



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ingeniería

Colegio de Ingeniería Textil

Remoción de colorantes textiles utilizando adsorbentes preparados a partir de semillas de chirimoya

Tesis que presenta

Diana Laura López Hernández

Para obtener el título de licenciado en Ingeniería Textil

Directora/Asesora de tesis

Dra. Alejandra Alicia Peláez Cid

Puebla, Pue.

Abril 2023

M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora
Director de la Facultad de Ingeniería
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
P r e s e n t e.

La que suscribe: Dra. Alejandra Alicia Peláez Cid, asesor del tema de tesis:

“REMOCIÓN DE COLORANTES TEXTILES UTILIZANDO ADSORBENTES PREPARADOS A PARTIR DE SEMILLAS DE CHIRIMOYA.”

Presentada por la C. Diana Laura López Hernández -201437189-, pasante del Colegio de Ingeniería Textil, y en atención al oficio No. SAC/0306/2023 con fecha de emisión 03 de febrero de 2023, me permito informar a Usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, metodología, redacción y ortografía de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente en autorizar la impresión del mismo.

Sin otro particular, le reitero la seguridad de mi más atenta y distinguida consideración.

A t e n t a m e n t e
“Pensar bien, para vivir mejor”
H. Puebla de Z. a de 16 de febrero de 2023



Dra. Alejandra Alicia Peláez Cid
Asesor de Tema



Oficio No. SAC/0657/2023

Mtro. Ricardo Valderrama Valdez
Director del Departamento Administración Escolar
Presente.

Por medio de la presente le saludo y al tiempo tengo a bien informar a Usted que la **C. DIANA LAURA LOPEZ HERNANDEZ**, pasante del Colegio de Ingeniería Textil con número de matrícula 201437189, que dentro del marco de *Titulación por Examen Profesional en línea*, sustentará el mismo el día viernes 28 de abril de 2023 a las 12:00 horas, toda vez que la misma tesis queda en resguardo de nuestra Facultad, por lo que me permito sugerir a Usted que el JURADO esté integrado por los siguientes catedráticos:

PRESIDENTE: DRA. ALEJANDRA ALICIA PELÁEZ CID
SECRETARIO: MTRO. JOSÉ ÁNGEL JUÁREZ TORRES
VOCAL: MTRA. MARÍA LUISA CASTELLANOS CABRERA

Sin otro particular, le reitero la seguridad de mi más atenta y distinguida consideración.

Atentamente
"Pensar bien, para vivir mejor"
H. Puebla de Z. a 24 de marzo de 2023

M. C. Víctor Galindo López
Secretario Académico



M'ACGZ/barv
C.c.p. Archivo

Facultad
de Ingeniería

Bld. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. 108 C, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610

La presente tesis se realizó en el laboratorio de Ingeniería Ambiental del Laboratorio Integral de la Facultad de Ingeniería de la BUAP bajo la supervisión de la Dra. Alejandra Alicia Peláez Cid.

Agradecimientos

La autora del trabajo de tesis expresa sus agradecimientos:

A la Dra. Alejandra Alicia Peláez Cid por permitirme trabajar con ella durante mi servicio social, compartiendo de sus conocimientos, creer en mi desempeño, el apoyo durante mi trayecto como estudiante y tiempo en cada paso durante el desarrollo de la tesis.

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla BUAP por otorgarme diversas becas brindándome la oportunidad de realizar movilidad académica, interés por la investigación con el apoyo de la VIEP y diversos eventos que fortalecieron mi formación académica.

A la Dra. Ana María Herrera González por las micrografías de alta resolución, así como la caracterización de la superficie específica por adsorción de N_2 de los materiales carbonáceos.

A Esmeralda Gómez Merino por ser una excelente compañera de colegio y de laboratorio.

Al M.V. José Ángel Juárez Torres por su amistad y apoyo durante todo mi proceso de estudiante.

A todo el cuerpo académico de la Facultad de Ingeniería que me ha apoyado en mis diversos proyectos.

A los miembros del jurado y revisores de tesis:

Dra. Alejandra Alicia Peláez Cid

M.V. José Ángel Juárez Torres

Ing. María Luisa Castellanos Cabrera

Dedicatorias

A Jesús por cuidarme, protegerme durante todo mi camino y encontrarme a personas que han enriquecido mi ser.

A mis padres por brindarme lo necesario para poder desarrollarme como profesionista, especialmente a mi madre con mucho sacrificio ha impulsado mis metas.

A mis hermanos que han estado conmigo en todo mi trayecto con universitaria además de apoyarme moralmente.

A la Dra. Alejandra Alicia Peláez Cid por tener la paciencia y por brindarme parte de su experiencia y conocimientos además de tener un interés por el medio ambiente y de valorar los recursos.

A mis profesores por estar durante todo mi proceso de formación académica y por aquellos que fuera de la universidad siguen apoyándome y fortaleciendo mis aptitudes.

Comunicaciones derivadas

Se participó en el programa Haciendo Ciencia en la BUAP Primavera 2019, mismo que se llevó a cabo del 11 de febrero al 09 de mayo de 2019. Con el proyecto de investigación: “Preparación de carbones activados a partir de residuos vegetales y su aplicación en la eliminación de colorantes textiles”, bajo la asesoría de la Dra. Alejandra Alicia Peláez Cid.

Se participó en el XXVIII International Materials Research Congress del 18 al 23 de agosto del 2019 en Cancún, México, con el trabajo “Optimization of the conditions for the preparation of adsorbents from custard apple seeds and its application in the removal of textile dyes”.

Se obtuvo el primer lugar en la sesión de pósters en el XIII Encuentro de Investigación del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales en modalidad virtual, que se llevó a cabo el día 23 de septiembre de 2020. Con el tema “Preparación de adsorbentes a partir de semillas de chirimoya y su utilización en la adsorción de colorantes textiles” bajo la asesoría de la Dra. Alejandra Alicia Peláez Cid.

Se participó en el día internacional de la mujer y la niña en la ciencia 2021 en exposición de E-POSTER modalidad virtual con el tema “Adsorción de colorantes textiles sobre carbones activados preparados a partir de semillas de chirimoya” con Esmeralda Gómez Merino bajo la asesoría de la Dra. Alejandra Alicia Peláez Cid.

Resumen

En la presente tesis se describe la elaboración, caracterización y adsorción de colorantes textiles sobre materiales adsorbentes a partir de un residuo vegetal, las semillas de chirimoya, obteniendo varios adsorbentes CarChiQ, CarChiQC, CarChiQE, CarChiF y SemChiNaOH, siendo 2 adsorbentes los principales uno celulósico (SemChiNaOH) y un carbonáceo (CarChiQC).

El adsorbente lignocelulósico SemChiNaOH fue activado con NaOH al 25% a 50°C. El carbón CarChiQC fue activado con H₃PO₄ al 50% y carbonizado a 400°C. Ambos adsorbentes fueron caracterizados por punto de carga cero pH_{pzc}, densidad aparente, superficie específica por adsorción de azul de metileno S_{Esp-BB9} y el carbón activado además por superficie específica por adsorción de nitrógeno y S_{BET} y microscopía electrónica de barrido SEM. Se siguió la cinética de adsorción de azul de metileno para ambos adsorbentes. Se determinó la capacidad de adsorción en sistemas estáticos para soluciones acuosas de 300 mg/L de los colorantes azul de metileno (BB9), cristal violeta (BV3), azul astrazón (BB3), amarillo oro maxilón GL (BY28) y rojo maxilón 2 GL (BR28). Los porcentajes de adsorción fueron de 75 a 96% para SemChiNaOH y entre 87 y 99.9% para CarChiQC. Se construyeron las isotermas de adsorción de los colorantes mencionados en el rango de concentraciones de 200 a 1200 mg/L para SemChiNaOH y de 170 a 1020 mg/L para CarChiQC. Las isotermas de adsorción se ajustaron al modelo de Langmuir. Ambos adsorbentes fueron utilizados para el tratamiento de agua residual textil y se evaluaron los parámetros: pH, conductividad, sólidos totales (ST), color y demanda química de oxígeno (DQO), antes y después del tratamiento. La remoción de color en agua residual sobre CarChiQC fue de 97.9% y en SemChiNaOH disminuyó de 9670 a 8820 U. Pt-Co, indicando que ambos adsorbentes son capaces de remover colorantes en presencia de otros agentes contaminantes, mejorando la calidad del agua.

Índice

	Página
Capítulo I: Introducción	
I.1 Descripción de la problemática	1
I.2 Objetivo general	4
I.3 Objetivos específicos	4
I.4 Hipótesis	4
I.5 Justificación	4
Capítulo II: Marco teórico	
II.1 Antecedentes	7
II.2 Historia de los colorantes	8
II.2.1 Colorantes textiles	9
II.2.2 Clasificación de los colorantes	10
II.2.3 Clasificación de los colorantes de acuerdo al Colour Index International	11
II.2.4 Clasificación por estructura química	12
II.2.5 Clasificación por método de aplicación	13
II.2.6 Clasificación por grado de fijación	14
II.3 Contaminación del agua a causa de la industria textil	15
II.4 Métodos de tratamiento en efluentes textiles	16
II.4.1 Adsorción	16
II.4.2 Carbón activado	18
II.4.3 Adsorbentes lignocelulósicos	18
II.4.4 Cinética de adsorción	20
II.4.5 Isotherma de adsorción	21
II.4.6 Factores que influyen en la adsorción de colorantes	24
II.4.7 Mecanismo de adsorción	24
II.4.8 Preparación de materiales adsorbentes	25
II.4.9 Aplicaciones de los adsorbentes	26
II.4.10 Caracterización	27

II.5 Espectrofotometría	29
II.5.1 Transmitancia y absorbancia	30
II.5.2 Ley de Lambert-Beer	32
II.5.3 Espectro de absorción	32
II.5.4 Curva de calibración	33
II.6 Parámetros generales indicadores de contaminación	33
II.6.1 Color	34
II.6.2 Olor y sabor	35
II.6.3 Turbiedad	35
II.6.4 Conductividad	36
II.6.5 Sólidos	36
II.6.6 Potencial de hidrógeno (pH)	37
II.6.7 Demanda química de oxígeno (DQO)	37
II.7 Chirimoya (<i>Annona cherimola</i>)	38
Capítulo III: Experimental	
III.1 Recolección de semillas de chirimoya	41
III.1.1 Preparación de los adsorbentes	41
III.1.2 Carbón activado (AC)	41
III.1.3 Adsorbente lignocelulósico	42
III.2 Porcentaje de humedad	43
III.3 Cenizas	44
III.4 Punto de carga cero (pH_{pzc})	45
III.5 Densidad aparente	46
III.6 Microscopia electrónica de barrido (SEM)	47
III.7 Colorantes seleccionados	47
III.8 Cinética de adsorción	48
III.9 Adsorción estática de soluciones de 300 mg/L	50
III.10 Curvas de calibración	51
III.11 Isotherma de adsorción	52
III.12 Superficie específica	53
III.13 Adsorción de colorantes presentes en agua residual	53

III.13.1 Parámetros de calidad del agua residual	54
III.14 Equipo utilizado	55
Capítulo IV: Resultados y discusión	
IV.1 Morfología de la semilla de chirimoya	56
IV.2 Características de los adsorbentes	56
IV.3 Punto de carga cero (pH_{pzc})	57
IV.4 Densidad aparente	58
IV.5 Microscopia electrónica de barrido (SEM)	58
IV.6 Cinética de adsorción de BB9 con una concentración de 500 mg/L	58
IV.7 Adsorción estática de colorantes en solución acuosa con una concentración de 300 mg/L	60
IV.8 Isotermas de adsorción	61
IV.9 Superficie específica de los adsorbentes	63
IV.10 Resumen general de las propiedades de los adsorbentes	65
IV.11 Mejoramiento en la calidad de las aguas residuales textiles	65
IV.11.1 pH	66
IV.11.2 Conductividad	66
IV.11.3 Sólidos totales (ST)	67
IV.11.4 Color	68
IV.11.5 Demanda química de oxígeno (DQO)	68
Conclusiones	71
Referencias bibliográficas	73

Tablas

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de colorantes por estructura química	12
Tabla 2. Clasificación por método de aplicación sujeto al tipo de fibra	13
Tabla 3. Clasificación por grado de fijación de los colorantes	15
Tabla 4. Comparación de los mecanismos de adsorción	25
Tabla 5. Adsorbentes vegetales utilizados en la remoción de contaminantes en medio acuoso	27
Tabla 6. Colorantes seleccionados	47
Tabla 7. Curvas de calibración de los colorantes básicos	51
Tabla 8. Equipo utilizado	55
Tabla 9. Resumen de la cinética de adsorción de pseudo segundo-orden de BB9 con una concentración de 500 mg/L sobre CarChiQC y SemChiNaOH	60
Tabla 10. Resumen de los parámetros de adsorción de acuerdo a la isoterma de Langmuir	62
Tabla 11. Propiedades texturales de los carbones activados	64
Tabla 12. Propiedades generales de los adsorbentes	65
Tabla 13. Resumen del tratamiento del agua residual textil	70

Figuras

	Pág.
Figura 1. Absorción de luz.	31
Figura 2. Chirimoya	39
Figura 3. Semilla de chirimoya, a) semilla entera, b) cascarilla, c) semilla abierta y d) embrión.	39
Figura 4. Prueba del punto de carga cero (pH_{pzc}).	46
Figura 5. Aspecto superficial de la semilla de chirimoya, a) corte transversal de la cascarilla, b) laminiformes, c) embrión parte central y d) embrión parte lateral.	56
Figura 6. Adsorbentes SemChiNaOH y CarChiQC.	57
Figura 7. pH_{pzc} de SemChiNaOH y CarChiQC.	57
Figura 8. Imágenes SEM del CarChiQC a) 200X y b) 1000X.	58
Figura 9. a) Cinética de adsorción a 500 mg/L y b) tratamiento de los datos de adsorción con la ecuación de cinética de pseudo segundo-orden.	59
Figura 10. Adsorción de colorantes básicos en solución acuosa con una concentración de 300 mg/L sobre SemChiNaOH y CarChiQC.	60
Figura 11. Aspecto de la SemChiNaOH después del proceso de adsorción de colorantes.	61
Figura 12. Isotermas de adsorción de colorantes básicos de acuerdo al modelo de Langmuir en CarChiQC y SemChiNaOH.	62
Figura 13. Isotherma de adsorción-desorción de N_2 en CarChiQC, CarChiQE y CarChiQ.	64
Figura 14. pH de las aguas residuales antes y después del tratamiento de adsorción a) SemChiNaOH y b) CarChiQC.	66
Figura 15. Conductividad de las aguas residuales antes y después del tratamiento de adsorción a) SemChiNaOH y b) CarChiQC.	66
Figura 16. Sólidos totales de las aguas residuales antes y después del tratamiento de adsorción a) SemChiNaOH y b) CarChiQC.	67
Figura 17. Color de las aguas residuales antes y después del tratamiento de adsorción a) SemChiNaOH y b) CarChiQC.	68
Figura 18. Demanda química de oxígeno de las aguas residuales antes y después del tratamiento de adsorción a) SemChiNaOH y b) CarChiQC.	69

Nomenclatura

Clave	Significado
A	Absorbancia
$A_{RealAds}$	Absorbancia real después de la adsorción
$A_{Real300}$	Absorbancia real de la concentración inicial de 300 mg/L
Å^2	Angstrom cuadrado
a	Cantidad adsorbida
AC	Carbón activado
a_{eq}	Cantidad adsorbida al alcanzar el equilibrio de adsorción
a_m	Capacidad de la monocapa
BB3	Azul Básico 3
BB9	Azul Básico 9
BR18	Rojo Básico 18
BV3	Violeta Básico 3
BY28	Amarillo Básico 28
BET	Brunauer-Emmet-Teller
C_{eq}	Concentración de equilibrio
C.I.	Colour Index
C_i	Concentración inicial
C_f	Concentración final
CarChiF	Carbón de semilla entera de chirimoya activado físicamente con H_2O
CarChiQ	Carbón de semilla entera de chirimoya activado químicamente con H_3PO_4
CarChiQC	Carbón de cascarilla de semilla de chirimoya activado químicamente con H_3PO_4
CarChiQE	Carbón de embrión de semilla de chirimoya activado químicamente con H_3PO_4
CONAGUA	Comisión nacional del agua
$D_{promporo}$	Diámetro promedio de poros
DQO	Demanda química de oxígeno
H	Velocidad de adsorción
k_1	Constante cinética de adsorción de pseudo de primer-orden
k_2	Constante de cinética de adsorción de pseudo segundo-orden
K_F	Constante de Freundlich
K_L	Constante de Langmuir
λ	Longitud de onda
$\lambda_{m\acute{a}x}$	Longitud de onda de máxima absorbancia
I_0	Cantidad total de luz incidente

I_a	Cantidad de luz absorbida
I_t	Cantidad de luz transmitida
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
M	Concentración molar o molaridad
pH	Potencial de hidrógeno
pH_{Pzc}	Punto de carga cero
PM	Peso molecular
ppm	Partes por millón o mg/L
R^2	Coefficiente de correlación
R_L	Parámetro de equilibrio de la ecuación de Langmuir
S_{BB9}	Superficie específica por adsorción de azul de metileno (BB9)
S_{BET}	Superficie específica por adsorción de N_2 a 77K
S_{esp}	Superficie específica
SEM	Microscopia electrónica de barrido
SemChiNaOH	Adsorbente lignocelulósico de embrión de semilla de chirimoya activado químicamente con NaOH
SS	Sólidos suspendidos
SD	Sólidos disueltos
ST	Sólidos totales
T	Temperatura
t	Tiempo
UV-Vis	Espectrofotometría ultravioleta-visible
$V_{\mu\text{P}}$	Volumen de los microporos
V_{MesoP}	Volumen de los mesoporos
V_{TP}	Volumen total de poro
W.W.	Agua residual
W.W.1	Agua residual color rojo vino
W.W.2	Agua residual color café

I. Introducción

I.1 Descripción de la problemática

El ser humano desde tiempos remotos tuvo la necesidad de proteger su cuerpo de las inclemencias del tiempo. Aprendió a vestir pieles, a coser y más tarde empezó a fabricar hilos, tejidos y darle color a las prendas, utilizando los recursos disponibles en la naturaleza. A través del tiempo con la escasez de ciertos animales o plantas de los cuales se extraían los colorantes, a consecuencia de su sobreexplotación y su alta demanda, se inició con la síntesis a gran escala de colorantes.

La ciudad de Puebla desde la instalación de la primera fábrica textil mecanizada en 1835 tuvo un crecimiento económico, y el desarrollo de la población en el altiplano de Puebla, a lo largo de la cuenca del río Atoyac, se instalaron varias industrias, incluyendo la textil, afectando los ecosistemas acuáticos con consecuencias ambientales.

El agua que es parte integral de los seres vivos, ha sido considerada “el líquido vital”. El protoplasma celular contiene aproximadamente un 80% de agua, por lo que todos necesitamos, que el agua, que bebemos sea limpia y segura. Por sus propiedades fisicoquímicas, el agua puede disolver y contener sustancias químicas inorgánicas y orgánicas; por ello es denominada apropiadamente como “el solvente universal”; inclusive puede llegar a albergar organismos microscópicos [1].

De acuerdo con la comisión nacional del agua en México (CONAGUA), el consumo del agua dulce corresponde un 76% al uso agrícola, 5% generación de energía eléctrica excluyendo la hidroeléctrica, 15% abastecimiento público y el 4% industrial autoabastecida [2]. Si bien la industria autoabastecida sólo consume 4% del agua total (3.5 km³ anuales), la contaminación que genera en demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es tres veces mayor que la que producen 100 millones de habitantes [3].

Las descargas de aguas residuales se clasifican en municipales y no municipales. Las no municipales son aquellas generadas por otros usos, diferentes al consumo del ser humano, como puede ser la industria autoabastecida y que se descargan directamente a cuerpos de agua nacionales, sin ser colectadas por sistemas de alcantarillado [2].

