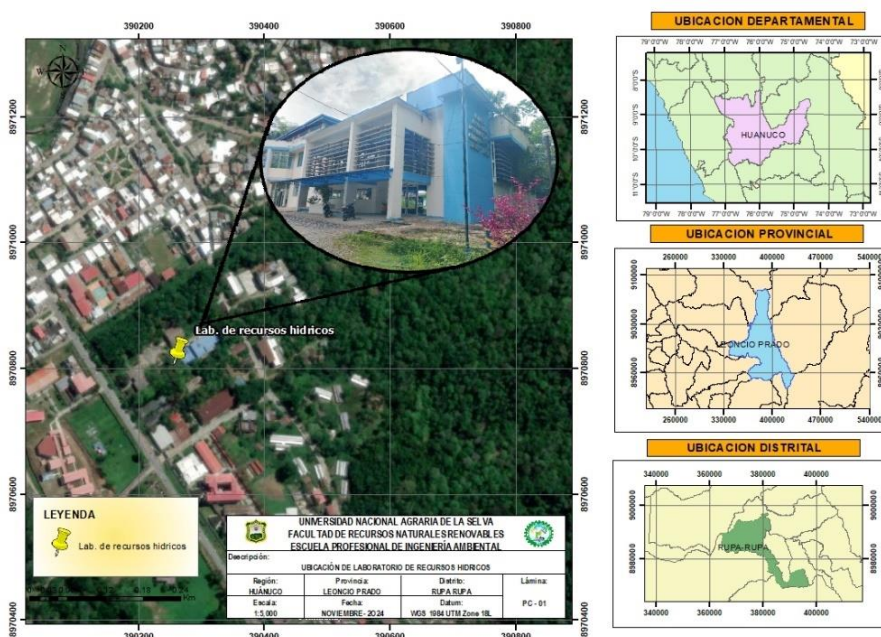


Figura 3. Ubicación del laboratorio de hidrología -UNAS

3.1.3. Clima

El clima de la ciudad de Tingo Maria es húmedo y tropical, con temperaturas promedio de 24.5° C. Anualmente, la lluvia varía entre 3 000 y 3 500 mm, y la humedad relativa se mantiene alrededor del 80%. (SERNANP, 2019)

3.2. Materiales y equipos

3.2.1. Materiales

- Material de uso: manguera, roscas de PVC, baldes de 20 L y 4 L, cargador de 12 V, protoboard, cables puente, foco tubular fluorescente T12, cinta masking, algodón, limpia tipo, colador, vasos de plástico descartables, soldimix, tamiz, mortero y pilon, cúter, estante de madera, carbón de coco y comercial.
- Materiales e instrumentos de laboratorio: Vasos precipitados, embudos, papel filtro, probetas, pizeta, varilla y libreta de campo.
- Equipos de protección personal: guardapolvo.

3.2.2. Equipos

- Espectrofotómetro UV-Visible, pH metro, Multiparámetro 3630 IDS, cámara fotográfica, laptop, conductímetro, estufa, mufla, balanza analítica, 2 bombas peristálticas de 12 V.

3.2.3. Insumos

- Azul de metileno.

3.2.4. Programas

- Arduino IDE
- Matlab
- Software Microsoft Excel

3.3. Criterio y análisis del estudio

3.3.1. Nivel de investigación

Es de nivel experimental, se centra en la recolección de datos y pruebas prácticas para evaluar y validar el desempeño de los parámetros de operación en el proceso de adsorción. Este tipo de investigación permite analizar variables específicas y realizar ajustes para optimizar el proceso en condiciones controladas (Condori, 2020).

3.3.2. Tipo de investigación

Es una investigación de tipo aplicado, su objetivo es mejorar, perfeccionar u optimizar el desempeño de los sistemas, procedimientos, normas y reglamentaciones tecnológicas vigentes, incorporando los progresos científicos y tecnológicos de última generación. En este sentido, este tipo de investigación no se evalúa en términos de verdad, falsedad o probabilidad, sino que se analiza en función de su eficiencia, deficiencia, ineficiencia, efectividad o ineficacia (Ñaupás, 2013).

3.3.3. Método de investigación

El método de investigación es cuantitativo, dado que se fundamenta en la recolección y análisis de datos numéricos para la comprobación de hipótesis y la evaluación de los objetivos propuestos. Este método es adecuado cuando se necesita medir de manera objetiva la eficiencia del proceso de adsorción y comparar resultados de diferentes tratamientos (Creswell, 2014).

3.3.4. Operacionalización de variables

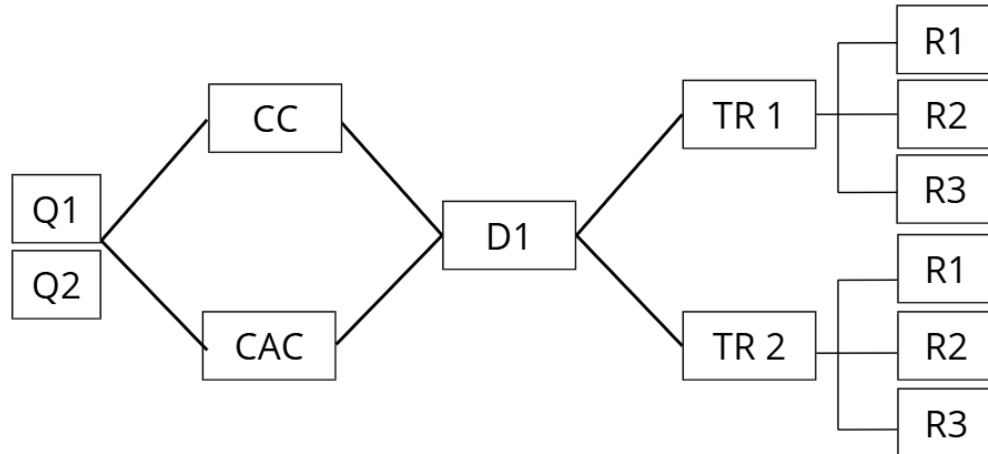
Tabla 1. Operacionalización de variables

Variables	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores	Escala
“Variable independiente” Parámetros de operación de adsorción por carbón activado en lecho fijo	Son las variables que influyen en la eficiencia del proceso de adsorción, estos factores determinan el rendimiento del sistema.	Parámetros de operación	Caudal	Razón
			Tipo de carbón activado	Categorico
“Variable dependiente” Decoloración de aguas con azul de metileno	Es el proceso de eliminación de este colorante mediante técnicas como adsorción, con el objetivo de reducir su toxicidad y su impacto ambiental.	Eficiencia	Porcentaje de remoción	Razón
			Capacidad máxima de adsorción	Razón
"Variable interviniente" Temperatura	Es una magnitud física que mide el nivel de calor o frío de un cuerpo o sistema	Factor climático	Temperatura en (°C)	Razón

Fuente: propia

3.3.5. Diseño de investigación

El diseño experimental, se conceptualiza como una estructura lógica que facilita la planificación y ejecución de experimentos bajo condiciones controladas, con el propósito de identificar relaciones causales entre variables (Montgomery, 2003). En el contexto de la investigación, un diseño experimental puede ser muy útil para estudiar cómo varios parámetros influyen en la eficiencia de la adsorción en una configuración práctica.



Leyenda:

[Q1]: Caudal 1, [Q2]: Caudal 2, [CC]: Carbón activado de coco, [CAC]: Carbón activado comercial, [D1]: Diámetro 1, [TR1]: Tiempo de retención 1, [TR2]: Tiempo de retención 2, [R1-R3]: Repeticiones.

Figura 4. Diseño de investigación experimental

3.3.6. Población y muestra

- Población

320 L de solución contaminada (azul de metileno + agua)

- Muestra

20 ml de solución contaminada.

3.3.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La recolección de información experimental se realizó mediante la medición de la absorbancia de azul de metileno en muestras de agua previas y posteriores al procedimiento de adsorción. Se empleó un espectrofotómetro UV-Visible, que permitió determinar la absorbancia de las muestras y, en consecuencia, su concentración. La longitud de onda de absorción máxima del azul de metileno fue de 664 nm, la cual se utilizó como referencia (Chaparro & Ospino, 2014).

Asimismo, se registraron variables operativas como el tiempo de retención, el tiempo de ruptura, el pH y la salinidad utilizando pH-metros, balanzas analíticas y un multiparámetro, respectivamente.

Para obtener una medición precisa de la absorbancia, se realizaron tres repeticiones por cada tratamiento. La absorbancia promedio de estas tres repeticiones se calculó para cada condición experimental y se utilizó este valor para el análisis de la eficiencia de decoloración, minimizando así el error experimental y asegurando la consistencia de los resultados.

Para el análisis y la interpretación de los datos recopilados, se utilizaron programas como MATLAB y Microsoft Excel. MATLAB fue utilizado para realizar

modelaciones y simulaciones de los procesos de adsorción, facilitando la comprensión de las dinámicas y la optimización de los parámetros operativos. Por su parte, Excel sirvió para la gestión y análisis estadístico de los datos, permitiendo realizar cálculos como medias, desviaciones estándar y otras estadísticas descriptivas, además de generar gráficos que ayudaron a visualizar tendencias y correlaciones entre las variables estudiadas. Estos instrumentos fueron esenciales para la interpretación eficiente y rigurosa de los resultados obtenidos, estableciendo un fundamento robusto para las conclusiones derivadas del estudio.

3.3.8. Análisis de datos

En el estudio de la decoloración de aguas mediante el uso de azul de metileno y su posterior adsorción en carbón activado, el análisis de datos se realizó utilizando MATLAB, hoja de campo y Microsoft Excel. El MATLAB jugó un papel fundamental en el modelado del comportamiento del proceso de adsorción y en la optimización de los parámetros operativos a través de simulaciones, lo que permitió identificar las condiciones más efectivas para lograr la decoloración. Concurrentemente, Excel se empleó para efectuar graficas de absorbancia-tiempo de datos experimentales. Esto facilitó una evaluación meticulosa y comprehensiva de los hallazgos. Esta combinación de herramientas informáticas garantizó un análisis riguroso y una interpretación precisa del impacto de los diversos parámetros en la eficiencia del proceso de adsorción.

3.4. Metodología

3.4.1. Diseñar el sistema de adsorción por carbón activado en lecho fijo

El sistema de adsorción se diseñó teniendo en cuenta las siguientes formulas:

- Densidad aparente

$$\delta_a = \frac{m}{v} \quad (1)$$

Donde:

δ_a = densidad aparente

m = masa (g)

v = volumen (ml)

- Densidad real por método volumétrico

$$(\delta_R) = \frac{\text{masa del carbon}}{\text{volumen desplazado (vs)}} \quad (2)$$

$$(V_s) = V_f - V_i \quad (3)$$

V_f = volumen final (ml)

V_i = volumen inicial (ml)

- Porosidad del carbón activado

$$n = \left(1 - \frac{\delta_a}{\delta_R}\right) \quad (4)$$

Donde:

n = porosidad del carbón activado

δ_a = densidad aparente (g/ml)

δ_R = densidad real (g/ml)

- Volumen del lecho de adsorción

$$V = \pi * r^2 * h * n \quad (5)$$

Donde:

V = volumen (ml)

n = porosidad

h = altura (cm)

r = radio (cm)

- Caudal

$$Q = \frac{V}{t} \quad (6)$$

Donde:

Q = caudal (ml/seg)

V = volumen (ml)

t = tiempo (seg)

- **Procedimiento del ensamblaje de la columna de adsorción**

El procedimiento que se realizó en el ensamblaje para la columna de madera fue de 55 cm de ancho y 114.5 cm de altura, y del lecho fijo (diámetro = 4 cm y altura = 77 cm). Se utilizaron dos bombas peristálticas, mangueras y dos potes de recepción, se preparó una solución contaminada en relación de 1.25 ml de azul de metileno (AM) en 1 litro de agua. Se comenzó montando las dos columnas verticales dentro de una caja de madera descubierta.

Con el sistema eléctrico (Arduino, protoboard, conectores eléctricos, bomba peristáltica), se utilizó un código para programar los dos caudales a 12 y 36 ml/min en el programa Arduino IDE, manteniendo así un caudal constante durante todo el proceso de adsorción.

Se conectó cada columna a una bomba peristáltica utilizando mangueras adecuadas, asegurándose de que cada bomba pudiera suministrar agua desde un tanque de 20 litros. Adicionalmente, se añadió constantemente la solución de agua más AM hasta saturar el lecho de carbón activado. Luego, se conectó la salida de cada columna a uno de los dos potes de recepción mediante mangueras en la parte inferior de cada columna, asegurando un flujo constante y controlado de agua a través de las columnas hacia los potes, finalmente se verificaron todas las conexiones para evitar fugas.

