

**Remoción de colorantes en aguas residuales de la industria textil por medio de material
bioadsorbente proveniente de concha de ostras**

Carolanne Coronado Herrera

Jean Carlos Rhenals Navarro



Corporación Universidad de la Costa

Departamento de Civil y Ambiental

Programa de Ingeniería Ambiental

Barranquilla – Atlántico

2022

**Remoción de colorantes en aguas residuales de la industria textil por medio de material
bioadsorbente proveniente de concha de ostras**

Carolanne Coronado Herrera

Jean Carlos Rhenals Navarro

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de
Ingeniero Ambiental**

Director:

Andrea Liliana Morenos Ríos

Magister en Ingeniería Química

Codirector:

Leandro Gómez Plata

Magister en Ciencias – Química

Corporación Universidad de la Costa

Departamento de Civil y Ambiental

Programa de Ingeniería Ambiental

Barranquilla – Atlántico

2022

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Jurado

Barranquilla, 6 de Diciembre de 2022.

Dedicatoria

A Dios primeramente por guiarme y estar conmigo en cada paso que doy, por darme sabiduría y paciencia para cumplir la meta de elaborar mi proyecto de grado. A mis padres Yadirra Esther Herrera Campo y Edgardo González Campo por creer en mí y estar incondicionalmente en todo tiempo ayudándome a cumplir mis sueños. A una persona especial, Alejandro Carvajal mi gran amor, por apoyarme y darme ánimos cuando sentía no poder lograrlo.

A nuestros tutores, Andrea Moreno Ríos y Leandro Gómez Plata, por aportar sus conocimientos y direccionarnos en este proceso de aprendizaje, a mi compañero de investigación Jean Carlos Rhenals Navarro, quien me ha acompañado en mi carrera y me ha brindado su apoyo incondicional para la elaboración del proyecto.

Por último, a nuestro jurado evaluador, Andrea Yanes, Rubén Cantero y Ximena Gastelbondo, por instruirnos, brindarnos sus conocimientos, corregirnos y apoyarnos, además de ser fuente de inspiración como investigadores para la ejecución de este proyecto.

Carolanne Coronado Herrera

Dedicatoria

Agradezco primeramente a Dios por la fortaleza y bendiciones que me ha regalado, de igual manera a mis padres que forjaron confianza y enseñanza en mí, para no darme por vencido y forjar esa inspiración para seguir adelante así poder cumplir el sueño de ser en un gran profesional, no fue fácil llegar a donde estoy, por eso quiero ser ejemplo a seguir también para mi hermana que día a día me ve crecer como persona y gracias a ella quiero cumplir cada una de mis metas, para que pueda seguir los pasos correctos, son mis motores para seguir adelante con disciplina y dedicación para lograr mis objetivos.

A mi compañera de tesis, Carolanne Coronado por la confianza y compromiso que demostró en el transcurso del proceso, una excelente persona y una gran compañera de trabajo, que ayudó en la realización de investigaciones y aportes importantes para cumplir con nuestro sueño de tener una excelente investigación, teniendo presente que dos cabezas piensan mejor que una.

Por último, pero no menos importante, a nuestros tutores, por la dedicación y el tiempo que invirtieron. Vivir este proceso día a día con ellos fue una experiencia gratificante y llena de enseñanzas que siempre quedarán en nuestros corazones, siempre enfocados por el amor a la investigación que nos llenó de orgullo y siempre dirigiendo el barco hacia el camino del aprendizaje, con el apoyo de ellos nos reforzamos de la mejor manera para lograr ser grandes profesionales en busca de innovación.

Jean Carlos Rhenals Navarro

Agradecimientos

Agradecemos primeramente a Dios, por estar presente, guiarnos y ayudarnos a cumplir nuestro sueño de ser profesionales. A nuestros padres por todo su apoyo incondicional, a los docentes y tutores Andrea Moreno Ríos y Leandro Gómez Plata por sus enseñanzas y apoyo en cada etapa del proceso.

Agradecemos al cuerpo de docentes de la Universidad de la Costa, por compartir con nosotros su conocimiento, apoyarnos en todo momento y contribuir con nuestra formación académica.

Por último, agradecemos a la Universidad de la Costa, por brindarnos las instalaciones y recursos necesarios para llevar a cabo nuestra investigación, principalmente el Centro de Investigaciones en Tecnologías Ambientales (CITA).

Carolanne Coronado Herrera y Jean Carlos Rhenals Navarro

Contenido

Introducción	15
1. Planteamiento del problema.....	17
2. Justificación	25
3. Objetivos.....	27
3.1 General	27
3.2 Específicos	27
4. Antecedentes	28
5. Marco teórico	32
5.1 Contaminación de los cuerpos de agua por aguas residuales textiles	32
5.2 Colorantes textiles	33
5.2.1 Colorante Verde Brillante.....	37
5.2.2 Tratamiento de colorantes textiles	38
5.2.2.1 Remediación física y química	38
5.3 Adsorción	39
5.3.1 Factores que influyen en la adsorción.....	40
5.3.1.1 Tamaño de partícula	40
5.3.1.2 Concentración inicial de colorante	40
5.3.1.3 Cantidad de adsorbente	40
5.3.1.4 Tiempo de contacto	41
5.3.1.5 pH.....	41

5.3.1.6	Temperatura	42
5.3.2	Técnicas de caracterización de materiales adsorbentes	43
5.3.2.1	Punto de carga cero (PZC).....	43
5.3.2.2	Análisis de área superficial y porosidad (BET).....	43
5.3.2.3	Difracción de rayos X (DRX o XRD).....	45
5.3.2.4	Espectrometría infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR).....	45
5.3.2.5	Análisis Termogravimétrico (TGA).....	46
5.3.3	Materiales bioadsorbentes.....	47
5.4	Estudio Cinético	49
5.4.1	Modelos cinéticos empleados	49
5.4.1.1	Pseudo primer orden	49
5.4.1.2	Pseudo-segundo orden	50
5.4.1.3	Modelo Elovich.....	50
5.4.1.4	Modelo de Intrapartícula	51
6.	Diseño metodológico	52
6.1	Obtención de material	52
6.2	Fase I: preparación del material bioadsorbente	52
6.3	Fase II: Caracterización del material bioadsorbente	54
6.3.1	Punto de carga cero (PZC).....	55
6.3.2	Análisis BET.....	55
6.3.3	Análisis DRX.....	56

6.3.4	Análisis FTIR.....	56
6.3.5	Análisis TGA	56
6.4	Fase III: Cinética de adsorción.....	57
6.4.1	Evaluación de la remoción de los colorantes.....	57
6.4.2	Pruebas realizadas en el laboratorio - cinética de adsorción.....	58
7.	Resultados y discusión	60
7.1	Caracterización del material.....	60
7.1.1	Punto de carga cero (PZC).....	61
7.1.2	Análisis BET.....	62
7.1.3	Análisis DRX.....	65
7.1.4	Análisis FTIR	67
7.1.5	Análisis TGA.....	68
7.2	Curva de calibración	70
7.3	Análisis de determinación de pH	71
7.4	Variación de concentración inicial de colorante	72
7.5	Variación de dosis de adsorbente	74
7.6	Cinética de adsorción	76
8.	Conclusiones	80
9.	Recomendaciones	82
10.	Referencias.....	83
Anexos	101	

Anexo A. Imágenes experimentales 101

Lista de tablas y figuras**Tablas**

Tabla 1	Métodos biológicos de eliminación de tintes.....	19
Tabla 2	Métodos Químicos de eliminación de tintes.....	21
Tabla 3	Métodos físicos de eliminación de tintes.....	22
Tabla 4	Clasificación de tintes según su aplicación, sustratos principales y tipos químicos...	33
Tabla 5	Clasificación de colorantes por estructura química.....	35
Tabla 6	Grado de fijación de colorantes.....	37
Tabla 7	Condiciones de diseño experimental programado.....	59
Tabla 8	Informe tabular isoterma de adsorción de la muestra de roca coquina.....	64
Tabla 9	Informe de datos área superficial de la muestra de roca coquina.....	65
Tabla 10	Banda de adsorción de la muestra no modificada.....	68
Tabla 11	Parámetros de ajuste no lineal de Pseudo-primer orden y Pseudo-segundo orden.....	76
Tabla 12	Parámetros de ajuste no lineal modelo Intra-partícula.....	77
Tabla 13	Parámetros de ajuste no lineal modelo Elovich.....	77

Figuras

Figura 1	Estructura del colorante Verde Brillante	38
Figura 2	Clasificación de isotermas de adsorción según IUPAC.....	44
Figura 3	Diagrama de flujo de Fase I: Preparación de material bioadsorbente	53
Figura 4	Diagrama de flujo de Fase II: Caracterización del material	54
Figura 5	Diagrama de flujo de Fase III: Cinética de adsorción	58
Figura 6	Porcentaje de remoción de material fino y grueso a diferentes temperaturas.....	60
Figura 7	Punto de carga cero del material bioadsorbente	62
Figura 8	Isoterma de adsorción de la Roca Coquina a 120 °C sin modificar	63
Figura 9	Difractograma de la muestra de Roca Coquina sin modificación térmica.....	66
Figura 10	Patrón de líneas DRX	67
Figura 11	Espectro FTIR de la muestra de Roca Coquina sin modificación térmica	67
Figura 12	Termograma de la muestra de Roca Coquina sin modificación térmica	69
Figura 13	Curva de calibración de verde brillante	70
Figura 14	Curva de calibración para selección de longitud de onda.....	71
Figura 15	Capacidad de adsorción en función del pH.....	71
Figura 16	Remoción de colorante en función del pH.....	72
Figura 17	Porcentaje de remoción según la variación de concentración de colorante	73
Figura 18	Capacidad de adsorción según la variación de concentración de colorante	74
Figura 19	Porcentaje de remoción según la variación de dosis de adsorbente	75

Figura 20 Capacidad de adsorción según la variación de dosis de adsorbente.....	75
Figura 21 Ajuste no lineal de modelos cinéticos a una concentración de 25 mg/L.....	78
Figura 22 Ajuste no lineal de modelos cinéticos a una concentración de 50 mg/L.....	79
Figura 23 Ajuste no lineal de modelos cinéticos a una concentración de 75 mg/L.....	79
Figura 24 Preparación de material bioadsorbente.....	101
Figura 25 Simulación de agua residual textil con colorante verde brillante.....	101
Figura 26 Montaje realizado en el laboratorio de cinética de adsorción	102

Resumen

En el presente trabajo se realizó la evaluación de un material proveniente de conchas de ostra denominado roca coralina: (Coquina), como bioadsorbente para la remoción de colorante en aguas residuales de la industria textil. Dicho material fue llevado a diferentes diámetros de partícula (300 μm y menor a 300 μm) y posteriormente modificado térmicamente utilizando un secado a 120°C y calcinación a temperaturas entre 200°C y 800 °C, para luego ser analizada a través de diferentes técnicas de caracterización. Para evaluar la capacidad de remoción, así como la cinética de adsorción del bioadsorbente, se realizaron montajes en el laboratorio utilizando el colorante verde brillante. Para lo anterior, se evaluaron concentraciones de colorante de 25, 50 y 75 mg/L, pH entre 2 y 12 y dosis de material bioadsorbente entre 0.2 a 0.6 g/L, con agitación constante. De cada experimento se tomaron alícuotas a diferentes intervalos de tiempo a las cuales se les realizó medición de la absorbancia a una longitud de onda de 640 nm para la posterior determinación de la concentración de colorante en cada instante de tiempo y determinación del porcentaje y capacidad de remoción. Posteriormente se realizó un barrido por diversos tipos de modelos cinéticos con la finalidad de seleccionar el que presentara un mayor ajuste a los resultados experimentales, siendo seleccionado el modelo de Pseudo segundo orden. Finalmente se seleccionó como mejor material la roca coquina a temperatura de 120°C y a un diámetro mayor a 300 μm , con la cual se obtuvo un porcentaje de remoción del 90% en un tiempo determinado ente 15 y 20 minutos a pH 7. Lo anterior permite concluir que la roca coquina es un material bioadsorbente viable y de fácil acceso para la remoción de colorante en agua residual textil.

Palabras clave: bioadsorbente, colorante, conchas de ostras, roca coquina, remoción

Abstract

In the present work, the evaluation of a material from oyster shells called coral rock was carried out: (Coquina), as a bioadsorbent for the removal of dye in wastewater from the textile industry. Said material was taken to different particle diameters (300 μm and less than 300 μm) and subsequently thermally modified using drying at 120°C and calcination at temperatures between 200°C and 800°C, to later be analyzed through different characterization techniques. To evaluate the removal capacity, as well as the adsorption kinetics of the bioadsorbent, mountings were made in the laboratory using the brilliant green dye. For the above, dye concentrations of 25, 50 and 75 mg/L, pH between 2 and 12 and doses of bioadsorbent material between 0.2 and 0.6 g/L, with constant agitation, were evaluated. Aliquots were taken from each experiment at different time intervals to which absorbance measurement was performed at a wavelength of 640 nm for the subsequent determination of the dye concentration at each instant of time and determination of the percentage and capacity of removal. Subsequently, a sweep was carried out through various types of kinetic models in order to select the one that presented a better fit to the experimental results, the Pseudo second order model being selected. Finally, the coquina rock was selected as the best material at a temperature of 120°C and with a diameter greater than 300 μm , with which a removal percentage of 90% was obtained in a given time between 15 and 20 minutes at pH 7. The above allows to conclude that coquina rock is a viable and easily accessible bioadsorbent material for dye removal in textile wastewater.

Keywords: bioadsorbent, colorant, oyster shells, coquina rock, removal

Introducción

Las industrias textiles son grandes contribuyentes de la economía mundial de países en desarrollo, aportan el 5% del comercio textil total, el 5% de exportaciones totales, 120 millones de empleos y a su vez 2000 millones de valor de mercado. Sin embargo, generan gran cantidad de aguas residuales altamente contaminantes, las cuales contienen productos químicos tóxicos y su apariencia generalmente es oscura por los colorantes. Además de contaminar el medio ambiente, también representan un riesgo para la salud, dado que se pueden filtrar fácilmente en la cadena alimentaria a través de los animales, puesto que la mayoría de los tintes no se fijan por completo a las fibras y estas aguas residuales persisten por un largo tiempo en el medio ambiente, convirtiéndose en una amenaza para los seres vivos, el agua y el suelo (Kishor et al., 2022).

Se han utilizado diversos métodos para la remoción de colorantes en aguas residuales industriales textiles, entre estos la coagulación, floculación, fenton, fotofenton, ozonización, métodos electroquímicos, entre otros métodos existentes (Kishor et al., 2022). Sin embargo, la mayoría de ellos implican la utilización de productos químicos y pueden ser costosos, por lo cual se requieren alternativas que sean sostenibles y asequibles.

Con base a lo anterior, se ha propuesto la utilización de materiales bioadsorbentes, los cuales son de fácil acceso por ser considerados residuos. Un ejemplo de estos materiales es la concha de ostras, la cual representa un problema ambiental por su acumulación y generación de olores (Chen et al., 2018). Sin embargo, es rica en carbonato de calcio (CaCO_3), el cual es el componente principal que le permite funcionar como potencial adsorbente y esto se ha

comprobado empleando este material para la remoción de metales pesados, nutrientes como nitratos, nitritos, fosfatos y sulfatos (Díaz y Rodelo, 2019) y colorantes (Cruz, 2019).

Considerando lo anteriormente mencionado, se realizó una evaluación a un material proveniente de conchas de ostra (Roca Coralina Coquina) como material bioadsorbente para la remoción de colorante en aguas residuales de la industria textil. Para este fin, inicialmente se realizó modificación térmica del material a diferentes temperaturas y luego se evaluó su capacidad de adsorción mediante el uso de agua residual textil simulada con el colorante verde brillante. Así mismo, para analizar la cinética de adsorción y determinar las mejores condiciones de operación, se evaluó el efecto de la variación de la concentración inicial de colorante, pH y dosis de bioadsorbente. A su vez se evaluaron diferentes modelos cinéticos y se seleccionó el que presentó un mejor ajuste con respecto a los resultados experimentales.

1. Planteamiento del problema

La Tierra es un planeta compuesto en un 70% de agua; solo el 3% es agua dulce y solo el 0.06% está disponible sin problemas. La contaminación del agua por diversos productos químicos es un punto de gran preocupación porque innumerables compuestos inorgánicos y orgánicos pueden contaminar fuentes de aguas subterráneas y superficiales (Ahuja, 2021).

Una de las grandes afectaciones a la integridad de los acuíferos y cuerpos de agua en el planeta es causado por el cambio climático y el desarrollo urbano intensificado (Yang et al., 2022), esto contribuye a una reducción significativa a superficies hídricas no solo por captación para uso doméstico y procesos industriales, sino porque son receptores de vertimientos producto de todo tipo de actividades antropogénicas que cambian las propiedades fisicoquímicas del agua (Ergaieg et al., 2021) y por ende, impactan negativamente por un aumento de la contaminación.

Actualmente las industrias manufactureras toman gran relevancia por la transformación económica que afectó a varios países, que se vieron obligados a generar estrategias de resiliencia y supervivencia empresarial ya que las consecuencias económicas están reformando de manera exponencial según (Chourasiya et al., 2022). La industria textil dedicada a la fabricación de todo tipo fibras vinculado a la vestimenta está sujeta a cumplir con la demanda de producción textil a medida que la población aumenta por ello se buscan alternativas sostenibles para reducir su gran impacto ambiental.

La industria textil es el segundo mayor consumidor de agua en el mundo ya que para poder producir 1 kg de tejido se necesitan 200 L de agua (Okafor et al., 2021), Además la industria textil es uno de los principales causantes de contaminación en el mundo, cuando se trata de residuos líquidos según McFall (2020); por consiguiente las cantidades de vertimientos de esta industria manufacturera son de gran cantidad, llegando a alcanzar los millones de galones de residuos líquidos a los cuerpos de agua donde en su mayoría contienen tintes que son fabricados para ser resistentes por ello su tratamiento de remoción depende la característica del tinte que se utilice (Katheresan et al., 2018).

Dentro de las sustancias químicas contaminantes en los vertimientos de la industria textil, los tintes textiles son de gran importancia, debido a que son altamente tóxicos y pueden llegar a ser cancerígenos si no son tratados antes de hacer el vertimiento (Sharma, Dangi y Shukla, 2018). Además, pueden generar subproductos químicos también nocivos para los seres vivos y el ambiente si los vertimientos de las industrias textiles son directamente descargados a los cuerpos de agua. Por ello es relacionada la degradación ambiental como también enfermedades o contaminación a la fauna. El tinte puede llegar a generar este tipo de problemas por su naturaleza de ser xenobióticos y recalcitrantes (Lellis et al., 2019) lo que quiere decir que son sustancias que se pueden encontrar en organismos que no lo producen naturalmente y que son de difícil degradación, lo que cambia su composición fisicoquímica. La toxicidad aguda de los tintes textiles es producida normalmente por ingestión oral e inhalación y provocando irritaciones en los ojos y piel (Christie, 2007).

Debido al potencial efecto negativo de los tintes utilizados por la industria textil sobre los cuerpos de agua, se han desarrollado múltiples métodos de tratamiento dirigido a la reducción del impacto ambiental buscando un sistema de eliminación de tintes para las aguas residuales (Sarro et al., 2018). Hasta el momento se han clasificado en tres métodos de remoción que son: biológicos (Tabla 1), físicos (tabla 2) y químicos (Tabla 3). Dentro de los métodos biológicos destacan la adsorción por biomasa microbiana o la utilización de microalgas. Por otro lado, dentro de las alternativas fisicoquímicas implementadas se encuentra la adsorción, la coagulación/floculación y los procesos de oxidación avanzados, entre otros.