La industria textil es conocida por consumir grandes volúmenes de agua, debido a sus altas relaciones de baño (RB) durante los procesos de acabados. Aunque actualmente ya se cuenta con equipos con bajas RB sus precios son elevados y sólo son utilizados en algunos de los múltiples procesos. Dentro de los procesos, que consumen una gran cantidad de agua están los de pretratamiento: descrude y desengomado, tintorería, lavado de prendas, suavizado, acabados químicos y otros procesos húmedos.

Una preocupación ambiental prioritaria e importante se deriva de la contaminación del agua por descargas de colorantes y tintes, debido a las actividades de teñido de las industrias textiles. Los colorantes son altamente visibles aún en bajas concentraciones, provocando problemas estéticos y ecológicos para los ecosistemas acuáticos [1].

La presencia de colorantes en el agua disminuye la penetración de la luz solar y reduce la fotosíntesis y otras actividades biológicas propias de los organismos acuáticos [4]. Los colorantes son moléculas orgánicas que pueden degradarse y al hacerlo, podrían generar subproductos que son aún más tóxicos que los colorantes mismos [5]. La falta de legislación actualizada (NOM-CCA-014-1993) para la descarga de efluentes, ha conducido a que la industria textil sea una de las principales responsables de la contaminación del agua debida a la presencia de los colorantes. El teñido textil húmedo convencional es un proceso ineficaz, para el que se estima un consumo de 2×10^8 kg de colorantes sin usar, que son emitidos en las aguas residuales de la industria textil cada año. La gran mayoría de las plantas de tratamiento de aguas residuales no están equipadas para hacer frente a estos efluentes con contaminantes resistentes; así mismo, la variación en la composición química del efluente para diferentes plantas de teñido es un aspecto

que provoca que una gran parte de estos colorantes escape hacia el medio ambiente.

En la actualidad se ha mostrado gran interés en reutilizar el agua en los procesos industriales, disminuyendo así el consumo de agua potable, la sobreexplotación de las fuentes, los costos de transportación, adecuaciones y satisfacer las demandas que no exigen la calidad de potable. Como resultado, se obtuvo el desarrollo de diversos métodos de tratamiento. El tratamiento del agua puede definirse como el conjunto de procesos que tiene como objetivo alcanzar una calidad que cumpla las normas especificadas por la legislación, con base al tipo de usuario final. Los tratamientos se clasifican de acuerdo a su complejidad en: tratamientos primarios (cribado, sedimentación, flotación, neutralización, homogenización, coagulación y floculación), tratamientos secundarios (procesos de tratamiento biológico tanto aeróbicos como anaeróbicos) y tratamientos terciarios (adsorción, intercambio iónico, ósmosis inversa, oxidación química, etc.).

La calidad del agua se determina mediante la caracterización física y química de muestras de agua y la comparación de sus valores con los establecidos en normas y estándares de calidad. De esta forma se puede identificar si el agua es idónea para los requerimientos de calidad asociados a un uso determinado. La evaluación de la calidad del agua se lleva a cabo utilizando tres indicadores: la Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO5), la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y los Sólidos Suspendidos Totales (SST). La DBO5 y la DQO son indicadores de la cantidad de materia orgánica presente en los cuerpos de agua provenientes principalmente de las descargas de aguas residuales, tanto de origen municipal como industrial [2].

La adsorción es un método que ha demostrado ser prometedor para la eliminación de contaminantes en medios acuosos, por sus características como versatilidad de aplicación, sencillez y fácil transportación. El carbón activado es el material adsorbente más popular utilizado en el mercado. Es el adsorbente ideal por la alta capacidad de adsorción de materia orgánica, debido a su alta superficie específica [6]. Los carbones activados se preparan a partir de materias primas carbonosas

tales como la madera, lignito, carbón mineral y cáscaras de coco, mediante procesos térmicos que implican la deshidratación y carbonización, seguido por la aplicación de vapor de agua. Se obtiene una estructura muy porosa con grandes superficies específicas (tan elevadas como $1000 \text{ m}^2/\text{g}$). La gran ventaja del carbón activado (AC) como adsorbente reside en la posibilidad de su reactivación, quemando los productos orgánicos adsorbidos y el AC se restaura básicamente hasta su capacidad inicial de adsorción [7].

I.2 Objetivo general

Remover colorantes presentes en agua residual textil, utilizando adsorbentes preparados de la semilla de chirimoya.

I.3 Objetivos específicos

Preparar adsorbentes lignocelulósicos y carbonáceos capaces de retener en su superficie moléculas de colorantes.

Optimizar la preparación de los adsorbentes y caracterizarlos.

Tratar agua residual textil con los mejores adsorbentes preparados.

I.4 Hipótesis

El material adsorbente preparado a partir de los residuos de la semilla de chirimoya removerá el color y mejorará la calidad del agua residual de los procesos textiles húmedos.

I.5 Justificación

Actualmente la industria textil de la moda es la segunda más contaminante del planeta, después de la industria petrolera. Esto se debe al consumo excesivo y rápido de prendas a consecuencia del fenómeno fast fashion [8] que está causando grandes problemas ambientales en nuestro planeta, tan solo para la elaboración de un pantalón de mezclilla se necesita alrededor de 2,130 a 3,078

litros de agua para su fabricación, estos valores indican el gran impacto que tiene la industria textil sobre los recursos hídricos [9].

La contaminación de las aguas residuales por colorantes no fijados sobre los textiles, es un problema ambiental grave, no sólo debido al peligro potencial que representan para la salud humana, animal y vegetal, sino también por el cambio de color, muy notorio, a pesar de que estén en bajas concentraciones. En la tintura ordinaria se logra una fijación del 90% del colorante aproximadamente, pero en la estampación con colorantes reactivos es habitual alcanzar sólo un valor del 60% o menos [10]. Esto significa que por lo menos una tercera parte de la cantidad total de colorante utilizados en una partida de producción, está destinada a los desechos hídricos residuales, además, aún falta considerar los lavados del material textil y limpieza de los equipos entre partida y partida.

En plena ciudad de Puebla un importante y peligroso efluente presente es el río Atoyac, que inicia en Tlaxcala y su primera interacción con la industria, es en San Martín Texmelucan, luego pasando por distintos parques industriales de la ciudad de Puebla, cruzando toda la ciudad hasta llegar a la laguna de Valsequillo y no termina ahí, continua hasta el estado de Guerrero conocido como el río Balsas conectado con otros ríos, y que desemboca al océano Pacífico.

El estado de Puebla es una zona textilera por tradición, y se coloca en el tercer lugar de la producción textil del país, por sí sola, aportó 8.7% de la producción textil nacional en 2018 [11]. Esta industria aporta grandes cantidades de ingresos económicos, pero consigo genera altas cantidades de residuos peligrosos en el ambiente afectando ecosistemas, y la salud de la población cercana a estos efluentes textiles industriales.

Como estudiante de ingeniería textil tenemos una formación académica para nuestro desarrollo profesional y laboral cubriendo áreas de fibrología, hilatura, tejido y acabados. Dentro del plan de estudios se encuentra la asignatura de contaminación en la industria textil que nos abre el paradigma ambiental de los procesos textiles. Tanto la universidad como la facultad de ingeniería además de

formar ingenieros que trabajaran en la optimización, desarrollo y control de procesos industriales. También forman personas responsables con el medio ambiente y social. Además les brinda a los estudiantes la oportunidad de conocer distintos panoramas desde otra parte del mundo, conociendo aún más los problemas a los que nos estamos enfrentando como población.

Aprovechar los residuos naturales, es una alternativa que permite minimizar el impacto sobre las fuentes naturales de explotación. La chirimoya es un fruto exótico, presente en varios estados como Puebla, Morelos, Guerrero, Michoacán, Veracruz, Hidalgo, etc., con gran número de semillas en su interior, que no tienen ninguna aplicación, que pueden utilizarse como material para la elaboración de carbones activados y materiales adsorbentes útiles para la remoción de colorantes y otros contaminantes presentes en las aguas residuales textiles.

El acceso al agua es un derecho humano, el artículo 4° de la constitución de los Estados Unidos Mexicanos en el párrafo 6 reconoce “toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible”. El Estado garantizará este derecho y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos, estableciendo la participación de la federación, las entidades federativas y los municipios, así como la participación de la ciudadanía para la consecución de dichos fines [12]. Paradójicamente en México hay 9 millones de mexicanos que no cuentan con agua potable [3].

Sin embargo, también ha surgido la conciencia sobre el impacto ambiental, e iniciando iniciativas como Fashion Revolution, este movimiento promueve la concientización preguntándose ¿quién hace mi prenda? ¿en dónde se hizo? ¿con qué productos? ¿son responsables con sus procesos?. El mercado textil está evolucionando en prácticas sostenibles, y lo dice el director de Inexmoda, Carlos Eduardo Botero, que “Aquellas empresas que no practiquen la sostenibilidad, no serán perdurables en el tiempo“.

II. Marco teórico

II.1 Antecedentes

Cholula era un centro de actividad religiosa y económica precolombino en el período posclásico (900-1520 D.C.), con una producción artesanal de alta calidad utilizada para comunicar mensajes ideológicos relacionados con la religión, el origen étnico y el estatus social. Los textiles fueron de enorme importancia en esta época en Cholula en la medida en que las capas (quachtlis) eran una unidad común para el pago de tributos [13].

La gente pobre se vestía de henequén, que es un hilo grueso hecho de maguey y los ricos se vestían de algodón, con un borde bordado de plumas y piel de conejo. Evidencia arqueológica de la producción textil, basada en fuentes etnohistóricas, indican que las fibras utilizadas para los textiles en Cholula fueron: algodón, maguey y materiales más exóticos como como plumas y pieles de conejo (la lana fue una introducción posterior a la conquista). Otros materiales que pueden haber sido utilizados incluyen ortiga (chichicaztle), algodoncillo y cabello humano [13].

Los pioneros de la industria en México establecieron las primeras fábricas durante los años de 1830 a 1853, como la producción de hilados y tejidos de algodón. Por un lado, se encuentra Estevan de Antuñano con su fábrica textil “La Constancia Mexicana” inaugurada en Puebla en 1835, la primera fábrica textil mecanizada y la primera que utilizó energía hidráulica en México, que además formó parte del inicio de la industria textil en América Latina [14].

Antuñano empleaba cerca de dos mil trabajadores entre mujeres viudas y esposos con hijos bajo el argumento de que se aumentaba el ingreso familiar y se producían un promedio de dos mil mantas mensuales con 7,680 husos [14].

Durante el período del Porfiriato (1876-1911) se instalaron industrias textiles en el altiplano Puebla-Tlaxcala. La inversión en la industria textil durante este período, resultó favorecida gracias a los incentivos de la política económica del Porfiriato y a tres factores más: el crecimiento de la población y de medios de comunicación,

que se tradujo en la ampliación del mercado, es decir, la demanda nacional; la disponibilidad de materia prima y de nuevas tierras para el cultivo del algodón; y los bajos salarios estables en la región central del País [15].

En el período de entre siglos, obligó a los empresarios a desarrollar e invertir su capacidad de innovación para poder hacer frente a la dura competencia de grandes fábricas de la Ciudad de México y Orizaba, que permitían vender telas de mejor calidad y a menor precio. Durante la segunda mitad del régimen de Porfirio Díaz, la industria textil se caracterizaba por contar con una planta productiva moderna. Según informes de los propios empresarios del altiplano Puebla-Tlaxcala, en 1913 todos los husos en actividad eran modernos y tan solo alrededor del 0.10% de los telares se catalogaban como "antiguos". Además, la región concentraba casi una tercera parte de las estampadoras modernas registradas en el país [15].

A fines del Porfiriato, 41% del total de la industria textil se encontraba fuera de la ciudad de Puebla, que había sido el centro fabril por tradición. Los empresarios del textil de Puebla y Tlaxcala fueron diversificando sus inversiones pero las más importantes las hicieron en la industria textil y en la banca, por lo cual, contribuyeron de manera importante al establecimiento de la industria de transformación del Porfiriato [15].

II.2 Historia de los colorantes

Los seres humanos han hecho uso del color desde tiempos prehistóricos, para decorar sus cuerpos, coloreando pieles, cueros y pinturas rupestres con las cuales embellecían y expresaban sus emociones, los colorantes empleados en aquellas épocas procedían de fuentes naturales.

No se conoce con claridad el año en el cual el hombre empezó a teñir su vestimenta, pero existen escritos que abarcan desde el año 2600 A.C., documentado en China, hasta la época de Alejandro Magno en 330 A.C. en esas épocas se obtenían exclusivamente, los colorantes extraiéndolos de diferentes

insectos y plantas; este conocimiento pasó de generación en generación como un proceso casero [16].

En 1856 William Henry Perkin, produjo el primer colorante sintético cuando hizo reaccionar la anilina con ácido crómico, fue el denominado "negro de anilina", razón por la cual todavía algunos se refieren a los colorantes sintéticos como "las anilinas". La evolución de las familias de colorantes, así como de sus mecanismos de aplicación, fue la respuesta a las necesidades generadas por la aparición de nuevas fibras (artificiales y sintéticas), que rápidamente fueron desarrolladas e introducidas al mercado sobre fines del siglo XIX, y durante la primera mitad del siglo XX [17].

II.2.1 Colorantes textiles

Los colorantes representan una clase importante de compuestos producidos en todo el mundo en grandes cantidades aproximadamente 7×10^8 kg por año y se utilizan en muchas industrias como alimenticias, cosmética, papel, farmacéutica, tintas de impresión, textil, curtiduría y otros. Entre estas aplicaciones industriales, la industria textil consume el 50% de la producción total de los colorantes [18].

Los colorantes son compuestos que cuando son aplicados sobre un objeto (tejidos, cuero, papel, etc.) le confiere color, son solubles en agua y resiste a factores como la luz, calor, jabón [16] entre otros. Los colorantes utilizados comercialmente para teñir textiles, pueden seleccionarse entre una amplia gama de colorantes orgánicos sintéticos, basados en compuestos aromáticos derivados del petróleo. Los colorantes son estructuras orgánicas conjugadas que contienen un sistema de alternancia de enlaces simples y dobles dentro de la molécula que le dan capacidad de absorber ciertas longitudes de onda de luz visible, de modo que la luz restante dispersada por el textil teñido, se percibe como coloreado [17].

Dentro de la estructura de un colorante se encuentran grupos cromóforos y auxocromos. El cromóforo es el responsable del color, es un grupo químico que le confiere a una sustancia el potencial de colorearse, por ejemplo: nitro $-\text{NO}_2$, nitroso $-\text{N}=\text{O}$, azo $-\text{N}=\text{N}-$, metino $-\text{CH}=\text{}$ y grupos carbonilo $\text{C}=\text{O}$. Sin embargo,

para considerarse un colorante como tal, la molécula debe contener otros grupos químicos como amina primaria $-\text{NH}_2$, secundaria $-\text{NHR}$ o terciaria $-\text{NR}_2$, hidroxilo $-\text{OH}$, carboxílico $-\text{COOH}$ y sulfonato $-\text{SO}_3$ que se llaman auxocromos, estos generalmente modifican o intensifican el color, le confiere al colorante solubilidad en agua y le otorgan sustantividad al colorante hacia la fibra [17].

El agua es una molécula polar debido a su geometría (ángulo de enlace de 104.5°) y por lo tanto la distribución de la carga dentro de la molécula es asimétrica. Esta característica es la que permite la solubilidad de los colorantes (con grupos polares) en polvo que se usan en la industria textil [16]. La coloración puede llevarse a cabo tiñendo los materiales a un color uniforme, o estampando impartiendo un diseño al textil. Las fibras, hilos y telas también pueden ser multicolores mediante técnicas de tintura especializadas. Los colorantes manufacturados típicamente contienen solo 30–40% de colorante activo. El resto de la formulación de colorante consiste en diluyentes para reducir la intensidad del color, electrolitos que mejoran el agotamiento del colorante en la fibra, y agentes dispersantes [17].

II.2.2 Clasificación de los colorantes

A grandes rasgos existen 2 grupos; los colorantes naturales y los sintéticos.

Colorantes naturales

Son extraídos de plantas (hongos, líquenes, raíces, etc.), animales (grana cochinilla, caracol púrpura, etc.) y minerales (arcilla, carbón, Fe_2O_3 , sales de Cu y Co, etc.) por sus características químicas tienen la virtud de teñir fibras naturales como algodón, yute, lino, bambú, cáñamo, lana, seda, alpaca, vicuña y guanaco.

Colorantes sintéticos

Son superiores a los colorantes naturales tanto por las propiedades físico-químicas como por las ventajas funcionales que estos muestran tanto en su aplicación como una vez teñidos, especialmente en lo que respecta a las solidez generales. Pueden dividirse, de acuerdo con su composición química, en dos

grupos principales: inorgánicos y orgánicos, estos a su vez se dividen en colorantes solubles y pigmentos insolubles.

Colorantes inorgánicos: Se presentan en forma de pigmentos, también se denominan colorantes térreos o minerales y se obtienen por vía natural (minas) o artificial (síntesis química). Se trata de compuestos metálicos de diferente color por ejemplo, ocre, rojo de óxido de hierro, amarillo de cromo, azul de ultramar, azul cobalto, etc.. Para fines textiles, los pigmentos inorgánicos se utilizan de forma muy limitada debido a su insolubilidad. Sus aplicaciones principales son en pinturas y lacas, así como en la industria del plástico.

Colorantes orgánicos: Se presentan en forma de pigmentos o de colorantes, su obtención es prácticamente por síntesis química. Los colorantes y pigmentos sintéticos, constituyen el grupo de los productos coloreados más utilizados en la industria textil [17].

II.2.3 Clasificación de los colorantes de acuerdo al Colour Index International

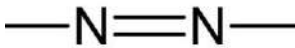
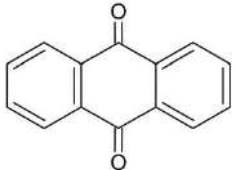
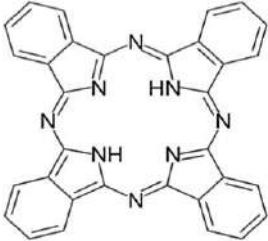
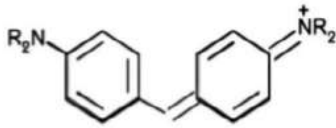
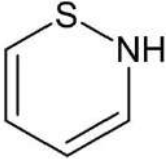
Los colorantes se pueden clasificar de acuerdo a la estructura química de sus moléculas. En la práctica se clasifican en función de la forma de aplicación del colorante o de soporte sobre el sustrato. El Colour Index International (C.I.) es la principal fuente de información sobre colorantes y enumera la mayoría de los colorantes y pigmentos. Los colorantes azo destacan por estar compuestos con un doble enlace de átomos de nitrógeno, constituyen casi dos tercios (67%) de los colorantes orgánicos enumerados en el C.I. las antraquinonas (15%), triarilmetanos (3%) y las ftalocianinas (2%) también son de gran importancia.

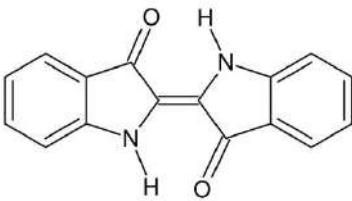
Cuando la estructura del colorante es conocida, se le asigna un número de constitución química específica en el C.I.. En el C.I., los colorantes se clasifican por su aplicación, su color y un número de introducción al C.I., por ejemplo, C.I. Acid Blue 45. El nombre comercial del colorante, variará de acuerdo con el fabricante y los colorantes que se formulan. Es posible tener el mismo C.I. y tener una variación en el contenido de colorante activo y en la naturaleza de los aditivos incorporados dentro de la formulación [17].

II.2.4 Clasificación por estructura química

En la tabla 1 los colorantes se agrupan de mayor a menor importancia de uso en la industria textil, así como su grupo cromóforo.

Tabla 1. Clasificación de colorantes por estructura química.

