



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL



CENTRO MEXICANO PARA LA PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA

“Evaluación de la cáscara de coyol (*Acrocomia aculeata*) como bioadsorbente sostenible para la eliminación de Cr (VI) en aguas residuales”

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA
EN PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA

Presenta

Carlos Nek Hernández Martínez

Directores:

Dr. Raúl Hernández Altamirano

Dr. Fidel Alejandro Aguilar Aguilar

Julio 2025



LaNDACBio
LABORATORIO NACIONAL DE BIOCOMBUSTIBLES



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
Dirección de Posgrado

*ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS
Y DESIGNACIÓN DE DIRECTOR DE TESIS*

Ciudad de México, a de del

El Colegio de Profesores de Posgrado de en su Sesión
(Unidad Académica)

No. celebrada el día del mes de conoció la solicitud
presentada por el (la) alumno (a):

Apellido Paterno:	Hernández	Apellido Materno:	Martínez	Nombre (s):	Carlos Nek
-------------------	------------------	-------------------	-----------------	-------------	-------------------

Número de boleta:

del Programa Académico de Posgrado:

Referente al registro de su tema de tesis

1.- Se acordó aprobar el tema de tesis:

Objetivo general del trabajo de tesis:

2.- Se designa como Directores de Tesis a los profesores:

Director: Director:
No aplica:

3.- El Trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesis será elaborado por el alumno en:

que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.

4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente, hasta la aprobación de la versión completa de la tesis por parte de la Comisión Revisora correspondiente.

Director (a) de Tesis

Dr. Raúl Hernández Altamirano

Director(a) de Tesis (en su caso)

Dr. Fidel Alejandro Aguilar Aguilar

Alumno

Ing. Carlos Nek Hernández Martínez

Presidente de Colegio

Dr. Raúl Hernández Altamirano





**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

SIP-14
REP 2017

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de siendo las horas del día del mes de del se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores del Posgrado del para examinar la tesis titulada:

"Evaluación de la cáscara de coyol (*Acrocomia aculeata*) como bioadsorbente sostenible para la eliminación de Cr (VI) en aguas residuales"

Apellido Paterno:	Hernández	Apellido Materno:	Martínez	Nombre (s):	Carlos Nek
-------------------	-----------	-------------------	----------	-------------	------------

Número de registro:

Alumna del Programa Académico de Posgrado:

Una vez que se realizó un análisis de similitud de texto, utilizando el software antiplagio, se encontró que el trabajo de tesis tiene **5 %** de similitud. **Se adjunta reporte de software utilizado.**

Después que esta Comisión revisó exhaustivamente el contenido, estructura, intención y ubicación de los textos de la tesis identificados como coincidentes con otros documentos, concluyó que en el presente trabajo SI **NO** **SE CONSTITUYE UN POSIBLE PLAGIO.**

JUSTIFICACIÓN DE LA CONCLUSIÓN:

La similitud del texto corresponde a frases de uso común, nombre de instancias y terminología aplicable al tema que el software no es capaz de filtrar adecuadamente.

****Es responsabilidad del alumno como autor de la tesis la verificación antiplagio, y del Director o Directores de tesis el análisis del % de similitud para establecer el riesgo o la existencia de un posible plagio.**

Finalmente, y posterior a la lectura, revisión individual, así como el análisis e intercambio de opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR** **SUSPENDER** **NO APROBAR** la tesis por **UNANIMIDAD** o **MAYORÍA** en virtud de los motivos siguientes:

Satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

COMISIÓN REVISORA DE TESIS

Director de Tesis
Dr. Raúl Hernández Altamirano

Dr. Gabriel Pineda Flores

Dr. Ignacio Elizalde Martínez

Dr. Alejandro Ramírez Estrada

Dr. Fidel Alejandro Aguilar

Dr. Raúl Hernández Altamirano
PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA DE AUTORIZACIÓN DE USO DE OBRA PARA DIFUSIÓN

En la Ciudad de México el día 04 del mes de julio del año 2025, el que suscribe Carlos Nek Hernández Martínez alumno del programa Maestría en Ingeniería en Producción más Limpia con número de registro B230398, adscrito al Centro Mexicano para la Producción más Limpia manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de tesis bajo la dirección de Dr. Raúl Hernández Altamirano y Dr. Fidel Alejandro Aguilar Aguilar y cede los derechos del trabajo intitulado "Evaluación de la cáscara de coyol (*Acrocomia aculeata*) como bioadsorbente sostenible para la eliminación de Cr (VI) en aguas residuales", al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expresado del autor y/o director(es). Este puede ser obtenido escribiendo a las siguiente(s) dirección(es) de correo rahernandez@ipn.mx, faquilara@ipn.mx, chernandezm1303@alumno.ipn.mx. Si el permiso se otorga, al usuario deberá dar agradecimiento correspondiente y citar la fuente de este.