Tabla 1

Métodos biológicos de eliminación de tintes

Método	Descripción	Ventajas	Desventajas
Adsorción por microbios biomasa	Básicamente se compone de una mezcla de organismos vivos que son creados para la adsorción de tintes	Los colorantes que son seleccionados y tienen afinidad con la biomasa son altamente excepcionales para su degradación en poco tiempo	Este tipo de método no es tan efectivo para toda la variedad de los tintes
Degradación de algas	El método de algas es favorable para el crecimiento de este organismo ya que adsorben la partícula del tinte para su desarrollo	Es capaz de degradar el tinte al punto de decolorarlo lo que lo vuelve de bajo costo y amigable al ambiente	Este sistema no es muy estable y puede variar dependiendo la complejidad del tinte
Combinación aeróbica-anaeróbica (método convencional)	Son mezclas de lodo preparado para la	Logra decolorar la partícula del tinte de manera eficiente y con	No es capaz de eliminar el tinte por completo y su consecuencia de uso son la

	descomposición de moléculas de tintes.	alta variedad de tintes, es económico y sin formación de la capa de espuma	liberación de metano y sulfuro de hidrógeno como subproductos
Degradación de enzimas	Al extraer una enzima con ella descompone la molécula de algunos tintes poco complejas	Este método es económico y eficiente ya que logra degradar la partícula del tinte utilizando enzimas reutilizables	No se tiene una cantidad confiable de encimas necesarias para producción y remoción de los colorantes
Cultivos fúngicos	Este método es utilizado para la extracción de algunas moléculas de tintes que tengan relación con la descomposición del hongo para su crecimiento al igual que las algas	Este método puede degradar varios tipos de tintes al mismo tiempo	Se necesitan reactores grandes para poder tener una degradación del tinte completa lo que lo vuelve un método inestable
Cultivos microbianos como bacteriano mixto	Son bacterias analizadas y mezcladas con productos químicos para la eliminación de las partículas del tinte	Tiene una eliminación del tinte de manera rápida y efectiva	Es eficaz para un número limitado de tintes y se recomienda ser utilizado a gran escala por su alto costo

Nota: Adaptado de “Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review”, Por Katheresan et al., 2018, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(4), 4676–4697.

Tabla 2*Métodos Químicos de eliminación de tintes*

Método	Descripción	Ventajas	Desventajas
Proceso de oxidación avanzada	Es un proceso simultaneo de oxidación para la eliminación total de partículas de tinte	Es un buen método de eliminación ya que puede también eliminar materiales tóxicos y el tinte en condiciones inusuales	Es un método que se expande fácilmente y llega a crear subproductos que varían el pH
Destrucción electroquímica	Los ánodos no solubles en la electrocoagulación son utilizados para atacar a las moléculas del colorante	Pueden ser utilizadas en tintes que son solubles y no solubles lo que lo hace adecuado para análisis	Alto costo en gasto eléctrico es la eliminación menos efectiva a comparación de otros métodos.
Oxidación	Son sustancias oxidantes utilizadas para los efluentes de tintes descomponiéndolas en dióxido de carbono y agua	Eliminación completa del tinte ya que tiene una aplicación sencilla y en corto tiempo se tienen resultados	Es altamente costoso y es dependiente del pH y requiere un catalizador para una degradación eficiente
Fotoquímico	Reaccionan el fotón junto con la luz ultravioleta para poder eliminar el colorante en las aguas residuales	El método es práctico y eficaz para la degradación de tintes y sin producción de malos olores.	Es expansivo y forma muchos subproductos en las aguas residuales
Irradiación ultravioleta	Se utiliza la penetración de la luz ultravioleta para descomponer el colorante en aguas residuales	El método elimina malos olores y no produce lodos	Tiempo de tratamientos limitados y altamente consumidores de energía

Nota: Adaptado de “Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review”, Por Katheresan et al., 2018, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(4), 4676–4697.

Tabla 3*Métodos físicos de eliminación de tintes*

Método	Descripción	Ventajas	Desventajas
Adsorción	Son adsorbentes fabricados para tener una alta afinidad con las moléculas de los colorantes	Existen varios tipos de métodos de eliminación para la amplia gama de tintes lo que lo hace reutilizable	Algunos adsorbentes pueden llegar a ser costosos
Coagulación y floculación	Se utilizan agentes indicadores de coagulantes en aguas residuales de tintes para agrupar y separar las moléculas del tinte por filtración	Es un método utilizado para efluentes dispersos y adecuado para contenedores de azufre	Alta concentración de lodos y no se recomienda en fluentes ácidos, básicos o reactivos
Irradiación	Para degradar el tinte es utilizada la radiación en aguas residuales	Es eficaz y útil a escala de laboratorio	Este método requiere una cantidad necesaria de oxígeno disuelto
Osmosis inversa	Este método utiliza la presión para pasar por membranas muy delgadas para separar contaminantes del agua	Es útil para el ahorro de agua también contribuye a la producción de agua limpia	Tiene un alto costo de operación y se requiere de una alta presión

Nota: Adaptado de “Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review”, Por Katheresan et al., 2018, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(4), 4676–4697.

Existen casos exitosos en los que se han utilizado materiales bioadsorbentes para la remoción de tintes en aguas residuales, entre los cuales se encuentran bioadsorbentes derivados de desechos agrícolas, dado que su costo es muy bajo y son fáciles de conseguir porque se encuentran en grandes cantidades como por ejemplo la cascara de arroz, la cual ha sido utilizada en la adsorción de colorantes tales como: rojo Congo, azul de metileno, violeta cristal y verde brillante, obteniéndose un porcentaje de remoción de 93,4% para el rojo Congo, 95,8% para el azul de metileno, 96,3% para violeta cristal y 96,6% para verde brillante (Abbas, 2013, citado por Ali et al., 2021).

Otro de los bioadsorbentes que ha sido implementado para remoción de tintes es la biomasa de raíces de jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), el cual es una especie acuática flotante de la región amazónica que crece en abundancia y afecta los ecosistemas acuáticos al reducir los niveles de oxígeno. Por tal motivo, se ha utilizado en la adsorción del colorante reactivo rojo BF-4B, obteniéndose una remoción del 95% y siendo una alternativa para disminuir la eutrofización causada por esta especie (Rigueto et al., 2020).

Así mismo, se han implementado muchos bioadsorbentes con los cuales se han obtenido buenos resultados en la remoción de colorantes y otros contaminantes. La concha de ostras es uno de ellos, que además de adsorber colorante también se ha comprobado que elimina fosfatos y nitratos, siendo ejemplo de esto la investigación realizada por los autores Shih y Chang (2015) en su artículo de investigación denominado “*The effect of water purification by oyster shell contact bed*” donde se registra que implementaron tres reactores de flujo horizontal con el objetivo de purificar aguas residuales doméstica, siendo el primer reactor un tanque aireado con ostras, el

segundo un tanque con conchas de ostras y el tercero un tanque de grava, obteniéndose mejores resultados en el tanque que contenía conchas de ostras (Shih & Chang, 2015).

Debido a lo mencionado anteriormente, se plantea la siguiente pregunta: ¿Es la roca coquina un material bioadsorbente, con el cual se logre un buen rendimiento en la remoción de colorantes provenientes de aguas residuales de la industria textil?

2. Justificación

La industria textil es una de las industrias que consume gran cantidad de agua y las aguas residuales que genera contienen un gran número de contaminantes que depende de las sustancias químicas que se implementen durante el proceso como cloruro de sodio (NaCl) y Sulfato de Sodio (Na_2SO_4) que provienen del teñido y agentes como fenoles, metales pesados que están presentes en los colorantes. (Bae et al.,2005).

Por lo tanto, se han desarrollado diversos métodos de tratamiento con materiales tanto biológicos como químicos para lograr remover los contaminantes en las aguas residuales de la industria textil. Sin embargo, la implementación de métodos químicos como la oxidación, coagulación y fotoquímico, pueden generar lodos y subproductos tóxicos y carcinógenos. (Hernández & Muñoz, 2018)

No obstante, para lograr determinar si un material biológico resulta o no eficiente para la remoción de determinados contaminantes textiles, se debe realizar una evaluación de dicho material, analizando sus propiedades fisicoquímicas. Por consiguiente, se requiere la selección de un material específico, en este caso es el polvo de roca coquina proveniente de conchas de ostras, que al ser un material biológico compuesto principalmente por carbonato de calcio utilizado para el tratamiento de aguas residuales; es una alternativa viable por su fácil acceso, debido a que son desechadas en vertederos o devueltas al mar; además su utilización evitaría la formación de subproductos tóxicos que luego pueden llegar a organismos acuáticos que afecten la cadena trófica y por consiguiente el ciclo natural (Shih & Chang, 2015).

Es por ello, que se desarrollará una evaluación con ostras fosilizadas para el tratamiento de agua residual simulada proveniente de la industria textil, para lo cual se validará la capacidad de adsorción de colorantes catiónicos a través del punto de carga cero, entre los cuales se validará el verde brillante, también conocido como Verde básico 1, Verde malaquita G, Verde esmeralda, entre otros nombres que recibe. Así mismo, se validará la Rodamina B, también conocida como violeta Básica 10, Tetraetilrodamina y Rosa Brillante B. Ambos colorantes son sales orgánicas altamente contaminantes, ya que pueden afectar en gran manera el medio ambiente acuático por su principal uso como colorantes textiles. Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, a partir de resultados obtenidos en pruebas preliminares donde se determinó el punto de carga cero, se identificó que el colorante que arroja mejores resultados con mayor porcentaje de remoción es el verde brillante, por lo cual este fue seleccionado para realizar la respectiva simulación de agua residual textil que se utilizará en el desarrollo experimental.

3. Objetivos

3.1 General

Evaluar el material proveniente de conchas de ostras como bio-adsorbente para la remoción de colorantes presente en aguas residuales de la industria textil.

3.2 Específicos

- Evaluar la influencia del tamaño de partícula y la temperatura de preparación del material bio-adsorbente obtenido de conchas de ostras en la capacidad de adsorción del colorante.
- Establecer las condiciones óptimas de los parámetros que influyen en la eficiencia de la remoción de los colorantes por el material bio-adsorbente obtenido de conchas de ostras.
- Determinar experimentalmente la cinética del proceso de adsorción de colorantes textiles en el material bio-adsorbente, aplicando modelos matemáticos cinéticos y ajuste no lineal.

4. Antecedentes

Se han informado muchos métodos para el tratamiento de aguas residuales textiles, tales como: físicos, químicos y biológicos que pueden ser aplicados para la remoción de colorantes. Sin embargo, los tratamientos biológicos son los más utilizados para para tratar los efluentes líquidos de la industria textil, e incluyen básicamente tratamientos aerobios que pueden ser combinados por una o más etapas de tratamiento, como sedimentación, tamizado, coagulación o cualquier otro tratamiento fisicoquímico avanzado, como ultrafiltración o adsorción (Wang et al. 2009, García-Montaña 2007, Rivas et al. 2004 citado por Sandoval et al., 2013). Entre los cuales la coagulación y la adsorción son procesos muy utilizados debido a su operación relativamente simple, de bajo costo y adecuados para la industria doméstica (Yimrattanabavorn et al., 2018).

El método de adsorción es un proceso de tratamiento de aguas residuales eficiente y factible que utiliza adsorbentes no tóxicos, de bajo costo y fácilmente disponibles (Asfaram et al., 2015, citado por Ezechi et al., 2015). Ardila, Palacio y Barrera, utilizaron cascara de piña cultivadas en regiones del Chocó y Urabá Antioqueño como adsorbente de colorantes textiles, para la adsorción de una mezcla de colorantes utilizados en la industria textil sobre cáscaras de piña. El proceso se realizó para diferentes condiciones de pH y se obtuvieron mejores resultados a pH 2.1. Así mismo se evaluó la concentración de colorante, fijándola en 50 ppm y la cantidad de adsorbente 150mg, siendo el tamaño de la partícula de 0,6mm. Bajo estas condiciones, obtuvieron un porcentaje de remoción del 60%, siendo levemente más efectivo para el proceso las cáscaras de piña del Urabá antioqueño. Además, observaron que disminuyendo el pH de la solución y el tamaño de partícula del adsorbente se obtienen mejores resultados (Ardila et al., 2018).

Por otra parte, Singh (2017), realizó un estudio sobre la adsorción del tinte verde de malaquita a partir de una solución acuosa por *Mangifera indica* (mango) utilizando el polvo de la semilla, la cual caracterizaron por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier y microscopía electrónica de barrido. Lograron un porcentaje máximo de eliminación del 96% con una capacidad de adsorción de 22,8 mg/g con un pH de 6 y con una concentración inicial de 100 mg/L de verde Malaquita (Singh et al., 2017). Así mismo, Sartape (2017) en su investigación, removió verde malaquita, usando cáscara de manzano, que es un residuo sólido de frutas y alimentos. Con este adsorbente, obtuvieron una remoción del 98.87% con una concentración inicial de 100 mg/L a pH 7-9, concluyendo que es una alternativa muy efectiva y económica (Sartape et al., 2017).

Igualmente, se han empleado variantes de cucurbitáceas para la remoción de colorantes como rojo Congo, índigo carmín y verde bromocresol; Barbajas, Cano, Castorena, Santiago y Díaz demuestran en su investigación que *Sechium edule* y *Curcubita ficifolia*, deshidratadas representan una alternativa para la remoción de colorantes recalcitrantes, el cual puede llevar a cabo no solo la adsorción total del colorante en 24 horas sino la oxidación del mismo, lo que podría causar la degradación completa (Barajas et al., 2016)

Del mismo modo, Ensuncho (2015), empleó diferentes tipos de carbón activado, obtenidos de desechos agrícolas para la remoción del colorante rojo allura; las áreas superficiales de los carbones activos se determinaron por medio de isotermas de nitrógeno, las cuales se evaluaron teniendo en cuenta, el efecto del tiempo de contacto, pH con valor de 7, la concentración de colorante 10 mg/L y la cantidad de adsorbente 0,2 g. Demostrando así, que el

carbón de tuza de maíz mostró mayor porcentaje de remoción del colorante respecto a los carbones cáscara de coco y cascarilla de arroz. (Ensuncho et al., 2015)

Entre muchos adsorbentes de bajo costo y más allá de los diversos pretratados (Gupta y Suhas, 2009, citado por Jung et al., 2016). La concha de ostras presenta problemas importantes debido a su olor desagradable y al abandono masivo que daña el medio ambiente (Jung et al., 2016). Como posible solución al problema de la utilización de desechos de concha de ostra, el polvo de concha de ostra (OSP), que consta de ~97% de carbonato de calcio, tiene aplicaciones potenciales como relleno de materiales , así como en las industrias química, alimentaria y biomédica, energética. y campos ambientales (Boyjoo et al., 2014, citado por Jung et al., 2016). Debido a su bajo precio y basicidad, el OSP se ha empleado en áreas ambientales para la estabilización / solidificación de metales pesados (As, Pb y Cu, etc.), eliminación de fosfatos, colorantes y desulfuración (Jung et al., 2016).

Los autores Jung et al., 2016, utilizaron concha de ostras para remover azul de metileno. Para el procedimiento utilizaron 0,02 g de las conchas de ostras en polvo con concentraciones de adsorbato de 1, 3, 5, 10 y 20 ppm a temperatura de 25°C. Se observó que a medida que aumentaba el tiempo de contacto disminuía la concentración de colorante, obteniendo un porcentaje de remoción de 100% (Jung et al., 2016).

Así mismo, los autores Su et al., 2022, utilizaron concha de ostras como bioadsorbente para remoción de los colorantes rojo Congo y azul de metileno. Su investigación consistió en someter el material bioadsorbente a trituración hasta obtener un tamaño de partícula de 27,75 μm

a 8,15 μm . Posteriormente la solución de colorante se mantuvo en oscilación a 200 rpm, temperatura de 30°C, pH 7 y concentración de 100 mg/L. Se determinó una capacidad de adsorción de 48,3% para el rojo Congo y 62,5% para el azul de metileno (Su et al., 2022).

Con respecto a la eliminación de fosfato, en una investigación realizada por los autores You et al., 2022, se propone utilizar concha de ostra magnética modificada con lantano (La-Fe-OSP). Como resultado obtuvieron un porcentaje de remoción superior al 90% para soluciones de fosfato preparadas a una concentración entre 10 y 100 mg L⁻¹ y a un rango de pH de 3 a 8. Además, existe la posibilidad de reciclar el material a través de un campo magnético (You et al., 2022).

Según los estudios presentado en los párrafos anteriores, cabe resaltar que existe una amplia variedad de materiales evaluados como bioadsorbentes, los cuales en su mayoría han presentado buenos porcentajes de remoción, mayores a 90%. Así mismo, las conchas de ostras han mostrado ser excelentes materiales para la remoción de diversos contaminantes, por lo que es de esperar que los resultados de este estudio sean positivos y sea considerado el material obtenido a base de concha de ostras como un bioadsorbente prometedor para la remoción de contaminantes de la industria textil.

5. Marco teórico

5.1 Contaminación de los cuerpos de agua por aguas residuales textiles.

La industria textil se considera una de las grandes industrias a nivel mundial, sin embargo, libera grandes cantidades de colorantes, metales / elementos peligrosos y productos químicos en las aguas residuales vertidas (Rehman et al., 2019). La economía de muchos países depende en gran medida de la industria textil y de las telas (Kadhom et al., 2020). La industria textil es uno de los sectores más importantes en la económica colombiana. constituyó el 7,5% del PIB manufacturero y el 3% del PIB nacional, y representó más del 5% de las exportaciones totales del país en el año 2015 (González et al., 2018).

Aunque no existe una base de datos exacta para estimar la cantidad total de colorantes liberados debido a sus enormes cantidades se estima que hay aproximadamente 11.000 tipos diferentes de colorantes dañinos que se mezclan con cuerpos de agua dulce y deterioran su calidad (Rehman et al., 2019).

Los colorantes aumentan la toxicidad y la demanda química de oxígeno (DQO) del efluente y reduce la estética del ecosistema e impiden la penetración de la luz, también son mutagénicos y cancerígenos por naturaleza, por lo que su eliminación es una necesidad (Palamthodi & Lele, 2016). Aunque se encuentren en bajas concentraciones la presencia de colorantes sintéticos en el flujo de salida puede producir una enorme cantidad de productos tóxicos a través de diferentes reacciones como la oxidación y la hidrólisis, que, por sus características, son persistentes y difíciles de degradar mediante los tratamientos convencionales de aguas residuales (Meili et al., 2019).

5.2 Colorantes textiles

Los colorantes sintéticos son sustancias químicas que pueden adherirse a varias superficies confiriendo, intensificando o restauran el color (Pavithra & Jaikumar, 2019). Son compuestos que pueden actuar sobre diferentes tipos de materiales: fibra textil, papel, cuero, material plástico o alimento. Por ello son extensamente usados en varias industrias, tales como la industria del procesamiento de alimentos, papel, curtido de cuero, plásticos, cosméticos, textiles y tintas de impresión (Palamthodi & Lele, 2016).

Muchos colorantes sintéticos son compuestos orgánicos complejos y son altamente resistentes a la degradación. Según su naturaleza química se clasifican ampliamente (Tabla 4) en tres tipos: (a) aniónicos, (b) catiónicos y (c) no iónicos. Los tintes catiónicos son tintes básicos con carga positiva y los tintes aniónicos son tintes ácidos con carga negativa (Sahu et al., 2020). De igual forma, se pueden clasificar según su estructura química (Tabla 5).