Familia	Grupo cromóforo	Descripción
Azo		Este grupo de colorantes es el más importante dentro de la industria textil con una elaboración aproximadamente del 70% de los colorantes orgánicos del mercado.
Antraquinona		Son quinonas tricíclicas derivadas del antraceno que a menudo contiene 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 piridina).
Ión arilcarbonylo		Su estructura química está conformada por un átomo de carbono unido a dos o tres anillos aromáticos.
Sulfuro		Grupo de colorantes totalmente insolubles, aplicados por reducción. Su principal característica es que contienen azufre. Proporciona una gama de colores bajos y apagados.
Indigoides		Son insolubles en agua, contienen 2 grupos cetona (C=O) separado por

		<p>un sistema conjugado de dobles enlaces que se convierten en álcalis solubles, por reducción alcalina.</p>
--	---	--

También se pueden clasificar los colorantes aniónicos en directos, ácidos y reactivos. Mientras que los colorantes catiónicos representan los básicos. Los colorantes no iónicos se refieren a los colorantes dispersos porque no forman iones en un medio acuoso [18].

II.2.5 Clasificación por método de aplicación

En la industria textil existen diversos tipos de fibras (lana, algodón, poliamida, poliéster, viscosa, etc.) a las cuales se aplican diferentes métodos de teñido por su capacidad y grado de fijación de los colorantes.

Tabla 2. Clasificación por método de aplicación sujeto al tipo de fibra.

Tipo	Fibras	Método de aplicación	Grupo cromóforos
Ácidos	Poliamida, lana, seda y piel.	Normalmente para baños de tinte neutros a ácidos.	Azo, antraquinona, trifenilmetano, nitro y nitroso.
Básicos	Poliacrilonitrilos, poliamida, poliéster y seda.	Para baños de tintura básicos.	Azo, trifenilmetano y antraquinona.
Directos	Algodón, rayón, piel y poliamida.	Inmersión de la fibra en un baño con un electrolito. Forma enlaces de puente de hidrógeno.	Azo
Dispersos	Poliéster, poliamida, acetato	En forma de dispersión coloidal con altas	Azo, antraquinona y nitro.

	y acrílico.	temperaturas y presión. Unión del colorante por interacciones dipolares.	
Mordientes	Lana, piel y algodón.	Aplicado en conjunto con sales de Al o Cr.	Azo y antraquinona.
Reactivos	Algodón, lana, seda y poliamida.	Los grupos reactivos del colorante reaccionan con los grupos funcionales de la fibra para enlazarse covalentemente bajo la influencia de la temperatura y el pH.	Azo y antraquinonas.
Al azufre	Algodón y rayón.	Reducción en una solución alcalina, se convierte el colorante en una forma soluble, una vez adsorbido el colorante es oxidado, con H ₂ O ₂ .	Estructuras indeterminadas.
Cuba	Algodón, rayón y lana.	Reducción con hidrosulfito de sodio (Na ₂ S ₂ O ₄), después de la impregnación se oxida.	Antraquinona e índigos.

II.2.6 Clasificación por grado de fijación

Se estima que hasta un 50% de los colorantes utilizados en la industria textil termina en las aguas descargadas por este sector industrial [16]. En la tabla 3 se muestran los porcentajes aproximados de fijación de los colorantes en las telas por los diferentes métodos de aplicación.

Tabla 3. Clasificación por grado de fijación de los 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
Cuba	Celulosa	80-95	5-20

II.3 Contaminación del agua a causa de la industria textil

Estimaciones indican que al menos el 12% de los colorantes sintéticos utilizados anualmente se pierden en las operaciones de procesamiento textil. Aproximadamente el 20% de estas pérdidas ingresan al ambiente a través de efluentes de plantas de tratamiento de agua residual. La descarga de desechos coloreados en cuerpos naturales de agua es indeseable por varias razones; la calidad estética del agua, disminución de la penetración de la luz solar impidiendo la fotosíntesis y otras actividades propias de los organismos acuáticos, además del daño devastador para la salud de sus consumidores.

Los colorantes en sí, no pertenecen a un solo grupo de compuestos químicos, además, muchos de ellos han sido desarrollados para ser resistente a la luz, al calor y a otros agentes externos. Por estas razones, la remoción de color en las aguas residuales textiles es un grave problema ambiental. Aunque la estructura de los colorantes tiene una naturaleza orgánica, su biodegradación es lenta y difícil porque los organismos naturales no poseen mecanismos adecuados para su rápida descomposición. Además muchos de estos colorantes textiles, contienen el cromóforo azo (colorantes azoicos) estos compuestos al degradarse, se sabe que tiene un carácter tóxico e inclusive cancerígeno o mutagénico. En la industria

textil, el uso de sales es común favoreciendo el teñido de materiales textiles. Como resultado, el agua residual es una mezcla compleja de varios compuestos químicos además de los colorantes [1, 5, 18, 19].

II.4 Métodos de tratamiento en efluentes textiles

Los colorantes en las aguas residuales pueden ser eliminados por varios métodos, coagulación-floculación, precipitación química, ósmosis inversa, adsorción, procesos electroquímicos y fotoquímicos. Otras técnicas comprenden radiación UV y decoloración con ozono O_3 en combinación con H_2O_2 y también en pequeña escala métodos de oxidación usando el reactivo de Fenton [21]. Como tal la elección de uno o varios métodos a utilizar, para eliminar el color antes de descargar las aguas residuales textiles en corrientes naturales o reutilizarlas, dependerá del tipo de colorante o colorantes presentes y el proceso empleado durante el acabado de los materiales textiles.

El uso de adsorción como operación final es importante porque, además de disminuir la demanda química de oxígeno (DQO) y el color del efluente pretratado, también nos permite disminuir la acidez o basicidad del efluente. Con el método de adsorción se obtiene porcentajes de remoción de color que van desde 50 y hasta 99%. Al combinar los procesos de coagulación-floculación y adsorción, es posible lograr porcentajes de remoción de colorante del 100% [20].

II.4.1 Adsorción

La adsorción es un fenómeno de acumulación de partículas sobre una superficie. Es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapadas o retenidas en la superficie de un material [23]. La sustancia que se adsorbe es el adsorbato y el material sobre el cual lo hace es el adsorbente. Las moléculas pueden ser eliminados por adsorción en fases sólidas, incluyendo carbón activado (AC), sílice y adsorbentes poliméricos [31]. El material adsorbente más común para obtener agua potable o para tratar agua residual es el AC. El proceso inverso de la adsorción es la desorción [6].

En una solución acuosa, la adsorción implica tres interacciones; 1) interacciones adsorbato-agua, 2) interacciones adsorbato-superficie y 3) interacciones agua-superficie. El grado de adsorción se determina por las fuerzas de las interacciones adsorbato-superficie, estas interacciones son determinadas por la química de la superficie, mientras que las de adsorbato-agua se relacionan con la solubilidad del adsorbato [6].

En la actualidad, están en desarrollo dos grupos de adsorbentes de bajo costo: (a) adsorbentes lignocelulósicos obtenidos de residuos agroindustriales y (b) adsorbentes carbonosos obtenidos por activación y carbonización de desechos vegetales. En ambos grupos, la elección de la materia prima es muy amplia y algunos ejemplos son: corteza de diferentes árboles, residuos de plantas, frutas y cereales [25]. La adsorción sobre sólidos, es un método atractivo y una alternativa de la precipitación química y el intercambio iónico [26].

Tamaño de poro

Una característica clave de los adsorbentes carbonáceos es un alto grado de porosidad intrínseca de los gránulos de AC, lo cual se traduce en una extensa área superficial interior en la que puede ocurrir la adsorción. La porosidad, que es la relación del volumen de poro con respecto al volumen total, debe ser cercana al 50%. Por lo general existe una relación inversa entre el tamaño del poro y el área superficial: cuanto más pequeños son los poros en un determinado volumen, mayor será el área superficial disponible para la adsorción. Además, la adsorción del adsorbato que puede entrar al poro está limitada por el tamaño de este [6].

Para fines de clasificación de los tamaños de los poros (diámetro d_p), la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) utiliza la siguiente convención:

Microporos: $d_p < 2$ nm.

Mesoporos: 2 nm $< d_p < 50$ nm.

Macroporos: $d_p > 50$ nm.

II.4.2 Carbón activado

El AC es el adsorbente más utilizado en el tratamiento del agua. El AC convencional se prepara mediante pirólisis oxidativa y por lo regular la materia prima es carbón/lignito (42%), madera/coco (45%) o huesos de animales, entre otros materiales [25]. Las investigaciones sugieren que la activación produce altas superficies específicas (S_{esp}) de 500–2000 m²/g. Esta superficie específica hace que el carbón tenga una alta capacidad de adsorción, hasta un gramo de material por gramo de carbón.

El carbón activado se maneja regularmente en 3 presentaciones:

Carbón activado en polvo – 20 a 50 μ m (powdered activated carbon, PAC)

Carbón activado granular – 0.5 a 3 mm (granular activated carbon, GAC)

Carbón activado fibroso (fiber activated carbon, FAC)

El AC se considera un material costoso debido a las sustancias químicas y tratamientos físicos utilizados durante su producción, su bajo rendimiento, el alto consumo de energía durante su producción, y los tratamientos térmicos o solventes utilizados para su regeneración. Sin embargo su alta capacidad de adsorción lo hace un producto atractivo para el tratamiento del agua. Intentando reducir el costo de producción del AC, la investigación contemporánea está dando un giro hacia los residuos industriales o agrícolas que se utiliza como materia prima y entonces, disminuir el costo de producción. Además, el uso de estos materiales precursores reduce la generación de residuos sólidos en zonas rurales y urbanas [6, 23, 27].

II.4.3 Adsorbentes lignocelulósicos

Los adsorbentes no-convencionales o bioadsorbentes son materiales alternos (semillas, cortezas, cáscaras, biopolímeros, biomasa viva (microorganismos) y no viva, etc.) no necesariamente deben recibir un tratamiento previo para activarse, sin embargo, su activación puede mejorar su capacidad de adsorción. Las fuentes

para la obtención de estos materiales han sido los residuos agroindustriales, de la industria alimenticia y desechos vegetales cuya aplicación es restringida o no tienen aplicación. Estos adsorbentes no-convencionales permiten la reducción de la concentración o la eliminación de contaminantes como colorantes, metales pesados, pesticidas, herbicidas, etc. [1].

La estructura física de los tejidos vegetales (tallos, hojas, cáscaras, semillas, raíces, etc.) presenta cavidades y poros que permiten la retención dentro de ellos de moléculas pequeñas, como los metales, hasta moléculas complejas como lo son los colorantes [1]. La composición elemental de los adsorbentes incluye un alto contenido carbono $\approx 40\%$, oxígeno $\approx 54\%$ y de hidrógeno $\approx 5\%$. Esto demuestra que los adsorbentes son de origen lignocelulósico y algunos de carácter aniónico [19].

Muchos adsorbentes orgánicos satisfacen la demanda de eliminación de colorantes pero sin ser económicos, los materiales no-convencionales y residuos agroindustriales reducen el costo de producción. Una serie de artículos se han publicado sobre el uso de mazorcas de maíz, corteza de eucalipto, cáscara de cebolla, algodón, tallos de girasoles, cáscara de cebada, bagazo de caña de azúcar, cáscara de naranja, paja de trigo, etc. [28]. Estudios han demostrado que la cáscara de cacahuate en polvo se utilizó como bio-adsorbente para colorantes aniónicos y las semillas de guayaba se utilizaron como adsorbente para la eliminación de colorantes ácidos [19].

Los adsorbentes lignocelulósicos preparados a partir de los residuos orgánicos pueden caracterizarse de acuerdo con su textura y composición química de la superficie. Los resultados de adsorción han demostrado el importante papel de la superficie química, contraria a la función principal de la magnitud de la superficie específica [28] en los AC. Las ventajas de usar adsorbentes no tratados y químicamente activados preparados de materiales de desecho incluyen: efectividad, bajo costo y facilidad de adquisición [19].

II.4.4 Cinética de adsorción

La cinética de adsorción describe la velocidad de adsorción del adsorbato en el adsorbente y determina el tiempo en que se alcanzó el equilibrio. Este parámetro es controlado por la tasa de transferencia de masa de soluto a la superficie del adsorbente. Una vez en el interior de la partícula porosa, el adsorbato puede difundirse a través del líquido en los espacios del poro, lo que se conoce como difusión de poros, o se adhiere a la superficie y después viaja a lo largo de ella, lo que se denomina difusión superficial. La cantidad de adsorción está determinada por la cinética química más que por el equilibrio del proceso [6]. Los siguientes modelos de pseudo primer-orden (ecuación 1) y pseudo segundo-orden (ecuación 2), utilizando expresiones lineales se aplican para el estudio de la cinética [20]. Además la constante de velocidad inicial H (ecuación 3) [29].

$$\ln(a_{eq} - a_t) = \ln a_{eq} - k_1 t \quad (1)$$

$$\frac{t}{a_t} = \frac{1}{k_2 a_{eq}^2} + \frac{t}{a_{eq}} \quad (2)$$

$$H = k_2 a_{eq}^2 \quad (3)$$

Donde:

a_{eq} = Cantidad adsorbida al alcanzar el equilibrio de adsorción (mg/g)

a_t = Cantidad adsorbida en el tiempo t (mg/g)

t = Tiempo de contacto entre adsorbente y adsorbato (h)

k_1 = Constante cinética de adsorción de pseudo primer-orden (h^{-1})

k_2 = Constante cinética de adsorción de pseudo segundo-orden (g/mg·h)

H = Constante de velocidad inicial (mg/h·g)

II.4.5 Isoterma de adsorción

Se denomina isoterma de adsorción a la relación entre la cantidad de sustancia adsorbida por un adsorbente y la concentración de equilibrio a una temperatura constante. Se establece el equilibrio de adsorción cuando la concentración del adsorbato remanente en la solución se haya en equilibrio dinámico, con la que hay presente en la superficie del sólido [7]. Las isotermas representan la interacción de los colorantes con cada uno de los adsorbentes preparados. Las isotermas de adsorción se construyen mediante gráficos de la cantidad de colorante adsorbido en función de la concentración de equilibrio.

La cantidad adsorbida, se calcula utilizando la ecuación 4 [5].

$$a = \frac{(C_i - C_{eq})V}{m} \quad (4)$$

Donde:

a = Cantidad adsorbida (mg/g)

V = Volumen de la solución (L)

C_i = Concentración inicial (mg/L)

C_{eq} = Concentración al alcanzar el equilibrio (mg/L)

m = Masa del adsorbente (g)

Isoterma de Langmuir

La isoterma de Langmuir se refiere al caso ideal de adsorción en una superficie homogénea, asumiendo que la adsorción ocurre en sitios específicos sobre la superficie y que las fuerzas intermoleculares, disminuyen rápidamente cuanto más lejos están las moléculas de adsorbato de la superficie de adsorción. Esta situación puede corresponder a la condición de una capa monomolecular (monocapa) de cobertura de las moléculas adsorbidas en la superficie indicada como a_m . La ecuación 5 muestra el modelo de la isoterma de Langmuir.

Este modelo también asume que todos los sitios activos para la adsorción son energéticamente equivalentes [5]. El número de los sitios activos por unidad de peso del adsorbente son finitos y la adsorción puede tener lugar hasta que cada sitio esté ocupado. La unión a los sitios específicos de adsorción puede ser química o física, pero debe ser lo suficientemente fuerte como para prevenir el desplazamiento de las moléculas de adsorbato [19, 22].

Para determinar los parámetros de Langmuir (a_m y K_L) los datos de adsorción son tratados con la ecuación de la forma lineal del modelo de Langmuir (ecuación 6).

Con la ecuación 7 se calcula el parámetro de equilibrio (R_L) que indica la naturaleza favorable ($0 < R_L < 1$) o no favorable ($R_L > 1$) de la adsorción [20, 22].

$$a = \frac{K_L a_m C_{eq}}{1 + K_L C_{eq}} \quad (5)$$

$$\frac{C_{eq}}{a} = \frac{1}{a_m} C_{eq} + \frac{1}{K_L a_m} \quad (6)$$

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_i} \quad (7)$$

Donde:

a = Cantidad adsorbida (mg/g)

a_m = Capacidad de la monocapa (mg/g)

K_L = Constante Langmuir (L/mg)

C_{eq} = Concentración de equilibrio (mg/L)

C_i = Concentración inicial (mg/L)

R_L = Parámetro de equilibrio (adimensional)

Isoterma de Freundlich

La isoterma de Freundlich es un modelo empírico que se puede aplicar a la adsorción no ideal en superficies heterogéneas, así como adsorción multicapa

[19]. El modelo de Freundlich no considera que la cobertura deba acercarse a un valor constante correspondiente a una monocapa completa, pero implica que la distribución de energía para los sitios de adsorción es exponencial. Los sitios altamente energéticos unen el soluto adsorbido fuertemente, mientras que los menos energéticos los atan débilmente. Aquí se puede considerar el parámetro $1/n$ un descriptor de la heterogeneidad de la distribución de energía de la superficie. La tasa de adsorción-desorción varía según la energía de los sitios, lo que lleva a la posibilidad de más de una capa monomolecular y con una forma diferente de isoterma de adsorción. Desviaciones de $1/n$ de la unidad produce un cóncavo ($1/n < 1$ o $n > 1$) o convexo ($1/n > 1$ o $n < 1$) en las isotermas, cuando $1/n = 1$ la isoterma es lineal. La ecuación de la isoterma de Freundlich (ecuación 8) demuestra que los valores de K_F corresponde a la magnitud de adsorción en un equilibrio concentración $C_{eq} = 1$ [22].

$$a = K_F C_{eq}^{1/n} \quad (8)$$

Donde:

a = Cantidad adsorbida (mg/g)

K_F = Constante de Freundlich (L/g)

C_{eq} = Concentración de equilibrio (mg/L)

$1/n$ = Factor de heterogeneidad

La relación isotérmica de Langmuir puede derivarse de las relaciones de equilibrio utilizando supuestos relativamente sencillos sobre la naturaleza iónica de la superficie del adsorbente. Cuando la superficie no se comporta bajo estos supuestos, la relación isotérmica de Freundlich puede ofrecer un mejor ajuste de los datos experimentales [7].

II.4.6 Factores que influyen en la adsorción de colorantes

La adsorción está influenciada por muchos factores, como las características de polaridad de los grupos funcionales del adsorbente, la extensión de su superficie, por la estructura molecular del adsorbato, el solvente en que se encuentra, la temperatura, el pH, el tiempo de contacto, etc. [31].

Tamaño de partícula, es un factor definitivo en todos los procesos de adsorción ya que el diámetro de la partícula determina indirectamente la magnitud de la superficie específica del sólido y por lo tanto, la cantidad que puede ser adsorbida [22].

Grupos funcionales, la interacción intermolecular entre los grupos funcionales de cada molécula y la química de la superficie de los adsorbentes pueden jugar un papel importante, porque pueden tener una afinidad electrostática, así como presentar fuerzas repulsivas. Además, puede haber interacciones del tipo Van der Waals o enlaces por puentes de hidrógeno [20, 28].

pH de la solución, es un factor importante en el proceso de adsorción, ya que puede cambiar la carga de la superficie, para conocer el efecto que tiene el pH se deben evaluar las isotermas de adsorción en distintos rangos de pH para conocer la capacidad máxima de adsorción del adsorbente [19].

Temperatura, dado que la adsorción es un proceso exotérmico, al aumentar la T disminuye la cantidad adsorbida, debido a la excitación de las moléculas. Por lo tanto mantener una T constante es ideal para su reproducción.

Tiempo de Contacto, depende de la cinética de adsorción, para que pueda llegar al equilibrio, de ahí el diseño del proceso de adsorción ideal (estático (batch) o sistemas de flujo (continuo)) [6].