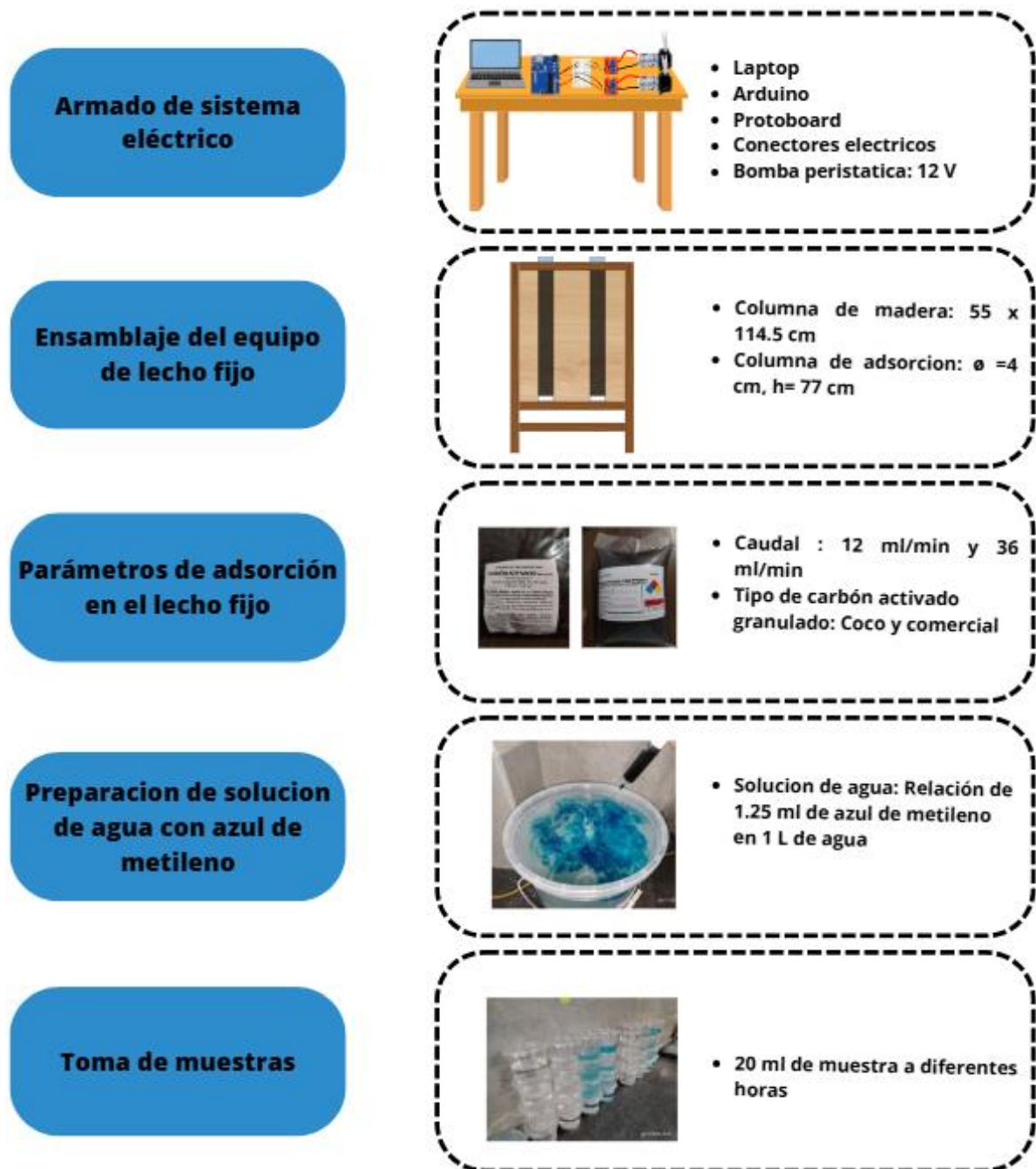


Figura 5. Etapas del proceso experimental

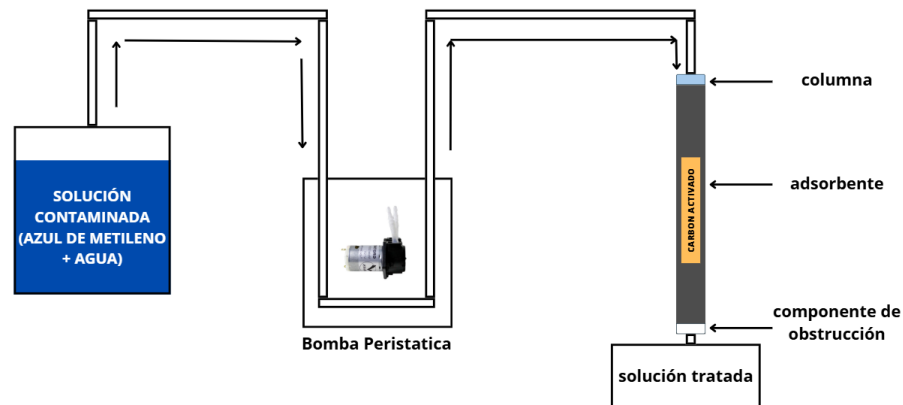


Figura 6. Procedimiento de adsorción por carbón activado en columna de lecho fijo

El procedimiento de adsorción se inició con la entrada de la solución contaminada, que fue impulsada mediante una bomba peristáltica hacia una columna de adsorción. En esta columna, un material adsorbente, tal como el CC y CAC, capturó las impurezas presentes en el agua. Conforme el agua se desplazó a través de la columna, las partículas contaminantes se adhirieron al adsorbente, resultando en una mayor limpieza del agua.

3.4.2. Determinar la capacidad máxima de adsorción del carbón activado de coco y comercial en la decoloración de aguas con azul de metileno bajo diferentes caudales mediante el método de Thomas

Teniendo como parámetros de operación el caudal de 12 y 36 ml/min y el tipo de carbón activado granular (coco y comercial), se determinó la capacidad máxima de adsorción mediante el modelo ajustado de Thomas.

- Modelo de Thomas

Teniendo en cuenta variables como el flujo de entrada a la columna, la concentración inicial del colorante y la altura del lecho de 77 cm, la absorbancia inicial se midió con el espectrofotómetro UV-Visible a una longitud de onda de 664 nm. El modelo de Thomas empleó un análisis de regresión no lineal, considerado uno de los métodos de uso más extendido. Este enfoque se utilizó para representar y evaluar los datos obtenidos en los ensayos con columnas, permitiendo determinar la capacidad máxima de adsorción del material adsorbente y la constante cinética asociada.

Este modelo se caracteriza a través de:

$$\frac{C}{C_i} = \frac{1}{1 + e^{\left(\frac{K_{Th}}{Q} * (q_0 * w - C_i * v_{ef})\right)}} \quad (7)$$

Donde:

K_{Th} = La constante cinética (mL/min*mg)

W = La masa de adsorbente en la columna (g)

C = La concentración inicial del efluente (mg/L)

C_i = La variación de la concentración del efluente en el tiempo (mg/L)

V_{ef} = Volumen del efluente (L)

Q = Caudal de alimentación (mL/min)

q_0 = Capacidad máxima del adsorbente (mg/g)

Tabla 2. Datos iniciales de la solución contaminada

Concentración inicial del azul de metileno	1225 mg/L
Densidad del azul de metileno	0.98 g/ml
Absorbancia inicial	0.748
pH inicial	9.26
Salinidad inicial	549 ppm
Conductividad eléctrica (CE) inicial	1096 μ s/cm

Fuente: propia

A través del uso de programas informáticos como MATLAB y Excel, se cargaron los datos obtenidos de concentración (mg/L) y tiempo (min) para posteriormente determinar la capacidad máxima de adsorción q_0 .

3.4.3. Determinar el punto de ruptura de los dos lechos de adsorción (carbón activado de coco y comercial) en la decoloración de aguas con azul de metileno bajo diferentes caudales

El punto de ruptura se determinó mediante un método empírico basado en la medición de la concentración del contaminante, calculada mediante la fórmula ((masa* absorbancia inicial*1000) / absorbancia inicial) a lo largo del tiempo. Según se observó en el gráfico, este punto se definió como el momento en que la concentración del contaminante fue más cercana al 5% de la concentración inicial (C_i) de la solución contaminante.

Se preparó la solución contaminada y se filtró a caudal constante mediante columnas, regulado por bombas peristálticas. Se tomaron muestras del efluente en intervalos regulares para medir la absorbancia y determinar la concentración remanente del colorante.

Este monitoreo se llevó a cabo hasta que la concentración alcanzó un porcentaje significativo de la C_i , lo que indicó el punto de ruptura del lecho. A través del uso de programas informáticos como MATLAB, se obtuvieron valores de la concentración de la solución contaminante a lo largo del tiempo y se generaron gráficas de las curvas de ruptura

para ambos tipos de carbón a diferentes caudales de 12 y 36 ml/min. Estas curvas facilitaron la identificación visual del punto en el cual la capacidad de adsorción del carbón comenzó a disminuir de manera significativa, lo que se manifestó a través de un aumento abrupto en la concentración del colorante en el efluente.

3.4.4. Evaluar la relación absorbancia-tiempo de los dos lechos de adsorción considerando el tipo de carbón activado de coco y comercial

Para evaluar la relación entre la absorbancia y el tiempo en dos lechos de adsorción (carbón de coco y carbón comercial), se llevó a cabo un experimento controlado. Cada tipo de carbón se colocó en una columna de lecho fijo, a través de las cuales se hizo pasar una solución contaminada en una relación de 1.25 ml:1 L de AM y agua a diferentes caudales (12 y 36 ml/min). Se utilizaron bombas peristálticas para garantizar un flujo constante. Durante el proceso de filtración, se tomaron muestras del efluente en intervalos de tiempo específicos y se midió la absorbancia de azul de metileno utilizando un espectrofotómetro UV-visible.

Cuando un colorante fue adsorbido por carbón activado, su concentración en la solución disminuyó, reduciendo la absorbancia medida en el espectrofotómetro. Esta relación permitió calcular la capacidad de adsorción y la eficiencia del proceso (Gelagutashvili, 2017). Los datos obtenidos se analizaron en Microsoft Excel, donde se calculó y graficó la cantidad de colorante adsorbido mediante la absorbancia en función del tiempo para cada tipo de carbón.

3.4.5. Determinar la eficiencia de decoloración de aguas con azul de metileno por el carbón activado de coco y carbón comercial a diferentes caudales

Se preparó la solución contaminada para determinar la eficiencia de decoloración del carbón activado de coco y comercial. Se tomaron muestras del agua tratada y se midió la absorbancia a 664 nm de longitud de onda con un espectrofotómetro UV-visible.

La eficiencia de decoloración se calculó con la fórmula:

$$\text{Eficiencia (\%)} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} * 100 \quad (8)$$

Donde:

A_0 es la absorbancia inicial, A_f es la absorbancia final

Se determinó la cantidad de colorante removida comparando la absorbancia inicial de 0.748 con la absorbancia final en cada intervalo de tiempo, lo que indicó la eficacia de decoloración del carbón activado de coco y comercial. Se tomó como referencia la eficiencia a los 0.5 h en los dos tipos de caudales, 12 y 36 ml/min, obteniendo una mayor eficiencia en ambos tipos de carbón activado (CC y CAC).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Diseño del sistema de adsorción por carbón activado en lecho fijo.

Tabla 3. Tipo de carbón activado y tamaño de partículas

Tipo de carbón activado	Malla	Tamaño de partículas
Carbón activado de coco	12 x 40	0.42 - 1.68 nm
Carbón activado comercial		

En la tabla 3, se muestra los tipos de carbón activado que se usó para esta investigación, Un CAG de dimensiones 12 x 40, en promedio, se adsorbe con un doble de velocidad en comparación con uno de 8 x 30. (Sevillano & Torres, 2013) menciona que el número de malla se refiere al número de rendijas por pulgada lineal. Un carbón de 8 x 30 alberga partículas que oscilan entre 0,595 y 2,38 mm.

Tabla 4. Cálculos del sistema de adsorción por carbón activado en lecho fijo.

Parámetros	Carbón activado de coco (CC)	Carbón activado comercial (CAC)
Densidad aparente	0.758 g/cm ³	0.752 g/cm ³
Densidad real	2.07 g/cm ³	2.19 g/cm ³
Porosidad del carbón	0.634	0.657
Volumen del lecho de adsorción	613.465 cm ³	635.355 cm ³
Caudal	12 y 36 ml/min	12 y 36 ml/min
Masa de adsorbente	465.01 g	477.7 g

En la tabla 4, se muestra los cálculos del sistema de adsorción a partir de las dimensiones iniciales de la altura de lecho de carbón activado de h:77 cm y diámetro del lecho de d:4 cm recortado del foco tubular, las 2 columnas de carbón activado, el CAC tiene una mayor densidad real (2.19 g/cm³) y porosidad (0.657), tiene una capacidad de adsorción superior en comparación con el de coco (2.07 g/cm³ y 0.634). Esto coincide con los hallazgos de Mejía y Jaimes (2021), quienes indicaron que la porosidad es un factor crucial en la eficiencia del proceso de adsorción. Además, la mayor porosidad del carbón comercial sugiere una mayor área superficial disponible para la adsorción, lo que puede justificar su rendimiento superior en sistemas de adsorción.

En cuanto al caudal, en esta investigación se utilizaron 2 tratamientos a diferentes caudales 12 y 36 ml/min, lo cual es relativamente bajo y adecuado para sistemas pequeños o de laboratorio. Esta elección se alinea con el estudio de Mejía y Jaimes (2021), quienes emplearon un caudal de 30 mL/min para la remoción de barbaloina. Sin embargo, en Carreño Espíndola y Jaimes Padilla (2020), se utilizó un caudal de 2.85 L/min, lo que resalta la diferencia de escala en los sistemas de adsorción. El caudal más alto de este último estudio, utilizado en una unidad piloto de adsorción continua, permite un tratamiento más eficiente de grandes volúmenes de contaminantes, lo que contrasta con esta investigación que se enfoca en comparar los rendimientos de dos tipos de carbón a caudales moderados.