Tabla 4

Clasificación de tintes según su aplicación, sustratos principales y tipos químicos

Clase	Sustratos principales	Método de aplicación	Grupos químicos
Acido	Lana, seda, papel, tintas, nailon y cuero	Comúnmente baños de tinte neutros a ácidos	Azo (incluido el premetalizado), antraquinona, trifenilmetano, azina, xanteno, nitro y nitroso.
Componentes y composiciones azoicas	algodón, rayón, acetato de celulosa y poliéster	Fibra impregnada con componente de acoplamiento y tratada con una solución de diazonio estabilizado	Azo

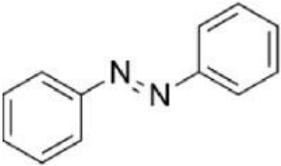
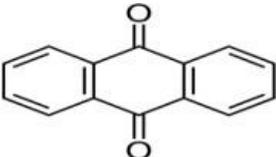
Básico (Catiónico)	Papel, poliacrilonitrilo, nylon modificado y poliéster	Utilizado a partir de baños de tintura ácidos.	Cianina, diazahemicianina, difenilmetano, azo, azina, hemicianina, triarilmetano, xanteno, acridina, oxazina y antraquinona
Directo	Algodón, rayón, papel, cuero y nylon	Se aplica a partir de baños neutros o ligeramente alcalinos que contienen electrolitos adicionales.	Azo, ftalocianina, estilbena y oxazina.
Disperso	Poliéster, acrílico, poliamida, acetato y plásticos	Dispersiones acuosas finas utilizadas a menudo por métodos portadores de alta temperatura / presión o baja temperatura; el tinte se puede expandir sobre un paño y hornear o termofijar.	Azo, estilbena, nitro, antraquinona y benzodifuranona.
Fluorescentes abrillantadores	Jabones y detergentes, todas las fibras, pinturas, aceites y plásticos	De solución, dispersión o suspensión en masa	Estilbena, pirazoles, cumarina y naftalimidias.
Alimentos, medicamentos y cosméticos	Alimentos, medicamentos y cosméticos	----	Azo, antraquinona, carotenoide y triarilmetano.
Mordaz o mordiente	Lana, cuero y aluminio anodizado	Aplicado junto con sales de Cr	Azo y antraquinona.
Basados en oxidación	Cabello, piel y algodón	Aminas aromáticas y fenoles oxidados sobre el sustrato	Anilina negra y estructuras indeterminadas.
Reactivo	Algodón, seda, lana y nylon.	El sitio reactivo del tinte reacciona con el grupo funcional de la fibra para unir el tinte covalentemente bajo	Azo, antraquinona, ftalocianina, formazán, oxazina y básico.

		la influencia del calor y el pH (alcalino)	
Solvente	Plásticos, gasolina, barnices, lacas, tintes, tintas, grasas, aceites y ceras	Disolución en el sustrato	Azo, trifenilmetano, antraquinona y ftalocianina.
Cubas (Vat)	Algodón, rayón y lana	Tintes insolubles en agua solubilizados reduciendo con hidrogenosulfito de sodio, luego agotados en fibra y reoxidados.	Antraquinona (incluidas quinonas policíclicas) e índigoides.
Azufrados	Algodón y rayón	Sustrato aromático encubado con sulfuro de sodio y reoxidado para productos insolubles que contienen azufre en fibra	Estructuras indeterminadas.

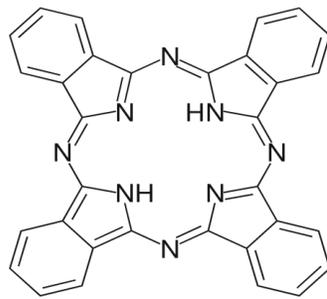
Nota: Adaptado de “Photocatalytic performance of aerogels for organic dyes removal from wastewaters: Review study”, por Hasanpour & Hatami, 2020, *Journal of Molecular Liquids*, 309, 113094.

Tabla 5

Clasificación de colorantes por estructura química

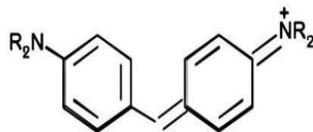
Familia	Grupo Cromóforo	Descripción
Azoicos		Este grupo de colorantes es el más importante dentro de la industria textil con una elaboración aproximada del 70% de los colorantes orgánicos del mercado.
Antraquinonas		Son quinonas tricíclicas derivadas del antraceno que a menudo contienen uno o más grupos hidroxilo

Ftalocianina



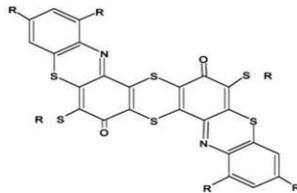
Estos colorantes están formados por la unión de cuatro grupos isoindol (dos anillos fusionados, uno bencénico y el otro; una piridina) mediante cuatro átomos de nitrógeno, dando lugar a un anillo de 16 átomos: ocho de nitrógeno y ocho de carbono, alternados con dobles enlaces conjugados.

**Ion
arilcarbonio**



Su estructura química está conformada por un átomo carbonilounido a dos o tres anillos aromáticos.

Sulfuro



Grupo de colorantes totalmente insolubles en agua, pero solubilizable por reducción. Proporciona una gama de colores bajos y apagados.

Nota: Adaptado de “Los Colorantes Textiles Industriales Y Tratamientos Óptimos De Sus Efluentes De Agua Residual: Una Breve Revisión.”, por Zaruma et al., 2018.

En general, la mayor parte de los colorantes artificiales son recalcitrantes debido a la estabilidad de su estructura aromática, haciendo que sean resistentes a las condiciones de luz e intemperie y dificultando su degradación en aguas residuales (Lee, Choi, Thiruvkatachari, Shim y Moon, 2006). Así, los efluentes coloreados representan un grave problema de contaminación que requiere de un determinado tratamiento fisicoquímico o biológico (Robinson, 2001; Ahmad & Seng, 2007)

Se estima que hasta un 50% de los colorantes utilizados en la industria textil termina en las aguas descargadas por este sector industrial, debido a su bajo grado de fijación en las telas (Tabla 6) (Zaruma et al., 2018).

Tabla 6

Grado de fijación de colorantes

Método de aplicación	Tipo de fibra	Grado de fijación (%)	Descarga en efluentes (%)
Ácido	Poliamida	85-95	5-15
Básico	Acrílico	95-100	0-5
Directo	Celulosa	70-95	5-30
Disperso	Poliéster	90-100	0-10
Reactivo	Celulosa	50-90	10-50
Sulfuro	Celulosa	60-90	10-40
Tina	Celulosa	80-95	5-20

Nota: Adaptado de “Los Colorantes Textiles Industriales Y Tratamientos Óptimos De Sus Efluentes De Agua Residual: Una Breve Revisión.”, por Zaruma et al., 2018.

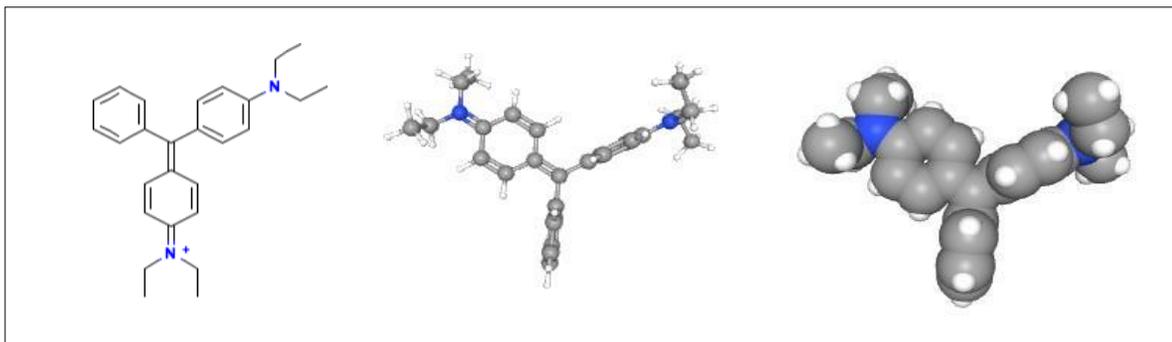
5.2.1 Colorante Verde Brillante

El verde brillante es una sal de hidrogenosulfato orgánico, la cual tiene un papel como fluorocromo, colorante histológico, fármaco antiséptico, agente antibacteriano, veneno y contaminante ambiental. Contiene un catión verde brillante y se utiliza en el tratamiento de gusanos intestinales, infecciones micóticas y antisepsia de heridas. También se usa como tinte para lana, algodón, fibras artificiales papel y tinte para madera, además de ser utilizado como indicador y colorante biológico. Por otra parte, es considerado como sustancia peligrosa, ya que

es tóxico, corrosivo, irritante y afecta el medio ambiente, sobre todo los organismos acuáticos (PubChem, 2022). En la figura 1 se observa la estructura química de dicho colorante.

Figura 1

Estructura del colorante Verde Brillante



Nota. Adaptado de “Resumen de compuestos de PubChem para CID12449, verde brillante”, por PubChem, 2022.

5.2.2 Tratamiento de colorantes textiles

La eliminación biológica de tintes es una forma prometedora de tratar los efluentes industriales, ya que brinda beneficios sobre los métodos de tratamiento tradicionales. Los microorganismos se utilizan de forma biológica para inmovilizar la estructura molecular de los tintes, lo que resulta en una degradación parcial, mineralización o transmutación. El establecimiento de procesos biológicos para la eliminación sostenible y rentable de tintes de las aguas residuales ha avanzado significativamente en los últimos años. Recientemente, se han informado numerosas revisiones para la eliminación de tintes utilizando enfoques biológicos (Singh et al., 2022).

5.2.2.1 Remediación física y química

La precipitación química (CP) es el proceso de convertir una sustancia soluble en una forma insoluble añadiéndole productos químicos, lo que da como resultado un entorno sobresaturado. El método más común para tratar aguas residuales que contienen colorantes es la

CP, siendo el proceso redox junto con la precipitación un proceso genéticamente similar (Singh et al., 2022).

Para el tratamiento de aguas residuales, se han empleado numerosos tipos de coagulantes y floculantes. Los suplementos de coagulantes se utilizan a menudo para acelerar el procedimiento de tratamiento. Se pueden usar como coagulantes sales metálicas, polímeros y compuestos de origen natural. El sulfato de aluminio, el cloruro de calcio, el polímero de cloruro de polialuminio y el lodo de cloruro de polialuminio y otros recursos naturales se han utilizado como coagulantes para remediar tintes y HM de los efluentes en los últimos años (Dotto et al., 2019, Nath et al., 2021, Wei et al., 2018, citado por Singh et al., 2022).

Por otra parte, las membranas se han vuelto más utilizadas para filtrar junto con la eliminación de metales pesados y tintes de las aguas residuales como tecnología. (Wang et al., 2008, citado por Singh et al., 2022). El intercambio de iones es una buena forma de eliminar los tintes de las aguas residuales. De hecho, es una reacción química reversible en la que los contaminantes se eliminan mediante el intercambio de iones de la resina por los de las aguas residuales (Singh et al., 2022).

5.3 Adsorción

La adsorción es utilizada en el tratamiento de aguas para eliminar sustancias que se encuentran en disolución mediante la acumulación de dichas sustancias en una base sólida. Es considerada una transferencia de masa de fase líquida a fase sólida. La sustancia que se quiere eliminar de la fase líquida se denomina adsorbato y el adsorbente puede estar en fase sólida,

líquida o gaseosa y es donde se acumula el adsorbato (Metcalf & Eddy, 2014 citado por (Osorio, 2019).

5.3.1 Factores que influyen en la adsorción

5.3.1.1 Tamaño de partícula

Se basa en el análisis de comparación de dimensiones de la partícula del adsorbente para identificar su influencia en la capacidad de adsorción, donde esta depende de los tamaños de microporos que se encuentran en el adsorbente y mencionan que, a menor tamaño de partícula, mayor es la adsorción ya que está directamente relacionada con el área superficial de contacto del adsorbato y el volumen de sus poros (Subhan et al., 2022).

5.3.1.2 Concentración inicial de colorante

Se considera que la capacidad de adsorción con respecto a la concentración inicial es una variable que se debe considerar a la hora de generar un análisis de su influencia, La adsorción del colorante en gran medida se relaciona entre su concentración y los enlaces disponibles en el área superficial del adsorbente donde el efecto de la concentración varía si se aumenta la concentración inicial (Rashid et al., 2018).

5.3.1.3 Cantidad de adsorbente

Esta variable influye en la capacidad de adsorción al porcentaje de eliminación de adsorbato puesto que si se aumenta la dosis hay una creciente en áreas de superficie se tiene más sitios de unión disponibles lo que conduce a la favorabilidad de absorción de iones lo que indica que a grandes cantidades de adsorbente su eficiencia es mucho más rápida y alta llegando un

punto de equilibrio donde no se encuentran intercambios iónicos y una concentración alta de adsorbente. (Katha et al., 2021)

5.3.1.4 Tiempo de contacto

Este factor permite determinar la naturaleza del proceso que controla la velocidad de la reacción global. Teniendo en cuenta esto, es posible describir expresiones de velocidad y los parámetros cinéticos. El tiempo de contacto es relevante en procesos de adsorción, tanto en sistema discontinuo como de flujo continuo, ya que, en el sistema discontinuo, cierta cantidad de adsorbente se mezcla con un volumen específico de agua residual hasta que disminuye la concentración del contaminante en la disolución y el momento en que el adsorbente se satura es conocido como tiempo de equilibrio. Por tal razón, la validación previa del tiempo de contacto es importante para el estudio de la cinética de adsorción (Fu, et al., 2003 citado por Osorio, 2019).

5.3.1.5 pH

Este factor es uno de los principales que afectan la capacidad de adsorción en solución acuosa (Mohan et al., 2002 citado por Osorio, 2019). Se dice que la acidez influye porque la carga de la superficie del sorbente es en función del pH de la solución (Fu, 2001 citado por Osorio 2019) y la variación en el pH puede llegar a cambiar las características y la disponibilidad de los iones metálicos en la disolución y modificar el estado químico de los grupos funcionales que son responsables de la sorción (Osorio, 2019)

5.3.1.6 *Temperatura*

Este parámetro afecta al aumento de la capacidad de adsorción aumentando la energía disponible a los adsorbatos al interactuar con el adsorbente cuando aumenta la temperatura y se utilizan indicadores termodinámicos para estudiar el comportamiento en su proceso de adsorción tales como la entalpía, entropía y la energía libre de Gibbs. El comportamiento de la temperatura en el sistema llega a un equilibrio de adsorción (Lim et al., 2022). Y para calcular los parámetros termodinámicos que se mencionan se utilizan:

$$\Delta G^{\circ} = -RT \ln(1000K_d) \quad (1)$$

$$K_d = \frac{q_e}{C_e} \quad (2)$$

$$\ln = (1000K_d) = \frac{\Delta S^{\circ}}{R} - \frac{\Delta H^{\circ}}{RT} \quad (3)$$

Donde K_d es el coeficiente de distribución, q_e y C_e son la concentración de equilibrio de adsorbato en el adsorbente y en la solución ($mg L^{-1}$). T (K) es la temperatura y R que es la constante universal de los gases que es expresada como ($8.314 J mol^{-1} K^{-1}$), lo cual según la fórmula ΔG° genera una predicción espontánea del proceso, confirmando que una temperatura en aumento induce a la adsorción espontánea del colorante (Lim et al., 2022).

5.3.2 **Técnicas de caracterización de materiales adsorbentes**

5.3.2.1 *Punto de carga cero*

Es definido como el valor de pH en el que la carga neta del protón es igual a cero, es un parámetro importante para comprender la función de agregación y aglomeración de las nanopartículas. Cuando se dispersan en soluciones a pH_{PZC} , la carga superficial de las nanopartículas se aproxima a cero y su fuerza electrostática disminuye, así mismo se da la

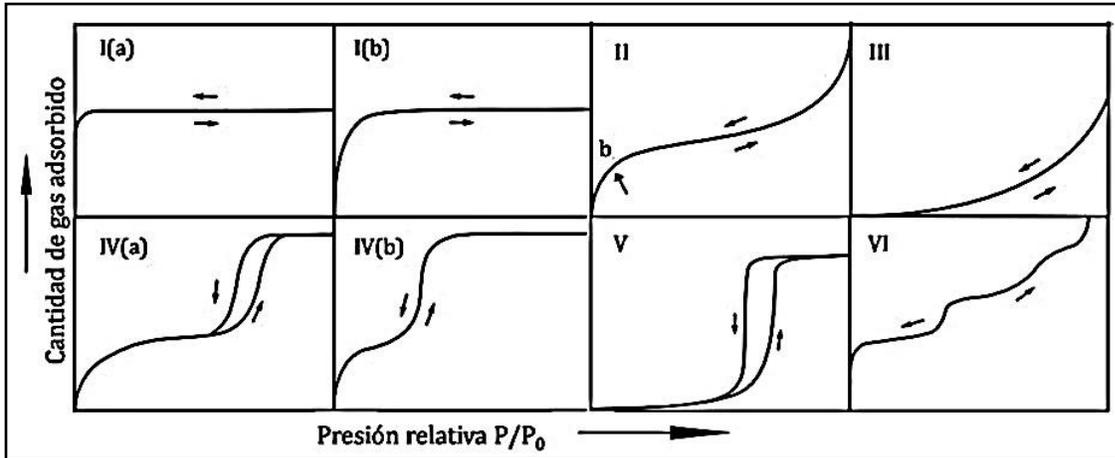
formación de aglomeración entre ellas (Umh & Kim, 2014). También indica el intervalo más adecuado con respecto al valor de pH para alcanzar una remoción eficiente de un determinado contaminante de naturaleza aniónica o catiónica; a su vez es definido como el valor del pH en el cual la carga neta total (de las partículas sobre la superficie del material adsorbente es neutra (Leiva, 2007 citado por Osorio 2019).

5.3.2.2 Análisis de área superficial y porosidad (BET)

Para el tratamiento de aguas por adsorción es de interés modelar isothermas de equilibrio. La isoterma tipo I están en la clasificación de Brunauer que se describen como isothermas simples. También existen isothermas tipo II utilizadas para la adsorción de tintes por medio de materiales sólidos. La ecuación BET se aplica para sistemas de adsorción gas-sólido y se basa en una adsorción multicapa que fue reformulada por Bartell para describir sistemas de adsorción líquido-sólido. la ecuación BET es utilizada para correlacionar isothermas de tipo II de los contaminantes del agua (Brião et al., 2022). A través de las isothermas se obtiene información del volumen adsorbido a determinada presión, lo cual permite calcular el área superficial del sólido, la distribución del poro y el tamaño (ver figura 2) (Grau, 2016, citado por Díaz y Rodelo, 2019).

Figura 2

Clasificación de isothermas de adsorción según IUPAC



Nota. Adaptado de “Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report)”, por Thommes et al., 2015, Pure and Applied Chemistry, 87(9-10), 1051–1069.

Según la figura 2, las isothermas se clasifican en 8 tipos, de la siguiente manera:

- **Tipo I:** se dividen en dos, tipo I (a) y tipo I(b). Están dadas por sólidos microporosos, los cuales no superan 2nm de diámetro. Se caracterizan porque la adsorción se produce a presiones relativas bajas y los materiales que presentan este tipo de comportamiento son: carbones activados, tamices moleculares, zeolitas y ciertos óxidos porosos (García, 2019)
- **Tipo II:** este tipo de isoterma se da en adsorbentes no porosos o macroporosos debido a la fisisorción de gases, la adsorción es multi molecular sin altos en P/P₀ (García, 2019).
- **Tipo III:** no es común encontrar en la práctica este tipo de isothermas, ya que Corresponde a una interacción débil entre el sólido y el gas (García, 2019).
- **Tipo IV:** Esta isoterma se divide en dos tipos: tipo IV(a) y tipo IV(b). Se determinan interacciones en adsorbentes mesoporosos del tipo adsorbente-adsorbible. Los materiales que se encuentran con este comportamiento son geles óxidos, adsorbentes industriales y

tamices moleculares mesoporosos, los mesoporos tienden a ser cónicos y cilíndricos (García, 2019).

- **Tipo V:** este tipo de isoterma es similar a la isoterma tipo III, sus interacciones adsorbato-adsorbente son débiles y se puede obtener con ciertos adsorbentes porosos (García, 2019).
- **Tipo VI:** esta isoterma está condicionada a la temperatura, se da en adsorbentes no porosos con superficies uniformes. La adsorción es escalonada, donde la altura del escalón es la capacidad de la monocapa y la cantidad de escalones es la cantidad de capas adsorbidas (García, 2019).

5.3.2.3 Difracción de rayos X (DRX o XRD)

Es un método directo utilizado para el análisis de estructuras (Ghosh et al., 2022). Esta técnica analítica es utilizada en los laboratorios de geología y ciencias del suelo para analizar materiales de grano fino (Bergslien, 2022). Esta técnica es aplicada a todo tipo de material con estructura cristalina tales como los metales, minerales, catalizadores, plásticos, polímeros, productos farmacéuticos, cerámicas, semiconductores y fluidos. Dicha técnica permite la recuperación del material estudiado sin deteriorarlo, dado que no es destructiva y permite identificar el tipo de material utilizado (UBU, 2021).

5.3.2.4 Espectrometría infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)

Según Adeleke (2019), la FT-IR es un procedimiento analítico de obtención de los grupos funcionales en la superficie de un material adsorbente que se obtiene con espectros de alta

resolución. La eficacia de la espectroscopia FT-IR está determinada por la medida en que el material adsorbente adsorbe la luz a una longitud de onda específica. FT-IR se utiliza para la identificación de los enlaces químicos en una molécula mediante la producción de un espectrómetro de absorción de infrarrojos. FTIR es aplicable para analizar los grupos funcionales de los materiales adsorbentes irradiados.