II.4.7 Mecanismo de adsorción

La adsorción física o fisisorción ocurre por fuerzas de atracción, excluyendo enlaces covalentes y es menos específica que la adsorción química. A pesar de

que puede haber repulsión entre el adsorbente y el adsorbato por diferentes causas, aun así se puede llegar a adsorber una cantidad mínima mediante interacciones de tipo Van der Waals o enlaces por puentes de hidrógeno [18]. La adsorción química o quimisorción ocurre cuando el adsorbato reacciona con la superficie para formar un enlace covalente o uno iónico. En la tabla 4 se mencionan los elementos fundamentales de los mecanismo de adsorción [6].

Tabla 4. Comparación de los mecanismos de adsorción.

Parámetro	Fisorción	Quimisorción
Ocurrencia	Es el mecanismo más común.	Poco frecuente en procesos de tratamiento de aguas.
Velocidad	Rápido, limitado por transferencia de masa.	Variable; depende de la tasa de reacción con la superficie.
Tipo de enlace	Mecanismo de enlace no específicos, como fuerzas de Van der Waals o condensación de vapores.	Intercambio de electrones (iónico) y enlace químico (covalente) en la superficie.
Tipo de reacción	Reversible, exotérmica.	No reversible, exotérmica.

II.4.8 Preparación de materiales adsorbentes

Carbón activado, AC

Hay dos tipos de proceso de activación para producir AC: física o térmica y química.

En la activación física, el material lignocelulósico como tal o los materiales previamente carbonizados pueden ser gasificados con vapor de agua, dióxido de carbono o los gases producidos por la combustión.

La activación química, consiste en la impregnación con reactivos químicos como: $ZnCl_2$, HNO_3 , $NaOH$ o H_3PO_4 en materias primas lignocelulósicas o carbonosas,

luego se someten a carbonización o pirólisis y finalmente, se lavan para eliminar el agente activador hasta alcanzar un cierto pH. La aplicación de una corriente gaseosa como el aire o el nitrógeno es una práctica común durante la pirólisis que genera un mejor desarrollo de porosidad del material [27]. La activación química seguida de la carbonización crea microporos y mesoporos en los AC con una superficie específica de hasta $1500 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ [25].

Adsorbentes lignocelulósicos

La activación química de materiales lignocelulósicos consiste en la impregnación a una cierta temperatura con NaOH, H_2O_2 o NaClO y finalmente, se lavan para eliminar el agente activador hasta alcanzar un cierto pH, de manera que los reactivos químicos erosionan la superficie de las partículas y por lo tanto le confiere una superficie específica mayor al material [19, 25].

Esto indica que el tratamiento químico modifica la superficie del material, dándole mayor capacidad de adsorción, y se ha demostrado que materiales naturales activados químicamente alcanzan el doble de su superficie específica comparada con el mismo material pero sin activación [19].

II.4.9 Aplicaciones de los adsorbentes

El AC es uno de los adsorbentes más utilizados en el proceso de eliminación de productos industriales, suelen aplicarse para eliminar químicos orgánicos sintéticos (synthetic organic chemical SOC), productores de olor y sabor, químicos orgánicos formadores de color, precursores de subproductos químicos, herbicidas y ciertos elementos inorgánicos como el perclorato, arsénico y algunos metales pesados [6]. Además es ampliamente utilizado en la depuración de agua subterránea, clarificación del agua, depuración de aguas para piscinas y refinamiento de las aguas residuales [23]. La instalación y puesta en marcha del proceso de adsorción resulta ser factible, además de mejorar la calidad del agua principalmente para pequeñas o medianas industrias.

Los adsorbentes lignocelulósicos se utilizan de manera efectiva para la eliminación de contaminantes como metales pesados, colorantes y compuestos orgánicos. En la tabla 5 se muestra algunos ejemplos. Pueden ser adaptados en sistemas batch o continuos [1, 19, 32].

Tabla 5. Adsorbentes vegetales utilizados en la remoción de contaminantes en medio acuoso.

Adsorbente	Tejido empleado	Adsorbato	Adsorción máxima (mg/g)
Tuna [19]	Cáscara	Azul de metileno	188.70
Agave [32]	Fibra	Azul de metileno	104.00
Cebolla [1]	Dermis del fruto	Azul de metileno	1055.00
Arroz [4]	Cáscara	Azul de metileno	312.00
Calabaza china [1]	Cáscara	Cr(VI)	18.70
Mango [1]	Cáscara	Cd(II)	68.92
		Pb(II)	99.05
Pitahaya [1]	Cáscara	Azul de metileno	640.00
Almendra [1]	Semilla	Naranja de metilo	41.34
Aceituna [1]	Semilla	Azul de metileno	111.00
Cactus [1]	Cáscara	Albumina de suero bovino	360.00

II.4.10 Caracterización

Los materiales adsorbentes pueden ser caracterizados por sus diferentes propiedades.

Punto de carga cero

El punto de carga cero (pH_{pzc}) corresponde a una carga superficial de cero. Por encima del pH_{pzc} , la carga superficial será negativa (aniónica) y por debajo de él

será positiva (catiónica), indicando su carácter ácido o básico de la superficie de un adsorbente [7, 29].

Densidad aparente

Se define como la masa de muchas partículas de un material contenida en un volumen determinado. Este volumen incluye: partículas de adsorbente, sus poros y el espacio entre las partículas.

Microcopia electrónica de barrido (SEM)

La SEM (Scanning Electron Microscopy) es una técnica que obtiene imágenes de alta resolución, permitiendo la observación y caracterización superficial de los materiales, dando información morfológica.

Superficie específica

Mediante el método de adsorción de solución es posible determinar la superficie específica de los adsorbentes macroporosos. La adsorción de la molécula azul de metileno, azul básico 9 (BB9) en el Colour Index, tiene una forma irregular y una densidad electrónica no uniforme. Sin embargo, se debe considerar que su área molecular es alrededor 98 \AA^2 durante su adsorción en adsorbentes lignocelulósicos. Después de construir la isoterma de adsorción para el azul de metileno en los adsorbentes y el tratamiento de los datos con la ecuación de Langmuir se obtiene la capacidad de la monocapa (a_m) que permite el cálculo del área de superficie específica (S_{esp}) como se muestra en la ecuación 9 [30].

$$S_{esp} = a_m \omega N \quad (9)$$

Donde:

S_{esp} = Superficie específica del adsorbente (m^2/g)

a_m = Capacidad de la monocapa (mg/g)

ω = Área molecular promedio para el azul de metileno ($98 \text{ \AA}^2 / \text{molécula}$)

$N = \text{Número de Avogadro } (6.023 \times 10^{23} \text{ moléculas/mol})$

También es posible determinar por medio de adsorción de nitrógeno la superficie específica de los carbones mediante la aplicación de la ecuación de BET (S_{BET}) a las isotermas de adsorción obtenidas. El volumen total de poro (V_{TP}) que corresponde al volumen de nitrógeno líquido adsorbido a una presión relativa. El volumen y el área de los microporos ($V_{\mu P}$) se determina utilizando el método de t-Plot. El volumen de los mesoporos (V_{MesOP}) se calcula utilizando la diferencia entre V_{TP} y $V_{\mu P}$ [29].

II.5 Espectrofotometría

La espectrofotometría ultravioleta-visible (UV-Vis) es un método analítico que permite identificar y determinar la concentración de un compuesto en solución. Se basa en que las moléculas absorben las radiaciones electromagnéticas y a su vez que la cantidad de luz absorbida depende de forma lineal con la concentración. El fundamento de la espectroscopía se debe a la capacidad de las moléculas para absorber radiaciones, dentro de las regiones UV y visible del espectro electromagnético.

Las moléculas pueden absorber energía luminosa y almacenarla en forma de energía interna. Cuando la luz (considerada como energía) es absorbida por una molécula se origina un salto desde un estado energético fundamental E_1 , a un estado de mayor energía “estado excitado” E_2 (ecuación 10) y sólo se absorberá la energía que permita el salto al estado excitado. Por lo tanto necesitamos saber la energía (E) en términos de longitud de onda (λ), y sabemos que la frecuencia (ν) y la longitud de onda están relacionadas por la constante de la velocidad de la luz (c) (ecuación 11), entonces sustituyendo en la ecuación 10 obtenemos la ecuación 12, se concluye que la E y la λ son inversamente proporcionales. Cada molécula tiene una serie de estados excitados o bandas que la distingue del resto de moléculas.

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu \quad (10)$$

$$v = c/\lambda \quad (11)$$

$$E = h \frac{c}{\lambda} \quad (12)$$

Donde:

E_1 y E_2 = Energía (J)

h = Constante de Plank (6.63×10^{-34} J·s)

v = Frecuencia (Hertz o s^{-1})

c = Velocidad de la luz (3×10^8 m/s)

λ = Longitud de onda (nm)

En espectrofotometría de absorción utiliza las regiones ultravioleta (UV cercano, de 195-400 nm) y visible (400-780 nm). La región UV es una región de energía muy alta. En la región visible apreciamos el color visible de una solución que corresponde a las longitudes de onda de luz que transmite, no que absorbe. El color que absorbe es el complementario del color que transmite. Por lo tanto, para realizar mediciones de absorción es necesario utilizar la longitud de onda en la que absorbe luz la solución coloreada [24].

II.5.1 Transmitancia y absorbancia

Cuando un rayo de luz de una determinada longitud de onda de intensidad (I_0) incide perpendicularmente sobre una disolución de un compuesto químico que absorbe luz o cromóforo, el compuesto absorberá (I_a) una parte de la radiación incidente y dejará pasar el resto (I_t), de forma que se cumple la ecuación 13.

$$I_0 = I_a + I_t \quad (13)$$

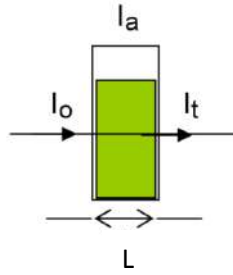


Figura 1. Absorción de luz.

La transmitancia (T) de una sustancia en solución es la relación entre la cantidad de luz transmitida que llega al detector una vez que ha atravesado la muestra, I_t y la cantidad de luz que incidió sobre ella, I_o (ecuación 14).

$$T = \frac{I_t}{I_o} \quad (14)$$

$$A = \log \frac{1}{T} = -\log T = -\log \frac{I_t}{I_o} \quad (15)$$

Dónde:

T = Transmitancia

A = Absorbancia

I_t = Cantidad de luz transmitida

I_a = Cantidad de luz absorbida

I_o = Cantidad total de luz incidente

La absorbancia (A) es un concepto más relacionado con la muestra puesto que nos indica la cantidad de luz absorbida por la misma, y se define como el logaritmo de $1/T$, en consecuencia obtenemos la ecuación 15. Cuando la intensidad incidente y transmitida son iguales ($I_o = I_t$), la transmitancia es del 100% e indica que la muestra no absorbe a una determinada longitud de onda, y entonces A vale $\log 1 = 0$. La cantidad de luz absorbida dependerá de la distancia que atraviesa la luz a través de la solución del cromóforo y de la concentración [24].

II.5.2 Ley de Lambert-Beer

La absorbancia de una solución es directamente proporcional a su concentración a mayor número de moléculas mayor interacción de la luz con ellas. Esta ley (ecuación 16) expresa la relación entre absorbancia de luz monocromática (de longitud de onda fija) y concentración de un cromóforo en soluciones diluidas [24].

$$A = \varepsilon \cdot M \cdot L \quad (16)$$

Donde:

A = Absorbancia (adimensional)

ε = Coeficiente de absortividad molar (L/cm x mol)

L = Longitud de paso de la luz a través de la solución (cm)

M = Concentración molar (mol/L)

II.5.3 Espectro de absorción

El espectro de absorción es una representación gráfica que indica la cantidad de luz absorbida (A) a diferentes valores de λ .

Se determina a partir de una solución diluida de un compuesto, cuya absorbancia máxima entra dentro del rango de medida del espectrofotómetro, se obtendrá el valor de absorbancia a diferentes longitudes de onda frente a un blanco que contenga el disolvente de la solución de la muestra a caracterizar. Se mide primero la absorbancia del disolvente, al que se le asigna el valor de cero mediante el ajuste del mando, de forma que la intensidad incidente y transmitida sean iguales ($I_0 = I_t$), por lo tanto la absorbancia es cero. A partir del espectro de absorción, se obtendrá el valor de λ , al que el compuesto presenta la mayor absorbancia ($\lambda_{\text{máx}}$). Dicha $\lambda_{\text{máx}}$ se utilizará al hacer determinaciones cualitativas y cuantitativas del compuesto [24].

II.5.4 Curva de calibración

Para obtener una curva de calibración de un compuesto se preparan soluciones de diferentes concentraciones del mismo, determinándose para cada una de ellas el valor de absorbancia en $\lambda_{\text{máx}}$. Estos valores de absorbancia se representan en el eje de ordenadas (eje y) y la concentración en el eje de abscisas (eje x). Se observará que, a bajas concentraciones, el aumento de concentración corresponde con un incremento lineal en la absorbancia cumpliéndose la ley de Lambert-Beer. El valor de R^2 , corresponde al coeficiente de correlación de la ecuación, indicando un buen ajuste de la línea recta cuando su valor es cercano a 1. Su aplicación es esencial para poder cuantificar la concentración desconocida de un compuesto conocido en disolución a partir de una gráfica lineal, que se basa en una relación de proporcionalidad entre dos variables. Además se obtiene datos exactos de concentración inicial (C_i) y concentración final (C_f) logrando medir antes, durante y después de un tratamiento que se someta un compuesto en este caso un colorante [19, 24].

II.6 Parámetros generales indicadores de contaminación

Los contaminantes del agua se clasifican en tres categorías: químicos, físicos y biológicos. Los contaminantes químicos comprenden tanto productos químicos orgánicos como inorgánicos. La contaminación por compuestos orgánicos se mide como la disminución de oxígeno como resultado de la utilización del existente en el proceso de degradación biológica de dichos compuestos. En el caso de la contaminación por compuestos inorgánicos es su posible efecto tóxico bioacumulable que se absorben en los tejidos de los peces y pueden hacer que no sean adecuados para el consumo humano [7].

El índice de calidad del agua (ICA) permite estimar el grado de pureza o contaminación de una muestra o un efluente. Los colorantes empleados en el proceso de teñido, que se mantienen presentes en las aguas residuales, provocan variaciones considerables en las características del agua particularmente en el pH, el color y la concentración de materia orgánica medida como DQO [1].

Los siguientes parámetros son los más significativos dentro de este estudio, para el tratamiento de soluciones acuosas con alta carga de color.

Parámetros de carácter físico

- Color
- Olor y sabor
- Turbiedad
- Conductividad
- Sólidos: sólidos suspendidos (SS), sólidos disueltos (SD)

Parámetros de carácter químico

- Potencial de hidrógeno (pH)
- Demanda química de oxígeno (DQO)

II.6.1 Color

El color es un parámetro organoléptico que está estrechamente relacionado con las sustancias disueltas y las partículas en suspensión. El agua no contaminada suele tener ligeros colores rojizos, pardos, amarillentos o verdosos por la presencia de sustancias húmicas, metales como hierro, magnesio, cobre y pigmentos verdes de las algas.

Existen dos tipos de color en el agua; el color verdadero y el color aparente. El color verdadero, es el color de la muestra una vez que la turbiedad se ha removido, por lo tanto sería el de la muestra una vez que ha sido filtrada o centrifugada, dejando solamente las sustancias disueltas. El color aparente incluye el color de las sustancias en solución, coloides y en suspensión. Además del color debido al material, sería aquella muestra tal y como ha sido obtenida. Para determinar el color del agua en el laboratorio se emplea el espectrofotómetro y se mide en unidades de platino-cobalto (U. Pt-Co) [23].

II.6.2 Olor y sabor

El olor y sabor son parámetros organolépticos que pueden describirse cualitativamente, porque no existen instrumentos de medición, ni unidades de medida. Los olores y sabores frecuentemente ocurren juntos y en general son prácticamente indistinguibles, pero pueden proporcionar información sobre el estado del agua. Los ensayos de sabor solo deben hacerse con muestras seguras para el consumo humano. Las sales o los minerales dan sabores salados o metálicos, en ocasiones sin ningún olor [23].

Los compuestos químicos presentes en el agua (fenoles, hidrocarburos, cloro, materia orgánica en descomposición con desprendimiento de gases y organismos vivos como algas u hongos) pueden dar olores y sabores aunque estén en muy pequeñas concentraciones.

En las aguas residuales industriales el olor dependerá de los compuestos presentes en los procesos, dentro de los procesos textiles de pretratamiento y acabado es frecuente percibir olores fuertes como NaOH, detergentes, suavizantes, agentes de acabados, etc., debido a la limpieza y acabados del material textil.

II.6.3 Turbiedad

La turbiedad o turbidez de un agua es ocasionada por la presencia de materia en suspensión como arcillas, limos, coloidales, plancton y otros organismos. Estas partículas suelen tener desde dimensiones de alrededor de 10 nm, hasta diámetros del orden 0.1 mm. La turbidez se puede asociar a tres categorías: minerales, partículas orgánicas húmicas, provenientes de descomposición de restos vegetales y partículas filamentosas, como por ejemplo restos de amianto.

La turbiedad excesiva reduce la penetración de la luz, afectando de esta manera la fotosíntesis de los organismos fitoplanctónicos, así como la vegetación que se desarrolla en el lecho y que a su vez sirve de alimento a la fauna acuática. La

turbidez se mide en UNF (unidades nefelométricas de turbidez) mediante un espectrofotómetro [1, 23].

II.6.4 Conductividad

La conductividad es la capacidad de una solución para conducir una corriente eléctrica. Esta medida nos proporciona información general de la concentración de sales e iones (átomos o moléculas cargados eléctricamente) presentes en las soluciones acuosas. Los iones más habituales son: sodio, calcio, magnesio, bicarbonato, sulfato y cloruro [1]. Este parámetro se puede reducir solamente mediante un sistema de filtración a través de una membrana semipermeable (nanofiltración u ósmosis inversa), que le permite el paso del agua y no así de sales. O bien mediante resinas de intercambio iónico por sustitución específica de aniones o cationes por un grupo OH^- o un H^+ [23].

La conductividad mide la cantidad de sales presentes en el agua, por medio de un potenciómetro, la unidad de medida es el Siemens, pero como es una unidad muy grande suele emplearse mSiemens/cm (mS/cm) en efluentes residuales.

II.6.5 Sólidos

Los sólidos presentes en una agua pueden estar en suspensión o disueltos. Los sólidos suspendidos (SS) son los que se pueden eliminar mediante un tratamiento físico de filtración con membranas de $0.45 \mu\text{m}$. Los sólidos disueltos (SD) son aquellos que quedan en el agua después de realizar la citada filtración. Solo pueden ser eliminados del agua mediante un tratamiento de tipo biológico, ya que son las bacterias las encargadas de convertir estos sólidos disueltos en sólidos en suspensión, para que puedan ser retirados del efluente. Existe otra clasificación de los sólidos totales, en sedimentables y no sedimentables. Tanto los SS y SD se expresan mg/L o ppm [23].

Los sólidos totales se calculan como la suma de sólidos suspendidos y disueltos (ecuación 17).

$$ST = SS + SD \quad (17)$$

Donde:

ST = Sólidos totales

SS = Sólidos suspendidos

SD = Sólidos disueltos

II.6.5 Potencial de hidrógeno (pH)

Es una medida de acidez o basicidad, indicando la concentración de iones de hidrógeno presentes en las soluciones acuosas. El pH típicamente va de 0 a 14 en disolución acuosa, siendo ácidas las disoluciones con pH menores a 7 y básicas las que tiene pH mayores a 7. El pH igual a 7 indica la neutralidad de la disolución [23].

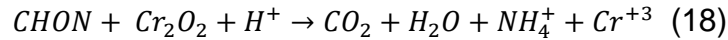
El valor de pH se puede medir en forma precisa mediante un potenciómetro o pH-metro, que es un instrumento que mide la diferencia de potencial entre dos electrodos. Un electrodo de referencia (plata/cloruro de plata) y un electrodo de vidrio que es sensible al ión hidrógeno. También se puede medir con papel indicador, otros indicadores usuales como son la fenolftaleína y naranja de metilo.