Por otro lado, al comparar las dimensiones del lecho de adsorción, en esta investigación se establece que la altura del lecho es de 77 cm con un diámetro de 4 cm, contrastando con los sistemas de mayor escala como el descrito por Meléndez y Paiz (2021), quienes utilizaron una columna con una altura de 2.3 m y un diámetro de 0.081 m para tratar agua contaminada con arsénico. Las diferencias en las dimensiones del lecho entre esta investigación y otros estudios afectan factores clave como el tiempo de contacto y la eficiencia de la adsorción. Mientras que nuestra configuración de dos columnas permite un análisis más detallado de las propiedades del adsorbente, las columnas más grandes de otros estudios permiten tratar mayores volúmenes y mejorar la capacidad de adsorción en sistemas industriales y a gran escala.



Figura 7. Esquema del sistema del sistema de adsorción por carbón activado en lecho fijo

En la figura 7, podemos observar las dos columnas cuyas dimensiones (h:77 cm y d:4 cm) de lecho de adsorción de CC y CAC, asimismo cuenta con el mismo tamaño de partículas de carbón activado, también al valde de 20 L de solución contaminada que se ira suministrando constantemente durante el proceso de operación hasta que se sature a un valor de $\leq 50\%$ de la solución contaminada de las columnas de adsorción y al sistema eléctrico que ayuda a regular el caudal, se observa también las dos bombas peristálticas ya programados a un caudal constante de 12 ml/min y 36 ml/min

4.2. Determinación de la capacidad máxima de adsorción del carbón activado de coco y comercial en la decoloración de aguas con azul de metileno bajo diferentes caudales mediante el método de Thomas

Tabla 5. Absorbancia y concentración del lecho de carbón activado de coco a $Q=12\text{ml/min}$

Tiempo (h)	Absorbancia del CC (A)	Concentración del CC (mg/L)
0.5	0.0043	7.0967
1	0.0093	15.2852
7	0.0093	15.2852
10	0.0163	26.7491
15	0.0203	33.2999
26	0.0207	33.8458
47	0.0333	54.5900
84	0.0843	138.1127
116	0.1127	184.5143
136	0.1133	185.6061
140	0.1153	188.8815
142	0.1623	265.8534
146	0.2137	349.9220
148	0.2470	404.5120
150	0.3640	596.1230

En la tabla 5, se presentan los valores promedio de absorbancia y concentración obtenidos de las tres repeticiones en la operación de adsorción. Se observa una disminución inicial significativa en la absorbancia y concentración durante las primeras horas, pasando de 1225 mg/L a 7.0967 mg/L entre 0 y 0.5 horas debido a que los poros de la columna de lecho de CC aún no se saturan. A medida que avanza el tiempo, la concentración y la absorbancia aumentan gradualmente, alcanzando valores más altos a partir de las 84 horas, con una concentración de 596.1230 mg/L a las 150 horas. Este comportamiento indica un proceso de adsorción progresiva y saturación del carbón activado.

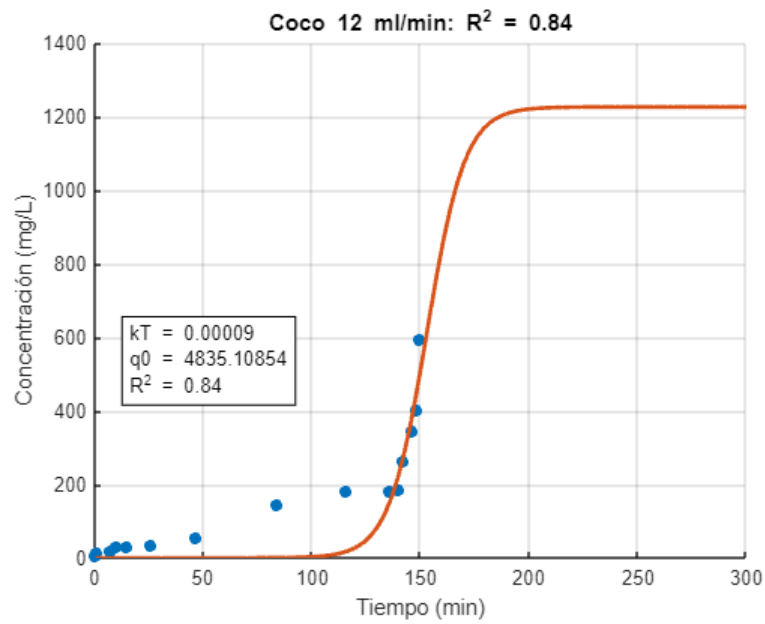


Figura 8. Capacidad máxima de adsorción de CC a un caudal de 12ml/min

En la figura 8, se muestra la capacidad máxima de adsorción del CC a un caudal de 12 ml/min, con un valor de $q_0=4835.10854$ mg/g, lo que indica que el CC puede adsorber hasta 4835 mg de azul de metileno por cada gramo de su masa. Este valor refleja una alta capacidad de adsorción, lo que sugiere que el material es efectivo para capturar contaminantes, con un 84% de la variabilidad observada en los datos.

Tabla 6. Absorbancia y concentración del lecho de carbón activado comercial a $Q=12$ ml/min

Tiempo (h)	Absorbancia del CAC (A)	Concentración del CAC (mg/L)
0.5	0.0023	3.8213
1	0.0077	12.5557
7	0.0137	22.3819
10	0.0180	29.4786
15	0.0187	30.5704
26	0.0197	32.2081
47	0.0430	70.4211
84	0.0573	93.8948
116	0.1090	178.5094
136	0.1170	191.6110
140	0.1190	194.8864
142	0.1270	207.9880
146	0.1660	271.8583
148	0.2380	389.7727
150	0.3470	568.2821

La tabla 6, se presentan los valores promedio de absorbancia y concentración obtenidos de las tres repeticiones en la operación de adsorción. Se evidencia una reducción acelerada en la concentración de 1225 mg/L a 3.8213 mg/L entre 0 y 0.5 horas. A partir de ese momento se

tiene una absorbancia mínima hasta las 84 h, después la absorbancia como la concentración aumentan progresivamente, alcanzando un máximo de 568.2821 mg/L a las 150 horas.

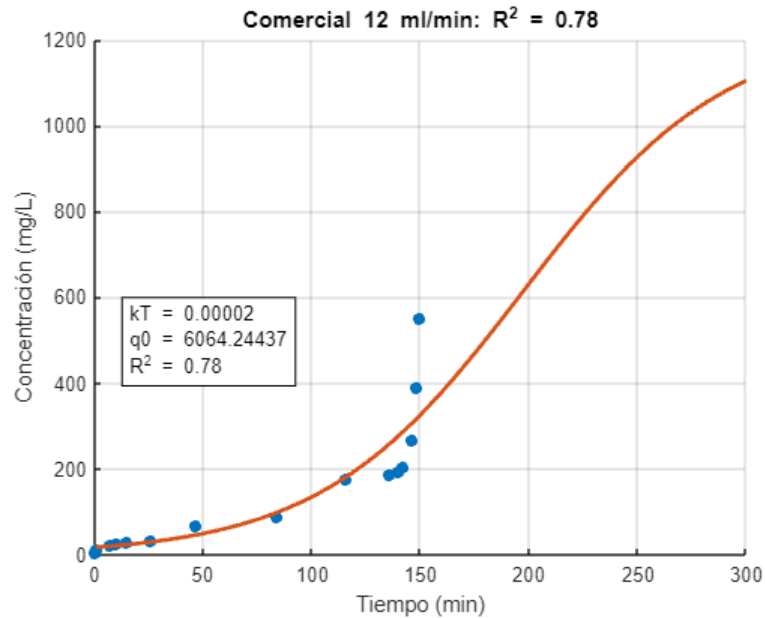


Figura 9. Capacidad máxima de adsorción de CAC a un caudal de 12 ml/min

En la figura 9, se muestra la capacidad máxima de adsorción del CAC a un caudal de 12 ml/min, con un valor de $q_0=6064.24437$ mg/g lo que indica que el CAC puede adsorber hasta 6064.24 mg de sustancia por cada gramo de su masa. El coeficiente de determinación $R^2=0.78$ indica que, aunque el modelo de adsorción explica de manera razonable la relación entre la concentración del contaminante y la cantidad adsorbida, existe una ligera dispersión en los datos.

La aplicación del método de Thomas para cuantificar la capacidad de adsorción máxima evidenció que el CAC posee una capacidad máxima de adsorción de 6064.24437 mg/g, mientras que el CC tiene una capacidad máxima de adsorción de 4835.10854 mg/g a un caudal de 12 ml/min. Estos valores son consistentes con algunos estudios previos, aunque la comparación revela ciertas diferencias en los resultados obtenidos con otros tipos de carbones activados.

Manjunath y Kumar (2020) encontró que el carbón activado de *Prosopis juliflora* (PJAC) presentó capacidades de adsorción mucho menores, con valores de 9.70 mg/g para metronidazol (MET), 8.21 mg/g para fosfato (PO_4^{3-}) y 5.57 mg/g para nitrato (NO_3^-) en un sistema monocomponente. En comparación, los valores de CC y CAC obtenidos en esta investigación son considerablemente mayores, lo que resalta la mayor eficiencia de estos carbones para adsorber contaminantes, posiblemente debido a diferencias en la porosidad y la superficie activa de los materiales. Además, Taquieteu et al. (2023) reportaron para el carbón

activado comercial una capacidad máxima de adsorción de 16.90 mg/g para el tinte naranja metílico (MO), lo que también es más bajo que los valores obtenidos en esta investigación. Este estudio también señala que un aumento en el diámetro de la columna disminuye la capacidad máxima de adsorción, lo que puede estar relacionado con la menor densidad de la fase adsorbente en sistemas de mayor volumen, lo que podría explicar algunas variaciones entre los resultados de diferentes investigaciones.

En cuanto a la confiabilidad del modelo de Thomas, tanto en el estudio de Manjunath y Kumar (2020) como en el de Taquieteu et al. (2023), este modelo mostró un buen ajuste de los datos experimentales, similar a lo observado en esta investigación donde los valores de R^2 fueron 0.84 para CAC y 0.78 para CC a un caudal de 12 ml/min. Aunque el CAC mostró una mayor capacidad máxima de adsorción, ambos materiales (CC y CAC) presentaron un buen ajuste a los datos experimentales, lo que valida la utilización del modelo de Thomas como herramienta confiable para predecir la capacidad máxima de adsorción en sistemas de lecho fijo.

Tabla 7. Absorbancia y concentración del lecho de carbón activado de coco a $Q=36$ ml/min

Tiempo (h)	Absorbancia del CC (A)	Concentración del CAC (mg/L)
0.5	0.0030	4.9131
1	0.0030	4.9131
7	0.0037	6.0049
9	0.0063	10.3721
14	0.0077	12.5557
16	0.0077	12.5557
31	0.0093	15.2852
37	0.0147	24.0196
39	0.0150	24.5655
43	0.0207	33.8458
45	0.0707	115.7308
47	0.1283	210.1716
49	0.1307	213.9929
53	0.2207	361.3859
69	0.3443	563.9149

En la tabla 7, se presentan los valores promedio de absorbancia y concentración obtenidos de las tres repeticiones en la operación de adsorción. Se muestra la variación de la absorbancia y concentración del lecho de CC a un caudal de 36 ml/min durante un período de tiempo. Al inicio, se observa una caída abrupta de la concentración de 1225 mg/L a 4.9131 mg/L entre 0 y 0.5 horas, manteniéndose estable en las siguientes mediciones hasta las 43 h. Posteriormente, la concentración aumenta gradualmente, alcanzando 563.9149 mg/L a las 69 horas.

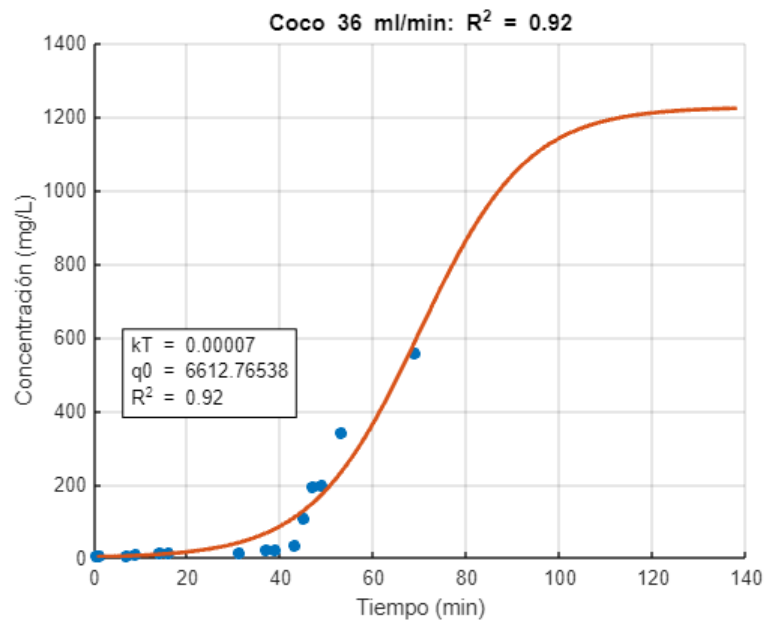


Figura 10. Capacidad máxima de adsorción de CC a un caudal de 36 ml/min

En la figura 10, se muestra la capacidad máxima de adsorción del CC a un caudal de 36 ml/min, con un valor de $q_0=6612.76$ mg/g, lo que indica que el CC puede adsorber hasta 6612.76 mg de sustancia por cada gramo de su masa en estas condiciones. El coeficiente de determinación de 92% indica que el modelo utilizado para describir la adsorción se ajusta de manera bastante buena a los datos experimentales, con una alta correlación entre las variables.