Los resultados son representados por medio de un espectro de infrarrojo, que está compuesto por bandas o picos, siendo el eje de las abscisas (X) los valores del intervalo de longitud de onda del infrarrojo medio (número de onda en cm^{-1} o de longitud de onda en nanómetros). Mientras el eje de las ordenadas (Y) representa los valores de la intensidad de absorción o transmisión. De esta manera, cada grupo funcional presente en un material estará representado como una banda o pico en un determinado número de onda que es considerado como una huella dactilar, así mismo, la intensidad del pico dará idea de la proporción de dicho grupo funcional en la muestra evaluada. Normalmente el análisis de resultados se realiza mediante la comparación con bases de datos con información referente a cada grupo funcional que se requiera analizar (Mondragón, 2017).

5.3.2.5 Análisis Termogravimétrico (TGA)

Es un método común de análisis térmico que se utiliza para estudiar la transformación de fase en el cambio de temperatura. Con el análisis TGA se determina el cambio de masa de una muestra con respecto al aumento de temperatura, que a su vez refleja reacciones físicas y químicas, incluida la absorción, desorción, descomposición, oxidación, reducción, etc. Es adecuada para caracterizar el comportamiento térmico y las propiedades de un material o residuo conocido. Los resultados de esta técnica son expresados mediante un termograma. En la abscisa

(X) se muestra la temperatura y en la ordenada (Y) el porcentaje en peso registrado durante el procesamiento térmico de la muestra, permitiendo analizar su comportamiento con el cambio en la temperatura. (Mishra and Mohanty, 2018; Reguieg et al., 2020; Tureková et al., 2019 citado por Yang & Hedin, 2022).

5.3.3 Materiales bioadsorbentes

La mayoría de los materiales bioadsorbentes surgen del aprovechamiento de los materiales desechados que provienen de la industria alimentaria y agrícola; estos son desechos de fruta, residuos vegetales y plantas (Valladares-Cisneros et al., 2017). Otros adsorbentes naturales son las algas, bacterias, residuos de crustáceos, hongos, minerales y rocas (dolomita, calizas), suelos lateríticos y sedimentos marinos (Lagos, 2016, citado por Díaz y Rodelo, 2019). Estos materiales son de bajo costo, fácil disponibilidad, tienen buena capacidad de adsorción, factibilidad de mejorar a través de modificación química, susceptible a la regeneración y biodegradabilidad, lo que conlleva a un menor número de problemas en la disposición final posterior a la adsorción (Valladares-Cisneros et al., 2017).

La especie *Crassostrea rhizophorae* es un tipo de molusco conocido como ostra de manglar, se encuentra cerca de las raíces y troncos de los manglares. Debido a su valor nutricional es una de las especies más exploradas nivel comercial. También se ha considerado como bioindicador para evaluar la contaminación por metales en estuarios y ambientes costeros, ya que acumulan contaminantes en sus tejidos (Cabral et al., 2022). En Colombia, esta ostra ha sido uno de los recursos pesqueros más abundantes de la Ciénaga Grande de Santa Marta (López y Mancera, 2019, citado por Díaz y Rodelo, 2019).

La almeja *Polymesoda* es un molusco bivalvo que habita en fondos blandos y con cascajo, en aguas estuarinas del continente americano. Su crecimiento se registra en la parte sur del Caribe y en la costa norte de Suramérica. En el sector occidental de la Isla de Salamanca existen bancos naturales de *Polymesoda* y ha sido incluida en la lista de especies amenazadas del Caribe colombiano (Cosel 1986, Díaz & Puyana 1994, citado por De la Hoz, 2010). Esta almeja tiene la capacidad de bioacumular contaminantes tóxicos, principalmente metales pesados, lo cual permite que estos organismos sean utilizados como indicadores biológicos de contaminación en los ecosistemas habitados por sí mismos (Behling et al., 2014, citado por Díaz y Rodelo, 2019).

Por último, las rocas coralinas (Coquina) son rocas calizas compuestas principalmente por conchas de bivalvos y son conocidas como “coquinas”. Se definen como fragmentos de conchas depositadas por la acción de agentes de transporte, se compone principalmente de carbonato de calcio (CaCO_3) en forma de mineral calcita y poseen variedad de tipos de poros, tamaños de poros, formas de poros y conectividad de poros que definen su porosidad e influyen en la permeabilidad (Corbett et al., 2017).

Estas rocas suelen formarse en aguas marinas claras, cálidas y poco profundas, se forman alrededor de las playas por la acción de las olas y concentraciones de conchas con tamaño similar (Atencio y Britto, 2019, citado por Díaz y Rodelo, 2019). Es importante mencionar que este tipo de roca será la utilizada en el presente estudio, debido a que en estudios previos se ha encontrado que tiene alta capacidad de remoción de otro tipo de sustancias contaminantes, como lo son los nutrientes presentes en el agua residual doméstica (Díaz y Rodelo, 2019).

5.4 Estudio Cinético

La cinética de adsorción describe la tasa de adsorción de soluto y, evidentemente, esta tasa controla el tiempo de residencia de la adsorción de adsorbato en la interfase sólido-solución. Los modelos más comunes utilizados para la cinética de adsorción son los modelos cinéticos de Pseudo-primer orden y Pseudo-segundo orden (Soudagar et al., 2021).

5.4.1 Modelos cinéticos empleados

5.4.1.1 Pseudo primer orden

La expresión de tasa de primer orden de Legranges basada en la capacidad sólida generalmente se muestra de la siguiente manera:

$$\frac{dq}{dt} = K_1 (q_e - q) \quad (4)$$

Se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$q_t = q_e(1 - e^{-K_1 t}) \quad (5)$$

$$\text{Log} (q_e - q_t) = \text{Log} q_e - \left(\frac{K_1}{2.303}\right) t \quad (6)$$

Donde:

- k_1 (l min^{-1}) es la constante de primer orden,
- q_e (mg/g) es la cantidad de adsorbato adsorbido en el equilibrio,
- q_t es la cantidad de adsorbato adsorbido en el tiempo t .
- El valor de q_e y k_1 se puede obtener del ajuste de la curva no lineal del registro de datos experimentales ($q_e - q_t$) frente a t .

5.4.1.2 Pseudo-segundo orden

El Pseudo-segundo orden se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \left(\frac{1}{q_e} \right) t \quad (7)$$

$$q_t = \frac{K_2 q_e^2 t}{1 + K_2 q_e t} \quad (8)$$

Donde:

- k_2 ($\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) son las constantes de segundo orden
- q_e (mg/g) y q (mg/g) la cantidad adsorbida en el equilibrio y en cualquier momento respectivamente.

5.4.1.3 Modelo Elovich

Este modelo se utiliza para describir la adsorción de gases, también se utiliza para describir la sorción de contaminantes sólidos en solución acuosa. Incorpora α como la velocidad inicial de adsorción ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$), β ($\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$) como constante de desorción relacionada con el alcance de la superficie, y la energía de activación para la quimisorción q_t , que representa la cantidad de gas quimisorbido en t (Tejada et al., 2015).

La ecuación de Elovich es la siguiente:

$$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha \beta) + \frac{1}{\beta} \ln(t) \quad (9)$$

5.4.1.4 Modelo de Intrapartícula

En el modelo de difusión de transferencia de masa intraparticular propuesto por Weber y Morris, el enfoque fraccionario del equilibrio cambia según una función de:

$$\left(\frac{Dt}{r^2}\right)^{0,5} \quad (10)$$

Donde D es el coeficiente de difusión dentro del adsorbente sólido y r es el radio de la partícula (Li et al., 2007). La constante de velocidad de difusión intraparticular se puede determinar de la siguiente manera:

$$qt = k_{ip}t^{1/2} + C \quad (11)$$

6. Diseño metodológico

6.1 Obtención de material

La roca coralina (Coquina) fue recolectada en los espolones ubicados en las playas de Salgar, en el municipio de Puerto Colombia, en el departamento del Atlántico.

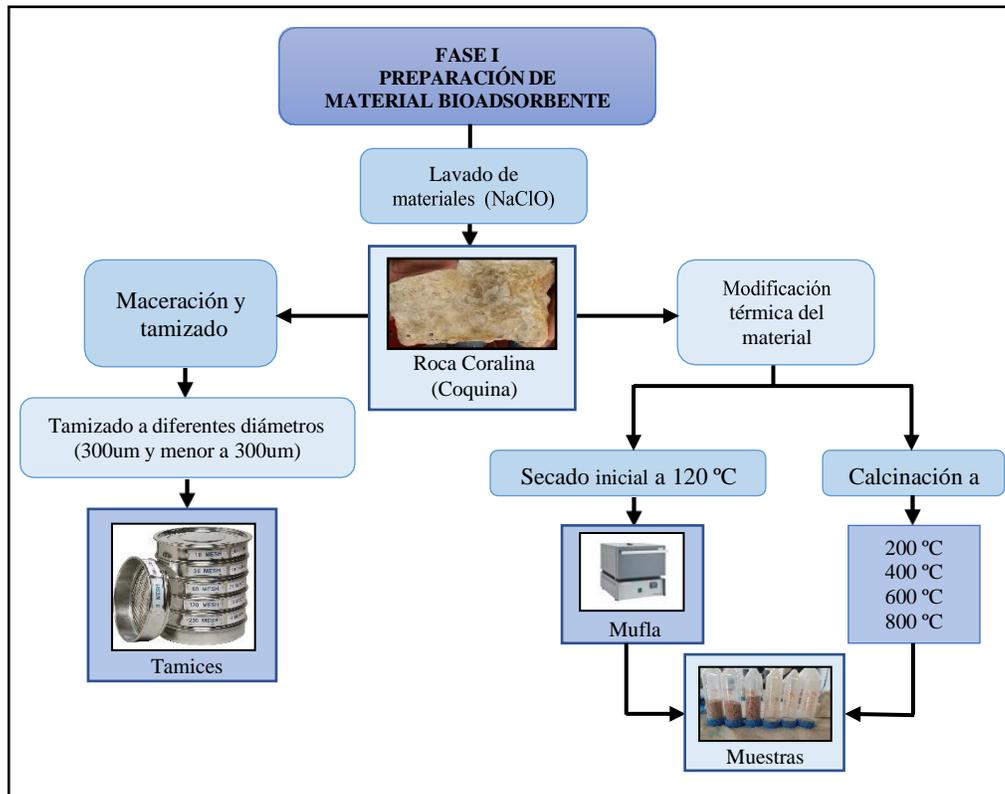
Para la simulación del agua residual textil se utilizó el colorante verde brillante suministrado por la Universidad de la Costa, junto con los equipos utilizados para las mediciones y preparación del material, tales como: el pH metro EcoSense pH100A, el agitador Oxitop IS 6, la centrífuga Thermo Scientific Megafuge 8 de Heraeus, la mufla Thermo Scientific Thermolyne Premium y el espectrofotómetro GENESYS 10uv UV-Visible. Dichos equipos se encuentran ubicados en el laboratorio del Centro de Investigaciones en Tecnologías Ambientales (CITA), donde se llevó a cabo la experimentación correspondiente.

6.2 Fase I: preparación del material bioadsorbente

La preparación del material utilizado en el presente estudio se realizó siguiendo la metodología presentada en la figura 3. Inicialmente se realizó un lavado del material bioadsorbente con una solución diluida de hipoclorito de sodio (NaClO), posteriormente fue secado a temperatura ambiente, se maceraron en morteros de porcelana y luego se realizó un proceso de tamizado en una torre conformada por tamices de tamaños de 2.36 mm, 1.18 mm y 300 micras (ver anexo A, figura 24). Las muestras se seleccionaron con un tamaño de 1.18 mm (a) y 2.36 mm (b) (Chang y Shih, 2015, citado por Díaz y Rodelo, 2019).

Figura 3

Diagrama de flujo de Fase I: Preparación de material bioadsorbente



Nota. El diagrama representa el proceso de la preparación del material. Fuente: Autores.

Consecutivamente al procedimiento anterior, se tomó una muestra sin modificación del material y otra muestra para someterla a una temperatura de 120°C durante 2 horas en una mufla para eliminar la humedad.

Para realizar la modificación térmica del material bioadsorbente, primeramente, se calentaron las muestras a una velocidad de 5°C/min hasta llegar a una temperatura de 120°C que se mantuvo durante 2 horas, luego fueron llevados a razón de 5°C/min a temperaturas de 200 °C, 400 °C, 600 °C y 800 °C, las cuales se mantuvieron por un tiempo determinado de 2 horas (Muñoz y Ramírez, 2017, citado por Díaz y Rodelo, 2019). Las muestras resultantes fueron colocadas en un desecador para evitar que se contaminaran.

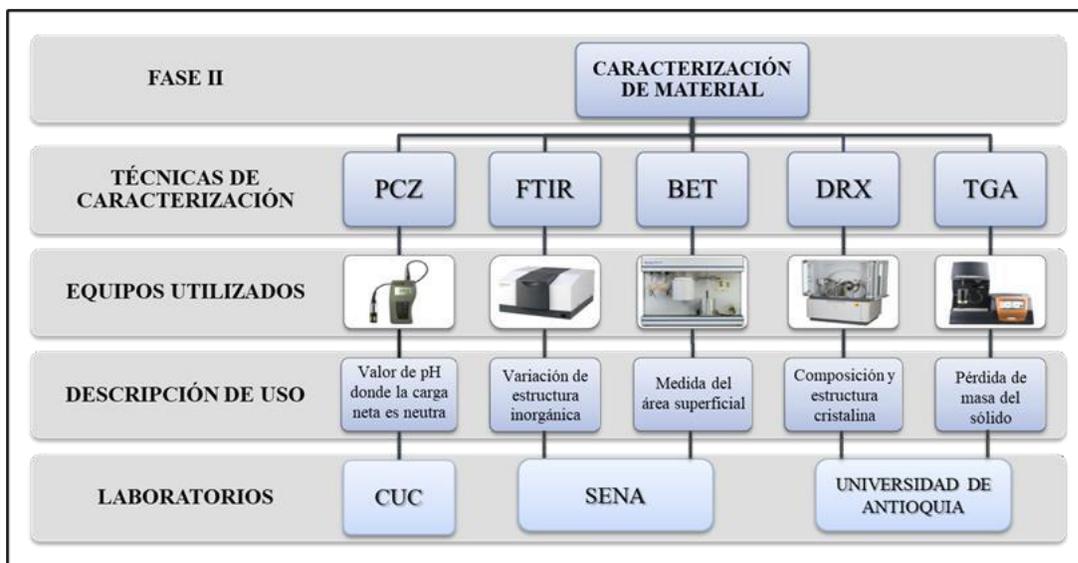
Cabe resaltar que se realizaron pruebas preliminares con el material bioadsorbente y el que arrojó mejores resultados de remoción de colorantes fue la Roca Coquina a temperatura de 120 °C, es decir solo expuesta a un proceso de secado, sin modificación térmica (ver figura 3). Por lo tanto, se presentará la caracterización de este material, el cual también fue utilizado para la evaluación cinética por su eficiencia. (ver figura 3).

6.3 Fase II: Caracterización del material bioadsorbente

Para determinar el comportamiento del material en las pruebas de adsorción, así como para definir el colorante a utilizar se determinó el punto de carga cero (PZC). Así mismo, para determinar las características texturales y elementales del material, se realizó una evaluación por los métodos BET, DRX, FTIR, TGA. En la figura 4 se observa el diagrama de flujo de la Fase II.

Figura 4

Diagrama de flujo de Fase II: Caracterización del material



Nota. El diagrama resume las técnicas de caracterización utilizadas. Fuente: Autores

6.3.1 Punto de carga cero (PZC)

Luego de obtener el material y realizar el tratamiento térmico, se determinó el Punto de Carga Cero, también conocido como Potencial Zeta (PCC o PCZ). Para ello, se requirió de 50 ml de agua destilada en Erlenmeyer de 100 ml, ajustando el pH de la solución a 2,4,6,8,10 y 12, para esto se adicionaron las cantidades adecuadas de HCl 0.1M y NaOH 0.1M. A estas soluciones se añadieron 0.2 g de muestra del material adsorbente (de cada diámetro) y transcurridas 48 horas bajo agitación a 220 rpm y a temperatura ambiente (25°C) se midió el valor del pH final.

Teniendo en cuenta el procedimiento anterior, se validó en pruebas preliminares la capacidad de adsorción del material adsorbente, utilizando dos colorantes catiónicos, Verde Brillante y Rodamina B, con la finalidad de seleccionar el colorante que presentara los mayores porcentajes de remoción. Dicho colorante fue el verde brillante, por lo cual este se seleccionó para realizar la respectiva simulación de agua residual textil (ver anexo A, figura 25).

6.3.2 Análisis BET

Este análisis se utiliza para determinar la medida del área superficial mediante la absorción de nitrógeno a baja temperatura (Díaz y Rodelo, 2019). Se realizó en el laboratorio del SENA, con el equipo ASAP 2020 marca Micromeritics, denotando que debido a su procedencia las muestras pueden contener en su mayoría óxidos de calcio y/o carbonato de calcio. Se analizó 0.1 g de muestra, se mantuvieron las condiciones de desgasificación a una temperatura de 50°C durante 1 hora, aumentando el valor a razón de 5°C/min hasta poder alcanzar los 120°C y manteniendo la temperatura durante un tiempo de 12 horas. El gas que se implementó fue el nitrógeno (N₂) como adsorbato a 77°K por 7 horas aproximadamente. Se incluyó la

determinación del tamaño del poro con la isoterma de adsorción, tomándose 5 puntos para cada isoterma (adsorción y desorción), estableciéndose el área superficial y la distribución de los poros (Grau, 2016, citado por Díaz y Rodelo, 2019).

6.3.3 Análisis DRX

Este análisis proporciona información sobre la composición y la estructura cristalina del material. Se realizó en el laboratorio de la Universidad de Antioquia por medio del equipo Difractómetro de Rayos X (DRX) XPert PANalytical Empyrean Serie II - Alpha1, Modelo 2012. Se utilizaron condiciones estándar por reflexión en un paso de 0.05 y 50 segundos por paso. (Malvern Panalytical, 2019, citado por Díaz y Rodelo, 2019)

6.3.4 Análisis FTIR

Este análisis se encarga de estudiar los modos de vibración de la estructura inorgánica del adsorbente e identificar sus modificaciones de acuerdo con la molécula orgánica presente en la estructura o superficie (Vilarrasa, 2014, citado por Díaz y Rodelo, 2019). El análisis se realizó en el laboratorio del SENA con el equipo IRAffinity -1 FTIR SHIMADZU, Serie: A213749, y condiciones estándar (Shimadzu, 2019, citado por Díaz y Rodelo, 2019).

6.3.5 Análisis TGA

Este análisis proporciona información sobre la pérdida de masa del sólido después de estar sometido a modificaciones térmicas y posibles transformaciones de fase (Vilarrasa, 2014, citado por Díaz y Rodelo, 2019). El análisis se realizó en el laboratorio de la Universidad de Antioquia, utilizando el equipo Thermal Analysis - TA Instruments, TGA 2950, DSC 2920, 1600

DTA, con una atmósfera de Nitrógeno, y una velocidad de calentamiento de 5°C/minuto hasta poder alcanzar una temperatura de 900°C. (Grau, 2016, citado por Díaz y Rodelo, 2019).