Carlos Nek Hernández Martínez

CONTENIDO

INDICE DE TABLAS Y FIGURAS	8
RESUMEN.....	11
ABSTRACT	12
1. INTRODUCCIÓN.....	13
2. MARCO CONCEPTUAL	15
CAPITULO I.....	18
3. ANTECEDENTES.....	18
4. MARCO TEÓRICO	19
4.1. Agua en México.....	20
4.1.1. Uso del agua.....	20
4.1.2. Diagnóstico y proyección.....	21
4.1.3. Generación de aguas residuales.....	25
4.1.4. Contaminación por Cr(VI), origen e impacto.....	25
4.2. Externalidades Ambientales derivadas de la contaminación del agua	26
4.3. Exposición al Cr(VI): Efectos adversos a la salud Humana, Animal y al Ecosistema	27
4.4. Marco jurídico e instituciones vinculados en materia de agua, tratamiento de agua y saneamiento.....	28
4.5. Vinculación internacional	28
4.6. Tratamiento de agua residual en México	30
4.7. Coyol como material bioadsorbente	31
4.8. Caracterización del adsorbente	32
4.8.1. Lignocelulósicos.....	32
4.8.1.1. Lignocelulosa	32
4.8.1.2. Lignina	33
4.8.1.3. Celulosa.....	34
4.8.1.4. Hemicelulosa.....	34
4.8.1.5. Caracterización de grupos funcionales del adsorbente por Espectroscopia Infrarroja Con Transformada De Fourier (FTIR)	35
4.9. Viabilidad técnica y económica de bioadsorbentes.....	36
4.10. Isotermas de adsorción.....	36
4.10.1. Isotermas de adsorción	36
4.10.2. Isoterma de Freundlich.....	37
4.10.3. Isoterma de Langmuir	38
4.11. Cinética de adsorción.....	39
4.11.1. Pseudo-primer orden y pseudo-segundo orden	39
4.11.2. Recuperación y disposición del adsorbente.....	40
4.11.3. Método de superficie de respuesta.....	40

5.	ESTADO DEL ARTE.....	41
5.1.1.	Bioadsorción con materiales lignocelulósicos como alternativa sostenible	41
6.	JUSTIFICACIÓN.....	45
7.	HIPÓTESIS.....	47
8.	OBJETIVOS.....	47
	General	47
	Específicos	47
CAPITULO II		48
9.	MATERIALES, MÉTODOS E INFRAESTRUCTURA	48
9.1.	Obtención y separación de la muestra.....	48
9.2.	Caracterización fisicoquímica de la cáscara	49
9.2.1.	Determinación de humedad y peso seco	49
9.2.2.	Eliminación de extraíbles	49
9.2.3.	Caracterización por FTIR.....	50
9.2.4.	Caracterización por SEM	51
9.2.5.	Caracterización por TGA	51
15.1.1.	Análisis elemental	52
15.2.	Punto de carga cero (pzc “point of zero charge”).....	52
15.3.	Diseño y montaje experimentales.....	52
15.4.	Caracterización después de la bioadsorción	54
15.4.1.	Evaluación de adsorción de cromo hexavalente por UV-VIS	54
15.4.1.1.	Método directo con Dicromato de Potasio.....	54
15.4.1.2.	Método indirecto por Difenil Carbazida	56
15.4.1.3.	Curva de calibración de Difenil Carbazida (DFC).....	56
15.4.2.	Regeneración de adsorbente.....	58
CAPITULO III.....		59
16.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	59
16.1.	Caracterización física	59
16.1.1.	Determinación de humedad.....	59
16.1.2.	Determinación de peso seco	61
16.1.3.	Rendimiento del adsorbente por hectárea	62
16.1.4.	Eliminación de extraíbles (o extractables)	66
16.1.4.1.	Extractables Hidrofilicos	66
16.1.4.2.	Extraíbles hidrofóbicos	68
16.1.5.	Caracterización por FTIR.....	68
16.1.5.1.	Cáscara de coyol cruda	69
16.1.6.	Cáscara de coyol libre de extraíbles (pretratada)	72
16.1.6.1.	Caracterización de extraíbles	73