Tabla 8. Absorbancia y concentración del lecho de carbón activado comercial a $Q=36$ ml/min

Tiempo (h)	Absorbancia del CC (A)	Concentración del CAC (mg/L)
0.5	0.0017	2.7295
1	0.0033	5.4590
7	0.0047	7.6426
9	0.0047	7.6426
14	0.0057	9.2803
16	0.0057	9.2803
31	0.0073	12.0098
37	0.0087	14.1934
39	0.0130	21.2901
43	0.0300	49.1310
45	0.0727	119.0062
47	0.1400	229.2781
49	0.1540	252.2059
53	0.2317	379.4006
69	0.3577	585.7509

En la tabla 8, se presentan los valores promedio de absorbancia y concentración obtenidos de las tres repeticiones en la operación de adsorción. Inicialmente, la concentración de 1225 mg/L disminuye rápidamente al pasar por la columna de lecho fijo de a 2.7295 mg/L

en las primeras 0.5 horas, manteniéndose baja hasta aproximadamente las 14 horas. A partir de las 45 horas, la concentración comienza a aumentar más significativamente, alcanzando 585.7509 mg/L a las 69 horas.

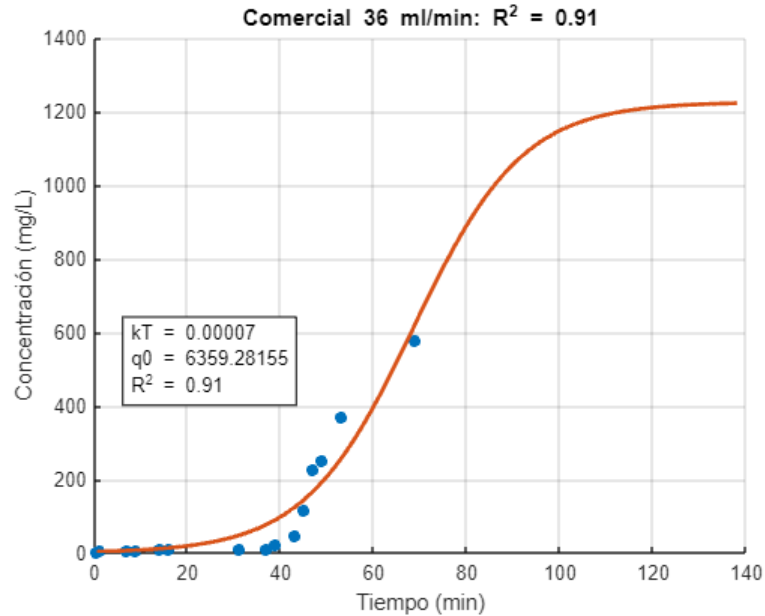


Figura 11. Capacidad máxima de adsorción de CAC a un caudal de 36 ml/min

En la figura 11, se muestra la capacidad máxima de adsorción del CAC a un caudal de 36 ml/min, con un valor de $q_0=6359.28$ mg/g lo que indica que el CAC puede adsorber hasta 6359.28 mg de sustancia por cada gramo de su masa a este caudal. El coeficiente de determinación $r^2=0.91$ indica que el modelo de adsorción se alinea adecuadamente con los datos experimentales, evidenciando una clasificación robusta entre las variables involucradas. Este hallazgo indica que el procedimiento de adsorción exhibe una tendencia predecible y eficaz bajo las condiciones experimentales del caudal de 36 ml/m.

Esta investigación evidencia un aumento en la capacidad máxima de adsorción de ambos materiales (CC y CAC) al aplicar el modelo de Thomas a un caudal de 36 ml/min, alcanzando $q_0 = 6612.76$ mg/g para el CC y $q_0 = 6359.28$ mg/g para el CAC. Este aumento puede atribuirse al mayor tiempo de contacto, favoreciendo la adsorción. Resultados similares fueron reportados por Fagbayigbo, Opeolu y Fatoki (2020), quienes también encontraron que un aumento en la velocidad de flujo mejoró la eficiencia de adsorción, incrementando la decoloración de contaminantes como PFOA y PFOS. Sin embargo, las capacidades de adsorción obtenidas en su estudio fueron menores, alcanzando 159.61 mg/g para PFOA y 208.64 mg/g para PFOS, lo que sugiere que los materiales utilizados en esta investigación (CC) presentan una mayor eficiencia de adsorción.

Por otro lado, la investigación de Ebrahim y Mustafa (2024) también utilizó el modelo de Thomas para predecir las curvas de ruptura en adsorción e intercambio iónico, encontrando un buen ajuste con los datos experimentales, lo cual es consistente con los resultados obtenidos en esta tesis ($R^2 = 0.92$ y 0.91). Esto refuerza la confiabilidad del modelo para predecir el rendimiento de sistemas de adsorción.

Esta investigación demuestra que la capacidad máxima de adsorción del CC y CAC aumenta significativamente con el modelo de Thomas a un caudal de 36 ml/min, alcanzando 6612.76 mg/g y 6359.28 mg/g, respectivamente, explicando el 92% y 91% de la variabilidad. Estos resultados coinciden con los de Silva et al. (2020), quienes reportaron una adsorción máxima de 714 mg/g en lechos fijos con un adsorbente de fibras de pseudotallo de banano, con un excelente ajuste a los modelos de Thomas y Yoon-Nelson ($R^2 > 0.99$). La comparación resalta cómo materiales modificados pueden lograr altas capacidades de adsorción, indicando que el diseño experimental y las propiedades fisicoquímicas del material son clave para optimizar estos procesos.

Estrada Aroca (2023) utilizó el modelo de Thomas para analizar la adsorción de azul de metileno en una columna de lecho fijo empleando totora como adsorbente. Al igual que en investigaciones recientes, el modelo mostró un ajuste satisfactorio con los datos experimentales, alcanzando una precisión superior al 96.75%. No obstante, esta tesis reporta capacidades de máxima de adsorción notablemente altas para los carbones activados ($q_0=6612.76$ mg/g para el CC), aunque con una correlación del 92%.

4.3. Determinación del punto de ruptura de los dos lechos de adsorción (carbón activado de coco y comercial) en la decoloración de aguas con azul de metileno bajo diferentes caudales.

Teniendo en cuenta la concentración inicial (C_i) de la solución contaminada de 1225 mg/L, se determinó los puntos de ruptura más cercana al 5% de C_i , para poder determinar el punto de ruptura se tomaron datos de tiempo y concentración de las tablas 5,6,7 y 8 para posteriormente tener las siguientes gráficas:

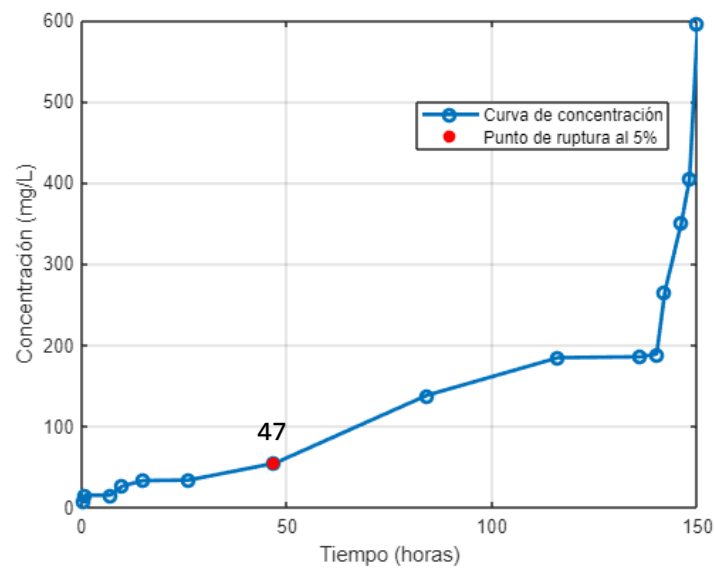


Figura 12. Curva de ruptura del lecho fijo de adsorción con CC a $q=12\text{ml/min}$

En la figura 12, se muestra la curva de ruptura con el adsorbente CC, donde el punto de ruptura se muestra a 47 h con una concentración 54.5900 mg/L, a un caudal constante de 12 ml/min, posteriormente se observa que la concentración de la solución contaminante va aumentando a las hasta 150h debido a la saturación progresiva del CC llegando hasta un 51.34% al de la concentración inicial (C_i).

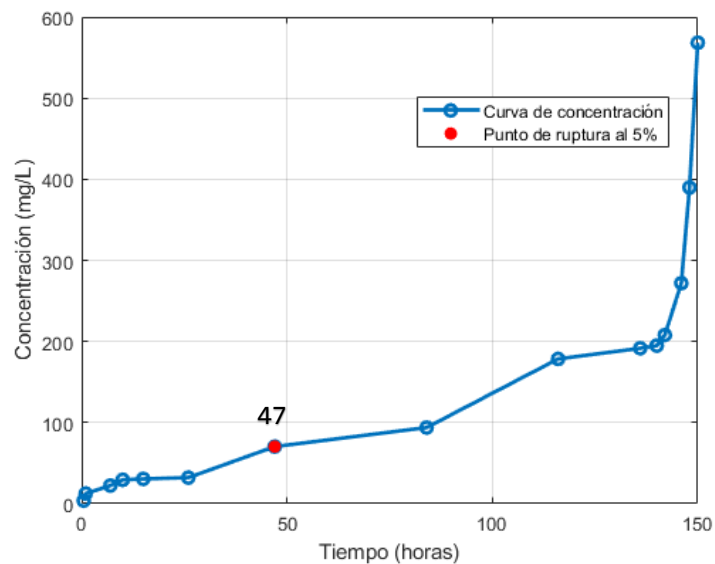


Figura 13. Curva de ruptura de adsorción con CAC a $q=12\text{ml/min}$

En la figura 13, se muestra la curva de ruptura con el adsorbente CAC, donde el punto de ruptura se muestra a 47 h con una concentración 70.4211 mg/L, a un caudal constante de 12 ml/min, posteriormente se observa que la concentración de la solución contaminante va

aumentando a las 84 h hasta 150h debido a la saturación progresiva del CAC llegando hasta un 53.61% de la concentración inicial (C_i).

Los resultados obtenidos muestran que, tanto para el CC como para el CAC, el punto de ruptura se alcanza a las 47 horas en un caudal constante de 12 ml/min, lo que indica que ambos adsorbentes comienzan a perder eficiencia en ese momento, debido a que ambos adsorbentes tienen el mismo tamaño de partículas de carbón activado. Sin embargo, la concentración de ruptura es diferente entre los dos materiales: para el CC, la concentración alcanza los 54.5900 mg/L, mientras que para el CAC se eleva a 70.4211 mg/L.

Este fenómeno puede estar asociado con las propiedades intrínsecas de los carbones activados utilizados, como la distribución de poros, la superficie específica, y la química superficial, factores que influyen directamente en su capacidad para retener los adsorbatos en función del caudal del fluido y la naturaleza del adsorbente. En este sentido, los resultados coinciden parcialmente con los de Mora Cirilo (2020), quien encontró que el rendimiento de los carbones activados está fuertemente influenciado por la dinámica del fluido, mientras que las características específicas del material adsorbente también juegan un papel crucial en la eficiencia del proceso.

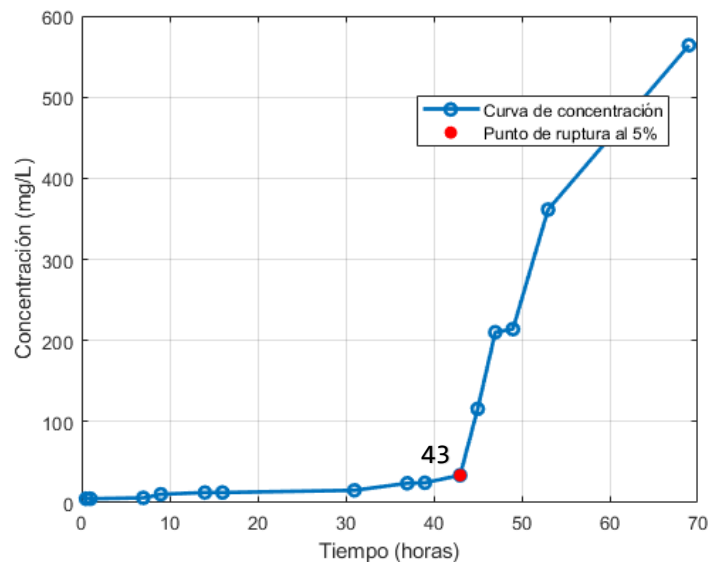


Figura 14. Curva de ruptura de adsorción con CC a $q=36$ ml/min

En la figura 14, se muestra la curva de ruptura con el adsorbente CC, donde el punto de ruptura se muestra a 43 h con una concentración 33.8458 mg/L, a un caudal constante de 36 ml/min, posteriormente se observa que la concentración de la solución contaminante va aumentando a las 45 h hasta 69 h debido a la saturación progresiva del CC llegando hasta un 53.97% de la concentración inicial (C_i).