6.4 Fase III: Cinética de adsorción

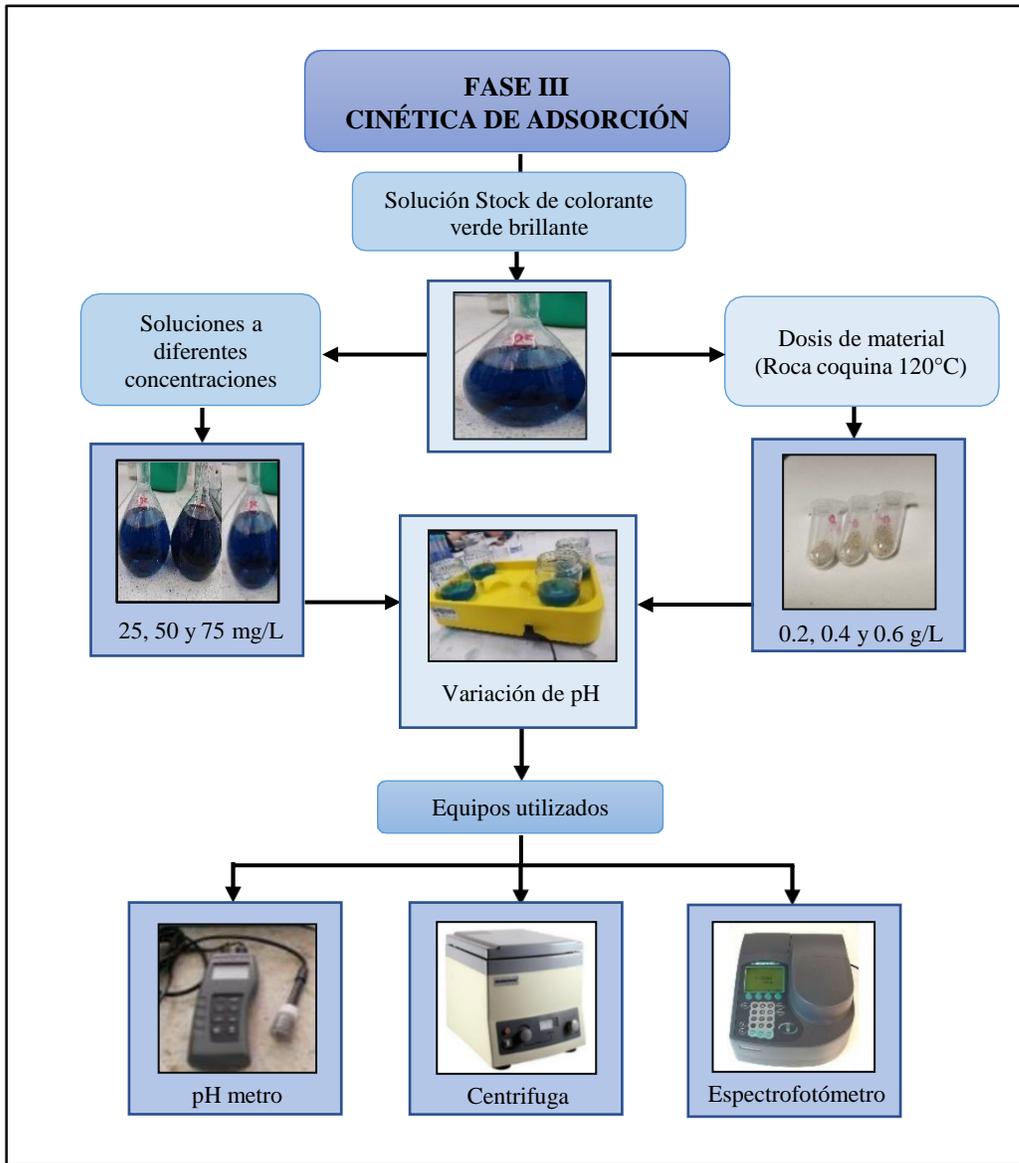
6.4.1 Evaluación de la remoción de los colorantes

La evaluación de la eficiencia del material obtenido para la remoción de colorantes recalcitrantes de la industria textil se realizó a escala de laboratorio, específicamente en el Centro de Investigaciones en Tecnologías Ambientales (CITA) en la Universidad de la Costa. Para tal fin, se utilizó el colorante verde brillante como molécula modelo de contaminación de la industria textil. Todos los experimentos de remoción se llevaron a cabo por duplicado en vasos de precipitado con agitación de 220 rpm, realizando seguimiento durante 2 horas.

Inicialmente se realizaron pruebas de adsorción para evaluar la remoción de colorante presentada por el material bioadsorbente preparado (incluyendo las diferentes temperaturas y tamaños de partícula), posteriormente se seleccionó la muestra que presentó mejor remoción y una vez caracterizado el material por las técnicas previamente mencionadas (PCZ, BET, DRX, FTIR y TGA), se realizaron pruebas de remoción con seguimiento en el tiempo para determinar las curvas de adsorción, establecer la cinética de adsorción y las condiciones óptimas de operación. En la figura 5 se observa el diagrama de flujo de la Fase II

Figura 5

Diagrama de flujo de Fase III: Cinética de adsorción



Nota. El diagrama representa el proceso de la cinética de adsorción. Fuente: Autores.

6.4.2 Pruebas realizadas en el laboratorio - cinética de adsorción

Para este procedimiento, se preparó una solución stock de 1000 mg/L de colorante. A partir de esta solución se prepararon soluciones a diferentes concentraciones (25, 50 y 75 mg/L), las cuales fueron puestas en contacto con el bioadsorbente a diferentes valores de pH (2, 4, 6, 8, 10 y 12) y con diferentes dosis de material adsorbente (0.2, 0.4 y 0.6 g/L). El montaje se realizó

en frascos con una capacidad de 100 mL en los cuales se insertó un imán para posteriormente ser ubicados en un agitador Oxitop (figura 26). La tabla 7 muestra las condiciones del diseño de experimentos programado. De cada experimento se tomaron alícuotas a diferentes intervalos de tiempo (0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 75, 90, 105 y 120 min) y la concentración del colorante se midió utilizando un espectrofotómetro GENESYS 10uv UV-Visible a una longitud de onda de 640 nm (ver figura 5).

Tabla 7

Condiciones de diseño experimental programado

Variables evaluadas	Concentración de colorante (mg/L)	Cantidad de adsorbente (g/L)	pH	Tiempo (h)	Velocidad (rpm)	Temperatura
pH	Seleccionado	0,2	2	2	220	Ambiente
	Seleccionado	0,2	4	2	220	Ambiente
	Seleccionado	0,2	6	2	220	Ambiente
	Seleccionado	0,2	8	2	220	Ambiente
	Seleccionado	0,2	10	2	220	Ambiente
	Seleccionado	0,2	12	2	220	Ambiente
Concentración inicial de colorante	25	0,2	Seleccionado	2	220	Ambiente
	50	0,2	Seleccionado	2	220	Ambiente
	75	0,2	Seleccionado	2	220	Ambiente
Cantidad de material	Seleccionado	0,2	Seleccionado	2	220	Ambiente
	Seleccionado	0,4	Seleccionado	2	220	Ambiente
	Seleccionado	0,6	Seleccionado	2	220	Ambiente

Nota: cronograma del diseño experimental programado. Fuente: autores.

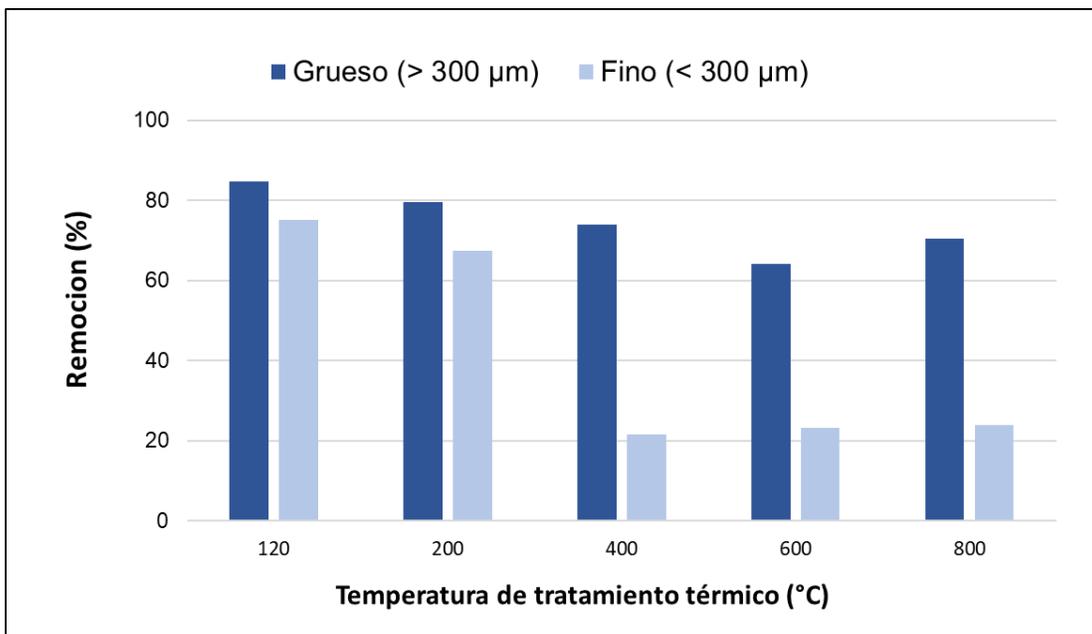
7. Resultados y discusión

7.1 Caracterización del material

Una vez preparado el material bioadsorbente se realizó la selección del tamaño de partícula y temperatura óptima de tratamiento térmico, para de esta manera poder definir el material con mejor eficiencia en el proceso de adsorción del colorante verde brillante y por ende proceder a su respectiva caracterización textural y elemental. En la figura 6 se presentan los porcentajes de remoción obtenidos para los diferentes valores de temperatura en las cuales se preparó el material y los dos tamaños de partícula evaluados (superiores a $300 \mu m$ y menores a $300 \mu m$).

Figura 6

Porcentaje de remoción de material fino y grueso a diferentes temperaturas



Nota. El gráfico representa la remoción de colorante verde brillante, utilizando los diferentes tamaños de partícula del material bioadsorbente a diferentes temperaturas. Fuente: Autores.

Según los resultados obtenidos en la figura 6 se observa una remoción favorable superior al 80% para la roca coquina preparada a una temperatura de 120 °C y un tamaño de partícula mayor a 300 μm . De esta manera dicho material se seleccionó para ser caracterizado mediante las técnicas de caracterización de punto de carga cero, BET, DRX, FTIR, TGA. Así mismo para la determinación de la cinética de adsorción. Cabe resaltar que a temperatura de 120°C el material no ha sido modificado térmicamente, dado que a esta temperatura solamente fue secado para remover la humedad de la preparación previa del material.

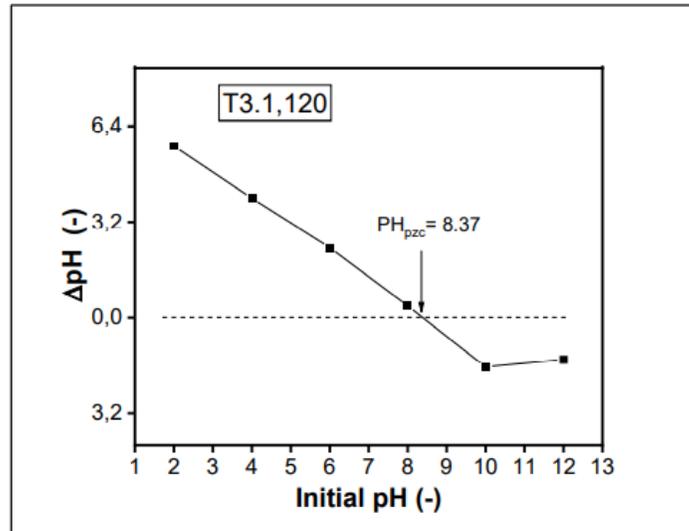
Por otro lado, se observa también que el material presenta una disminución en el porcentaje de remoción al incrementar la temperatura de tratamiento térmico desde 120 °C a 800°C (figura 6) y con mayor tamaño de partícula. Según investigaciones realizadas mencionan que a menor tamaño de partícula el porcentaje aumenta, pero esto puede variar dependiendo el tipo de material utilizado (Teshager et al., 2022), en este caso el tamaño de partícula menor a 300 μm presentó problemas operativos la modificación térmica, según la investigación de (Albalasmeh et al., 2020) en los tamaños de partícula entre 300 a 500 μm a temperaturas inferiores a 300 °C presenta mejor porcentaje de remoción entre tamaños inferiores lo que se deduce que el material tiene mayor superficie de contacto y no sufre modificación térmica.

7.1.1 Punto de carga cero (PZC)

En la figura 7 se muestra el resultado de pH medidos antes y después de entrar en contacto con el bioadsorbente (roca coquina) indicando el punto donde las cargas superficiales se neutralizan entre si corresponden a 8,37 esto indica que no hay efecto significativo en el tamaño de partícula en las cargas superficiales de la roca coquina.

Figura 7

Punto de carga cero

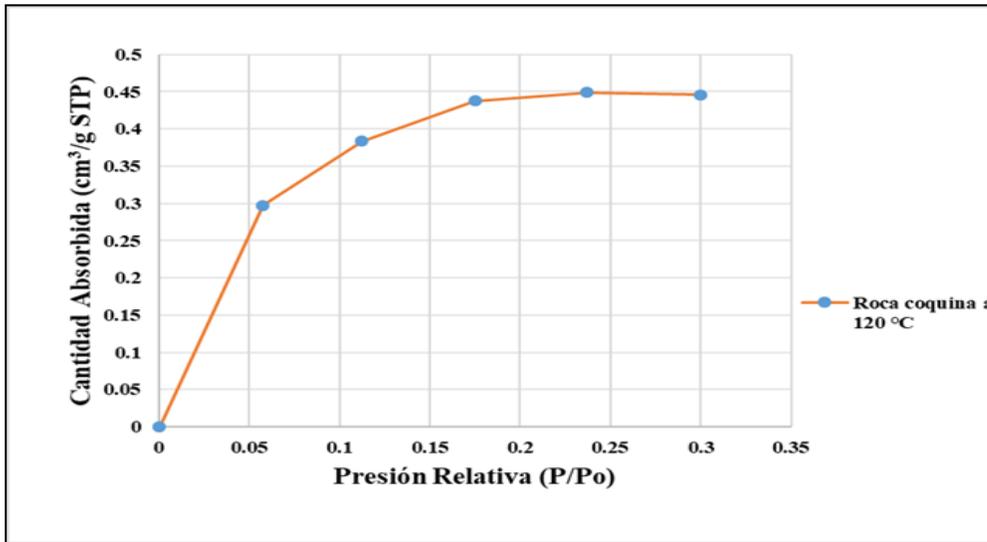


Nota. El gráfico representa el punto de carga cero del material bioadsorbente. Fuente: autores.

Si comparamos el punto de carga cero (PZC) de otras investigaciones como por ejemplo de Wu et al, (2022) donde se utilizan los residuos reciclados de concha de cangrejos para la remoción del verde brillante el resultado que se muestra es de 9,17 lo que involucra utilizar compuestos básicos para que la solución acuosa trabaje de manera eficiente y las cargas superficiales se neutralicen, lo que vuelve a la roca coquina un material de mayor eficiencia al trabajar en un pH cercano a 7.

7.1.2 Análisis BET

En la figura 8 se observa el comportamiento de la isoterma de adsorción de N_2 con respecto a la muestra evaluada, por lo que se establece que la relación entre el material bioadsorbente y el adsorbato es bastante fuerte, puesto que presenta características no porosas con diámetros superiores a 50 nm, con una capacidad de adsorción de multicapas.

Figura 8*Isoterma de adsorción*

Nota. El gráfico representa la isoterma de adsorción de la Roca Coquina a 120 °C sin modificar Fuente: Autores.

La Roca Coquina presenta una semejanza a una serie de investigaciones que se han realizado sobre todo al momento de caracterizar, donde se presenta calcio en su fórmula, por lo cual existe una correlación con las isotermas de tipo II (Brião et al., 2022). Teniendo en cuenta los resultados que se obtuvieron en la figura 8 y los valores de la tabla 8 reportados por el SENA, se puede decir que corresponden a esta clasificación. Dicha correlación es presentada en la fórmula BET, dado que se usa para explicar las isotermas de los contaminantes presentes en el agua. La fórmula de isoterma más conocida es la de Brunauer, también denominada BET (Brunauer et al., 1938) y se ajusta a las isotermas de tipo II.

Tabla 8*Informe tabular isoterma de adsorción de la muestra de roca coquina*

Presión Relativa (P/Po)	Presión Absoluta (mmHg)	Cantidad Absorbida (cm ³ /g STP)	Tiempo Transcurrido (h: min)	Presión de Saturación (mmHg)
0	0	0	1:30	
0.0574	44.5303	0.2972	1:44	774.9279
0.0574	87.1216	0.3835	1:46	
0.1748	135.4778	0.4375	1:49	
0.2371	183.7639	0.4491	1:51	
0.2999	232.4536	0.4456	1:53	

Nota: valores reportados por el SENA.

Así mismo se obtuvieron los datos suministrados por el laboratorio SENA (Tabla 9) donde se muestra el área superficial de la roca coquina con un valor de 1.4163 ± 0.1134 m²/g como se observa en la tabla 8, lo que indica una naturaleza microporosa que concuerda con la figura 2 teniendo una isoterma de tipo II como sugiere la investigación de (Uddin et al., 2021) donde se menciona la relación del análisis de área superficial y porosidad con la isoterma de adsorción tipo II.

Haciendo una comparación más con otras investigaciones, donde se obtuvieron valores de área superficial de 7,535 m²/g, donde se utilizó bentonita (MoS₂) para la remoción de colorante anicónico en solución acuosa (Uddin et al., 2021) y un área superficial de 44,171 m²/g, en esta investigación se utilizaron piedras de magnetitas a base híbrida para la adsorción del verde malaquita (Ahmed et al., 2022), siendo la diferencia en esta investigación una menor porosidad y área superficial.

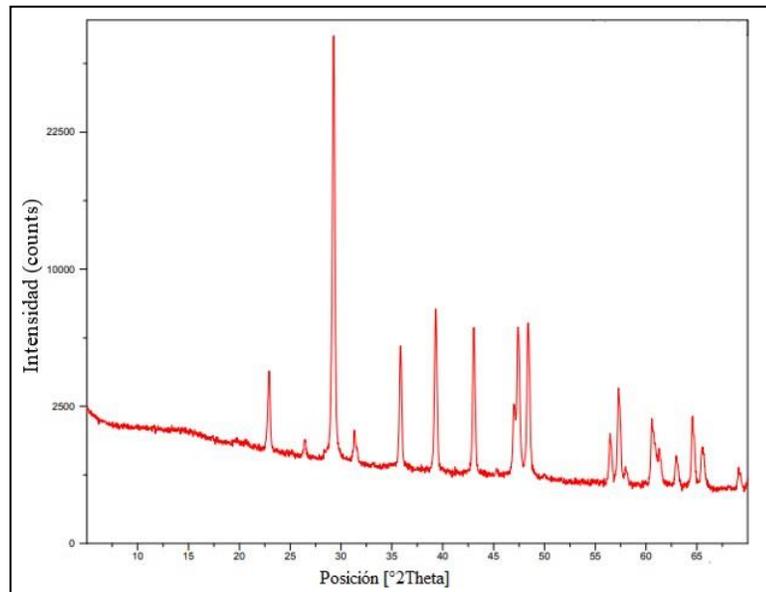
Tabla 9*Informe de datos área superficial de la muestra de roca coquina*

Caracterización BET - Área superficial de la muestra	
Área de Superficie BET	$1.4163 \pm 0.1134 \text{ m}^2/\text{g}$
Slope	$3.082627 \pm 0.241408 \text{ g}/\text{cm}^3 \text{ STP}$
Y-Intercept	$-0.008972 \pm 0.047395 \text{ g}/\text{cm}^3 \text{ STP}$
C	-342.599486
Qm	$0.3253 \text{ cm}^3/\text{g STP}$
Coefficiente de correlación	0.9909258
Área de corte transversal molecular	0.1620 nm^2

Nota: valores reportados por el SENA.

7.1.3 Análisis DRX

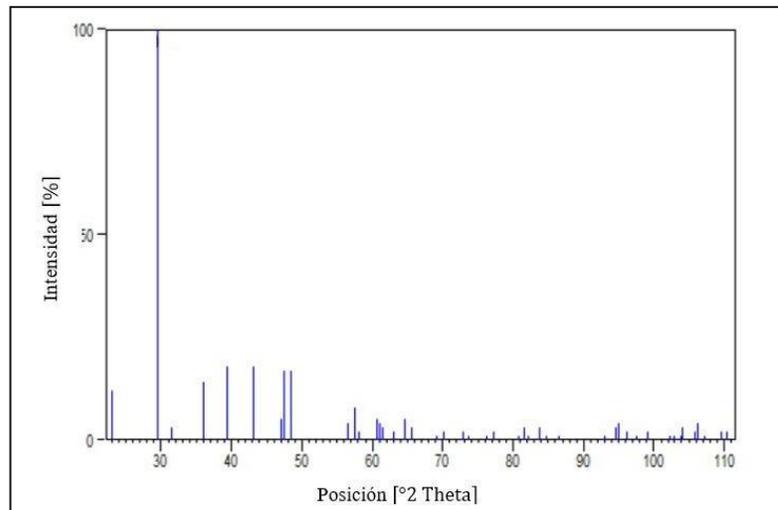
En la figura 9 se presenta el difractograma obtenido al analizar el bioadsorbente seleccionado (secado a 120°C) por la técnica de difracción de rayos X, se observa la presencia de varios picos, dentro de los que resaltan los presentados $\theta = 26.2^\circ, 27.3^\circ, 38.7^\circ, 46^\circ, 48.3^\circ, 50.3^\circ, 52.8^\circ, 53.2^\circ$, que representan compuestos relacionados al carbonato de calcio que corresponde a la mineral calcita, este resultado al comparar los resultados obtenidos en otras investigaciones donde se analizaron materiales compuestos de residuos de ostras, almejas y piedra caliza (Asikin et al., 2015; Chang et al., 2019; Ferraz et al., 2018; Werner, 2016) donde presentan un comportamiento similar al presentado en esta caracterización.