II.6.6 Demanda química de oxígeno (DQO)

Corresponde al volumen de oxígeno requerido para oxidar la fracción orgánica de una muestra susceptible de ser oxidada por vía química con dicromato o permanganato, en medio ácido. Es una medida de la cantidad de materia orgánica presente en el agua, se mide en mg/L o ppm. La DQO no mide toda la materia orgánica presente en el agua, sino solo aquella fracción que se puede oxidar con el $K_2Cr_2O_7$ y otros potentes agentes oxidantes.

El ensayo de la determinación de la DQO con dicromato de potasio se utiliza ampliamente para establecer la contaminación con materia orgánica de aguas residuales. El ensayo se lleva a cabo calentando en condiciones de reflujo total, una muestra de volumen determinado, con un exceso conocido de dicromato potásico ($K_2Cr_2O_7$), en presencia de ácido sulfúrico (H_2SO_4) durante un período de

2 horas. La materia orgánica en la muestra se oxida, como resultado se consume el dicromato de color amarillo que se reemplaza por el ión crómico de color verdoso (ecuación 18). Como catalizador se añade sulfato de plata (Ag_2SO_4).



La medición se lleva a cabo por espectrofotometría, es más rápido, fácil y suficiente para fines prácticos en comparación con colorímetro fotoeléctrico [7].

II.7 Chirimoya (*Annona cherimola*)

La chirimoya es un fruto tropical del género *Annona* es la fuente más importante de frutas comestibles en la familia botánica *Annonaceae*. Se conoce que existen cinco formas botánicas diferentes por la forma del fruto, en este trabajo se estudió la forma botánica Umbonada. Este fruto crece en árboles de entre 5 y 11 metros, a los 3 años de su siembra se empieza a cosechar. El nombre *Annona* deriva del latín que significa cosecha anual, en México la cosecha comprende 5 meses (octubre-febrero). Se cree que la chirimoya tiene su origen en los valles fríos, pero libres de heladas de los Andes a una altitud de entre 700 y 2,400 m [33].

Mundialmente la fruta se cultiva, en el Mediterráneo, España, Israel, Bolivia, Ecuador, México y Perú, entre otros países. El mercado de exportación es bajo, solo del 8 a 10% se vende a países europeos. En países sudamericanos es frecuente encontrarlos en mercados y cadenas comerciales. Su consumo es limitado en comparación con otros frutos, porque tiende a oxidarse y su difícil transportación a distancias largas, por lo que se cosecha en huertos familiares o en la naturaleza. En México se encuentran en los estados de Puebla, Hidalgo, Michoacán, Veracruz, Morelos y Guerrero, entre otros.

Características del fruto

La fruta tiene un aspecto cónico alargado en forma de corazón, de 5 a 18 cm de largo y hasta 15 cm de ancho, con un peso promedio de 0.1 a 0.5 kg, pero las frutas más grandes pueden alcanzar los 2 kg de peso. La piel es semi-delgada, verde, suave y puede ser lisa con marcas parecidas a huellas dactilares o

cubiertas con sutiles protuberancias cónicas o redondeadas como se observa en la figura 2. La pulpa es blanca, suave, dulce y jugosa.



Figura 2. Chirimoya

Características de la semilla

El tamaño de la fruta generalmente es proporcional a la cantidad de semillas que contiene, pero mientras más asemeje una forma de corazón contendrá un número elevado de semillas. Cada segmento de pulpa rodea una sola semilla dura semi-aplanada de color negro, pero cuando estas son expuestas al aire por un tiempo tienden a cambiar de negro a marrón (Figura 3. a). Las semillas tienen un tamaño promedio de 1.5 cm de largo por 1 cm de ancho. Están compuestas por una cascarilla dura que cubren al embrión. El peso promedio por semilla seca es de 0.5 g. Por dentro la corteza (tegumento) es blanda y con un gran número de laminillas que comparte con el embrión (Figura 3. b) y tiene un parecido a la nuez con muchos espacios o hendiduras entre la estructura (Figura 3. d).

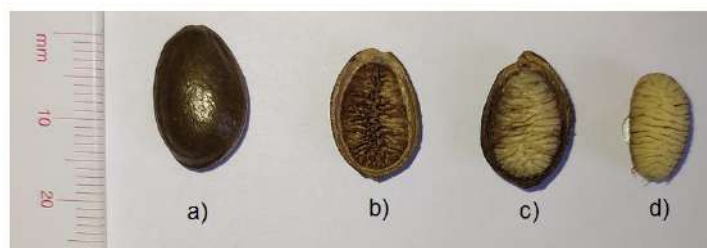


Figura 3. Semilla de chirimoya, a) semilla entera, b) cascarilla, c) semilla abierta y d) embrión.

Aplicaciones de la semilla de chirimoya

Tradicionalmente las semillas de chirimoya se trituran y se han utilizado como insecticida, tratamiento para piojos e infecciones en la piel. El extracto de semilla de chirimoya exhibe propiedades con una fuente importante de toxinas vegetales, en contacto en los ojos puede causar ceguera y al ingerirla causar problemas intestinales y náuseas. Sin embargo se han encontrado beneficios que poseen actividades antioxidantes en las células y antiinflamatorias. En comunidades indígenas de México se considera que tiene propiedades anticancerígenas [34].

III. Experimental

III.1 Recolección de semillas de chirimoya

Las muestras de *Annona Cherimola* fueron recolectados de 2 árboles de la forma botánica Umbonada con una altura entre 7 y 8 m y una edad aproximada de 30 años, en la ciudad de Puebla que se ubica a 2,135 m sobre el nivel del mar y con una temperatura ambiental entre 10 y 25°C. Se recolectaron todas las semillas de las chirimoyas despreciando su aspecto físico, desde chirimoyas atacadas por hongos, inmaduras, partidas por la caída, duras, sanas, pequeñas, grandes, etc. Se tomó la decisión de despreciar su estado, debido a que las semillas no son afectadas por estos factores y todas presentaron buen aspecto físico. Las semillas fueron lavadas con agua potable, secadas con una toalla y se llevaron al congelador para su conservación, hasta su utilización.

III.1.1 Preparación de los adsorbentes

Las semillas fueron sacadas del congelador y secadas al sol por 5 días. Posteriormente con la ayuda de unas pinzas se ejercía presión sobre la semilla y esta se abría como una nuez, posteriormente se separaba la cascarilla del embrión.

III.1.2 Carbón Activado (AC)

Para la elaboración del AC se utilizaron las cascarillas, a continuación se describe el procedimiento:

1. Las cascarillas se cortaron en dos fragmentos y fueron tamizadas para obtener partículas con un tamaño >0.841 mm.
2. Se pesaron 50 g de fragmentos de cascarilla y se dejaron inmersas en H_3PO_4 al 50% durante 24 h a T ambiente.
3. Después, se dejaron escurriendo las cascarillas durante 24 h, para eliminar el exceso de ácido.

4. Se acomodaron las cascarillas en cápsulas de porcelana y se llevaron a la mufla para su carbonización con un gradiente de calentamiento de $4.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ hasta alcanzar los 400°C y se mantuvo esta T durante 3 h.
5. Se enfrió el carbón hasta alcanzar la temperatura ambiente, prosiguieron los enjuagues con agua destilada en caliente ($\approx 90^{\circ}\text{C}$) y fue sometido a ultrasonido durante 10 min, hasta lograr un pH_{final} menos ácido.
6. Fue secado en estufa a $60\pm 5^{\circ}\text{C}$ por 48 h.
7. Luego fue molido en mortero y tamizado para obtener un tamaño de partícula controlada de 0.25-0.42 mm para pruebas de adsorción y < 0.25 mm para otras pruebas de caracterización.
8. Después de molerlo y tamizarlo, el AC nuevamente fue secado a 100°C durante 8 h, fue nombrado como CarChiQC y fue almacenado en el desecador.

Previo a este procedimiento se prepararon otros materiales carbonáceos a partir de la semilla de chirimoya, CarChiQ, CarChiF y CarChiQE. El carbón CarChiQ fue elaborado a partir de la semilla entera, con las mismas condiciones descritas, pero se obtuvieron resultados no tan favorables (baja capacidad de adsorción). Se optimizaron las condiciones de preparación, separando la cascarilla y el embrión, obteniendo CarChiQC y CarChiQE respectivamente, dando como resultado que el embrión es la parte de la semilla con baja capacidad de adsorción al ser carbonizada, además de presentar un bajo rendimiento. El carbón CarChiF fue activado físicamente sin un agente químico utilizando la semilla entera, presentando también una baja capacidad de adsorción, por lo que fue descartado. En el capítulo IV se presentan los resultados de la caracterización de todos los carbones sintetizados.

III.1.3 Adsorbente lignocelulósico

Para la elaboración del adsorbente lignocelulósico se utilizaron los embriones, a continuación se describe el procedimiento optimizado de preparación:

1. Los embriones se cortaron en cuatro fragmentos y se tamizaron para obtener partículas con un tamaño >0.841 mm, eliminando las partículas pequeñas y residuos de cascarilla.
2. Se pesaron 30 g de los fragmentos del embrión y se agregaron 75 mL de NaOH al 25%.
3. Se puso a calentar la solución en una parrilla con agitación magnética manteniendo una temperatura de 50 ± 5 °C durante 30 min.
4. Se decantó la solución de NaOH y se enjuagaron varias veces, con 200 mL de agua destilada en cada enjuague, durante 30 min, bajo agitación magnética a T ambiente, hasta alcanzar un pH_{final} menos alcalino.
5. Se dispersaron los embriones en vidrios de reloj y se secaron en la estufa a una T de 60 ± 5 °C por 48 horas.
6. Posteriormente los embriones se molieron en una licuadora y fueron tamizados para obtener partículas con un tamaño de 0.84-2 mm para las pruebas de adsorción y < 0.84 mm para otras pruebas de caracterización.
7. Después del molido y tamizado del adsorbente lignocelulósico, nuevamente, se puso a secar en la estufa a 60 ± 5 °C durante 48 h, se nombró como SemChiNaOH y fue almacenado en el desecador.

Previo al establecimiento del procedimiento anteriormente descrito hubo 2 pruebas fallidas, aplicando las mismas condiciones mencionadas, en la primera prueba se usó la semilla entera y en la segunda prueba la semilla entera fue cortada en cuatro fragmentos, en los primeros enjuagues se cancelaron las pruebas porque se observó que la cascarilla impedía la activación del embrión. La finalidad era que el NaOH erosionara la superficie de la parte blanda de la semilla.

III.2 Porcentaje de humedad

El contenido de humedad se determina mediante el método termogravimétrico, es decir la pérdida por secado mediante el cual se calienta la muestra y se registra la pérdida de peso debida a la evaporación del H_2O . Se expresa en % de humedad.

Procedimiento para determinar el % de humedad:

1. Las cápsulas de porcelana se pusieron a peso constante es decir, a 120°C durante 2 h y dejarlas enfriar a T ambiente en un desecador.
2. En una balanza analítica pesar con pinzas las cápsulas vacías y registrar el peso de la cápsula vacía.
3. Agregar una cierta cantidad de muestra (cascarilla y embrión por separado) en cada cápsula, pesar y registrar el peso.
4. Realizar la resta entre cápsula con muestra – cápsula vacía, este peso se registra como peso húmedo (PH).
5. Las cápsulas se meten a la estufa a 50°C.
6. Se sacan de la estufa y se dejan enfriar en el desecador durante 30 min, pesar las cápsulas diariamente hasta registrar un peso constante, este peso se registrar como peso seco (PS).
7. Realizar los cálculos correspondientes para cada cápsula utilizando la ecuación 19.

$$\% Humedad = 100 - \frac{PS \times 100}{PH} \quad (19)$$

Donde:

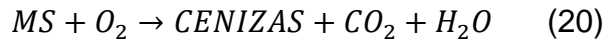
PS = Peso del material seco (g)

PH = Peso del material húmedo (g)

Se obtuvo un porcentaje de humedad para las cascarillas de 6.2% y para los embriones de 7.8%.

III. 3 Cenizas

El contenido de materia inorgánica es realizado a través de un proceso de combustión (T superiores a 500°C) de un material vegetal seco. Una vez que la materia orgánica se destruye, solo quedan cenizas (materia inorgánica incombustible) como sales minerales. En la ecuación (20) química se muestra la reacción típica de combustión, siendo *MS* el material vegetal seco. La determinación de las cenizas se realiza por el método gravimétrico del material a peso constante.



Procedimiento para determinar la cantidad de cenizas:

1. Poner a peso constante las cápsulas de porcelana.
2. En una balanza analítica pesar con pinzas las cápsulas vacías y registrar el peso.
3. Agregar una cierta cantidad de semillas de chirimoya secas en las cápsulas y registrar su peso.
4. Realizar la resta entre cápsula con muestra – cápsula vacía, este peso se registra como peso seco (PS).
5. Meter a la mufla a 600°C durante 5 horas.
6. Enfriar y pesar, registrando el peso de las cenizas (PC).
7. Calcular el porcentaje de cenizas utilizando la ecuación 21.

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{PC}{PS} \times 100 \quad (21)$$

Donde:

PC = Peso de ceniza (g)

PS = Peso del material seco (g)

El porcentaje de ceniza obtenido fue de 1.5% para la semilla completa.

III.4 Punto de carga cero (pH_{pzc})

En este caso se utilizó la técnica de inmersión, para la cual se preparó una solución de electrolito ajustado a diferentes pH.

Procedimiento para la determinación del pH_{pzc} :

1. Preparar una solución de NaCl 0.1 M y enumerar frascos con tapa del 2 al 12 para ambos adsorbentes.
2. Agregar en cada frasco, previamente enumerado, 50 mL de la solución de NaCl e ir agregando un agitador magnético.
3. Ajustar el pH de cada frasco, con la ayuda de un pH-metro y una parrilla de agitación magnética, agregando un poco de solución de NaOH para los pH's básicos o HCl para los pH's ácidos e ir registrando el pH_{real} .

4. Pesar once muestras con 0.15 g de adsorbente CarChiQC <0.25 mm y SemChiNaOH <0.84 mm para cada frasco enumerado.
5. Cuando se haya ajustado el pH en todos los frascos agregar el adsorbente en su correspondiente frasco, tapar y dejar en contacto por 48 h con 12 h de agitación orbital.
6. Filtrar la solución con papel filtro.
7. Tomar lectura del pH_{final} en cada uno de los frascos, enjuagando el electrodo en cada lectura y registrar los datos. En la figura 4 se puede apreciar la realización del pH_{pzc}.
8. Construir la gráfica e identificar el pH_{pzc} como el punto de intersección entre la curva pH_{inicial} vs pH_{final} y la línea recta pH_{inicial}=pH_{final}.



Figura 4. Prueba del punto de carga cero (pH_{pzc})

III.5 Densidad aparente

Es la relación entre volumen y el peso seco de un material, que se basa en el principio de densidad.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (22)$$

Donde:

ρ = Densidad (g/cm³)

m = Masa del material en seco (g)

v = Volumen (cm³)

Procedimiento para determinar la densidad aparente de los adsorbentes.

1. Por cada uno de los adsorbentes, poner a peso constante 3 matraces aforados de 1 mL.
2. En una balanza analítica pesar los matraces aforados sin material y registrar su peso.
3. Agregar poco a poco el adsorbente en el matraz, dando golpes sobre una superficie hasta que las partículas lleguen a la marca del aforo.
4. Pesar cada uno de los aforados llenos y registrar su peso.
5. Determinar la densidad por diferencia de peso.

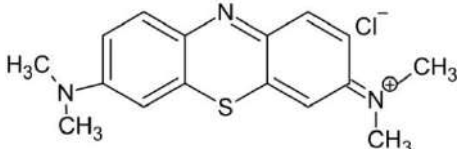
III.6 Microscopia electrónica de barrido (SEM)

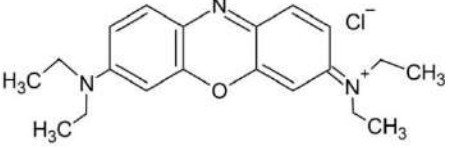
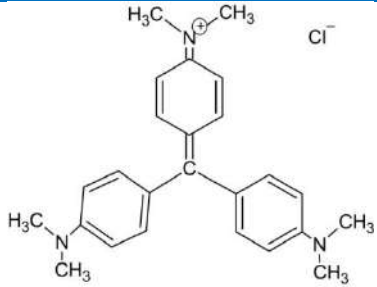
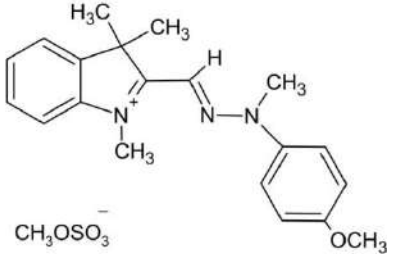
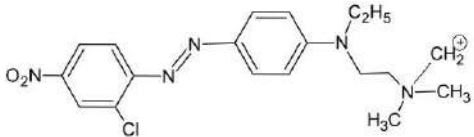
La morfología superficial de CarChiQC se observó mediante SEM utilizando un microscopio electrónico de barrido JEOL modelo JSM 6300 operado a 30 kV. Para su observación, las partículas del AC se dispersaron en cinta de grafito y luego se cubrieron con oro para evitar la acumulación de cargas electroestáticas en la muestra, esta prueba se realizó en el Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH).

III.7 Colorantes seleccionados

Los colorantes utilizados pertenecen al tipo básicos, estos fueron preparados en soluciones acuosas con concentraciones conocidas. El agua residual fue obtenida de procesos de acabados textiles. En la tabla 6 se muestran las principales características y estructura química de los colorantes seleccionados.

Tabla 6. Colorantes seleccionados

Colorante (Nombre comercial)	Abreviatura	Estructura química	PM (g/mol)	$\lambda_{\text{máx}}$ (nm)
Basic Blue 9 (Azul de metileno)	BB9		319.5	665

Basic Blue 3 (Azul astazón)	BB3		356.9	654
Basic Violet 3 (Cristal violeta)	BV3		407.5	590
Basic Yellow 28 (Amarillo oro maxilón GL)	BY28		433.5	439
Basic Red 18 (Rojo maxilón 2GL)	BR18		426.3	486

Para la cuantificación del colorante presente en el agua residual, antes y después de la adsorción, se obtuvo el espectro UV-Vis para determinar la longitud de onda de máxima absorbancia del colorante presente. Con la SemChiNaOH se trató un agua residual con colorante reactivo de color vino y se obtuvo una $\lambda_{\text{máx}}$ de 515 nm. Con CarChiQ, y CarChiQC se trató un agua residual de una mezcla de colorantes directos de color café, por lo que no fue posible obtener $\lambda_{\text{máx}}$.

III.8 Cinética de adsorción

Por medio de la cinética de adsorción se describe la velocidad de adsorción del adsorbato en el adsorbente y se determina el tiempo en que se alcanza el equilibrio.

Procedimiento para la determinación de la cinética de adsorción:

1. Pesar en frascos con tapa 0.3 g de SemChiNaOH y 0.075 g de CarChiQC.
2. Preparar solución de 500 mg/L a partir de una solución patrón de BB9 de 2100 mg/L, para calcular el volumen de la alícuota, se utilizó la ecuación 23.

$$C_1V_1 = C_2V_2 \quad (23)$$

Donde:

C_1 = Concentración inicial (mg/L)

V_1 = Volumen inicial (mL)

C_2 = Concentración final (mg/L)

V_2 = Volumen final (mL)

3. Agregar 15 mL de solución de BB9 de 500 mg/L en cada frasco, teniendo una relación masa/volumen de 20 g/L para SemChiNaOH y 5 g/L para CarChiQC, tapar los frascos y ponerlos en agitación. Tomar el tiempo de contacto entre los adsorbentes y la solución de colorante.
4. Tomar alícuotas cada hora durante las primeras 4 horas y posteriormente durante lapsos de tiempo más largos.
5. Diluir las alícuotas en tubos de ensayo, en caso de ser necesario.
6. Encender el espectrofotómetro y esperar a que calienten las lámparas UV-Vis y en el ajuste de mando poner una $\lambda_{m\acute{a}x}$ 664 nm.
7. Calibrar el equipo con un blanco de agua destilada.
8. Introducir la muestra, medir las absorbancias (A) y registrar los datos.
9. Graficar la cinética de adsorción como a (mg/g) vs t (h).
10. Tratar los datos de la cinética de adsorción con las ecuaciones de pseudo 1^{er} orden y pseudo 2^o orden. Obtener las ecuaciones de las rectas y la que presente el mayor valor de R^2 indicará el mejor ajuste.