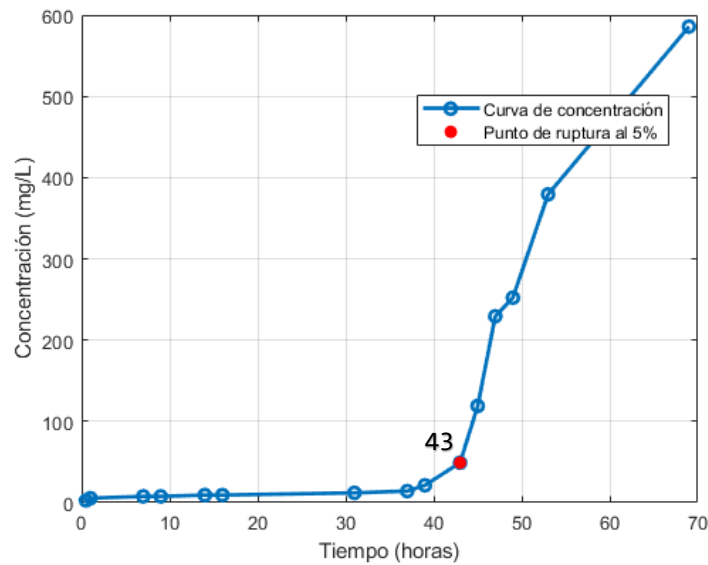


Figura 15. Curva de ruptura de adsorción con CAC a $q=36$ ml/min

En la figura 15, se muestra la curva de ruptura con el adsorbente CAC, donde el punto de ruptura se muestra a 43 h con una concentración 49.1310 mg/L, a un caudal constante de 36 ml/min, posteriormente se observa que la concentración de la solución contaminante va aumentando a las 45 h hasta 69h debido a la saturación progresiva del CAC llegando hasta un punto donde vuelve a hacer igual al de la concentración inicial (C_i).

Al comparar resultados, tanto para el CC como para el CAC, el punto de ruptura se alcanza a las 43 horas en un caudal constante de 36 ml/min, lo que indica que ambos adsorbentes comienzan a perder eficiencia en ese momento, debido a que ambos adsorbentes tienen el mismo tamaño de partículas de carbón activado. Sin embargo, la concentración de ruptura es diferente entre los dos materiales: para el CC, la concentración alcanza los 33.8458 mg/L, mientras que para el CAC se eleva a 49.1310 mg/L.

Vera & Juera (2020) en su estudio se analizó la biosorción de metales pesados utilizando cáscara de cacao en columnas de lecho fijo, también demuestra la influencia del caudal en el proceso de adsorción. Encontraron que, al aumentar el caudal, el tiempo hasta alcanzar el punto de ruptura disminuía, lo que afectaba negativamente la eficiencia del proceso. Este hallazgo refuerza la idea de que un caudal mayor reduce el tiempo de contacto entre el adsorbente y el contaminante, lo que puede explicarse por la menor interacción entre ambos a un mayor caudal. Aunque el estudio se centró en metales pesados, estos resultados pueden extrapolarse a la situación de los carbones activados, ya que un aumento en el caudal de la solución contaminada podría haber contribuido a la disminución de la eficiencia observada en el caso del CC y el CAC, afectando las concentraciones de ruptura.

4.4. Evaluación de la relación absorbancia-tiempo de los dos lechos de adsorción considerando el tipo de carbón activado de coco y comercial

Tabla 9. Absorbancia de carbón activado de coco y comercial a Q=12 ml/min.

Tiempo (h)	Absorbancia (A)	
	Coco (CC)	Comercial (CAC)
0.5	0.0043	0.0023
1	0.0093	0.0077
7	0.0093	0.0137
10	0.0163	0.0180
15	0.0203	0.0187
26	0.0207	0.0197
47	0.0333	0.0430
84	0.0843	0.0573
116	0.1127	0.1090
136	0.1133	0.1170
140	0.1153	0.1190
142	0.1623	0.1270
146	0.2137	0.1660
148	0.2470	0.2380
150	0.3640	0.3470

Fuente: Propia

En la tabla 9, se presentan los valores promedio de absorbancia obtenidos de las tres repeticiones en la operación de adsorción. Inicialmente, ambos tipos de carbón tienen una absorbancia idéntica de 0.748. A medida que avanza el tiempo, la absorbancia de ambos carbonos disminuye rápidamente en las primeras 0.5 horas, con el CAC mostrando una mayor reducción a 0.0023, mientras que el CC llega a 0.0043. Posteriormente, la absorbancia aumenta gradualmente en ambos casos, alcanzando sus valores más altos a las 150 horas, con el CC registrando 0.3640 y el CAC 0.3470.

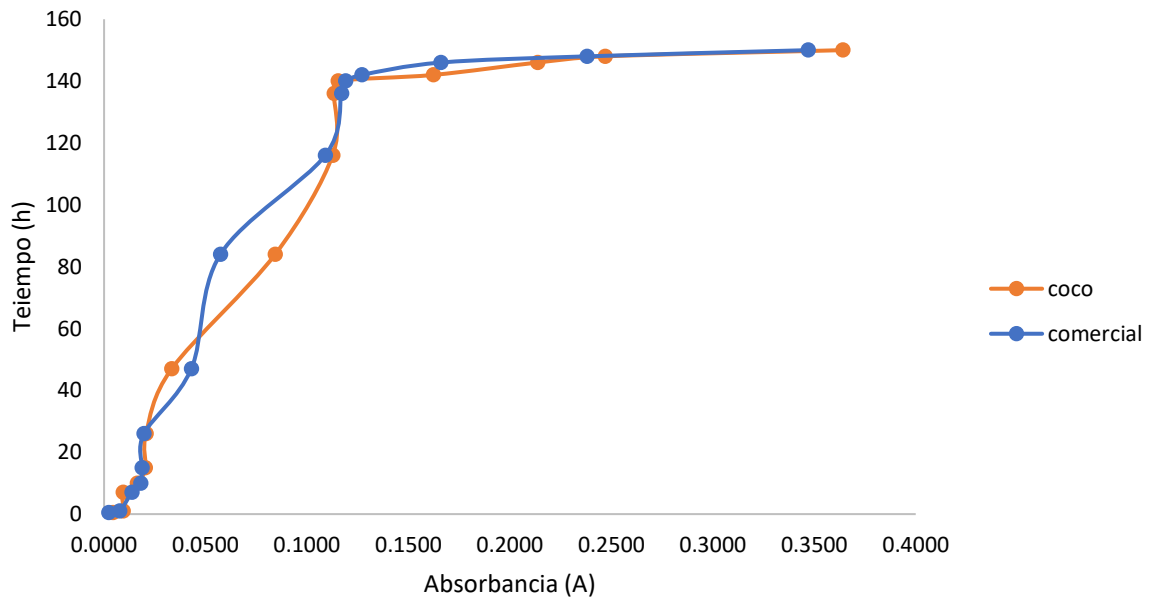


Figura 16. Relación de absorbancia vs tiempo del CC y CAC a caudal de 12 ml/min.

En la figura 16, se muestra la absorbancia del CC y CAC a lo largo del tiempo a un caudal de 12 ml/min, ambos tipos de carbón muestran una tendencia similar, teniendo una diferencia de absorbancia a las 84h indicándonos que a partir de ahí se muestra ascendentemente mayor la absorbancia de la solución contaminada debido a que los poros de ambos carbones activados comienzan a saturarse, obteniendo las mayores absorbancias en las 150 h, haciendo un gasto de solución contaminada de 180 L.

La relación de absorbancia vs tiempo muestra que tanto el CC como el CAC presentan una rápida absorción inicial en las primeras horas, con un aumento significativo de la absorbancia debido a la poca disponibilidad de sitios activos; sin embargo, a partir de las 10 horas, la absorbancia aumenta gradualmente, indicando una saturación progresiva. Al final del periodo (150 h), el CC alcanza valores de absorbancia ligeramente mayores que el CAC, lo que podría indicar una mayor capacidad de saturación o un menor rendimiento en la retención a largo plazo.

Tabla 10. Absorbancia de carbón activado de coco y comercial a Q=36 ml/min.

Tiempo (h)	Absorbancia (A)	
	Coco (CC)	Comercial (CAC)
0.5	0.0030	0.0017
1	0.0030	0.0033
7	0.0037	0.0047
9	0.0063	0.0047
14	0.0077	0.0057
16	0.0077	0.0057
31	0.0093	0.0073
37	0.0147	0.0087
39	0.0150	0.0130
43	0.0207	0.0300
45	0.0707	0.0727
47	0.1283	0.1400
49	0.1307	0.1540
53	0.2207	0.2317
69	0.3443	0.3577

Fuente: Propia

En la tabla 10, se presentan los valores promedio de absorbancia obtenidos de las tres repeticiones en la operación de adsorción. Se muestra los resultados de la absorbancia de CC y CAC al tratar una solución contaminada de azul de metileno y agua a un caudal de 36 ml/min, teniendo una absorbancia inicial de 0.748. En las primeras 0.5 horas, ambos carbones muestran una disminución notable de la absorbancia, con el CC alcanzando 0.0030 y el CAC 0.0017, lo que indica una rápida absorción inicial del contaminante. Posteriormente, la disminución de la absorbancia continúa de manera más gradual. Al final del experimento (a 69 horas), la absorbancia alcanza valores de 0.3443 para el CC y 0.3577 para el CAC, lo que muestra una mayor saturación de ambos carbones frente al contaminante, pero con una ligera diferencia entre ellos.

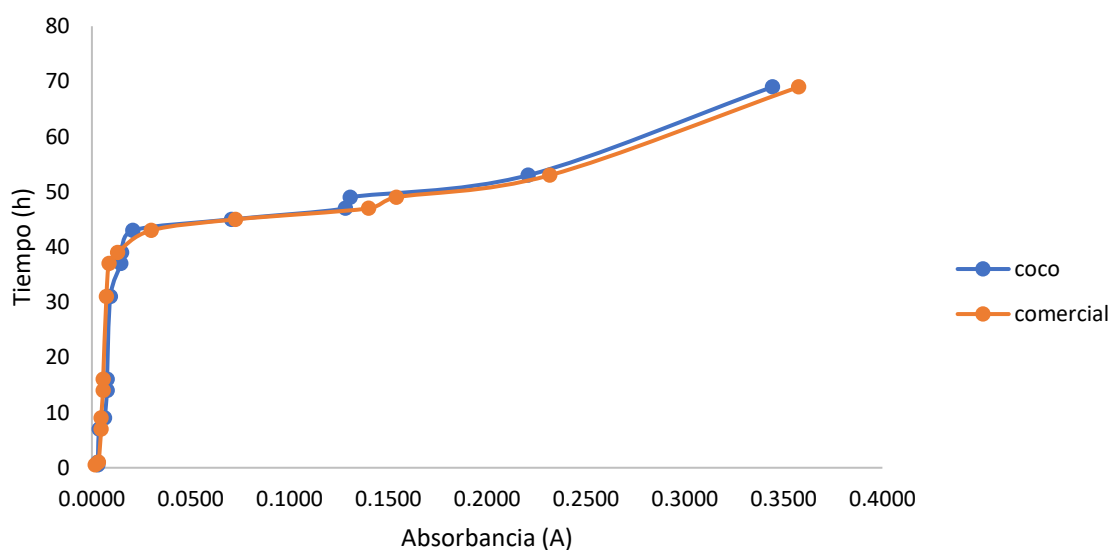


Figura 17. Relación de absorbancia vs tiempo del CC y CAC a caudal de 36 ml/l.

En la figura 17, se muestra la absorbancia del CC y CAC a lo largo del tiempo a un caudal de 36 ml/min, ambos tipos de carbón muestran una tendencia similar, teniendo una diferencia de absorbancia a las 37 horas indicándonos que a partir de ahí se muestra ascendentemente mayor la absorbancia de la solución contaminada debido a que los poros de ambos carbones activados comienzan a saturarse, obteniendo las mayores absorbancias en las 69 h, haciendo un gasto de solución contaminada de 140 L.

Comparando resultados, tanto en la figura 16 como en la figura 17, se observa una tendencia similar en la absorbancia del CC y el CAC a lo largo del tiempo, aunque con algunas diferencias notables debido al caudal de la solución. En el caso del caudal de 12 ml/min (figura 16), la absorbancia muestra un aumento progresivo, alcanzando las mayores absorbancias a las 150 horas, tras un consumo de 180 L de solución contaminada. La diferencia de absorbancia entre ambos tipos de carbón se hace más evidente a las 84 horas, lo que indica que los poros de ambos carbones comienzan a saturarse. Por otro lado, en el caso del caudal de 36 ml/min (figura 17), la saturación de los poros ocurre a un ritmo más acelerado, con la diferencia de absorbancia observada a las 37 horas, alcanzando las mayores absorbancias a las 69 horas y un gasto total de 140 L de solución contaminada. Estos resultados indican que, a mayor caudal, la saturación de los carbones activados ocurre más rápidamente, resultando en un menor volumen de solución tratada antes de alcanzar la saturación.