Figura 9*Difractograma - DRX*

Nota. El gráfico representa el Difractograma de la muestra de Roca Coquina sin modificación térmica.

Fuente: Universidad de Antioquia

Tomando en cuenta investigaciones realizadas para determinar si el difractograma que vemos en la figura 3 corresponde a presencia de carbonato de calcio (CaCO_3), se detalla mayor intensidad en el rango 30 y una intensidad del 100% indica presencia de mineral calcita (ver figura 10), Al comparar con el estudio realizado por Wu et al., 2022 en el que se utilizó el reciclado de caparazón de cangrejo para remoción de verde malaquita y este indica presencia del compuesto en la misma posición lo que corrobora la información anteriormente mencionada

Figura 10*Patrón de líneas DRX*

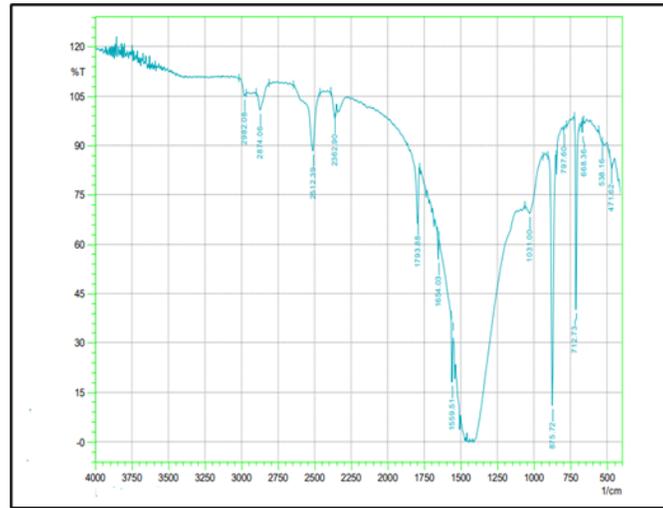
Nota. El gráfico representa el patrón de la intensidad en el análisis DRX. Fuente: Universidad de Antioquia.

7.1.4 Análisis FTIR

El espectro que se observa en la figura 11 junto con los datos de la tabla 10, representan las bandas del anión Carbonato (CO_3^{-2}), esto evidencia la presencia de calcita en la muestra seleccionada, como se mencionó con anterioridad, realizando la comparación con investigaciones realizadas con características similares de bioadsorbente como las conchas de otras y almejas (Nguyen et al., 2020; Chang et al., 2019; Samudio, 2018) que corresponden a la composición de material con Carbonato de calcio.

Figura 11

Espectro FTIR



Nota. El grafico representa el espectro FTIR de la muestra de Roca Coquina sin modificación térmica. Fuente: SENA.

Tabla 10

Banda de adsorción de la muestra no modificada

Pico No	Número de Onda (cm-1)
1	471.62
2	538.16
3	668.36
4	712.73
5	797.60
6	875.72
7	875.72
8	1031.00
9	1395.56
10	1414.85
11	1421.60
12	1427.39
13	1434.14
14	1439.92
15	1454.39
16	1460.18
17	1465.00
18	1472.71
19	1507.43
20	1540.23
21	1559.51
22	1559.51
23	1654.03
24	1793.88
25	2362.90
26	2512.39
27	2874.06
28	2982.08

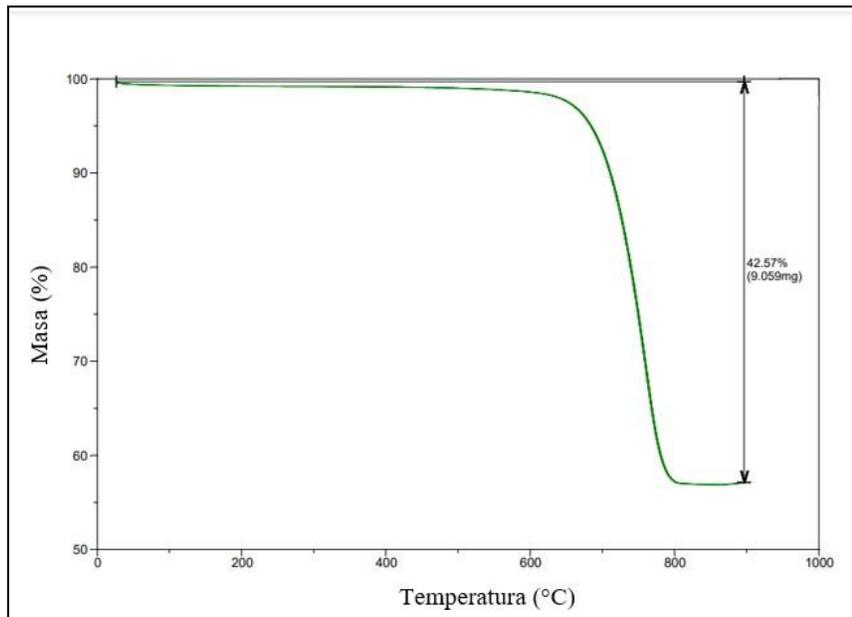
Nota: valores reportados por el SENA.

7.1.5 Análisis TGA

En el termograma presentado en la figura 12 se evidencia una pérdida de masa a una temperatura superior de 600 °C a los 800 °C perdiendo hasta un 42,57% de masa que corresponden a 9,059 mg, estos resultados al compararlos con otros autores, evidencian una relación de pérdidas determinadas a un 35 % en materiales utilizados, como cascaras de huevo, conchas de ostras, almejas entre otros (Natali et al., 2022; Ferraz et al., 2018), concuerdan con la presencia del carbonato de calcio como compuesto principal dentro de las investigaciones. Cabe resaltar que a temperaturas superiores a 600°C ya el material empieza a cambiar sus características, lo que quiere decir que no se puede escoger el material estando en ese punto, dado que el material seleccionado a 120 °C arrojó buenos resultados y se encuentra en una fase donde no sufre una modificación en sus características.

Figura 12

Termograma – TGA



Nota. El gráfico representa el Termograma de la muestra de Roca Coquina sin modificación térmica. Fuente: Universidad de Antioquia

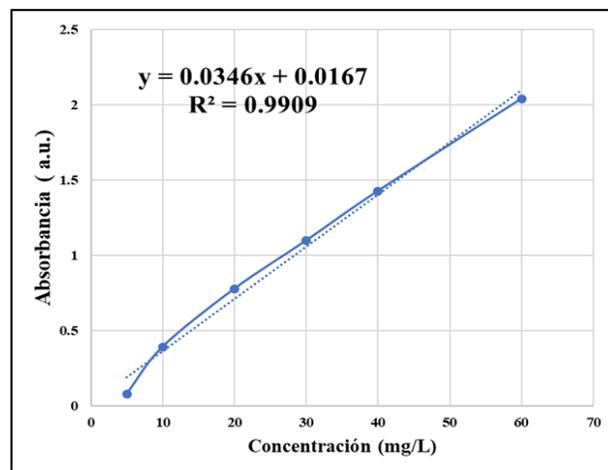
Al analizar investigaciones realizadas donde se utiliza el bagazo de la caña de azúcar y carbonato de bario para remoción del verde malaquita o verde brillante, se observa que estos materiales son modificados en temperaturas cercanas a los 120°C, por lo que empiezan a perder sus características físicas, convirtiéndose en un material inestable en presencia de altas temperaturas (Fan et al., 2021). Haciendo una comparación con el estudio mencionado, la muestra seleccionada tiene mejor viabilidad, ya que no se modifica a altas temperaturas como se observa en la figura 9 y no tiene pérdida de masa como se menciona anteriormente.

7.2 Curva de calibración

Los datos obtenidos experimentalmente en la calibración del colorante verde brillante son la base para obtener la ecuación de la recta (figura 13), siendo necesarios para el análisis de la capacidad de adsorción del material estudiado y las concentraciones. El valor de R^2 obtenido es cercano a 1, lo que indica que podemos utilizar estos datos para pasar hacer la conversión de la absorbancia a concentración por medio de la ecuación de la recta presentada en el gráfico (figura 13).

Figura 13

Curva de calibración de verde brillante



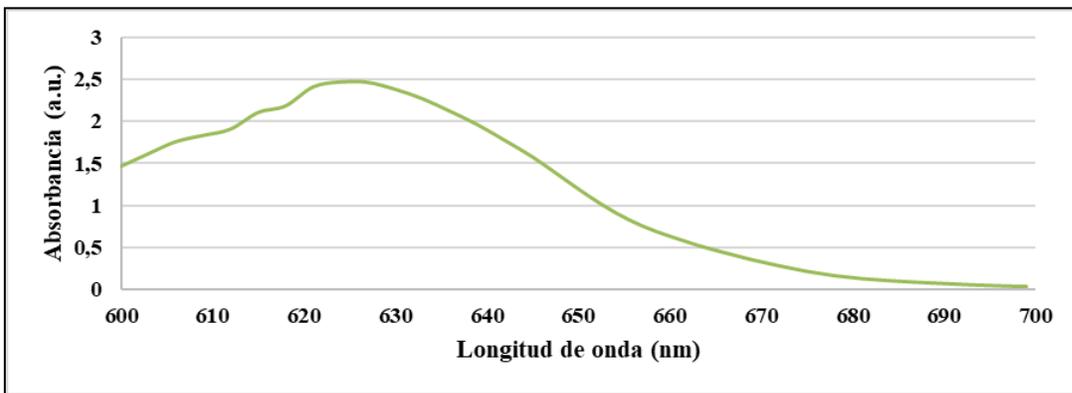
Nota. El gráfico representa la curva de calibración del colorante, donde se observa su linealidad y concentración.

Fuente: autores.

Por otra parte, para definirla longitud de onda a la cual se debían procesar las muestras en el espectrofotómetro, se tomó una serie de lecturas de absorbancia del verde brillante a diferentes longitudes de ondas para realizar el barrido e identificar cual es la mejor a trabajar. La longitud de onda que se evidencia en la figura 14 es de 630, sin embargo, para mejor ajuste del equipo de laboratorio se decidió trabajar a un promedio de 640.

Figura 14

Curva de calibración para selección de longitud de onda



Nota. El gráfico representa el barrido de las diferentes longitudes de onda para seleccionar la que mejor se ajuste.

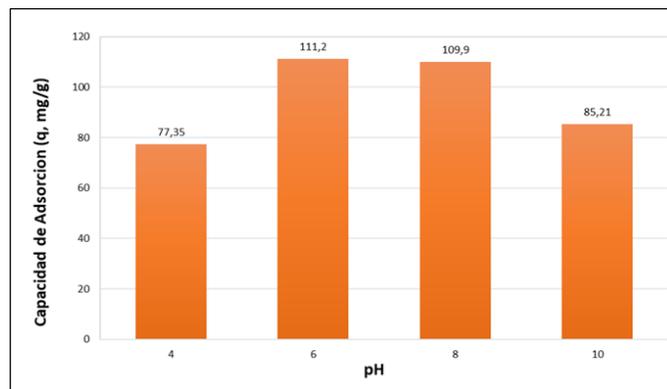
Fuente: autores.

7.3 Análisis de determinación de pH

Para determinar el pH óptimo se tomaron una serie de datos bajo unas condiciones iniciales, siendo estas de una concentración fija de 25 mg/L y un tiempo determinado de 30 minutos. El pH tuvo mayor influencia en la adsorción como se muestra en la figura 15, donde se evidencia una mayor capacidad de adsorción entre los rangos de pH 6 y 8. Se observó que en pH inferiores a 4, se deteriora el adsorbato, ocurriendo lo mismo con pH superiores a 10.

Figura 15

Capacidad de adsorción en función del pH

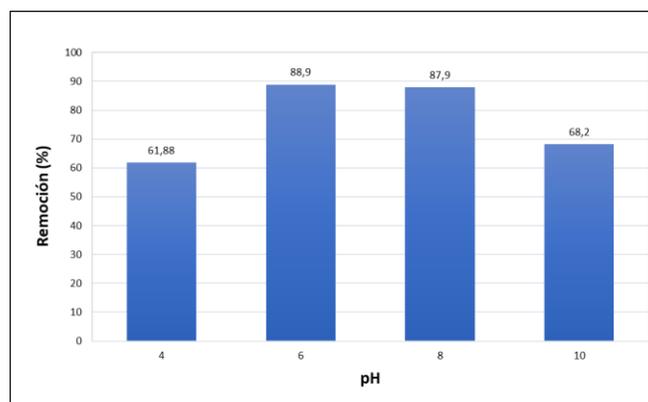


Nota. El gráfico representa la capacidad de adsorción del material bioadsorbente a diferentes pH. Fuente: autores.

En la figura 16 se observa el porcentaje de remoción del 88.9%. En este caso no se realizó variación en cuanto al tipo de adsorbente, ni concentración de este, ya que el interés era analizar en qué rango de pH el colorante fue mayormente removido. Tomando estos datos como referencia, y observándose que no hay una diferencia significativa entre los pH 6 y 8, se seleccionó el pH 7 para que el bioadsorbente tenga mayor eficiencia de adsorción y se tengan mejores resultados en los análisis cinéticos.

Figura 16

Remoción de colorante en función del pH



Nota. El gráfico representa el porcentaje de remoción del colorante verde brillante a diferentes pH. Fuente: autores.

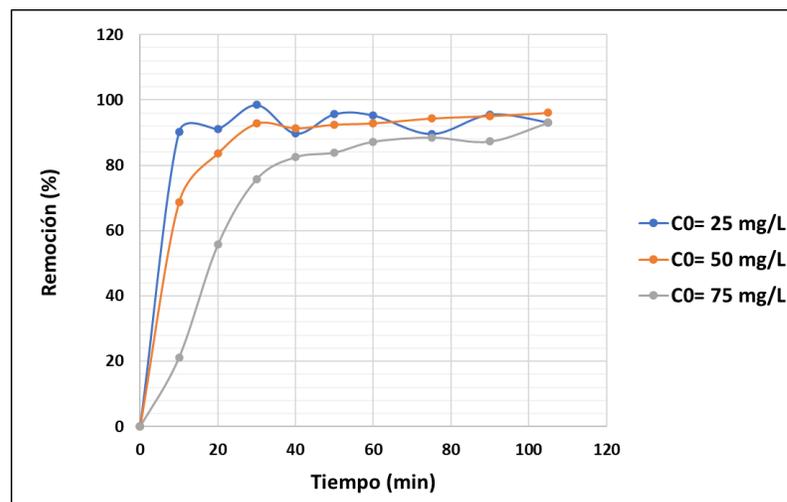
7.4 Variación de concentración inicial de colorante

Para evaluar el efecto de la concentración inicial se realizaron pruebas de adsorción manteniendo el pH, agitación y dosis de material constante, con única variable de concentración inicial de colorante. Según los datos obtenidos en la parte experimental se observó en la figura 17 una remoción positiva en los primeros 15 y 20 minutos, siendo mayor la remoción para la concentración de 25 mg/L y en la figura, en investigaciones realizadas se mostraron capacidades de adsorción favorables a concentraciones altas lo que indica que el bioadsorbente a mayor concentración de colorante su tiempo de adsorción aumenta con el tiempo al tener mayor cantidad de moléculas de tinte (Ruscasso et al., 2021).

Se deduce que a concentraciones bajas la cinética de adsorción es demasiado rápida, ya que se observa una concentración constante antes de los 25 minutos y su progresión no varía, obteniéndose un comportamiento relativamente lineal.

Figura 17

Remoción del colorante según la variación de concentración

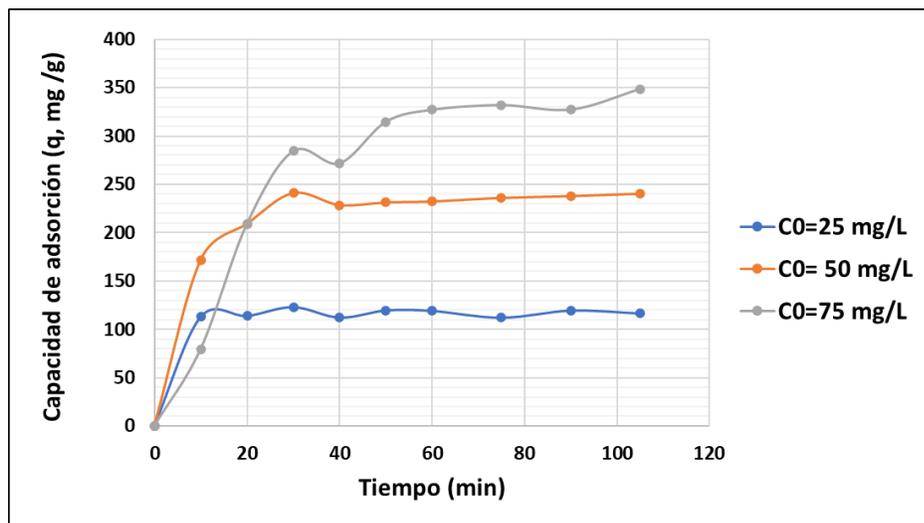


Nota. El gráfico representa el porcentaje de remoción a diferentes concentraciones de colorante. Fuente: autores.

Para determinar la eficiencia del material estudiado, se comparó con otros materiales implementados en otros estudios. Por ejemplo, Haladu. (2022) implementó la resina de cicloterpolimero sensible al pH y sus resultados muestran una remoción del 90% hasta el minuto 65 para una concentración de 50 mg/L de colorante verde brillante, esto rectifica que la roca coquina en comparación tiene mejores resultados en un menor tiempo llegando a una remoción a los 40 min a la misma concentración (ver figuras 17 y 18).

Figura 18

Capacidad de adsorción según la variación de concentración



Nota. El gráfico representa la capacidad de adsorción del material bioadsorbente a diferentes concentraciones de colorante. Fuente: autores

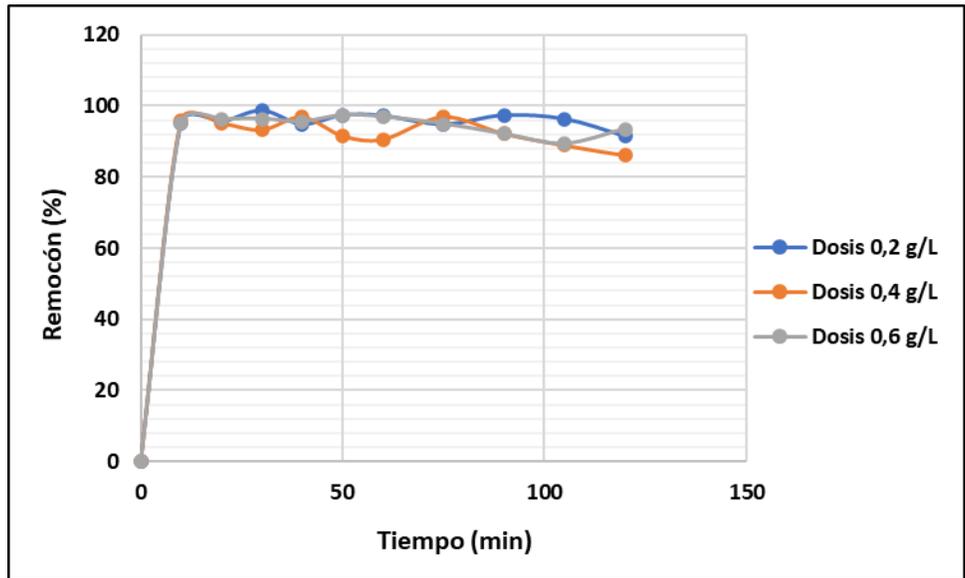
En Otra investigación realizadas para el mismo colorante (verde brillante), donde se utilizó como adsorbente alcalí-lacasa inmovilizada con biocarbon (Wang et al., 2022), muestra que maneja una capacidad de adsorción (q mg/g) de hasta 700 en un tiempo de 330 minutos, lo cual demuestra que es un adsorbente para el cual su proceso de adsorción tiende a tomar más tiempo en comparación con el presentado en este estudio.