III.9 Adsorción estática de soluciones de 300 mg/L

La adsorción estática de los colorantes nos permite determinar los porcentajes de remoción de los colorantes. Se llevó a cabo mediante el siguiente procedimiento:

1. Preparar soluciones acuosas de 300 mg/L, de todos los colorantes mencionados en la tabla 6, a partir de soluciones patrón de 2100 mg/L, se utilizó la ecuación 23 para determinar el volumen de la solución patrón requerido.
2. Identificar y pesar en cada frasco con tapa, 0.2 g de SemChiNaOH (m/V=20 g/L) y 0.05 g de CarChiQC (m/V=5 g/L) para cada colorante.
3. Agregar 10 mL de solución acuosa en cada frasco, taparlo y ponerlo en agitación orbital aproximadamente durante 12 h, el tiempo de contacto adsorbente-solución fue de 48 h para ambos adsorbentes a una temperatura de 30°C.
4. Al finalizar el tiempo de contacto, tomar alícuotas de la muestras, en caso de ser necesario diluir con agua destilada.
5. También se deben tomar alícuotas de las soluciones de colorantes con concentración inicial de 300 mg/L y diluir con agua destilada.
6. Encender el espectrofotómetro y medir la absorbancia (A) de cada solución de colorante (antes y después de la adsorción) a su respectiva longitud de onda ($\lambda_{m\acute{a}x}$) (tabla 6).
7. Calcular los resultados de porcentaje de adsorción, utilizando la ecuación 24. La concentración final o de equilibrio se evalúa considerando la A de la concentración inicial (300 mg/L) y la A después de la adsorción.

$$\%Adsorción = \frac{C_i - C_{eq}}{C_i} \cdot 100 \quad (24)$$

Donde:

C_i = Concentración inicial (mg/L)

C_{eq} = Concentración de equilibrio (mg/L)

III.10 Curvas de calibración

Para determinar la concentración final de las soluciones acuosas de colorantes después de la adsorción a distintas concentraciones, es necesario construir las curvas de calibración de cada colorante. Para BB9 en SemChiNaOH en el rango fue de 300 a 1800 mg/L y para BR18, BV3, BB3 y BY28 de 200 a 1200 mg/L. En el caso de CarChiQC los colorantes anteriormente mencionados estuvieron en el rango de 170 a 1020 mg/L.

Procedimiento para construir las curvas de calibración:

1. Preparar 50 mL de soluciones acuosas de todos los colorantes mencionados, con las concentraciones indicadas, a partir de la solución patrón de 2100 mg/L.
2. Tomar una alícuota de cada solución de colorante y diluir en una cantidad conocida de agua destilada, para poder leer su absorbancia en el espectrofotómetro.
3. Encender el espectrofotómetro, seleccionar la $\lambda_{\text{máx}}$ de cada colorante y medir la A de las soluciones con diferentes concentraciones, esta debe ser <1 para obtener lecturas confiables.
4. Calcular los valores de A_{real} , multiplicando la A leída en el espectrofotómetro por el factor de dilución. Graficar los datos A_{real} vs concentración (C) para obtener la curva de calibración. Ajustar los datos a una línea recta y obtener la ecuación de la recta y el coeficiente de correlación, R^2 .
5. En la tabla 7 se muestran las ecuaciones de las curvas de calibración obtenidas con sus respectivos coeficientes de correlación.

Tabla 7. Curvas de calibración de los colorantes básicos.

Colorante	R^2	Ecuación de la curva de calibración
BB9	0.9912	$C = \frac{A}{0.2895}$

BB3	0.9991	$C = \frac{A}{0.1644}$
BV3	0.9972	$C = \frac{A}{0.2860}$
BY28	0.9981	$C = \frac{A}{0.0553}$
BR18	0.9947	$C = \frac{A}{0.0384}$

III.11 Isotermas de adsorción

Para la construcción de las isotermas de adsorción, se utilizaron las mismas concentraciones de las curvas de calibración con sus respectivos adsorbentes. El procedimiento seguido fue:

1. Identificar los frascos con tapa para las isotermas de adsorción y pesar el adsorbente, 0.2 g para SemChiNaOH y 0.05 g de CarChiQC.
2. Agregar 10 mL de solución de colorante y poner los frascos en agitación orbital. Teniendo una relación m/V de 20 g/L para SemChiNaOH y 5 g/L para CarChiQC. Los frascos permanecieron a una temperatura de 30 °C durante 48 h.
3. Extraer alícuotas de las muestras puestas en adsorción y si es necesario se diluye con agua destilada en celdas para hacer lectura de su A.
4. Encender el espectrofotómetro y seleccionar la $\lambda_{\text{máx}}$ para cada colorante.
5. Tomar las lecturas de las A y registrar los datos.
6. Una vez teniendo las absorbancias se sustituye en las ecuaciones de las curvas de calibración (tabla 7) y se obtiene la concentración en equilibrio C_{eq} , este dato se sustituye en la ecuación 4 para obtener la cantidad adsorbida a para cada isoterma.
7. Graficar los puntos muestreados de la isoterma a (mg/g) vs C_{eq} (mg/L).
8. Graficar la transformada de Langmuir (ecuación 6) C_{eq}/a vs C_{eq} , para obtener la ecuación de la recta y R^2 .

9. Obtener la capacidad de la monocapa (a_m) y la constante de Langmuir (K_L) a partir de la ecuación de la recta de la transformada.
10. Construir el modelo completo de la isoterma de Langmuir utilizando la ecuación 5.

III.12 Superficie específica

La superficie específica por adsorción de azul de metileno BB9 fue determinada para ambos adsorbentes, una vez construidas las isotermas de adsorción de BB9 se toma el valor de la capacidad de la monocapa (a_m) y se calcula con la ecuación 9.

Para la determinación de la S_{esp} y obtener información de la porosidad de los carbones, se recurre al proceso de adsorción de un gas inerte, generalmente nitrógeno a la temperatura de licuefacción del gas. La isoterma de adsorción se determina volumétrica o gravimétricamente: en el sistema volumétrico, la cantidad adsorbida se calcula, mediante la aplicación de las leyes de los gases, a partir de la presión y volumen del adsorbato antes y después de la adsorción. La superficie específica por adsorción de N_2 a 77 K, únicamente fue calculada para el AC, utilizando un analizador de superficie específica y porosidad Micrometrics ASAP 2020. Este análisis se realizó en los laboratorios del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH).

III.13 Adsorción de colorantes presentes en agua residual

El agua residual, designada como W.W. del nombre en inglés wastewater, se recolectó en dos empresas textiles, ambas aguas fueron tratadas con los adsorbentes y fueron puestas en adsorción estática.

El procedimiento para el tratamiento de las aguas residuales fue el siguiente:

1. Pesar 1.2 g de SemChiNaOH, 0.2 g de CarChiQ y 0.1 g de CarChiQC en frascos con tapa.

2. Agregar 30 mL de solución de W.W.1 (rojo vino) en el frasco con la SemChiNaOH, 20 mL de W.W.2 (café) en frasco con CarChiQ y en otro con CarChiQC, teniendo una relación m/V de 40, 10 y 5 g/L, respectivamente.
3. Poner en adsorción estática durante 48 h para SemChiNaOH y 24 h para CarChiQ y CarChiQC.

III.13.1 Parámetros de calidad del agua residual

Se midieron los parámetros de calidad del W.W. antes y después del tratamiento.

1. Se determinó la conductividad eléctrica y el pH con el potenciómetro.
2. Para la determinación de la DQO se agregó en un vial de la marca HACH con agente oxidante, 0.5 mL de W.W. + 1.5 mL de agua destilada, se colocaron en el reactor por 2 h a 150°C, después, se dejó enfriar a temperatura ambiente para su lectura en el espectrofotómetro HACH modelo DR5000.
3. Se pusieron a peso constante 2 cápsulas de porcelana por cada muestra de W.W., se pesaron las cápsulas vacías (P_1) y se agregaron 5 mL de muestra, luego se metieron a la estufa por 2 h a 120°C evaporando el agua, se sacaron de la estufa y se dejaron enfriar. Se volvieron a pesar registrando el peso de las cápsulas con muestra (P_2), utilizando la ecuación 25, se calcularon los sólidos totales.
4. Las determinaciones espectrofotométricas fueron realizadas antes y después del tratamiento y fueron las siguientes: color, DQO se midieron en el equipo y en algunos casos fue necesario diluir.

$$ST = \frac{(P_2 - P_1) \cdot 1,000,000}{V_m} \quad (25)$$

Donde:

ST = Sólidos totales (mg/L)

P_2 = Peso inicial (g)

P_1 = Peso final (g)

V_m = Volumen de muestra (mL)

III.14 Equipo utilizado

El presente trabajo se realizó en el laboratorio de Ingeniería Ambiental del laboratorio Integral de la Facultad de Ingeniería. La tabla 8 se muestra el equipo utilizado durante el desarrollo de esta tesis.

Tabla 8. Equipo utilizado

Equipo	Marca	Modelo
Balanza analítica	OHAUS	Explorer
Potenciómetro y conductímetro	Conductronic	pH 10
Mufla	Thermolyne	48000
Estufa	Felisa	141
Estufa	SHEL.-LAB.	---
Cuba de ultrasonido	Branson	1510
Espectrofotómetro	HACH	DR 5000
Reactor para digestión de muestras de DQO	HACH	---
Agitador multipropósito	Scientific	CVP-2000 P
Parilla de agitación magnética	Thermolyne	Corning
Desecador	Sampia Dry keeper	---
Bomba de vacío	Controls	---
Micropipetas 20-200, 500-5000, 100-1000 y 1000-10000 μ L	Brand	---

IV. Resultados y discusión

IV.1 Morfología de la semilla de chirimoya

La semilla abierta está constituida por la cascarilla y el embrión, ambos con aspecto semi-aplanado. La cascarilla es de color marrón oscuro, teniendo una corteza exterior dura (figura 5. a) y por dentro es más suave con bastantes pétalos leñosos (laminoformes) que coinciden con las hendiduras del embrión (Figura 5. b). El embrión es de color blanco amarillento, tiene una apariencia oleosa, esponjosa, con cavidades, en la figura 5. c) se observan estas características y en la figura 5.d) pueden apreciarse residuos leñosos de la cascarilla.

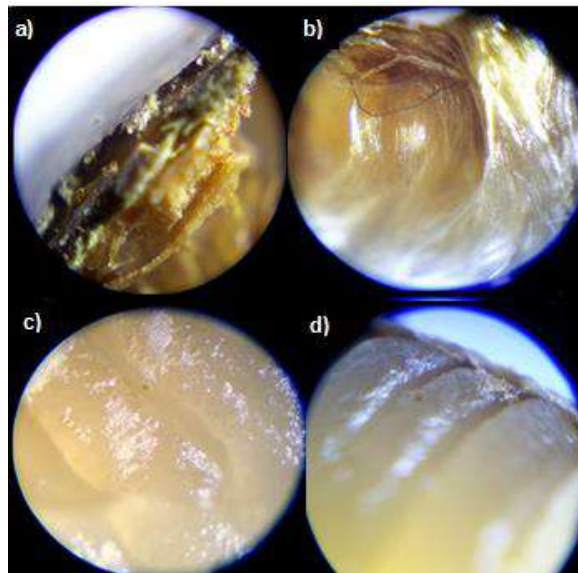


Figura 5. Aspecto superficial de la semilla de chirimoya, a) corte transversal de la cascarilla, b) laminoformes, c) embrión parte central y d) embrión parte lateral.

IV.2 Características de los adsorbentes

El adsorbente lignocelulósico (SemChiNaOH) conservó casi el mismo aspecto físico que una semilla sin tratamiento, aunque se blanqueó y presentó una menor cantidad de laminoformes. El adsorbente carbonáceo (CarChiQC) presentó la apariencia característica de un carbón, conservando la estructura física de la cascarilla aunque un poco deformada debido a la carbonización. El rendimiento de los adsorbentes fue de 75.4% y 46.9% para SemChiNaOH y CarChiQC

respectivamente. En la figura 6 se muestra los adsorbentes después de su proceso de activación a) SemChiNaOH en su último lavado y b) CarChiQC al término de su carbonización.



Figura 6. Adsorbentes a) SemChiNaOH y b) CarChiQC.

IV.3 Punto de carga cero (pH_{pzc})

El punto de carga cero es el pH en el cual las cargas positivas y negativas de una superficie están balanceadas, es decir, la carga es neutra [7]. En la figura 7 se muestra la determinación del pH_{pzc} para los adsorbentes preparados. SemChiNaOH tuvo una carga superficial de 6.7 cercano a la neutralidad, CarChiQC tuvo una carga superficial de 2.38 esto se debe al ácido utilizado durante su activación química. Ambos adsorbentes tuvieron una carga superficial aniónica, uno considerable más que el otro, siendo ideales para la adsorción de colorantes catiónicos (básicos).

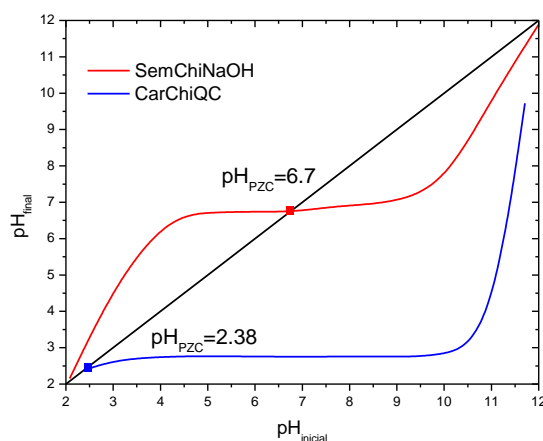


Figura 7. pH_{pzc} de SemChiNaOH y CarChiQC.

IV.4 Densidad aparente

Las densidades de los materiales adsorbentes fueron 0.4264 y 0.4854 g/mL para SemChiNaOH y CarChiQC respectivamente. Habiendo poca diferencia entre sus densidades puesto que la cascarilla es un residuo más denso que el embrión, al ser carbonizado originó poros en su estructura perdiendo densidad. En cuanto al embrión es un residuo menos denso y el tratamiento químico no fue tan severo, como para el AC, por lo tanto, conservó un poco más de sus características originales.

IV.5 Microscopia electrónica de barrido (SEM)

La morfología de la superficie de CarChiQC se muestra en la figura 8 se observa que las partículas del AC tienen una forma y tamaño irregular, presentan rejillas con muchas cavidades poco profundas, se pueden observar partículas sólidas al fondo de estas cavidades, siendo irregular también su forma y tamaño. La forma de las cavidades tienen un patrón cuadrado o rectangular con tamaños entre 10 y 25 μm aproximadamente, divididas con paredes muy delgadas. Algunas zonas del AC están cubiertas por una capa sólida y algunas otras zonas presentan multicapas, lo que indica una constitución irregular.

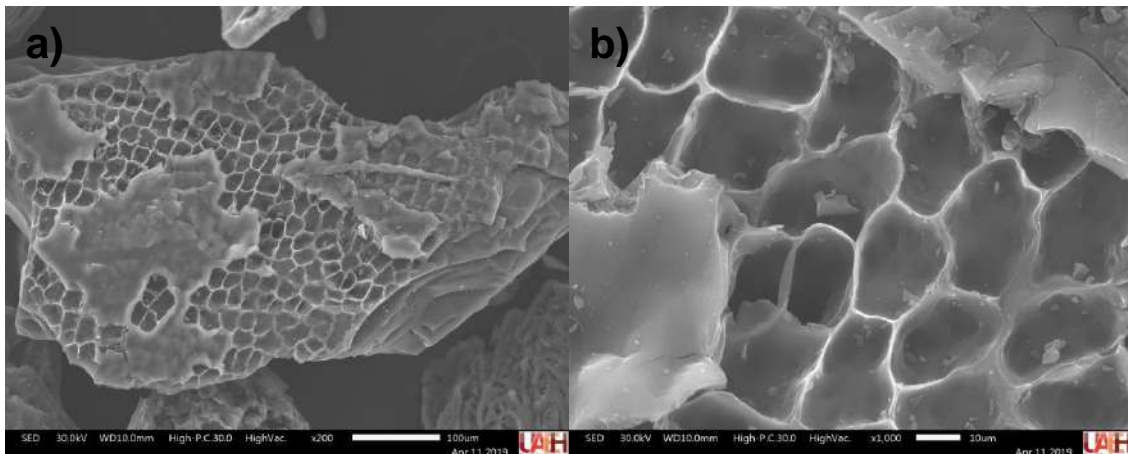


Figura 8. Imágenes SEM de CarChiQC a) 200X y b) 1000X.

IV.6 Cinética de adsorción de BB9 con una concentración de 500 mg/L

La cinética de adsorción permite determinar la velocidad de adsorción del colorante en los adsorbentes, así como el tiempo necesario para alcanzar el

equilibrio. Esto se debe a que la superficie se satura creando una monocapa (esto se demuestra con el tratamiento de los datos de adsorción con la ecuación de Langmuir) que es la unión física o química entre el adsorbato y el adsorbente. En la figura 9, se muestran las curvas de la cinética de adsorción de BB9 con una concentración de 500 mg/L, en ambos adsorbentes. En SemChiNaOH se alcanza el equilibrio de adsorción a las 8 h de contacto, con una cantidad adsorbida en el equilibrio (a_{eq}) de 23.52 mg/g aproximadamente. En el caso de CarChiQC, a las 20 h se empieza a observar la meseta y a las 24 h se alcanza el equilibrio, siendo $a_{eq} \approx 102.04$ mg/g. En la figura 9 b) se presenta el tratamiento de los datos con la ecuación de la cinética de pseudo segundo orden, con un coeficiente de correlación (R^2) de 0.9987 y 0.9998 para CarChiQC y SemChiNaOH respectivamente, indicando un buen ajuste al modelo de pseudo segundo orden. La velocidad de adsorción (H) fue mayor en CarChiQC de 147.05 mg/h·g seguido de SemChiNaOH de 131.57 mg/h·g. En la tabla 9 se presenta el resumen de los resultados de la cinética de adsorción de BB9 en ambos adsorbentes y los resultados de pseudo segundo-orden.

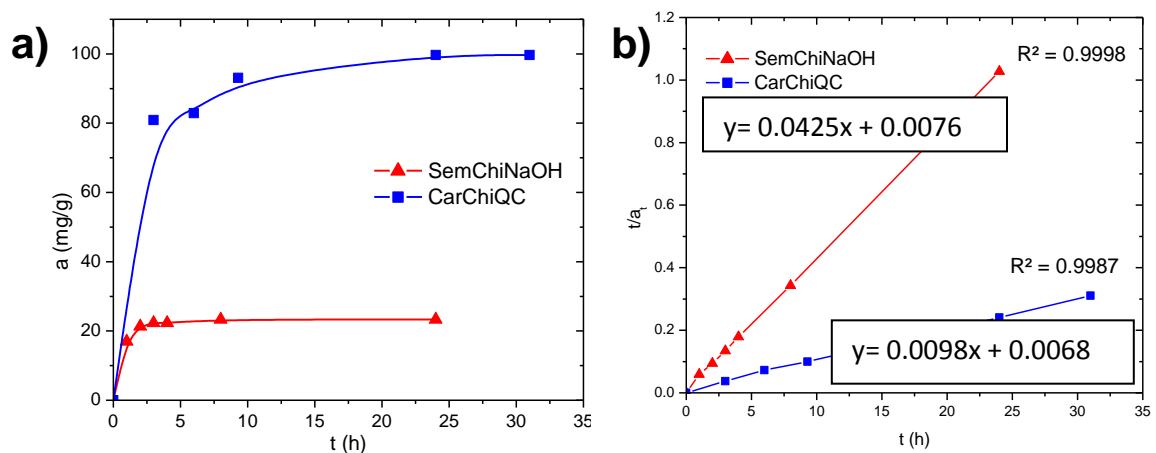


Figura 9. a) Cinética de adsorción de BB9 a 500 mg/L y b) tratamiento de los datos de adsorción con la ecuación de cinética de pseudo segundo-orden.