Gómez y Menéndez (2023), reporta que el carbón derivado del endocarpo de coco exhibe una adsorción inicial más rápida, atribuida a su mayor porosidad y superficie específica. Estos resultados indican que, aunque ambos tipos de carbón presentan una tasa de adsorción elevada en las primeras etapas, el tipo de material (CC frente a CAC) y las condiciones

operacionales (caudal de la solución) juegan un papel fundamental en la rapidez con la que se alcanzan los puntos de saturación.

También Gómez y Menéndez (2023), destacan que el carbón de coco presenta una adsorción inicial más rápida debido a su mayor porosidad. Sin embargo, en esta investigación, el carbón comercial tiene una porosidad ligeramente superior (0.657 frente a 0.634), lo que indica que tiene un rendimiento similar o incluso superior. Además, la mayor masa de adsorbente utilizada (477.7 g frente a 465 g de coco) proporciona una mayor superficie activa para la adsorción. Esto explica en parte por qué el carbón comercial, con mayor masa y una ligera ventaja en porosidad, alcanzó la saturación más rápidamente en niveles de absorbancia a un caudal mayor (36 ml/min) y mostrando q_0 mayor que el del CC a un caudal de 12 ml/min, resultando en un menor volumen de solución contaminada antes de alcanzar la máxima absorbancia.

4.5. Determinación de la eficiencia de decoloración de aguas con azul de metileno por el carbón activado de coco y carbón comercial a diferentes caudales.

Tabla 11. Resultado de eficiencia de carbón activado de coco y comercial a $Q=12$ ml/min

Tiempo (h)	Absorbancia de coco	Eficiencia (%)	Absorbancia de comercial	Eficiencia (%)
0.5	0.0043	99.42%	0.0023	99.69%
1	0.0093	98.75%	0.0077	98.98%
7	0.0093	98.75%	0.0137	98.17%
10	0.0163	97.82%	0.0180	97.59%
15	0.0203	97.28%	0.0187	97.50%
26	0.0207	97.24%	0.0197	97.37%
47	0.0333	95.54%	0.0430	94.25%
84	0.0843	88.73%	0.0573	92.34%
116	0.1127	84.94%	0.1090	85.43%
136	0.1133	84.85%	0.1170	84.36%
140	0.1153	84.58%	0.1190	84.09%
142	0.1623	78.30%	0.1270	83.02%
146	0.2137	71.43%	0.1660	77.81%
148	0.2470	66.98%	0.2380	68.18%
150	0.3640	51.34%	0.3470	53.61%

En la tabla 11, se presentan los valores promedio de absorbancia obtenidos de las tres repeticiones en la operación de adsorción. Donde se muestra los resultados que tanto el CC como el CAC tienen una alta eficiencia inicial de decoloración (99.42% y 99.69%, respectivamente), disminuyendo con el tiempo debido a la saturación. Hasta las 84 horas, el CAC mantiene una eficiencia ligeramente superior, alcanzando 94.25% frente al 88.73% del

CC, aunque ambos materiales caen por debajo del 85% después de 116 horas. A las 150 horas, las eficiencias finales son 51.34% y 53.61%, respectivamente, con absorbancias más altas que reflejan mayor saturación.

En este caso a un caudal de 12 ml/min, el carbón activado comercial muestra una eficiencia algo más estable a lo largo del tiempo, mientras que el coco presenta una mayor disminución hacia el final del análisis.

Tabla 12. Resultado de eficiencia de carbón activado de coco y comercial a Q=36 ml/min

Tiempo (h)	Absorbancia de coco	Eficiencia (%)	Absorbancia de comercial	Eficiencia (%)
0.5	0.0030	99.60%	0.0017	99.78%
1	0.0030	99.60%	0.0033	99.55%
7	0.0037	99.51%	0.0047	99.38%
9	0.0063	99.15%	0.0047	99.38%
14	0.0077	98.98%	0.0057	99.24%
16	0.0077	98.98%	0.0057	99.24%
31	0.0093	98.75%	0.0073	99.02%
37	0.0147	98.04%	0.0087	98.84%
39	0.0150	97.99%	0.0130	98.26%
43	0.0207	97.24%	0.0300	95.99%
45	0.0707	90.55%	0.0727	90.29%
47	0.1283	82.84%	0.1400	81.28%
49	0.1307	82.53%	0.1540	79.41%
53	0.2207	70.50%	0.2317	69.03%
69	0.3443	53.97%	0.3577	52.18%

Fuente: Propia

En la tabla 12, se presentan los valores promedio de absorbancia obtenidos de las tres repeticiones en la operación de adsorción. Donde se muestra que tanto el CC como el CAC comienzan con eficiencias cercanas al 99.60 % y 99.78 % en las primeras horas aun caudal de 36 ml/min, manteniéndose al 99% hasta las 9 horas en el CC y 31 horas en el CAC. Sin embargo, a medida que pasa el tiempo, la eficiencia de ambos carbones disminuye, con el coco manteniendo una ligera ventaja sobre el comercial, la eficiencia comienza a disminuir debido al comienzo de saturación de los tipos de carbones, alcanzando una eficiencia final de 53.97% para el CC y 52.18% para el CAC a las 69 horas.

Contrastando las eficiencias con los dos caudales, se observa que un caudal de 12 ml/min proporciona una eficiencia de deoloración del 99.42 % del CC frente al 99.69% del CAC en un tiempo operativo de 150 h. Por otro lado, un caudal de 36 ml/min proporciona eficiencias del 99,60 % del CC y del 99,78% del CAC durante las primeras horas en un tiempo operativo de 69 h. Esto indica que un incremento en el caudal conlleva una reducción en el tiempo operativo.

Comparando las eficiencias finales entre las tablas, se observa que a un caudal de 12 ml/min (Tabla 11) el CC y el CAC alcanzan eficiencias de 51.34% y 55.61% respectivamente tras 150 horas, mientras que a un caudal mayor de 36 ml/min (Tabla 12), estas eficiencias caen a 53.97% y 52.18% a solo 69 horas. Esto demuestra que un aumento en el caudal reduce el tiempo en que los materiales mantienen una eficiencia aceptable, ya que a mayor caudal limita el contacto efectivo entre los contaminantes y los sitios activos de adsorción, acelerando la saturación del carbón activado y disminuyendo su desempeño a largo plazo.

Adicionalmente se analizó el pH, salinidad y conductividad eléctrica (CE) de las primeras 0.5 horas, obteniendo valores a un caudal de 12 ml/min del CC (pH=8.63, salinidad = 144 ppm y CE= 293 $\mu\text{s/cm}$) y CAC (pH= 8.42, salinidad=138 ppm y CE= 297 $\mu\text{s/cm}$) y aun caudal de 36 ml/min del CC (pH= 8.95, salinidad= 204 ppm y CE= 415 $\mu\text{s/cm}$) y CAC (pH= 8.59, salinidad= 156 ppm y CE= 294 $\mu\text{s/cm}$), notándose una disminución con los valores iniciales de pH, salinidad y CE de la solución contaminada.

Valenzuela y Torres (2020) reportaron que el carbón activado de coco es más eficiente que el derivado de cáscara de nuez en la decoloración de colorantes azoicos, alcanzando una eficiencia del 92 % frente al 85 %. Aunque las eficiencias son menores que las observadas en el presente estudio, la comparación indica que el origen del carbón activado y el proceso de activación influyen significativamente en el desempeño. Asimismo, la diferencia en los colorantes y concentraciones iniciales podría explicar las discrepancias en los resultados. También Cárdenas y Uribe (2023) en su investigación aplicaron un método de electro-oxidación, logrando una eficiencia del 99.1 % en la decoloración de efluentes textiles. Aunque la tecnología difiere del uso de carbón activado, la alta eficiencia reportada es comparable a los resultados obtenidos con el CAC en esta investigación. Sin embargo, la electro-oxidación requiere equipos especializados y costos más altos, lo que posiciona al carbón activado como una solución más accesible y sostenible en escenarios rurales o de bajos recursos.

Santillán (2020) destacó la capacidad del carbón activado de endocarpo de coco para reducir la turbidez y el color en agua de escorrentía con eficiencias superiores al 97 %. Estos resultados son comparables con los obtenidos en esta investigación a caudales bajos. Asimismo, la investigación de Mousavi et al. (2021) reporta que el carbón activado obtenido de residuos de madera de uva logra una eliminación del 98% de azul de metileno, resultado comparable con los de nuestra investigación. Sin embargo, también Mousavi et al (2021) destacan que, bajo condiciones óptimas, el carbón activado podría alcanzar eficiencias superiores, lo que sugiere que ajustes en los parámetros operativos podrían mejorar el desempeño tanto del carbón comercial como del de coco.

Melgarejo Martínez (2021) evaluó la adsorción de azul brillante FCF con bioadsorbentes como la cascarilla de arroz y piña, alcanzando eficiencias de 86.56% hasta el 99%. Aunque los bioadsorbentes tienen un rendimiento prometedor, nuestros resultados muestran que los carbones activados mantienen eficiencias más estables, especialmente en tiempos prolongados. Esta estabilidad refuerza la idea de que los carbones activados son más duraderos en el tiempo, a pesar de las caídas graduales en eficiencia observadas.

Según Heredia (2018), en su investigación identificó que la eficiencia del carbón activado en la decoloración de efluentes textiles depende de factores como la concentración inicial y el tiempo de servicio. Estas observaciones concuerdan con los resultados de la presente investigación, donde se evidenció que un aumento en el caudal reduce el tiempo operativo, a pesar de mantener eficiencias altas en las primeras horas. Este paralelismo subraya la importancia de optimizar las condiciones operativas para maximizar el rendimiento del carbón activado. Parimelazhagan & Rampal (2021), también mostraron una eficiencia de decoloración a 83,64 % para el rojo Congo, mientras que esta investigación alcanza hasta un 99,78 % del CAC a $q=36$ ml/min para la solución contaminada, esto indicando que el carbón activado es un adsorbente más eficiente en términos de porcentaje de eliminación.

Finalmente, Alania (2021) en su investigación, demostró que el carbón activado derivado de residuos agrícolas puede alcanzar eficiencias superiores al 95 % en la remoción de colorantes orgánicos, confirmando su viabilidad como alternativa a los carbones comerciales. Los resultados de la presente investigación amplían esta perspectiva al mostrar que, bajo ciertas condiciones de flujo, el carbón activado de coco puede igualar o superar las eficiencias reportadas por los carbones comerciales, consolidándose como una opción sostenible y de alto rendimiento.

V. CONCLUSIONES

Se diseñó el sistema de adsorción por carbón activado en lecho fijo, el cual ha demostrado ser funcional y eficiente para la decoloración de aguas con azul de metileno.

Se determinó la capacidad máxima de adsorción de CC y CAC con el método de Thomas, el CAC tuvo mayor capacidad a 12 ml/min, mientras que el CC mostró mejor rendimiento a 36 ml/min.

Se determinó el punto de ruptura de ambos CC y CAC alcanzando su punto de ruptura a las 47 horas aun un caudal de 12 ml/min, mientras tanto a un caudal de 36 ml/min a 43 horas, debido al mismo tamaño de partículas de carbón activado.

Se evaluó la relación absorbancia - tiempo de los dos lechos de adsorción, observando similares relaciones a diferentes caudales.

Se determinó la eficiencia de decoloración a diferentes caudales, siendo el carbón activado comercial el más eficiente.

Se determinó la influencia de los parámetros de operación en la decoloración de aguas con azul de metileno, evidenciando que tanto el caudal como el tipo de carbón activado son parámetros determinantes que influyen en la operación de adsorción, encontrándose que, a caudales bajos, la eficiencia de decoloración se mantiene elevada durante un periodo más prolongado, mientras que, a caudales más altos, la eficiencia decrece más rápido.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

Implementar sistemas de monitoreo en tiempo real en los lechos de adsorción para un control más preciso del proceso recomendando su uso a investigadores, industrias textiles y plantas de tratamiento de aguas residuales.

Investigar métodos de regeneración y reutilización de carbones activados, especialmente aquellos que muestran una menor rapidez en la saturación.

Diseñar columnas modulares ajustables que permitan adaptarse a diferentes caudales y tipos de contaminantes, reduciendo la inversión inicial.

Plantear el uso de filtros de adsorción por carbón activado de coco en industrias textiles y plantas de tratamiento de aguas residuales.

Considerar la influencia de la temperatura en el proceso de adsorción.

Analizar el efecto de parámetros como el tamaño de partículas, pH, altura del lecho fijo y temperatura adicionales en la eficiencia de adsorción.