7.5 Variación de dosis de adsorbente

Para determinar la dosis optima de bioadsorbente se realizaron pruebas de adsorción variando solo está variable y manteniendo constante el pH, concentración inicial de colorante (verde brillante) y agitación. Se observa en las figuras 19 y 20, que se obtiene un porcentaje de remoción alto aproximadamente del 96% a los 20 minutos para las tres dosis. Lo anterior sugiere que en el rango de concentración de adsorbente evaluado no hay variación significativa en cuanto al porcentaje de remoción, sin embargo, al comparar la capacidad de adsorción presentada en la figura 20 se evidencia que a concentraciones de 0,2 mg/L tanto en la remoción como la capacidad de adsorción es favorable, correspondiente a los datos obtenidos se trabajó con 0,2 mg/L. dosis optima de adsorbente.

Figura 19

Remoción de colorante según la variación de dosis de adsorbente

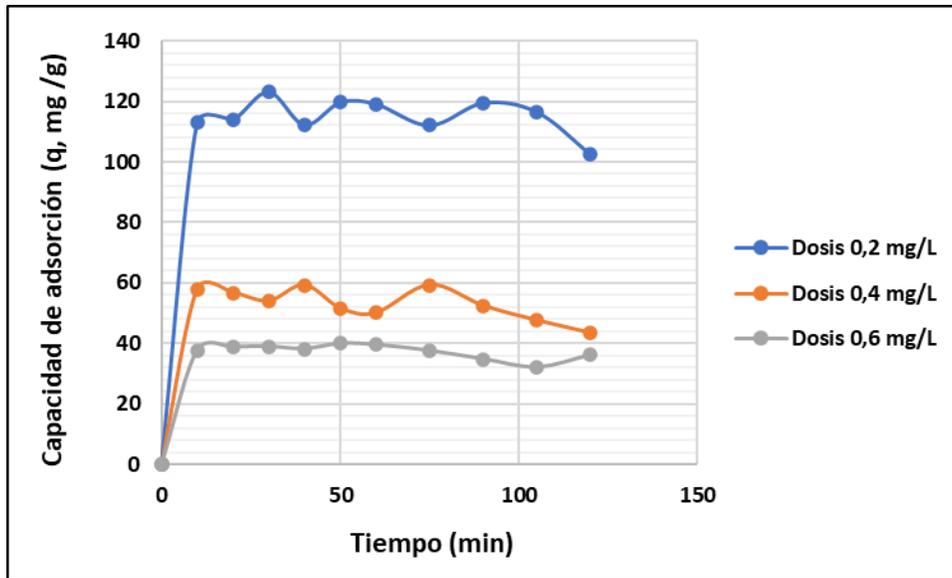


Nota. El gráfico representa el porcentaje de remoción del colorante verde brillante a diferentes dosis de material bioadsorbente.

Fuente: autores.

Figura 20

Capacidad de adsorción según la variación de dosis de adsorbente



Nota. El gráfico representa la capacidad de adsorción del material a diferentes dosis. Fuente: autores.

7.6 Cinética de adsorción

Este estudio cinético permite observar la velocidad a la que el colorante es adsorbido, donde se tuvo en cuenta 4 modelos cinéticos que son altamente referenciados en investigaciones anteriores (Simonin, 2016) y (Haladu, 2022), que son Pseudo primer orden, Pseudo segundo orden, modelo Intra-partícula y Elovich.

Los resultados evidencian en las tablas, donde representan valores de constantes para cada uno de estos métodos a diferentes tamaños de partícula, concentraciones de adsorbato y adsorbente. El modelo que mejor ajuste presenta para los datos experimentales obtenidos para el material bioadsorbente evaluado según las tablas 11, 12 y 13 es el Pseudo segundo orden, este modelo presenta un coeficiente de regresión muy cercano a 1.

Tabla 11

Parámetros de ajuste no lineal de Pseudo-primer orden y Pseudo-segundo orden

MODELO	Roca coralina Coquina (Rc)		
	Concentración Inicial mg L ⁻¹		
	25	50	75
Pseudo-first order			
q_1 (mg g ⁻¹)	117.37 ± 1.4590	227.8027 ± 7.068	390.8671 ± 2.0779
k_1 (min ⁻¹)	5.3959	43.1137	0.0274
R^2	0.9849	0.9129	0.9331
R^2_{adj}	0.9832	0.9033	0.9331
χ^2	21.2886	499.6374	518.1608
MSE (mg g ⁻¹)	4.6139	22.3525	22.7631
Pseudo-Second order			
q_2 (mg g ⁻¹)	119.3731 ± 2.0217	253.3723 ± 4.3189	515.5514 ± 0.9877
k_2 (min ⁻¹)	0.0139	9.3080	4.8321
R^2	0.9874	0.9904	0.9972
R^2_{adj}	0.9860	0.9893	0.9972
χ^2	17.7055	55.0278	27.1232
MSE (mg g ⁻¹)	4.2078	7.4180	5.208

Nota: valores obtenidos en el programa Origin 2022. Fuente: autores.

Tabla 12

Parámetros de ajuste no lineal modelo Intra-partícula

MODELO	Roca coralina Coquina (Rc)		
	Concentración Inicial mg L ⁻¹		
	25	50	75
Intra-particle d.			
q (mg g ⁻¹)	7.7267 ± 2.5508	17.9999 ± 4.1708	34.2496 ± 4.0196
k (min ⁻¹)	7.7267	17.9999	34.2496
C	55.0058	86.6544	31.7080
R^2	0.5048	0.6742	0.8897
R^2_{adj}	0.4498	0.6380	0.8774
χ^2	699.6441	1870.53	1737.37
MSE (mg g ⁻¹)	26.4507	43.2497	41.6817

Nota: valores obtenidos en el programa Origin 2022. Fuente: autores.

Tabla 13*Parámetros de ajuste no lineal modelo Elovich*

MODELO	Roca coralina Coquina (Rc)		
	Concentración Inicial mg L ⁻¹		
	25	50	75
Elovich			
<i>a</i>	102.6201 ± 5.1901	4934.43 ± 7433.91	16.9085 ± 0.0866
<i>b</i>	0,0486	0.0401	0.0068
<i>R</i> ²	0.9062	0.9798	0.9974
<i>R</i> ² _{adj}	0.9061	0.9775	0.9974
<i>X</i> ²	37.1835	115.8007	24.4806
MSE (mg g ⁻¹)	6.0978	10.7610	4.9478

Nota: valores obtenidos en el programa Origin 2022. Fuente: autores.

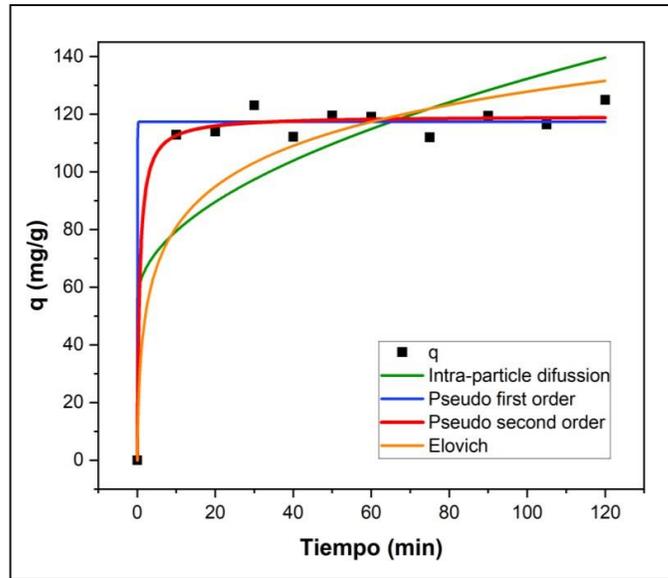
Se observa en las figuras 21, 22 y 23, la secuencia de modelos para expresar el ajuste no lineal para cada una de las concentraciones de 25 mg/L con un R² = 0.9874, 50 mg/L con un R² = 0.9904 y 75 mg/L R² = 0.9972, para el modelo Pseudo segundo orden, por ende, su ajuste fue el mejor presentado y fue seleccionado para la investigación.

En las literaturas de manera general se utilizan los modelos Pseudo primer orden y Pseudo segundo orden ya que con el primero se explica un proceso de difusión de partículas y el segundo propone un proceso regido por la reacción de adsorción en fase líquido/sólido en el adsorbente, fue por esta última parte que los resultados experimentales en esta como en otras literaturas la cinética de reacción de Pseudo segundo orden es la mejor con los datos relacionados en la investigación de (Simonin, 2016).

Otra investigación que relaciona el modelo Pseudo segundo orden como el mejor ajustado trata sobre piedras de magnetita a base híbrida para la adsorción del verde brillante, se analizó que el estudio cinético se Pseudo segundo orden fue el más apropiado (Ahmed et al., 2022).

Figura 21

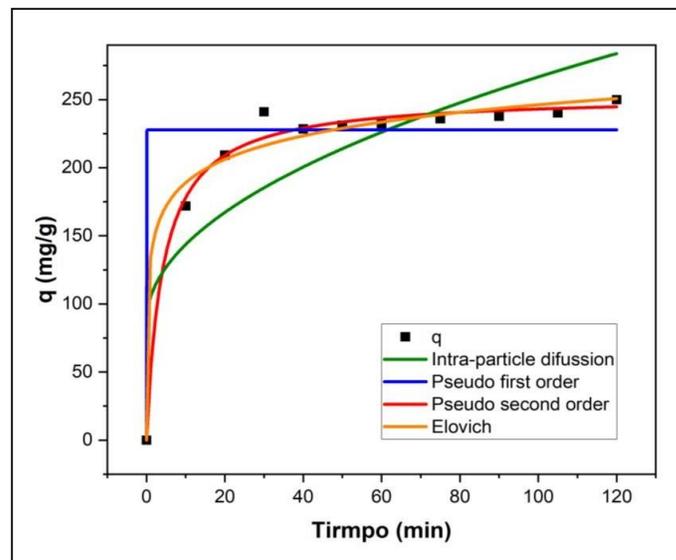
Ajuste no lineal a concentración de 25 mg/L



Nota. El gráfico representa el ajuste no lineal de los modelos cinéticos implementados a concentración de 25 mg/L. Obtenido en el programa Origin 2022. Fuente: autores.

Figura 22

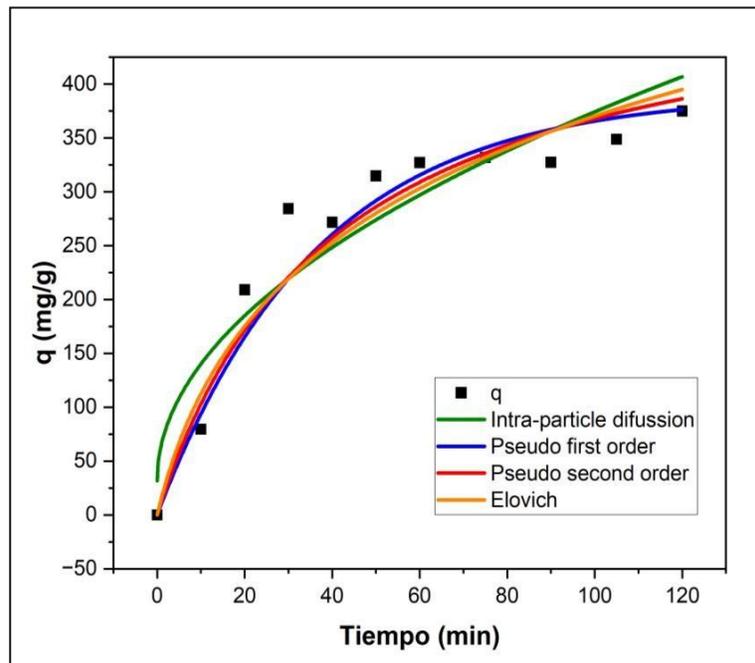
Ajuste no lineal a concentración de 50 mg/L



Nota. El gráfico representa el ajuste no lineal de los modelos cinéticos implementados a concentración de 50 mg/L. Obtenido en el programa Origin 2022. Fuente: autores

Figura 23

Ajuste no lineal a concentración de 75 mg/L



Nota. El gráfico representa el ajuste no lineal de los modelos cinéticos implementados a concentración de 75 mg/L. Obtenido en el programa Origin 2022. Fuente: autores

8. Conclusiones

En esta investigación se evaluó el rendimiento de la Roca Coquina pulverizada como material bio-adsorbente para la remoción del colorante verde brillante presente en aguas residuales de la industria textil. Los resultados obtenidos de la caracterización del material y herramientas de análisis como son los modelos cinéticos muestran excelentes resultados de adsorción a condiciones estándares como la temperatura de secado del material 120°C, pH 7, velocidad de agitación de 220 rpm y temperatura ambiente, volviéndose óptimo para el proceso de adsorción bajo dichas condiciones y sin modificación térmica.

Evaluando el tamaño de partícula se evidencia como varia la capacidad que tiene el material para adsorber el colorante y teniendo un mayor rendimiento con tamaños mayores a 300 μm en comparación con las partículas finas, por ende, este material fue seleccionado para realizarla caracterización a través de las técnicas BET, DRX, FTIR y TGA, observándose según los resultados su composición y comportamiento, evidenciándose su relación mayormente con el mineral calcita que logra demostrar mantener mayor afinidad con el colorante. En el análisis TGA se evidencia una modificación térmica de la roca coralina a temperaturas superiores a 600 °C y presenta desintegración del material ocasionado un incremento de pH y turbiedad.

Asimismo, se determinaron condiciones para evaluar la eficiencia del bioadsorbente, dando como resultado una remoción altamente positiva con valores superiores al 80% con respecto al punto de carga cero, puesto que dentro de los resultados muestra una neutralización de cargas en un pH de 8 y comparando con otros autores, este pH se acerca más al neutro, reduciendo el impacto por cambios de pH dentro del proceso de remoción.

Por otra parte, se obtuvo un porcentaje de remoción de hasta 96 % en los primeros 30 minutos, lo que quiere decir que el adsorbente interactúa de manera rápida con el colorante en poco tiempo. Teniendo en cuenta lo anterior, si lo comparamos con otros bioadsorbentes utilizados se evidencia que el material tiene mejor eficiencia en menor tiempo, lo mismo ocurre con la capacidad de adsorción, su alta afinidad se logra en los primeros minutos en una concentración de 25 mg/L.

Para el estudio cinético se concluyó que el modelo que tiene mejor ajuste es el Pseudo segundo orden para un tamaño de partícula grueso de la Roca Coquina en concentraciones de colorante verde brillante de 25 mg/L, 50 mg/L y 75 mg/L, dado que se basa una buena relación con el proceso de velocidad de reacción adsorción en fase líquido/sólido como se menciona en investigaciones realizadas.

Lo anterior demuestra la eficiencia del material (roca coquina) como método alternativo para la remoción del colorante verde brillante por su fácil accesibilidad ya que se encuentra en zonas costeras como residuo fosilizado de conchas sin generar afectaciones ambientales ni subproductos químicos.

9. Recomendaciones

Para que la investigación realizada se pueda implementar a mayor escala y aplicarla a nivel industrial, se deben emplear estudios de impacto ambiental en base a la extracción de este material encontrado en la costa de la playa. Sin embargo, hasta el momento no se han encontrado impactos relacionados, ya que, según la literatura consultada, el material se forma por fragmentos de conchas depositadas por la acción de agentes de transporte, como se especificó con anterioridad en el marco teórico.

Se recomienda por otro lado, ampliar los tiempos de experimentación para evaluar la eficiencia de retención. Asimismo, hacer pruebas con agua residual real de industrias textil y estudiar el comportamiento, seguido a ello se recomienda evaluar otras variables fisicoquímicas para determinar las condiciones del agua y garantizar que no incumpla con los parámetros estipulados para su vertimiento en la normativa vigente (resolución 631 de 2015) como por ejemplo la demanda química de oxígeno (DQO), dureza, alcalinidad, entre otros parámetros que son de gran importancia para efectuar vertimientos.

Finalmente, se recomienda una profundización en el tratamiento y análisis del material para remover el adsorbato y poder ser reutilizado, logrando así un mejor rendimiento y generando mayor rentabilidad, analizando también la posible presencia de otro tipo de subproductos que puedan ser utilizados en actividades o procesos de las distintas industrias, buscando reducir aún más los residuos generados e incluirlos en una economía circular.

10. Referencias

- Adeleke, O. A., Latiff, A. A. A., Saphira, M. R., Daud, Z., Ismail, N., Ahsan, A., Ab Aziz, N. A., Al-Gheethi, A., Kumar, V., Fadilat, A., & Apandi, N. (2019). Principles and Mechanism of Adsorption for the Effective Treatment of Palm Oil Mill Effluent for Water Reuse. *Nanotechnology in Water and Wastewater Treatment*, 1–33.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813902-8.00001-0>
- Ahmed, S. B., Mahmoud, N. M., Manda, A. A. & Refaat, H. M. (2022). Study of the optimization and mechanism for the remediation process of Malachite green dye via hybrid-based Magnetite-date's stones. *Alexandria Engineering Journal*, 61(12), 9879-9889. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.02.065>
- Ahuja, S. (2021). Water quality worldwide. *Handbook of Water Purity and Quality*, 19–33.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821057-4.00003-3>
- Ali, K., Javaid, M. U., Ali, Z., & Zaghum, M. J. (2021). Biomass-Derived Adsorbents for Dye and Heavy Metal Removal from Wastewater. *Adsorption Science & Technology*, 2021, 1–14. <https://doi.org/10.1155/2021/9357509>
- Amaringo, F. A., & Hormaza Anaguano, A. (2013). Determinación del punto de carga cero y punto isoeléctrico de dos residuos agrícolas y su aplicación en la remoción de colorantes. *Revista de investigación Agrícola y Ambiental*, 30.

- Ardila, C., Palacio, A., & Barrera, R. (2018). Cáscara de Piña como Adsorbente de Colorantes Típicos de la Industria Textil. Uptc.edu.co.
https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ciencia_en_desarrollo/article/view/7689/7268
- Asikin-Mijan, N., Taufiq-Yap, Y. & Lee, H. (2015). Synthesis of clamshell derived Ca(OH)₂ nano-particles via simple surfactant-hydration treatment. *Chemical Engineering Journal*, 262, 1043-1051. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.10.069>
- Avelino, C. (2021). Sustitución de productos químicos tóxicos por productos químicos sostenibles en los procesos de la industria textil mediante tecnologías limpias.
<http://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12952/5836/IF-AVELINO%20CARHUARICRA%20-FIQ-2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Bae S.J., Freeman S.H. y Kim D.S., 2006. Influences of new azo dyes to the aquatic ecosystem. *Fiber Polymer.*, 7, 30-35
- Barajas, J., Cano, M., Castorena, J. H., Santiago, V., & Díaz, J. (2016). Remocion de colorantes por medio de Curcubitaceas. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 7(4), 67-80.
- Bergslien, E. T. (2022). X-ray diffraction (XRD) evaluation of questioned cremains. *Forensic Science International*, 332, 111171.
<https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2022.111171>

Brunauer, S., Emmett, P. H. & Teller, E. (1938). Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *Journal of the American Chemical Society*, 60(2), 309-319.

<https://doi.org/10.1021/ja01269a023>

Brião, G. de V., da Silva, M. G. C., Vieira, M. G. A., & Chu, K. H. (2022). Correlation of type II adsorption isotherms of water contaminants using modified BET equations. *Colloid and Interface Science Communications*, 46, 100557.

<https://doi.org/10.1016/j.colcom.2021.100557>

Cabral, D. S., Campos Medeiros, L. C., Barbosa Alves, B. V., Passos, L. S., Pereira, T. M., Merçon, J., Castheloge, V. D., & Chippari-Gomes, A. R. (2022). Do iron and manganese affect the health of the estuarine oyster *Crassostrea rhizophorae*? *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 268, 107800.