Tabla 9. Resumen de la cinética de adsorción de pseudo segundo-orden de BB9 con una concentración de 500 mg/L sobre CarChiQC y SemChiNaOH.

Adsorbente	a_{eq} (mg/g)	k_2 (g/h·mg)	H (mg/h·g)	R ²
CarChiQC	102.04	0.1412	147.05	0.9987
SemChiNaOH	23.52	0.2378	131.57	0.9998

IV.7 Adsorción estática de colorantes en solución acuosa con una concentración de 300 mg/L

La figura 10 muestra los resultados de adsorción de los colorantes catiónicos BB9, BB3, BV3, BR18 y BY28 en solución acuosa, con una concentración inicial de 300 mg/L. CarChiQC presentó elevados porcentajes de adsorción que oscilaron entre 87 y 99.9% y SemChiNaOH presentó porcentajes ligeramente menores entre 75 y 96%. El AC tiene un prominente carácter aniónico en su superficie lo que favoreció la adsorción, no obstante, el adsorbente lignocelulósico también presentó buenos porcentajes de adsorción. En la figura 11 se observa el aspecto del adsorbente lignocelulósico después de la adsorción, adquiriendo una elevada coloración en su superficie, indicando una buena afinidad de la SemChiNaOH por los colorantes catiónicos y por lo tanto cumpliendo su función de remover colorantes, adsorbiéndose sobre su superficie.

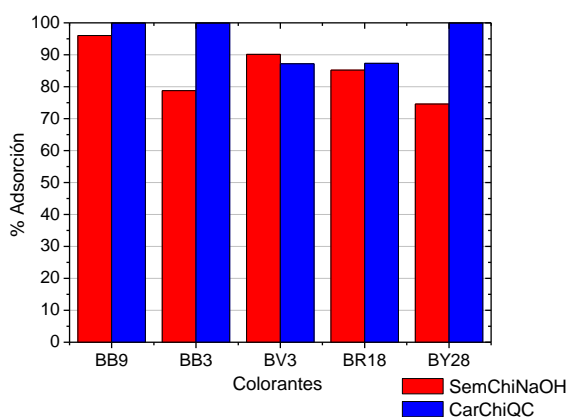


Figura 10. Adsorción de colorantes básicos en solución acuosa con una concentración de 300 mg/L sobre SemChiNaOH y CarChiQC.

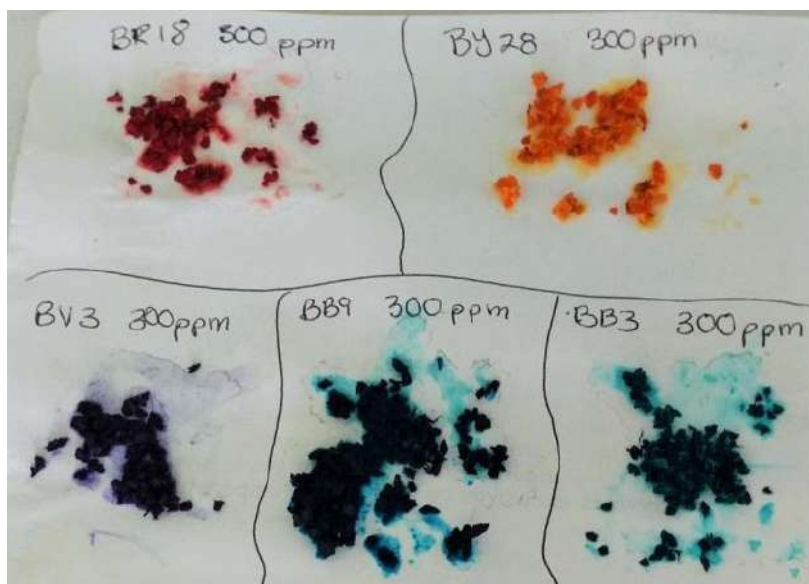


Figura 11. Aspecto de la SemChiNaOH después del proceso de adsorción de colorantes.

IV.8 Isotermas de adsorción

Con los datos experimentales obtenidos se construyeron las isotermas de adsorción a 30°C y se ajustaron al modelo de Langmuir, de esta forma se pudo obtener la máxima capacidad de adsorción o capacidad de la monocapa a_m , encontrándose para la SemChiNaOH entre 32.7 y 56.6 mg/g y entre 112.3 y 204 mg/g para CarChiQC. La figura 12 muestra las isotermas de adsorción siendo los símbolos los datos experimentales y las líneas el ajuste de la isoterma al modelo Langmuir. Se observa que para SemChiNaOH los colorantes con mayor capacidad (a_m) de la monocapa son BV3 y BR18, seguido de BB9 y los de menor capacidad BB3 y BY28. Para CarChiQC la mayor a_m lo presentan BB3, BY28 seguido de BB9 y los de menor capacidad de monocapa son BR18 y BV3, esto se puede deber al tamaño molecular de BV3 y BR18 que son más grandes y esto impide su interacción con los microporos del AC, BV3 y BR18 son más grandes y el AC tiene en su mayoría microporos, por lo que le dificultad el proceso de adsorción, a pesar de esta condición los altos porcentajes de la monocapa son sobresalientes.

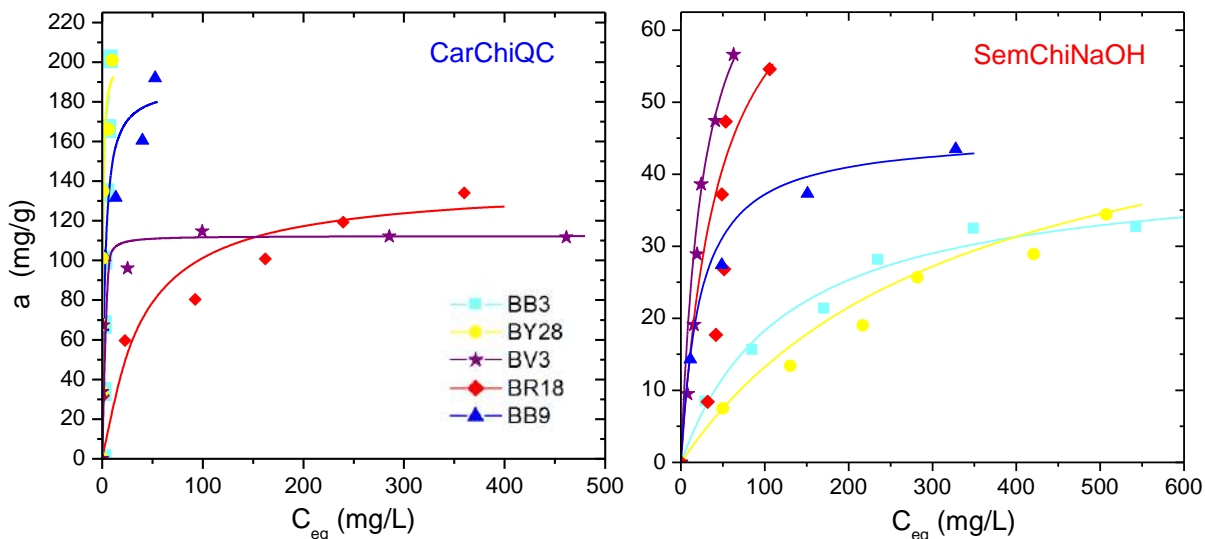


Figura 12. Isothermas de adsorción de colorantes básicos de acuerdo al modelo de Langmuir en CarChiQC y SemChiNaOH.

La tabla 10 muestra los parámetros obtenidos del modelo de Langmuir y sus coeficientes de correlación de entre 0.92 y 0.99 los cuales indican que los datos tiene un buen ajuste ($R^2 \approx 1$) al modelo de Langmuir. El parámetro de equilibrio (R_L) indicó una naturaleza favorable siendo los datos obtenidos menores a 1 de entre 0.0006 y 0.651.

Tabla 10. Resumen de los parámetros de adsorción de acuerdo a la isoterma de Langmuir.

Colorante	CarChiQC				SemChiNaOH			
	a_m (mg/g)	K_L (L/mg)	R_L	R^2	a_m (mg/g)	K_L (L/mg)	R_L	R^2
BB9	188.7	0.376	0.002-0.015	0.982	45.6	0.044	0.012-0.116	0.922
BB3	200	1.562	0.0006-0.003	0.950	32.7	0.008	0.093-0.382	0.983
BV3	112.3	1.561	0.0006-0.003	0.999	56.6	0.037	0.021-0.118	0.995
BR18	154	0.430	0.002-0.013	0.999	55	0.022	0.035-0.182	0.920
BY28	204	1.531	0.006-0.003	0.988	36	0.003	0.237-0.651	0.947

IV.9 Superficie específica de los adsorbentes

La superficie específica de los adsorbentes calculada por la técnica de adsorción de soluciones de azul de metileno (BB9) fue de 348.23 y 84.26 m²/g para CarChiQC y SemChiNaOH respectivamente. Estos valores indican, que la superficie del AC es casi cuatro veces superior a la del adsorbente lignocelulósico debido a su porosidad.

La superficie específica y distribución del tamaño de poro del material carbonáceo fueron determinadas mediante la construcción de las isotermas de adsorción-desorción de N₂ a 77 K empleando la ecuación de BET. La figura 13 muestra las isotermas de adsorción-desorción de N₂ sobre CarChiQC, CarChiQE y CarChiQ. El AC CarChiQC es el único que presenta una isoterma tipo I según la clasificación de la IUPAC, esto indica que es un carbón microporoso, presentando una alta adsorción de N₂ a bajas presiones, esto se debe a las fuertes interacciones entre el adsorbato y el adsorbente que es característico de los AC. En su mayoría estos AC están formados por poros cuyo ancho es inferior a 2 nm. Para CarChiQE y CarChiQ presentan la forma de una isoterma tipo IV y se observa un tenue lazo de histéresis del tipo H₄ siendo más evidente en CarChiQE, indicando que el poro tiene forma de redija y la presencia de mesoporos y microporos. En la isoterma de adsorción-desorción de N₂ (figura 13) el adsorbente CarChiQ se encuentra entre CarChiQC y CarChiQE lo que confirma, que al ser separados la parte de la semilla, la cascarilla es un excelente material para la producción de carbones activados con alta superficie y siendo el embrión el responsable de la baja capacidad de adsorción de CarChiQ.

Este tipo de adsorción no es posible aplicarla en los adsorbentes lignocelulósicos, porque contienen una elevada cantidad de moléculas de agua, que interfieren en el proceso de adsorción de las moléculas de N₂.

La tabla 11, muestra un resumen de la caracterización de la porosidad obtenida a partir de las isotermas de adsorción de soluciones (BB9) y adsorción-desorción de N₂ sobre CarChiQC, CarChiQE y CarChiQ. El porcentaje de μ Poro es de 50.2%

con un diámetro promedio de poro (D_{proporo}) de 2.13 nm característico de los AC microporosos.

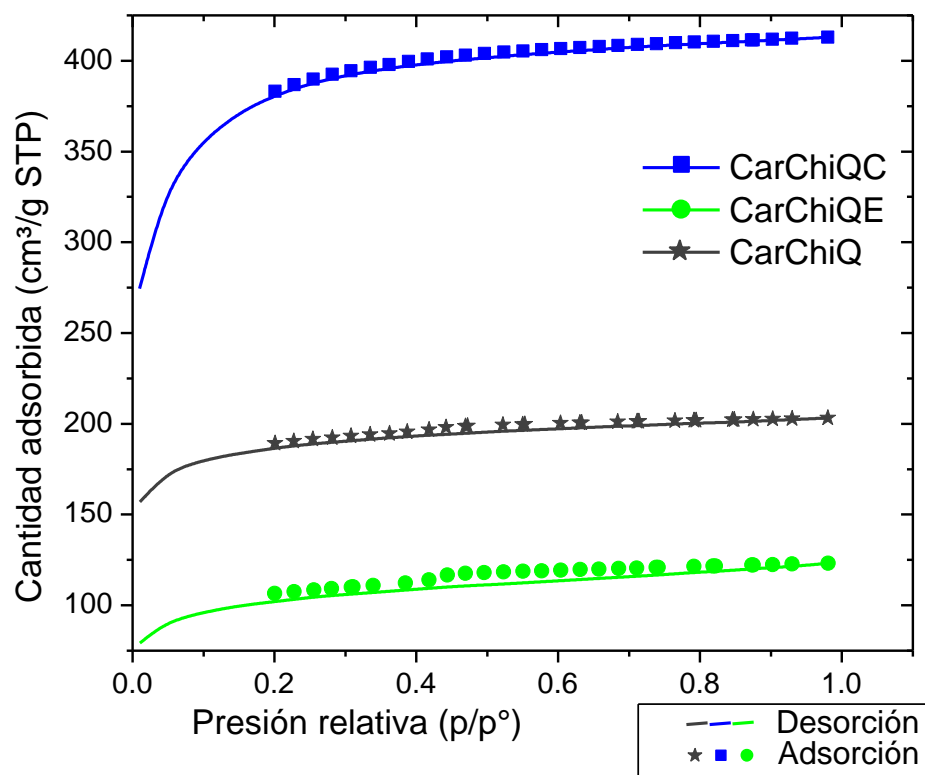


Figura 13. Isothermas de adsorción-desorción de N_2 en CarChiQC, CarChiQE y CarChiQ.

Tabla 11. Propiedades texturales de los carbones activados

Carbón activado	S_{BB9} (m^2/g)	S_{BET} (m^2/g)	V_{TP} (cm^3/g)	$V_{\mu\text{P}}$ (cm^3/g)	%μPoro	V_{MesoP} (cm^3/g)	D_{ProPoro} (nm)
CarChiQC	348.2	1198.30	0.63	0.32	50.2%	0.32	2.13
CarChiQ	145.3	581.73	0.3144	0.2099	66.8%	0.1044	2.16
CarChiQE	-----	324.77	0.1905	0.0893	46.9%	0.1011	2.34
CarChiF	52.1						
SemChiNaOH	84.3						

IV.10 Resumen general de las propiedades de los adsorbentes

En la tabla 12 se muestra un resumen de las propiedades determinadas para los adsorbentes, siendo SemChiNaOH y CarChiQC los 2 adsorbentes con el mayor rendimiento, siendo CarChiF el de menor rendimiento y superficie específica (método de adsorción de soluciones de BB9). La tabla muestra que las propiedades de CarChiQ se encuentran entre las de los carbones de cascarilla y embrión, las características de CarChiQE indicaron que el embrión no es un material apropiado para la preparación del carbón, pero sí lo fue como adsorbente lignocelulósico. El carbón con propiedades superiores en rendimiento y superficie específica fue CarChiQC y por lo tanto fue seleccionado para su estudio a profundidad.

Tabla 12. Propiedades generales de los adsorbentes

Adsorbente	Parámetros						
	Tamaño partícula (mm)	Rendimiento %	m/V (g/L)	pH _{pzc}	Densidad aparente (g/mL)	S _{BB9} (m ² /g)	S _{BET} (m ² /g)
SemChiNaOH	0.84-2	75.4	20	6.7	0.4264	84.26	-----
CarChiQC	0.25-0.42	46.9	5	2.4	0.4854	348.23	1198.30
CarChiQE	0.25-0.42	30.3	----	2.9	0.2534	-----	324.8
CarChiQ	0.25-0.42	28.9	10	2.13	0.3579	145.3	581.7
CarChiF	0.25-0.42	11.6	20	7.95	0.2879	52.13	-----

IV.11 Mejoramiento en la calidad de las aguas residuales textiles

El agua residual (W.W.) procedente de los procesos de teñido en la industria textil es una mezcla compleja de varios químicos, fibras, además de los colorantes, por lo tanto, la descarga de desechos coloreados en corrientes naturales es perjudicial para el medio ambiente. Los resultados del tratamiento del agua residual con los adsorbentes, considerando los valores de los parámetros de calidad del agua antes y después del tratamiento son:

IV.11.1 pH

Este es un parámetro de carácter no específico bastante variable dentro de los procesos húmedos textiles, el cual depende del tipo de material textil procesado. La figura 14 muestra los resultados del pH antes y después del tratamiento. El pH disminuyó poco en W.W.1 después del tratamiento, y en W.W.2 disminuyó bastante debido al ácido con que fue activado el carbón, aunque estos parámetros pueden ser mejorados con la neutralización de los efluentes.

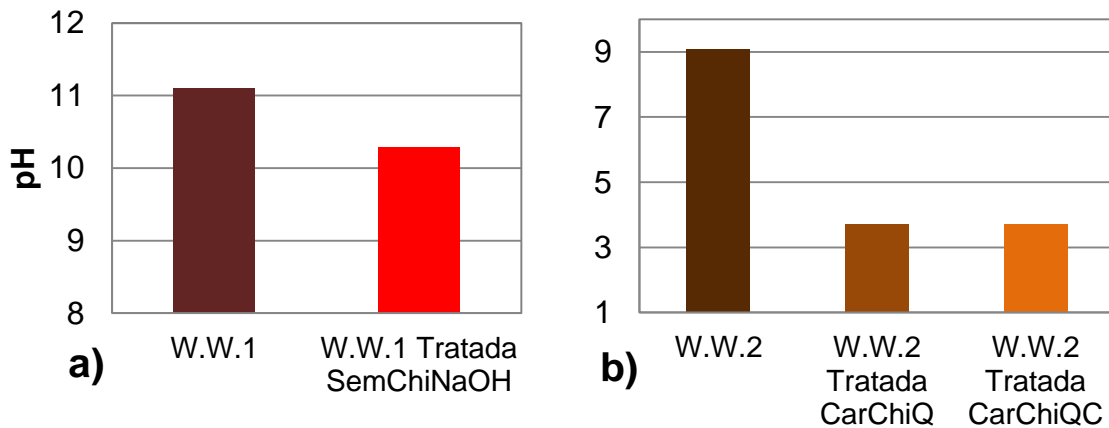


Figura 14. pH de las aguas residuales antes y después del tratamiento de adsorción a) SemChiNaOH y b) CarChiQ y CarChiQC.

IV.11.2 Conductividad

La conductividad eléctrica indica el contenido de sales (cargas iónicas) en el agua. Dentro de la industria textil es común agregar una elevada cantidad de sales para mejorar los rendimientos de teñido en fibras celulósicas. En la figura 15 se observa los resultados W.W.1 tratada con SemChiNaOH disminuyendo 5.79% siendo baja la remoción y el W.W.2 tratada con CarChiQ y CarChiQC fueron muy parecidos los porcentajes de remoción de 10.26% y 12.69%, siendo superior la remoción en CarChiQC. La remoción de los materiales adsorbentes fue baja, aunque se podrían combinar métodos de tratamiento y mejorar estos resultados.