16.1.6.2.	Caracterización por SEM.....	75
16.2.	Área BET.....	81
16.3.	Caracterización por TGA.....	82
16.4.	Determinación de punto de carga cero.....	84
16.5.	Análisis Elemental.....	88
16.6.	Poder calorífico.....	90
16.7.	Evaluación de adsorción de cromo hexavalente.....	90
16.7.1.	Método directo de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$).....	90
16.7.2.	Remoción por relación de variables y Análisis Multifactorial (Pareto).....	94
16.7.3.	Cinética de adsorción.....	102
16.7.4.	Isotermas de adsorción.....	105
16.7.5.	Regeneración del bioadsorbente.....	108
17.	ASPECTOS DE SOSTENIBILIDAD, PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA Y QUIMICA VERDE 109	
18.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	110
19.	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	112
20.	REFERENCIAS.....	114
	ANEXO FOTOGRAFICO.....	123

INDICE DE TABLAS Y FIGURAS

<i>Figura 1</i> Diseño de investigación	20
<i>Figura 2</i> sitios de monitoreo	22
<i>Figura 3</i> evolución DBO5.....	23
<i>Figura 4</i> Evolución DQO.....	23
<i>Figura 5</i> Evolución SST.....	24
<i>Figura 6</i> Presencia de metales pesados por sitios de monitoreo.	24
<i>Figura 7</i> ODS 2030.....	29
<i>Figura 8</i> Palma de Coyol, ACM,2024.	32
<i>Figura 9</i> Estructura y composición química de la lignocelulosa.....	33
<i>Figura 10</i> principales unidades repetitivas de la lignina.....	34
<i>Figura 11</i> Dos cadenas adyacentes de celulosa mostrando el puente de hidrógeno intermolecular.	34
<i>Figura 12</i> Tipos de isotermas.....	37
<i>Figura 13</i> Seis clasificaciones de isotermas de adsorción de Langmuir	39
<i>Figura 14</i> Cinética de adsorción para las isotermas de Langmuir y Freundlich en diferentes tiempos y condiciones sobre la base de la teoría de tasas estadísticas.....	40
<i>Figura 15</i> Ejemplo de superficie de respuesta con curvatura.....	41
<i>Figura 16</i> Esquema metodológico.	48
<i>Figura 17</i> Componentes del coyol separados, a) pulpa, b) cáscara, c) cáscara de núcleo, d) núcielo.2024	49
<i>Figura 18</i> Curva de calibración de azúcares reductores absorbancia en función de la concentración	50
<i>Figura 19</i> Montaje experimental	53
<i>Figura 20</i> Curva tipo de dicromato de potasio.....	55
<i>Figura 21</i> Curva tipo de dicromato de potasio II	56
<i>Figura 22</i> Curva tipo de Difenil Carbazida (DFC)	57
<i>Figura 23</i> Fotografía del cambio ascendente de las concentraciones para la curva tipo de DFC	58
<i>Figura 24</i> Representación gráfica del contenido de humedad de cada componente del Coyol.....	60
<i>Figura 25</i> Porcentaje en peso seco de los componentes de Coyol.....	62
<i>Figura 26</i> comparación de la cantidad de adsorbente que puede ser obtenida.....	63
<i>Figura 27</i> concentración de azúcares reductores en 3 lavados en intervalos de 2 horas a temperaturas de T_a (20°C aprox.), 40 y 60 °C.....	67
<i>Figura 28</i> Hidrolisis de la sacarosa (ejemplo de hidrolisis de polisacáridos) Fuente: Edulat,2025.....	68
<i>Figura 29</i> FTIR Cáscara de Coyol Crudo con las características que se describen el artículo de Hospodarova.....	69
<i>Figura 30</i> Código en MATLAB para la función de caracterización	70
<i>Figura 31</i> FTIR Cáscara de Coyol Crudo con las características que se describen el artículo de Aguilar-Aguilar.....	71
<i>Figura 32</i> FTIR Cáscara de Coyol Crudo	71
<i>Figura 33</i> FTIR cáscara de coyol pretratada.	72
<i>Figura 34</i> comparación de FTIR de la cáscara de coyol cruda y pretratada	73
<i>Figura 35</i> Enlaces, estiramientos y vibraciones de los extraíbles hidrofóbicos	74
<i>Figura 36</i> comparación de los extractables de la cáscara de coyol.....	75
<i>Figura 37</i> SEM 3D de cáscara de Coyol Cruda	76
<i>Figura 38</i> SEM Cáscara de coyol curda a 200 micrómetros.....	76
<i>Figura 39</i> Cáscara de Coyol cruda a 100 micrómetros.....	77
<i>Figura 40</i> a Cáscara de Coyol cruda 20 micrómetros.....	77
<i>Figura 41</i> Cáscara de Coyol Tratada (lavada) a 20 micras	78
<i>Figura 42</i> Cáscara de coyol Tratada (lavada) a 1 mm.....	78
<i>Figura 43</i> Cáscara de coyol Tratada (lavada) a 50 micras	79
<i>Figura 44</i> TGA cáscara de coyol pretratada por zonas para el cálculo de composición	83
<i>Figura 45</i> TGA y DTG de la cáscara de coyol pretratada.....	84
<i>Figura 46</i> PZC de la cáscara de coyol cruda.	85
<i>Figura 47</i> PZC cáscara de Coyol pretratada.....	87
<i>Figura 48</i> muestras liquidadas después de la adsorción	91