VII. REFERENCIAS

- Alania Trinidad, Y. (2021). Producción de carbón activado a partir de residuos de cajonerías. Tesis de grado. Universidad Nacional Agraria de la Selva. <https://hdl.handle.net/20.500.14292/2036>
- Anjaneyulu Y., Sreedhara-Chary N. y Suman-Raj S., (2005). Decoloración de efluentes industriales: métodos disponibles y tecnologías emergentes – a review. *Rev. Environ. Sci. Technol.*, 4, 245–273.
- Bansal, R. C., & Goyal, M. (2005). *Activated Carbon Adsorption*. CRC Press.
- Cárdenas Mendoza, T. J., Quinto Sánchez, M., Hermoza Guerra, E. G., & Uribe Valenzuela, C. L. (2023). Decoloración de efluentes textiles que contienen colorantes reactivos mediante el método de electro-oxidación con electrodos de titanio. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 89(3), 227-239.
- Carreño Espíndola, Y. N., & Jaimes Padilla, M. E. (2020). Diseño preliminar de una unidad piloto de adsorción en continuo [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio UIS.
- Castro P., & Durán H. (2014). Degradación y decoloración de agua contaminada con colorantes textiles mediante procesos de oxidación avanzada. *Revista Tecnología en Marcha*, 27(2), pág-40.
- Chaparro, C. V., Cabanzo, R., & Ospino, E. M. (2014). Estudio de la adsorción de azul de metileno sobre óxido de grafeno. *Revista Colombiana de Materiales*, (5), 131-139.
- Condor Mena, J. S., & Maza Parrilla, D. (2020). Remoción de plomo para mejorar el agua de Mórrope utilizando carbón activado del endocarpio de aceituna y cáscara de coco.
- Condori-Ojeda, P. (2020). Niveles de investigación.
- Creswell, J. W. (2014). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (4th ed.). SAGE Publications.
- Crini, G. (2006). Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review. *Bioresource Technology*, 97(9), 1061-1085. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.05.001>
- Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., & Tchobanoglous, G. (2012). *MWH's Water Treatment: Principles and Design* (3rd ed.). Wiley.
- D. Cuevas y M. Garzón. (2009). Tratamiento de aguas residuales que contienen colorantes utilizados en la industria textil mediante un proceso combinado de oxidación avanzada y un proceso biológico. Accessed: Abril. 15, 2024.

- Dias, J. M., et al. (2007). Waste materials for activated carbon preparation and its use in aqueous-phase treatment: A review. *Journal of Environmental Management*, 85(4), 833-846. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.07.031>
- Ebrahim, S., y Mustafa, Y. (2024). Utilización del modelo Thomas para predecir las curvas de desglose para la adsorción y el intercambio iónico. *Journal of Engineering*. <https://doi.org/10.31026/j.eng.2010.04.34>
- Estrada Aroca, A. L. (2023). Estudio de la adsorción de azul de metileno mediante el (*Schoenoplectus californicus*) a través de una columna de lecho fijo (Master's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial. Maestría en Química).
- Fagbayigbo, B., Opeolu, B. y Fatoki, O. (2020). Adsorción de ácido perfluorooctanoico (PFOA) y sulfonato de perfluorooctano (PFOS) del agua utilizando biomasa de hojas (*Vitis vinifera*) en un estudio de columna de lecho fijo. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 18, 221-233. <https://doi.org/10.1007/s40201-020-00456-1>
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2-10. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>
- Garg, V. K., Amita, M., Kumar, R., & Gupta, R. (2004). Basic dye (methylene blue) removal from simulated wastewater by adsorption using Indian Rosewood sawdust: a timber industry waste. *Dyes and Pigments*, 63(3), 243-250. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2004.03.005>
- Gelagutashvili, E., Bagdavadze, N., & Rcheulishvili, A. (2017). Biosorption of Cr (III), Cr (VI), Cu (II) ions by intact cells of *Spirulina platensis*. arXiv preprint *arXiv:1706.05307*
- Ghosh, S., Chatterjee, P., & Mandal, P. (2021). Coconut (*Cocos nucifera* L.): A comprehensive review on value added products and their applications. *Food Bioscience*, 40, 100891. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100891>
- Gómez, F., & Menéndez, J. A. (2023). Adsorción de azul de metileno en medio acuoso utilizando carbón activado derivado del endocarpo de coco. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 22(1), 108-120.
- Guo, J., & Lua, A. C. (2000). Preparation and characterization of adsorbents from oil-palm fruit solid wastes. *Journal of Oil Palm Research*, 76(12), 1089-1098. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(99\)00275-7](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(99)00275-7)
- Gupta, V. K., & Suhas. (2009). Application of low-cost adsorbents for dye removal – A review. *Journal of Environmental Management*, 90(8), 2313-2342. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.017>

- Hao O.J., Kim H. y Chang P.C., 2000. Decolorization of wastewater. *Crit. Rev. Env. Sci. Technol.*, 30, 449–505.
- Heidarinejad, Z., et al. (2020). Methods for preparation and activation of activated carbon: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 18(2), 393–415. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00955-0>
- Heredia, A. A., Landauro, C. V., & Nowak, H. (2018). Proceso de decoloración de los efluentes del teñido de algodón mediante carbón activado en una columna empacada.
- Hernández, J., Reyna, L., Ortiz, E., & Rojas, S. (s/f). *Isoterma de Adsorción de Langmuir*. Monterrey: Universitat de València.
- Ioannidou, O., & Zabaniotou, A. (2007). Agricultural residues as precursors for activated carbon production—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(9), 1966-2005. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.03.013>
- Kuhad R.C., Sood N., Tripathi K.K., Singh A. y Ward O.P., (2004). Developments in microbial methods for the treatment of dye effluents. *Adv. Appl. Microbiol.*, 56, 185-213.
- Kumar, R., Balachandran, et al. (2020). A comprehensive review on the application of activated carbon derived from coconut shell for the removal of heavy metals and dyes. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(4), 447-464. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06748-4>
- Kunz, A., Peralta-Zamora, P., de Moraes, S. G., & Durán, N. (2002). Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. *Química Nova*, 25(1), 78-82. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422002000100014>
- López R., et al (2021). Adsorption properties of activated carbons from coconut shell: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105820. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105820>
- Luna, D., González, A., Gordon, M., & Martín, N. (2007). Obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco.
- Manjunath, S., & Kumar, M. (2020). Eliminación simultánea de antibióticos y nutrientes mediante una columna de carbón activado de *Prosopis juliflora*: evaluación del rendimiento, efecto de los parámetros operativos y modelado innovador. *Chemosphere*, 262, 127820. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127820>
- Marsh, H., & Rodríguez-Reinoso, F. (2006). *Activated Carbon*. Elsevier.
- Martínez-Santa María, C., & Fernández Yuste, J. A. (2006). Enfoques teóricos para definir el caudal ambiental. *Ingeniería Hidráulica en México*, 21(2), 67-78.

- Mejía, L. D., & Jaimes, S. C. (2021). Estudio del proceso de adsorción en columna con carbón activado para la disminución de la concentración de barbaloina en *Aloe barbadensis* Miller [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio UIS.
- Meléndez, M. H., & Paiz, F. R. (2021). Diseño de un sistema de columnas de adsorción con carbón activado para el tratamiento de aguas naturales contaminadas con arsénico [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua]. Repositorio UNAN.
- Melgarejo Martínez, M. C. (2021). Comportamiento de la bioadsorción del colorante azul brillante FCF, con la cascarilla de arroz y cáscara de piña, frente al carbón activado utilizado en el tratamiento de aguas residuales en Colombia.
- Moghadam, N. B., Alavi, S. H., & Badrzadeh, M. (2020). Coconut (*Cocos nucifera* L.) and its byproducts: A review of their uses and benefits. *Journal of Food Science and Technology*, 57(1), 123-135. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-04073-1>
- Montgomery, D. C. (2003). Diseños experimentales ¿qué son y cómo se utilizan en las ciencias acuáticas?.
- Mora Cirilo, R. R. (2020). Adsorción de plomo (II) con carbón activado a partir de semillas de eucalipto [Tesis, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión]. Repositorio UNJFSC.
- Moreno, J., et al. (2019). Tiempos de ruptura y regeneración en una torre de adsorción empacada con SiO. *Revista Tecnocientífica URU*, (17), 59-69.
- Mousavi, S., Shahbazi, D., Mahmoudi, A. y Darvishi, P. (2021). Eliminación de azul de metileno utilizando carbón activado preparado a partir de desechos de madera de uva: análisis y modelado del proceso de adsorción. *Revista de investigación sobre la calidad del agua*. <https://doi.org/10.2166/wqrj.2021.015>
- Mustafa, Y. A., & Ebrahim, S. E. (2010). Utilization of Thomas model to predict the breakthrough curves for adsorption and ion exchange. *J. Eng*, 4(16), 6206-6223.
- Ortega, G. C., et al. (2013). Adsorción por lote y en una columna de lecho fijo del colorante B39 sobre carbón activado granular. *Prospectiva*, 11(1), 66-75.
- Parimelazhagan, V., Jeppu, G., & Rampal, N. (2021). Continuous fixed-bed column studies on congo red dye adsorption-desorption using free and immobilized *Nelumbo nucifera* leaf adsorbent. *Polymers*, 14(1), 54. <https://doi.org/10.3390/polym14010054>
- Plaza Recobert, M. (2015). Carbón activado evaluación de nuevos precursores y del proceso de activación con dióxido de carbono [Tesis doctoral, Universidad de Alicante]. Repositorio Institucional de la Universidad de Alicante.

- Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R., & Nigam, P. (2001). Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresource Technology*, 77(3), 247-255. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00080-8](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00080-8)
- Ruthven, D. M. (1984). *Principles of adsorption and adsorption processes*. Wiley.
- Santillán Gutierrez, K. M. (2020). Eficiencia del carbón activado obtenido del endocarpo de coco (*Cocos nucifera*), para la reducción de color y turbiedad en el agua de escorrentía del sector San Lorenzo-Moyobamba 2018. <https://tesis.unsm.edu.pe/handle/11458/3942>
- SERNANP. (2019). Parque nacional Tingo Maria. Perú. (<https://www.gob.pe/institucion/sernanp/informes-publicaciones/1949442-parque-nacional-tingo-maria>)
- Sevillano, A. S., & Torres, P. B. (2013). Obtención de Carbón Activado a Partir de Madera (Estudio de Prefactibilidad). Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza.
- Shrestha, A., Wang, Z., & Li, H. (2021). Preparation and characterization of activated carbon from coconut shell for adsorption of organic pollutants: A review. *Journal of Cleaner Production*, 283, 124597. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124597>
- Silva, Ch. (2021). efecto del biocarbón obtenido a partir de biomasa residual agrícola en la inmovilización de cadmio en el suelo en fase de laboratorio. Tesis de Pregrado. Universidad Nacional Agraria de la selva.
- Silva, M., et al. (2020). Fibras de carbón activado con H₃PO₄ de gran área superficial a partir de fibras de pseudotallo de banano: estudios de adsorción del colorante azul de metileno en sistemas de lecho fijo y por lotes. *Journal of Molecular Liquids*, 114771.
- Sosa Pérez, R. (2015). Estudio de navegabilidad del río Meta entre Puerto López (K804) y Puerto Carreño (K0). [Trabajo de Fin de Grado, Universitat Politècnica de Catalunya].
- Taquieteu, I., Dzoujo, H., Shikuku, V., Banenzoué, C., & Dina, D. (2023). Adsorción en lecho fijo de un colorante azoico (naranja de metilo) sobre carbones activados regenerados química y térmicamente. *Journal of Chemistry*. <https://doi.org/10.1155/2023/6677710>
- Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., & Sing, K. S. W. (2015). Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 87(9-10), 1051-1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>

- Valencia Ríos, J. S., & Castellar Ortega, G. C. (2013). Predicción de las curvas de ruptura para la remoción de plomo (II) en disolución acuosa sobre carbón activado en una columna empacada. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (66), 141-158.
- Valenzuela-Padilla, Arturo Armando, & Torres-Pérez, Jonatan. (2020). Decoloración de colorantes azóicos (A5 y R40) con carbón activado de cáscara de nuez.
- Valle, E. G. Y. (2009). Metodología de la investigación. Recuperado de: <https://doi.org/10.20937/rica.2018.34.04.05>, (9). Ñaupas, H. M. (2013). Metodología de la investigación científica y elaboración de tesis. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Vera et al. (2018). Modelado en columna de lecho fijo para la bioadsorción de cd_2^+ y pb_2^+ con cáscara de cacao. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 34(4), 611-620. <https://doi.org/10.20937/rica.2018.34.04.05>
- Vera, M., Astudillo, S., & Juela, D. M. (2020). Estudio experimental y simulación dinámica de la biosorción de metales pesados utilizando cáscara de cacao en columna de lecho.