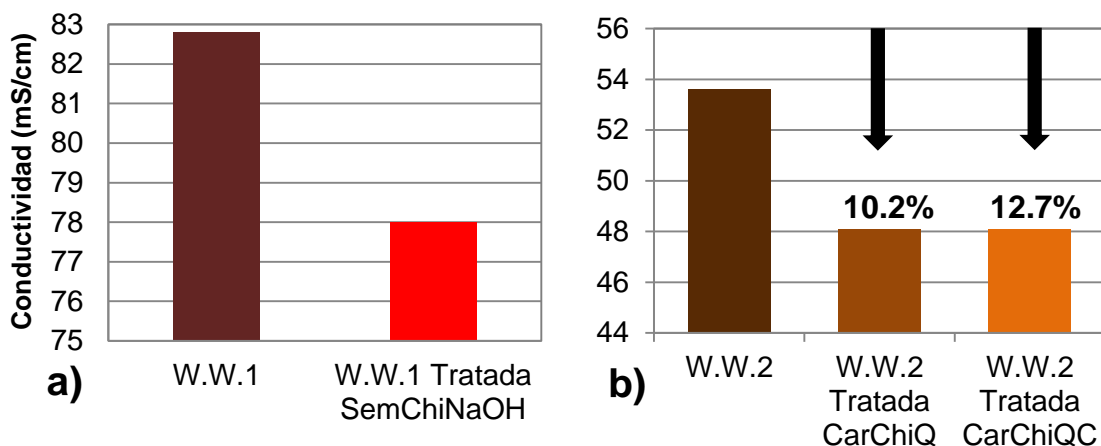


Figura 15. Conductividad de las aguas residuales antes y después del tratamiento de adsorción a) SemChiNaOH y b) CarChiQ, y CarChiQC.

IV.11.3 Sólidos totales (ST)

En la figura 17 se observa que en el W.W.1 tratada con SemChiNaOH se removió un 9.5% de ST, y en el W.W.2 tratada con los materiales carbonáceos disminuye muy poco casi manteniéndose los mismos valores, esto podría estar influenciado por que los carbones en su mayoría son microporosos.

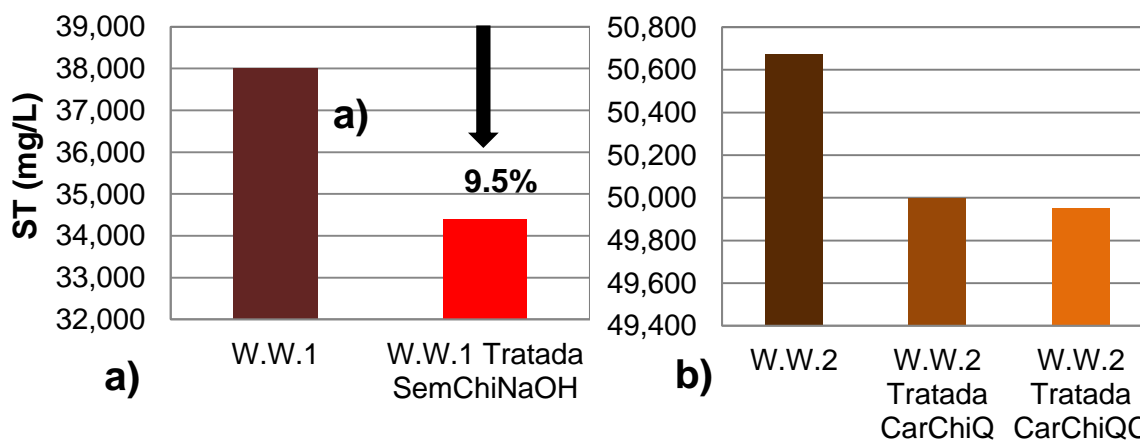


Figura 16. Sólidos totales de las aguas residuales antes y después del tratamiento de adsorción a) SemChiNaOH y b) CarChiQ y CarChiQC.

IV.11.4 Color

La figura 18 muestra los resultados de la reducción del color después del tratamiento de adsorción. El W.W.1 presentaba una elevada carga de color y después de la adsorción se logró disminuir en un 8.9% mejorando un poco la calidad del agua, a pesar de que se encontraba presente un colorante reactivo, con carácter aniónico y su elevada carga de color y el tratamiento de W.W.2 en ambos carbonos se removió un 97.9% del color, siendo superior CarChiQC debido a la relación m/V, mejorando considerablemente la calidad del agua, por lo tanto, es capaz de remover colorantes provenientes de aguas residuales textiles.

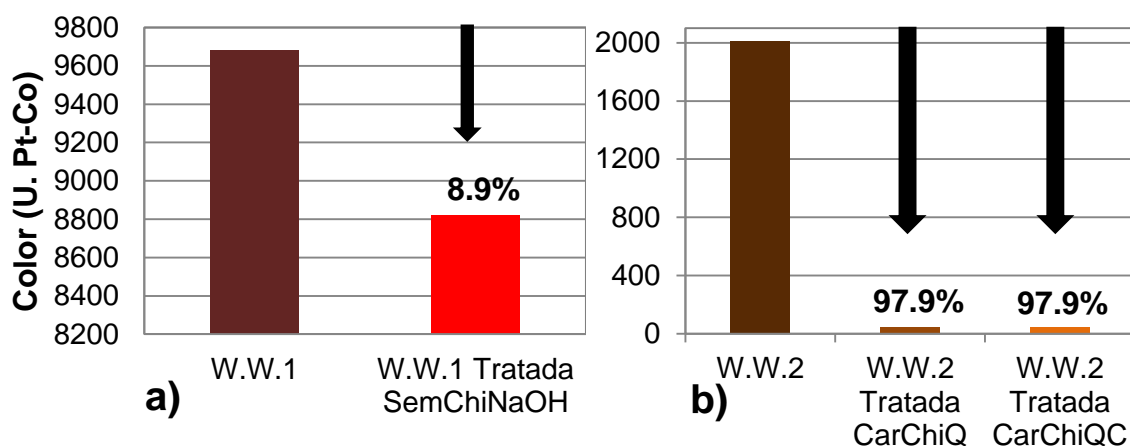


Figura 17. Color de las aguas residuales antes y después del tratamiento de adsorción a) SemChiNaOH y b) CarChiQ y CarChiQC.

IV.11.5 Demanda química de oxígeno (DQO)

La figura 19 muestra los valores de la DQO, antes y después del tratamiento de adsorción, en W.W.1 se incrementó el valor de la DQO, posiblemente debido a la turbiedad que se genera en solución, incrementando la carga orgánica por el mismo adsorbente. En W.W.2 los resultados fueron muy favorables logrando una remoción de 71.7% y 72.8% para CarChiQ y CarChiQC respectivamente, siendo superior CarChiQC teniendo el doble de capacidad de remover DQO debido a la relación m/V, mejorando notablemente la calidad del agua residual tratada con los carbonos.

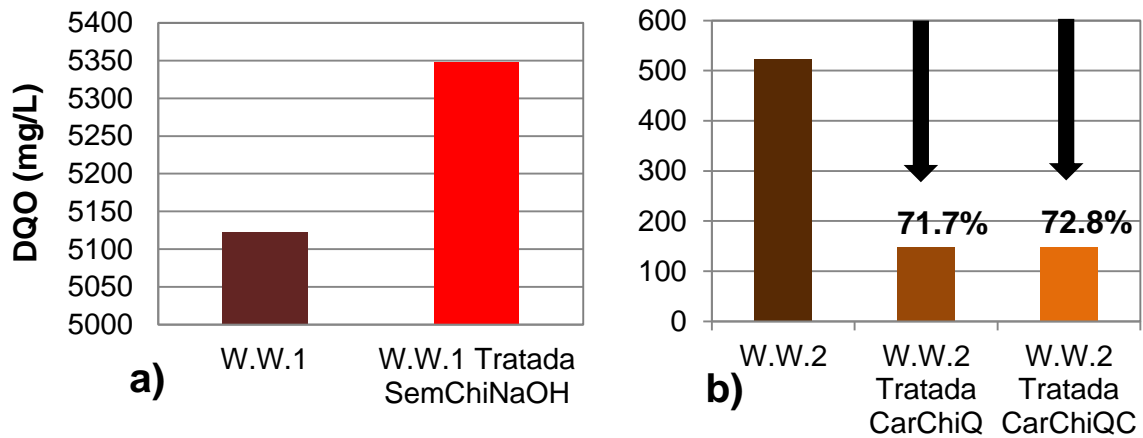


Figura 18. Demanda química de oxígeno de las aguas residuales antes y después del tratamiento de adsorción a) SemChiNaOH y b) CarChiQ y CarChiQC.

El agua residual tratada con CarChiQC logró disminuir hasta un 97.9% el color, 72.8% la DQO y 12.7% la conductividad, mejorando la calidad del agua residual tratada con el carbón. El tratamiento con SemChiNaOH removió 9.5% de ST y 8.9% de color, no fue tan eficiente como el carbón en la remoción de contaminantes, debido a la elevada cantidad de estos presente en el efluente textil y a su menor superficie específica, pero podría utilizarse para un pretratamiento de los efluentes ya que es más económica su preparación. CarChiQ se encuentra en un término medio debido a que fue elaborado de la semilla entera y confirmando que la cascarilla tiene una mayor capacidad de retener contaminantes en su superficie, aunque el embrión tiene capacidad de tener en su superficie moléculas de colorante.

En la tabla 13 se muestra un resumen de los valores obtenidos antes y después del tratamiento por adsorción del agua residual.

Tabla 13. Resumen del tratamiento del agua residual textil

Parámetro de calidad del agua	W.W.1 (Rojo vino)	W.W.1 tratada con SemChiNaOH	W.W.2 (Café)	W.W.2 tratada con CarChiQ	W.W.2 tratada con CarChiQC
pH	11.1	10.28	9.1	3.7	3.3
Conductividad (mS)	82.8	78	53.6	48.1	46.8
ST (mg/L)	38020	34390	50675	50000	49950
Color (U. Pt-Co)	9681	8820	2010	42	43
DQO (mg/L)	5122	5348	523	148	142

Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos del trabajo de tesis se concluye lo siguiente:

Se logró el objetivo de preparar adsorbentes a partir del residuo de la chirimoya obteniendo, un adsorbente lignocelulósico, SemChiNaOH, y uno carbonáceo, CarChiQC, ambos fueron capaces de retener en su superficie moléculas de colorantes textiles. Además se optimizó el proceso de obtención de estos materiales.

El adsorbente SemChiNaOH tuvo un rendimiento alto, de 75.4%, con un proceso de preparación simple y económico. El rendimiento del carbón activado CarChiQC fue de 46.9%, semejante al de los carbones comerciales, con una alta capacidad de adsorción, que lo hace sumamente eficiente.

El punto de carga de cero (pH_{PZC}) indicó que SemChiNaOH tuvo una superficie ligeramente ácida (6.7) y CarChiQC ácida (2.38) ambos adsorbentes presentaron carga superficial aniónica, siendo ideales para la adsorción de colorantes catiónicos (básico).

La densidad aparente fue de 0.4264 y 0.4854 g/mL para SemChiNaOH y CarChiQC respectivamente, los adsorbentes presentaron diferencias en su densidad, debido a que fueron preparados con diferentes partes de las semillas y sometidos a diferentes tratamientos de activación.

Los adsorbentes preparados a partir de las semillas de chirimoya son eficientes en la adsorción de colorantes textiles. La adsorción estática tuvo altos porcentajes de remoción, siendo de 87 a 99.9% en CarChiQC y de 75 a 96% en SemChiNaOH.

La superficie específica de CarChiQC determinada por adsorción de N_2 fue de 1198.30 m^2/g , indicando la ausencia de lazo de histéresis en las isothermas de adsorción-desorción una superficie mayormente microporosa.

El agua residual tratada con los adsorbentes carbonáceos fueron superiores al lignocelulósico en especial CarChiQC logró disminuir hasta un 97.9% el color, 72.8% la DQO y 12.7% la conductividad. SemChiNaOH removió un 8.9% de color, a pesar de su elevada carga de color, por lo tanto los adsorbentes son capaces de retener en su superficie contaminantes mejorando la calidad del agua residual.

Referencias bibliográficas

- [1] Valladares Cisneros, M. G., Valerio Cárdenas, C., 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), pp. 55-73. doi: 10.22395/rium.v16n31a3
- [2] CONAGUA. (2017). Estadísticas del agua en México 2017. Recuperado de: http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2017.pdf
- [3] Agua.org.mx. (2020). Visión general del agua en México. Recuperado de: <https://agua.org.mx/cuanta-agua-tiene-mexico/>
- [4] Gupta, V. K., & Suhas. (2009). Application of low-cost adsorbents for dye removal – A review. *Journal of Environmental Management*, 90, pp. 2313-2342. doi: 10.1016/j.jenvman.2008.11.017
- [5] Caldera Villalobos, M., Peláez Cid, A. A., & Herrera Gonzáles, A. M. (2016). Removal of textile dyes and metallic ions using polyelectrolytes and macroelectrolytes containing sulfonic acid groups. *Journal of Environmental Management*. 177, pp. 65-73. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.04.004
- [6] Howe, K. J., Hand, W. D., Crittenden, J. C., Rhodes Trussell, R., & Techobanoglous, G. (2012). *Principios de tratamiento del agua*. Mexico: CENGAGE learning.
- [7] Ramalho, R. S., (1996). *Tratamiento de aguas residuales*. España: REVERTÉ, S.A.
- [8] Colorando, M. (2018). Después del petróleo, la industria textil es la más contaminante del mundo. Recuperado de: <https://www.france24.com/es/20180424-medio-ambiente-fast-fashion-contaminacion>
- [9] Revista Circle. (2018). ¿Sabes cuantos litros de agua se consumen para fabricar unos vaqueros?. Recuperado de: <https://www.revistacircle.com/2018/10/17/cuantos-litros-de-agua-se-consumen-para-fabricar-unos-vaqueros/>
- [10] Greenpeace. (2012). Puntadas tóxicas: El desfile de la contaminación. Recuperado de: <https://archivo-es.greenpeace.org/espana/Global/espana/report/contaminacion/toxicthreads2.pdf>
- [11] Nucamendi, M. (2 de octubre 2019). Se coloca Puebla como tercer productor textil del país: Inegi. *Periódico el Popular*. Recuperado de:

<https://www.elpopular.mx/2019/10/02/local/se-coloca-puebla-como-tercer-productor-textil-del-pais-inegi>

- [12] Cámara de diputados, H. C. U. (06 de marzo 2020). CONSTITUCIÓN Política de los Estados Unidos Mexicanos. *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado en: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf_mov/Constitucion_Politica.pdf
- [13] McCafferty Sharisse, D., & McCafferty Geoffrey, G. (2000). TEXTILE PRODUCTION IN POSTCLASSIC CHOLULA, MEXICO. *Ancient Mesoamerica*, pp. 39-54. U.S.A.: Cambridge University Press.
- [14] Carbajal Arenas, L. (2015). Los pioneros de la industria textil. El caso de Cayetano Rubio. *Academic Journal*, 28, pp. 39-51.
- [15] Gutiérrez Álvarez, C. (1996). La industria textil en Puebla y Tlaxcala durante el Porfiriato. *Revista de la universidad de México*, 545, pp. 42-46.
- [16] Zaruma Arias, P. E., Proal Nájera, J. B., Chaires Hernández, I., & Salas Ayala H. I. (2018). Los Colorantes Textiles Industriales Y Tratamientos Óptimos De Sus Efluentes De Agua Residual: Una Breve Revisión. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas*, 19, pp. 1390-1869.
- [17] Richard Horrocks, A. & Subhash Anand, S. (2016). *Handbook of technical textiles*. England: WOODHEAD PUBLISHING.
- [18] Peláez Cid, A. A., Blasco Sancho, S., & Matysik, F. M. (2008). Determination of textile dyes by means of non-aqueous capillary electrophoresis with electrochemical detection. *Talanta*, 75, pp.1362-1368. doi: 10.1016/j.talanta.2008.01.049
- [19] Peláez Cid, A. A., Velázquez Ugalde, I., Herrera González, A. M., & García Serrano, J. (2013). Textile dyes removal from aqueous solution using *Opuntia ficus-indica* fruit waste as adsorbent and its characterization. *Journal of Environmental Management*, 130, pp. 90-97. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.08.059>
- [20] Caldera Villalobos, M., Peláez Cid, A. A., Martins Alho, M. A., & Herrera González, A. M. (2018). Removal of textile dyes in wastewater using polyelectrolytes containing tetrazole groups. *Korean J. Chem. Eng.*, 35(12), pp. 2394-2402. doi: 10.1007/s11814-018-0160-3
- [21] Dávila Jiménez, M. M., Elizalde González, M. P., Gutiérrez Gonzáles, A., & Peláez Cid, A. A. (2000). Electrochemical treatment of textile dyes and their analysis by high-performance liquid chromatography with diode array detection. *JOURNAL OF CHROMATOGRAPHY A*, 889, pp. 253-259.

[22] Elizalde González, M. P., & Peláez Cid, A. A. (2002). REMOVAL OF TEXTILE DYES FROM AQUEOUS SOLUTIONS BY ADSORPTION ON BIODEGRADABLE WASTES. *Environmental Technology*, 24, pp.821-829.

[23] Peláez Cid, A. A. (2017). Cuaderno de apuntes de contaminación en la industria textil, *BUAP*.

[24] Abril Díaz, N., Bárcena Ruiz, A., Fernández Reyes, E., Galván Cejudo, A., Jorrín Novo, J., Peinado Peinado, J., Meléndez Valdés, F.T.& Túnez Fiñana, I. (2005). 8. Espectrofometría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas. Recuperado de: <https://www.uco.es/organiza/departamentos/bioquimica-biol-mol/practicasgenerales.htm>

[25] Elizalde González, M. P., Mattusch, J., Peláez Cid, A. A., & Wennrich, R. (2007). Characterization of adsorbent materials prepared from avocado kernel seeds: Natural, activated and carbonized forms. *JOURNAL of ANALYTICAL and APPLIED PYROLYSIS*, 78, pp. 185-193. doi: 10.1016/j.jaap.2006.06.008

[26] Carrillo Morales, G., Dávila Jiménez, M. M., Elizalde González, M. P., & Peláez Cid, A. A. (2001). Removal of metal ions from aqueous solution by adsorption on the natural adsorbent CACMM2. *JOURNAL OF CHROMATOGRAPHY A*, 938, pp. 237-242.

[27] Peláez Cid, A. A., Tlalpa Galán, M. A., & Herrera González, A. M. (2012). Carbonaceous material production from vegetable residue and their use in the removal of textile dyes present in wastewater. *Third Congress on Materials Science and Engineering, (CNCIM-Mexico 2012)*. Materials Science and Engineering, 45.

[28] Dávila Jiménez, M. M., Elizalde González, M. P., & Peláez Cid, A. A. (2005). Adsorption interaction between natural adsorbents and textile dyes in aqueous solution. *COLLOIDS AND SURFACES A*, 254, pp. 107-114. doi: 10.1016/j.colsurfa.2004.11.02

[29] Peláez Cid, A. A., Romero Hernández, V., Herrera González, A. M., Bautista Hernández, A., & Coreño Alonso, O. (2019). Synthesis of activated carbons from black sapote seeds, characterization and application in the elimination of heavy metals and textile dyes. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.04.021>

[30] Elizalde González, M. P., Geyer, W., Guevara Villa, M. R. G, Peláez Cid, A. A., & Wennrich, R. (2006). Characterization of an adsorbent prepared from maize waste and

adsorption of three classes of textile dyes. *COLLOIDS AND SURFACES A*, 278, pp. 89-97. doi: 10.1016/j.colsurfa.2005.11.097

[31] Dávila Jiménez, M. M., Elizalde González, M. P., Peláez Cid, A. A., & Rosas Juárez, A. (1997). Water and dye adsorption properties of cactaceous material. *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE LETTERS*, 16, pp. 1145-1147.

[32] Peláez Cid, A. A., Herrera González, A. M., Bautista Hernández, A., & Salazar Villanueva, M. (2016). Preparation and characterization of activated carbón from Agave tequilana Weber for the removal of textile dyes and heavy metals. *Desalination and Water Treatment*, 57, pp. 21105-21117. doi: 10.1080/19443994.2015.1111815

[33] Pino, J. A. (2018). CONOCIMIENTOS ACTUALES SOBRE LOS COMPUESTOS DEL AROMA DE LA CHIRIMOYA. *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 28, pp. 56-62.

[34] Haykal, T., Nasr, P., Hodroj, M. H., Taleb, R. I., Sarkis, R., El. Moujabber, M. N., & Rizk, S. (2019). Annona cherimola Seed Extract Activates Extrinsic and Intrinsic Apoptotic Pathways in Leukemic Cells. *Journal toxins*, 11(506). doi: 10.3390/toxins11090506