<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.107800>

Centro Nacional de Información Biotecnológica (2022). Resumen de compuestos de PubChem para CID 12449, verde brillante. Recuperado de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Brilliant-green> .

Centro Nacional de Información Biotecnológica (2022). Resumen de compuestos de PubChem para CID 6694, Rhodamine B. Obtenido de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Rhodamine-B> .

Chang, H. Y., Kuo, Y. L. & Liu, J. (2019). Fluoride at waste oyster shell surfaces – Role of magnesium. *Science of The Total Environment*, 652, 1331-1338.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.238>

Chen, Y., Xu, J., Lv, Z., xie, R., Huang, L., & Jiang, J. (2018). Impacts of biochar and oyster shells waste on the immobilization of arsenic in highly contaminated soils. *Journal of Environmental Management*, 217, 646–653.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.007>

Chourasiya, R., Pandey, S., & Kumar Malviya, R. (2022). Developing a framework to analyse the effect of sustainable manufacturing adoption in Indian textile industries.

Cleaner Logistics and Supply Chain, 4, 100045.

<https://doi.org/10.1016/j.clscn.2022.100045>

Corbett, P. W. M., Wang, H., Câmara, R. N., Tavares, A. C., Borghi de Almeida, L. F., Perosi, F., Machado, A., Jiang, Z., Ma, J., & Bagueira, R. (2017). Using the porosity exponent (m) and pore-scale resistivity modelling to understand pore fabric types in coquinas (Barremian-Aptian) of the Morro do Chaves Formation, NE Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 88, 628–647.

<https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.08.032>

Cortazar Martínez, A., Coronel Olivares, C., Escalante Lozada, A., & González Ramírez, C. (2012). Contaminación generada por colorantes de la industria textil. *Vida Científica*.

Cruz, R. (2019). Evaluación de distintos adsorbentes basados en calcio en la adsorción del colorante índigo carmín. *Buap.mx*.

<https://doi.org/https://hdl.handle.net/20.500.12371/4578>

De Cózar Escalante, J. M. (2005). Principio de precaución y medio ambiente. *Revista Españolas de la Salud Pública*, 79(2).

Deckker, P., Reeves, J. & Prendergast, A. (2017). She sells sea shells. *Australian Academy of Science*. <https://www.science.org.au/curious/earth-environment/sea-shells>

De La Hoz, M. (2010). Condición somática de la almeja *Polymesoda solida* (Veneroidea: Corbiculidae) durante el periodo lluvioso, en el Parque Natural Isla de Salamanca, Caribe colombiano. In *Rev. Biol. Trop. (Int. J. Trop. Biol. ISSN (Vol. 58, Issue 1)*.

Díaz, A. and Rodelo, E., 2019. Evaluación de materiales bioadsorbentes modificados térmicamente en la remoción de nutrientes presentes en aguas residuales municipales de la ciudad de Barranquilla. Repositorio.cuc.edu.co. Disponible en: <<https://repositorio.cuc.edu.co/handle/11323/4914>>.

Ensuncho, A. E., Milanés, N., & Robles, J. R. (2015). Remoción del colorante rojo allura en solución acuosa utilizando carbones activados obtenidos de desechos agrícolas. *Información tecnológica*, 26(2), 69-78.

Ergaieg, K., Msaddek, M. H., Kallel, A., & Trabelsi, I. (2021). Monitoring of horizontal subsurface flow constructed wetlands for tertiary treatment of municipal wastewater. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(19). <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08419-y>

Europa press. (2017). Las conchas marinas, una nueva fuente de biomateriales sostenibles. <https://www.europapress.es/sociedad/medio-ambiente-00647/noticia-conchas-marinas-nueva-fuente-biomateriales-sostenibles-20170705040443.html>

Ezechi, E. H., Kutty, S. R. bin M., Malakahmad, A., & Isa, M. H. (2015). Characterization and optimization of effluent dye removal using a new low cost adsorbent: Equilibrium, kinetics and thermodynamic study. *Process Safety and Environmental Protection*, 98, 16–32. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.06.006>.

Fan, X., Deng, L., Li, K., Lu, H., Wang, R. & Li, W. (2021). Adsorption of malachite green in aqueous solution using sugarcane bagasse-barium carbonate composite. *Colloid and Interface Science Communications*, 44, 100485. <https://doi.org/10.1016/j.colcom.2021.100485>

Garcés Giraldo, L. F., & Peñuela Mesa, G. A. (2007). Tratamiento de las aguas residuales de una industria textil utilizando colector solar. *Revista lasallista de investigación*, 25.

García, C. (2019). Adsorción de compuestos clorados en sílices dopadas: Cu/SiO₂, Fe/SiO₂ y Ag/SiO₂ para aplicaciones ambientales.

<https://repositorioinstitucional.buap.mx/bitstream/handle/20.500.12371/5012/838019TL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Giwa, S. O., Said, D. Y., Ibrahim, M. D., & Giwa, A. (2017). Textile wastewater treatment using sodom apple (*Calotropis procera*) - Aided tamarind seed as a coagulant.

International Journal of Engineering Research in Africa, 32, 76–85.

<https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/JERA.32.76>

Ghosh, S., Islam, S., Pramanik, S., & Seth, S. K. (2022). Structural elucidation of phenoxybenzaldehyde derivatives from laboratory powder X-ray diffraction: A combined experimental and theoretical quantum mechanical study. *Journal of Molecular Structure*, 133697. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.133697>

Giraldo, G., Fernando, L., Mesa, P., & Antonio, G. (2005). Cinética de degradación y mineralización del colorante Naranja Reactivo 84 en aguas. *Revista Lasallista de Investigación*.

Haladu, S. A. (2022). Highly efficient adsorption of malachite green dye onto a cross-linked pH-responsive cycloterpolymer resin: Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. *Journal of Molecular Liquids*, 357, 119115.

<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.119115>

- Hasanpour, M., & Hatami, M. (2020). Photocatalytic performance of aerogels for organic dyes removal from wastewaters: Review study. *Journal of Molecular Liquids*, 309, 113094. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113094>
- Hernández. & Muñoz, S. (2018). Caracterización de Tecnologías aplicadas al tratamiento de aguas residuales de la industria textil. *Universidad Libre*.
<https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/ambiental/article/view/5770>
- Holkar, C., Jadhav, A., Pinjari, D., Mahamuni, N., & Pandit, A. (2016). A critical review on textile wastewater treatments: Possible approaches. *Journal of Environmental Management*, 356-358.
- Jung, S., Heo, N. S., Kim, E. J., Oh, S. Y., Lee, H. U., Kim, I. T., Hur, J., Lee, G.-W., Lee, Y.-C., & Huh, Y. S. (2016). Feasibility test of waste oyster shell powder for water treatment. *Process Safety and Environmental Protection*, 102, 129–139.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.03.004>.
- Katha, P. S., Ahmed, Z., Alam, R., Saha, B., Acharjee, A., & Rahman, M. S. (2021). Efficiency analysis of eggshell and tea waste as Low cost adsorbents for Cr removal from wastewater sample. *South African Journal of Chemical Engineering*, 37, 186–195. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2021.06.001>

- Katheresan, V., Kansedo, J., & Lau, S. Y. (2018). Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(4), 4676–4697. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.06.060>
- Kishor, R., Raj, A., & Bharagava, R. N. (2022). Synergistic role of bacterial consortium (RKS-AMP) for treatment of recalcitrant coloring pollutants of textile industry wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 47, 102700. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102700>
- Lellis, B., Fávoro-Polonio, C. Z., Pamphile, J. A., & Polonio, J. C. (2019). Effects of textile dyes on health and the environment and bioremediation potential of living organisms. *Biotechnology Research and Innovation*, 3(2), 275–290. <https://doi.org/10.1016/j.biori.2019.09.001>
- Li, Q., Zhai, J., Zhang, W., Wang, M., & Zhou, J. (2007). Kinetic studies of adsorption of Pb(II), Cr(III) and Cu(II) from aqueous solution by sawdust and modified peanut husk. *Journal of Hazardous Materials*, 141(1), 163–167. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.06.109>
- Lim, A., Chew, J. J., Ismadji, S., Khaerudini, D. S., Darsono, N., & Sunarso, J. (2022). Kinetic and equilibrium adsorption study of anionic dyes using oil palm trunk-derived activated carbon. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.918>

Maldonado. (2009). Ciudades y contaminación ambiental. *Revista de Ingeniería*, 68.

Mansilla, H., Lizama, C., Gutarra, A., & Rodríguez, J. (2001). *Tratamiento de residuos líquidos de la industria de celulosa y textil*.

Maria, R. (04 de 11 de 2012). slide share. Recuperado el 06 de 07 de 2017, de <https://es.slideshare.net/MariaGpeRdzMarthell/distribucin-de-planta-15020464>

Melgar Merino, A. (Enero-Diciembre de 2013). Evaluación del proceso de biosorción del colorante rodamina contenidas en las aguas residuales de la Cooperativa Textil Manufacturas del Centro Ltda. con cáscara de naranja modificada. *Prospectiva universitaria*, 10(1 y 2), 1.

Mondragón, P. (2017). Espectroscopia de infrarrojo para los alimentos consumidos en México. https://ciatej.mx/files/divulgacion/divulgacion_5a43b7c09fdc1.pdf

Natali, M., Torre, L., Puri, I. & Rallini, M. (2022). Thermal degradation of phenolics and their carbon fiber derived composites: A feasible protocol to assess the heat capacity as a function of temperature through the use of common DSC and TGA analysis. *Polymer Degradation and Stability*, 195, 109793. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2021.109793>

Nguyen, T., Ngo, H., Guo, W., Nguyen, T., Vu, N., Soda, S., Nguyen, T., Nguyen, M., Tran, T., Dang, T., Nguyen, V. & Cao, T. (2020). White hard clam (*Meretrix lyrata*) shells as novel filter media to augment the phosphorus removal from wastewater.

Science of The Total Environment, 741, 140483.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140483>

Okafor, C. C., Madu, C. N., Ajaero, C. C., Ibekwe, J. C., & Nzekwe, C. A. (2021).

Sustainable management of textile and clothing. *Clean Technologies and Recycling*, 1(1), 70–87. <https://doi.org/10.3934/ctr.2021004>

ONU. (2019). No dejar a nadie atrás. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo del recurso hídrico. <https://www.acnur.org/5c93e4c34.pdf>

Osorio, R. (2019). Estudio comparativo de la remoción de azul de metileno con cascara de yuca y banano.

Ramirez Bravo, A. T. (2015). Estudio de la calidad del agua de riego del rio quillcay con fines de riego durante el año 2014. *Universidad Nacional Santiago Antunez De Mayolo(T0441)*, 1.

Rashid, S., Shen, C., Yang, J., Liu, J., & Li, J. (2018). Preparation and properties of chitosan–metal complex: Some factors influencing the adsorption capacity for dyes in aqueous solution. *Journal of Environmental Sciences*, 66, 301–309.
<https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.04.033>

Rigueto, C. V. T., Piccin, J. S., Dettmer, A., Rosseto, M., Dotto, G. L., de Oliveira Schmitz,

A. P., Perondi, D., de Freitas, T. S. M., Loss, R. A., & Geraldi, C. A. Q. (2020).

Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) roots, an amazon natural waste, as an

alternative biosorbent to uptake a reactive textile dye from aqueous

solutions. *Ecological Engineering*, 150, 105817.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105817>

Risso, R., Ferraz, P., Meireles, S., Fonseca, I. & Vital, J. (2018a). Highly active Cao

catalysts from waste shells of egg, oyster and clam for biodiesel production. *Applied*

Catalysis A: General, 567, 56-64. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2018.09.003>

Risso, R., Ferraz, P., Meireles, S., Fonseca, I. & Vital, J. (2018b). Highly active Cao

catalysts from waste shells of egg, oyster and clam for biodiesel production.

Applied Catalysis A: General, 567, 56-64.

<https://doi.org/10.1016/j.apcata.2018.09.003>

Ruscasso, F., Bezus, B., Garmendia, G., Vero, S., Curutchet, G., Cavello, I. &

Cavalitto, S. (2021). *Debaryomyces hansenii* F39A as biosorbent for textile dye

removal. *Revista Argentina de Microbiología*, 53(3), 257-265.

<https://doi.org/10.1016/j.ram.2020.10.004>

Samudio, L. E. (2018). Caracterización de la dolomita para su uso en procesos de adsorción de fosfato en aguas. Recuperado de <http://ns2.une.edu.py:7004/repositorio/handle/123456789/315>

Sandoval Yoal, L., Miranda Mandujano, E., & Moeller Chávez, G. (2013). Evaluación de diferentes procesos de tratamiento para la remoción de colorantes sintéticos utilizados en la industria textil.

Sharma, B., Dangi, A. K., & Shukla, P. (2018). Contemporary enzyme based technologies for bioremediation: A review. *Journal of Environmental Management*, 210, 10–22. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.075>

Sarro, M., Gule, N. P., Laurenti, E., Gamberini, R., Paganini, M. C., Mallon, P. E., & Calza, P. (2018). ZnO-based materials and enzymes hybrid systems as highly efficient catalysts for recalcitrant pollutants abatement. *Chemical Engineering Journal*, 334, 2530–2538. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.11.146>

Sartape, A. S., Mandhare, A. M., Jadhav, V. V., Raut, P. D., Anuse, M. A., & Kolekar, S. S. (2017). Removal of malachite green dye from aqueous solution with adsorption technique using *Limonia acidissima* (wood apple) shell as low cost adsorbent. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S3229–S3238. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.12.019>

- Singh, D., Sowmya, V., Abinandan, S., & Shanthakumar, S. (2017). Removal of Malachite Green Dye by *Mangifera indica* Seed Kernel Powder. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series A*, 99(1), 103–111. <https://doi.org/10.1007/s40030-017-0257-4>
- Shih, P.-K., & Chang, W.-L. (2015). The effect of water purification by oyster shell contact bed. *Ecological Engineering*, 382-390.
- Simonin, J. P. (2016). On the comparison of pseudo-first order and pseudo-second order rate laws in the modeling of adsorption kinetics. *Chemical Engineering Journal*, 300, 254-263. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.04.079>
- Soudagar, S., Akash, S., Sree Venkat, M., Rao Poiba, V., & Vangalapati, M. (2021). Adsorption of methylene blue dye on nano graphene oxide-thermodynamics and kinetic studies. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.199>
- Su, H., Guo, X., Zhang, X., Zhang, Q., Huang, D., Lin, L., & Qiang, X. (2022). Ultrafine biosorbent from waste oyster shell: A comparative study of Congo red and Methylene blue adsorption. *Bioresource Technology Reports*, 19, 101124. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101124>
- Subhan, F., Aslam, S., Yan, Z., Yaseen, M., Naeem, M., Ikram, M., Ali, A., & Bibi, S. (2022). Adsorption and reusability performance of hierarchically porous silica

(MMZ) for the removal of MB dye from water. *Inorganic Chemistry Communications*, 139, 109380. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2022.109380>

Tejada, C., Ortiz, A., & Ruiz, E. (2015). Adsorption kinetics of Cr (VI) using chemically modified residual biomass in batch and continuous Systems.

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>

Trinidad, L. (2018). Teñido de algodón usando dióxido de carbono a diferentes temperaturas y cantidades de agua a nivel de laboratorio. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/19289/Trinidad_PLA-SD.pdf?sequence=6&isAllowed=y

UBU. (2021). Difracción de Rayos X (DRX). *Universidad de Burgos*. [Www.ubu.es](http://www.ubu.es). <https://www.ubu.es/parque-cientifico-tecnologico/servicios-cientifico-tecnicos/rayos-x/difraccion-de-rayos-x-de-polvo-drx-p>

Uddin, M. K., Mashkoor, F., AlArifi, I. M. & Nasar, A. (2021). Simple one-step synthesis process of novel MoS₂@bentonite magnetic nanocomposite for efficient adsorption of crystal violet from aqueous solution. *Materials Research Bulletin*, 139, 111279. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2021.111279>

- Umh, H. N., & Kim, Y. (2014). Sensitivity of nanoparticles' stability at the point of zero charge (PZC). *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(5), 3175–3178. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.11.062>
- Valladares-Cisneros, M. G., Valerio Cárdenas, C., de la Cruz Burelo, P., & Melgoza Alemán, R. M. (2017). Adsorbentes no-convencionales, alternativas sustentables para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 16(31), 55–73. <https://doi.org/10.22395/rium.v16n31a3>
- Vargas Rodríguez, M., Cabañas Vargas, D., Gamboa Marrufo, M., & Domínguez Benetton, X. (2009). Evaluación del proceso de biosorción con cáscaras de naranja para la eliminación del colorante comercial Lanazol Navy CE en aguas residuales de la industria textil. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, 40.
- Wang, Z., Ren, D., Zhang, X., Zhang, S. & Chen, W. (2022). Adsorption-degradation of malachite green using alkali-modified biochar immobilized laccase under multi-methods. *Advanced Powder Technology*, 33(11), 103821. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2022.103821>
- Wu, J., Yang, J., Feng, P., Wen, L., Huang, G., Xu, C. & Lin, B. (2022). Highly efficient and ultra-rapid adsorption of malachite green by recyclable crab shell biochar. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 113, 206-214. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2022.05.047>

- Yang, J., & Hedin, N. (2022). Advances of lab-scale analytical methods for solidification/stabilization technologies. *Low Carbon Stabilization and Solidification of Hazardous Wastes*, 483–495. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-824004-5.00006-2>
- Yang, F., Gato-Trinidad, S., & Hossain, I. (2022). New insights into the pollutant composition of stormwater treating wetlands. *Science of The Total Environment*, 827, 154229. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154229>
- You, K., Yang, W., Song, P., Fan, L., Xu, S., Li, B., & Feng, L. (2022). Lanthanum-modified magnetic oyster shell and its use for enhancing phosphate removal from water. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 633, 127897. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127897>
- Zahid, M., Ahmad, H., Drioli, E., Rehan, Z. A., Rashid, A., Akram, S., & Khalid, T. (2021). Role of polymeric nanocomposite membranes for the removal of textile dyes from wastewater. *Aquananotechnology*, 91–103. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821141-0.00006-9>
- Zaruma, P., Proal, J., Chaires, I., & Salas, H. (2018). Los Colorantes Textiles Industriales Y Tratamientos Óptimos De Sus Efluentes De Agua Residual: Una Breve Revisión. <file:///C:/Users/carol/Downloads/4rfcq19.pdf>

Zollinger, H. (2004). *Color Chemistry: Syntheses, Properties and Applications of Organic Dyes and Pigments*. Zürich: Angewandte Chemie.

Anexos

Anexo A. Imágenes experimentales

Figura 24

Preparación de material bioadsorbente



Nota. Adaptado de “Evaluación de materiales bioadsorbentes modificados térmicamente en la remoción de nutrientes presentes en aguas residuales municipales de la ciudadde Barranquilla”, por Díaz y Rodelo, 2019.

Figura 25

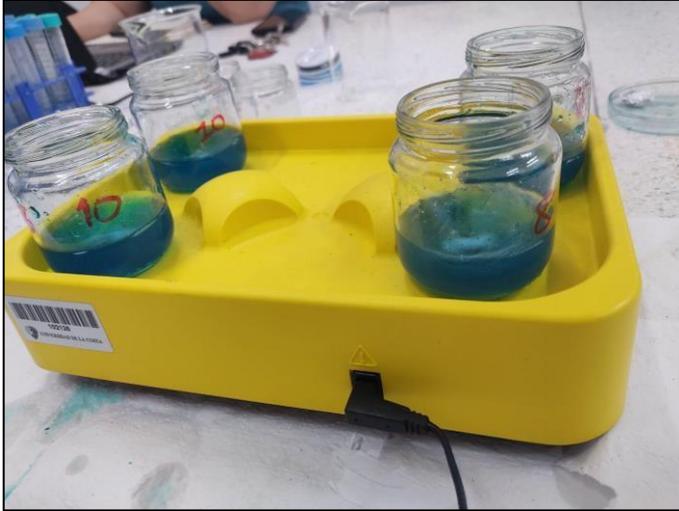
Simulación de agua residual textil



Nota. La imagen representa la simulación de agua residual textil utilizando el colorante verde brillante. Fuente: autores

Figura 26

Montaje de cinética de adsorción



Nota. La imagen representa el montaje realizado en el laboratorio para el procedimiento de cinética de adsorción.

Fuente: autores.