VIII. ANEXOS



Figura 18. Azul de metileno

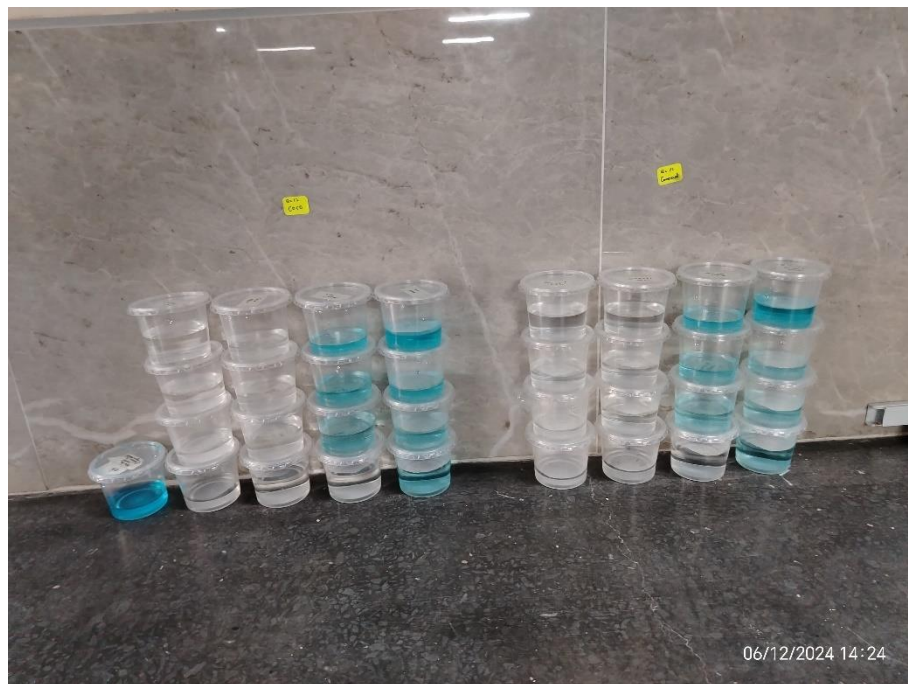


Figura 19. Muestras de experimento de CC y CAC a diferentes tiempos



Figura 20. Sistema de adsorción por carbón activado en lecho fijo

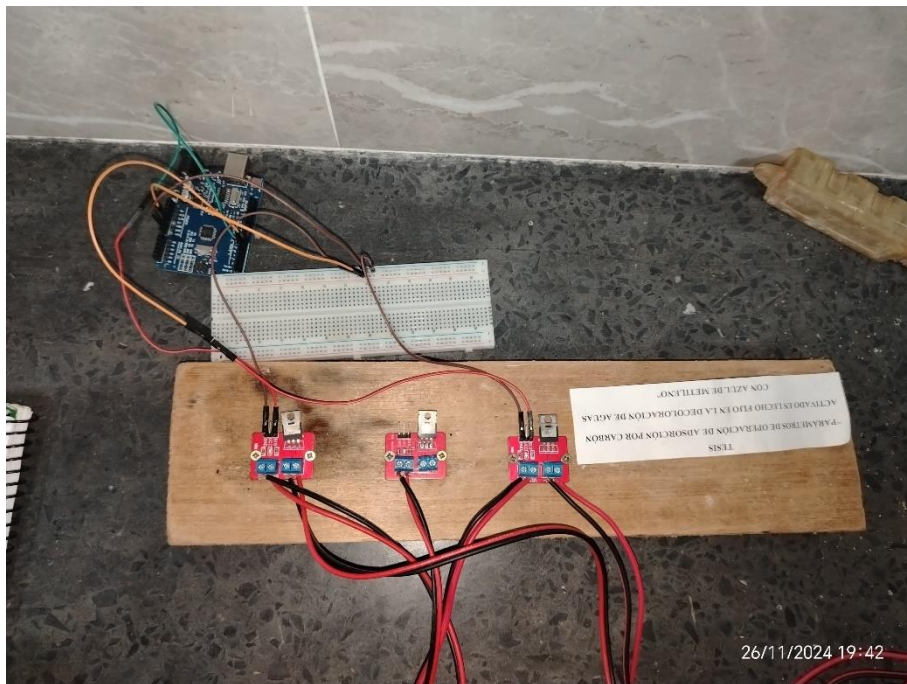


Figura 21. Sistema eléctrico de Arduino

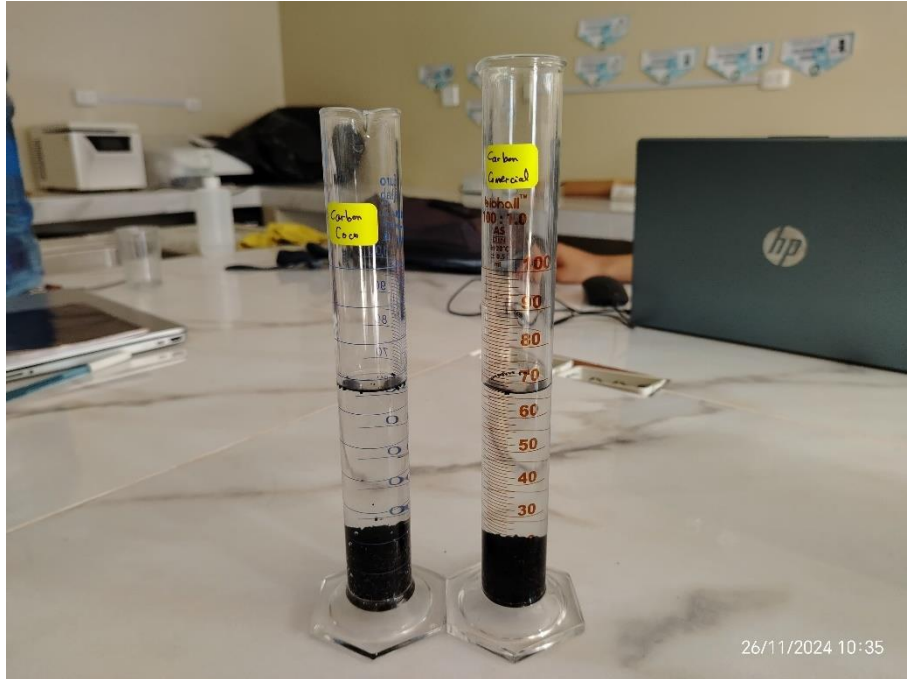


Figura 22. Toma de muestra para hallar densidad del carbón activado



Figura 23. Preparación de la solución contaminada



Figura 24. Medición de absorbancia



Figura 25. Medición de pH, salinidad y CE



Figura 26. Columna de lecho fijo saturado

```
// Definir los pines digitales
const int pin6 = 6;
const int pin7 = 7;
// Definir los tiempos en milisegundos
const unsigned long tiempoPin6 = 13586; // 12 ml/min
const unsigned long tiempoPin7 = 13586; // 12 ml/min
const unsigned long cicloTotal = 60000; // 60 segundos
void setup()
  // Configurar los pines como salida
  pinMode(pin6, OUTPUT);
  pinMode(pin7, OUTPUT);
  // Asegurar que ambos pines estén apagados inicialmente
  digitalWrite(pin6, LOW);
  digitalWrite(pin7, LOW);
void loop() {
  // Obtener el tiempo de inicio del ciclo
  unsigned long inicioCiclo = millis();
  // Encender ambos pines al inicio
  digitalWrite(pin6, HIGH);
  digitalWrite(pin7, HIGH);
  // Esperar 5 segundos y apagar el pin 6
  delay(tiempoPin6);
  digitalWrite(pin6, LOW);
  // Esperar otros 5 segundos (hasta completar los 10 segundos) y apagar el pin 7
  delay(tiempoPin7 - tiempoPin6); // 10 - 5 = 5 segundos más
  digitalWrite(pin7, LOW);
  // Esperar el tiempo restante del ciclo hasta completar 60 segundos
  while (millis() - inicioCiclo < cicloTotal) {
    // Mantener el programa en espera hasta que se cumpla el ciclo
```

Figura 27. Código Arduino para caudal

Tabla 13. Resultados de operación de adsorción por CC y CAC de repetición 1 a Q = 12 ml/min

Tiempo (h)	CC		CAC	
	Absorbancia (A)	Concentración (mg/L)	Absorbancia (A)	Concentración (mg/L)
0.5	0.004	6.5508	0.002	3.2754
1	0.008	13.1016	0.007	11.4639
7	0.009	14.7393	0.012	19.6524
10	0.017	27.8409	0.016	26.2032
15	0.019	31.1163	0.017	27.8409
26	0.021	34.3917	0.019	31.1163
47	0.033	54.0441	0.041	67.1457
84	0.086	140.8422	0.053	86.7981
116	0.11	180.1471	0.106	173.5963
136	0.111	181.7848	0.114	186.6979
140	0.112	183.4225	0.117	191.6110
142	0.159	260.3944	0.125	204.7126
146	0.208	340.6417	0.163	266.9452
148	0.243	397.9612	0.238	389.7727
150	0.361	591.2099	0.335	548.6297

Tabla 14. Resultados de operación de adsorción por CC y CAC de repetición 1 a Q = 36 ml/min

Tiempo (h)	CC		CAC	
	Absorbancia (A)	Concentración (mg/L)	Absorbancia (A)	Concentración (mg/L)
0.5	0.003	4.9131	0.002	3.2754
1	0.003	4.9131	0.004	6.5508
7	0.004	6.5508	0.005	8.1885
9	0.007	11.4639	0.005	8.1885
14	0.008	13.1016	0.006	9.8262
16	0.008	13.1016	0.006	9.8262
31	0.009	14.7393	0.008	13.1016
37	0.016	26.2032	0.008	13.1016
39	0.016	26.2032	0.014	22.9278
43	0.024	39.3048	0.03	49.1310
45	0.075	122.8275	0.08	131.0160
47	0.134	219.4519	0.15	245.6551
49	0.136	222.7273	0.165	270.2206
53	0.234	383.2219	0.237	388.1350
69	0.37	605.9492	0.381	623.9639

Tabla 15. Resultados de operación de adsorción por CC y CAC de repetición 2 a Q = 12 ml/min

Tiempo (h)	CC		CAC	
	Absorbancia (A)	Concentración (mg/L)	Absorbancia (A)	Concentración (mg/L)
0.5	0.005	8.1885	0.003	4.9131
1	0.01	16.3770	0.009	14.7393
7	0.011	18.0147	0.014	22.9278
10	0.019	31.1163	0.018	29.4786
15	0.02	32.7540	0.019	31.1163
26	0.022	36.0294	0.02	32.7540
47	0.035	57.3195	0.043	70.4211
84	0.089	145.7553	0.055	90.0735
116	0.113	185.0602	0.108	176.8717
136	0.113	185.0602	0.116	189.9733
140	0.114	186.6979	0.119	194.8864
142	0.161	263.6698	0.127	207.9880
146	0.211	345.5548	0.165	270.2206
148	0.246	402.8743	0.24	393.0481
150	0.364	596.1230	0.338	553.5428

Tabla 16. Resultados de operación de adsorción por CC y CAC de repetición 2 a Q = 36 ml/min

Tiempo (h)	CC		CAC	
	Absorbancia (A)	Concentración (mg/L)	Absorbancia (A)	Concentración (mg/L)
0.5	0.002	3.2754	0.001	1.6377
1	0.002	3.2754	0.003	4.9131
7	0.003	4.9131	0.004	6.5508
9	0.005	8.1885	0.004	6.5508
14	0.007	11.4639	0.005	8.1885
16	0.007	11.4639	0.005	8.1885
31	0.008	13.1016	0.006	9.8262
37	0.012	19.6524	0.006	9.8262
39	0.013	21.2901	0.011	18.0147
43	0.018	29.4786	0.025	40.9425
45	0.055	90.0735	0.06	98.2620
47	0.104	170.3209	0.125	204.7126
49	0.106	173.5963	0.14	229.2781
53	0.184	301.3369	0.212	347.1925
69	0.31	507.6872	0.325	532.2527

Tabla 17. Resultados de operación de adsorción por CC y CAC de repetición 3 a Q = 12 ml/min

Tiempo (h)	CC		CAC	
	Absorbancia (A)	Concentración (mg/L)	Absorbancia (A)	Concentración (mg/L)
0.5	0.004	6.5508	0.002	3.2754
1	0.01	16.3770	0.007	11.4639
7	0.008	13.1016	0.015	24.5655
10	0.013	21.2901	0.02	32.7540
15	0.022	36.0294	0.02	32.7540
26	0.019	31.1163	0.02	32.7540
47	0.032	52.4064	0.045	73.6965
84	0.078	127.7406	0.064	104.8128
116	0.115	188.3356	0.113	185.0602
136	0.116	189.9733	0.121	198.1618
140	0.12	196.5241	0.121	198.1618
142	0.167	273.4960	0.129	211.2634
146	0.222	363.5695	0.17	278.4091
148	0.252	412.7005	0.236	386.4973
150	0.367	601.0361	0.368	602.6738

Tabla 18. Resultados de operación de adsorción por CC y CAC de repetición 3 a Q = 36 ml/min

Tiempo (h)	CC		CAC	
	Absorbancia (A)	Concentración (mg/L)	Absorbancia (A)	Concentración (mg/L)
0.5	0.004	6.5508	0.002	3.2754
1	0.004	6.5508	0.003	4.9131
7	0.004	6.5508	0.005	8.1885
9	0.007	11.4639	0.005	8.1885
14	0.008	13.1016	0.006	9.8262
16	0.008	13.1016	0.006	9.8262
31	0.011	18.0147	0.008	13.1016
37	0.016	26.2032	0.012	19.6524
39	0.016	26.2032	0.014	22.9278
43	0.02	32.7540	0.035	57.3195
45	0.082	134.2914	0.078	127.7406
47	0.147	240.7420	0.145	237.4666
49	0.15	245.6551	0.157	257.1190
53	0.244	399.5989	0.246	402.8743
69	0.353	578.1083	0.367	601.0361