<i>Figura 49 Comparación de la fase líquida después del ensayo de adsorción, A) Cáscara cruda, B) izquierda cáscara cruda- derecha cáscara pretratada</i>	92
<i>Figura 50 porcentajes promedio más altos y bajos de remoción</i>	94
<i>Figura 51 diagrama de superficie del porcentaje de Remoción por la actividad del adsorbente y el contaminante</i>	95
<i>Figura 52 Diagrama de superficie del porcentaje de Remoción por la actividad del adsorbente y el pH</i>	96
<i>Figura 53 Diagrama de superficie del porcentaje de Remoción por la actividad del adsorbente y el tiempo de contacto</i>	97
<i>Figura 54 observaciones comparadas con la predicción del modelo (software Statistica)</i>	98
<i>Figura 55 Pareto con nivel de significancia del 10%</i>	99
<i>Figura 56 Especiación en Fracción vs pH del Cromo en solución</i>	100
<i>Figura 57: modelos cinéticos para a la bioadsorción de cromo en solución acuosa,</i>	103
<i>Figura 58 modelo cinético de Pseudo primer orden a diferentes concentraciones de dicromato de potasio</i>	104
<i>Figura 59 modelo cinético de Pseudo segundo orden a diferentes concentraciones de dicromato de potasio</i>	104
<i>Figura 60 modelo cinético de Elovich a diferentes concentraciones de dicromato de potasio</i>	105
<i>Figura 61 Isotermas para a la bioadsorción de cromo en solución acuosa,</i>	106
<i>Figura 62 Isoterma de Langmuir no linealizada en concentraciones de Cr (VI) en mg/ml</i>	107
<i>Figura 63 Isoterma de Freundlich no linealizada en concentraciones de Cr (VI) en mg/ml</i>	107
<i>Figura 64 Isoterma de RP no linealizada en concentraciones de Cr (VI) en mg/ml</i>	108
<i>Tabla 1 Generación de aguas residuales en México</i>	25
<i>Tabla 2: Bioadsorbentes para la remoción de metales pesados y sus características de experimentación.</i>	43
<i>Tabla 3 Materiales lignocelulósicos empleados en la remoción de metales pesados, Modificada de Cardoso et al (2021), Dias et al (2023) y Bachmann et al (2022).</i>	45
<i>Tabla 4 Curva de calibración para la determinación de azúcares reductores mediante el método de DNS</i>	50
<i>Tabla 5 Diseño experimental mediante MSR</i>	53
<i>Tabla 6 Proporciones para curva tipo</i>	54
<i>Tabla 7 concentraciones para la construcción de la curva tipo</i>	56
<i>Tabla 8: Determinación de porcentaje de humedad por el método de peso constante</i>	59
<i>Tabla 9 Comparación del porcentaje de humedad con residuos agroindustriales</i>	60
<i>Tabla 10: porcentaje de composición del coyol en peso húmedo</i>	61
<i>Tabla 11: cantidad de componentes del coyol en seco y húmedo con base de cálculo de 1 tonelada</i>	62
<i>Tabla 12 comparación de los porcentajes en peso obtenidos</i>	62
<i>Tabla 13 obtención de la cantidad de adsorbente en función de la producción y humedad del fruto</i>	64
<i>Tabla 14 pérdidas típicas de los frutos en la preparación</i>	65
<i>Tabla 15: Determinación de absorbancia y concentración de 3 extracciones de azúcares reductores a diferentes temperaturas</i>	67
<i>Tabla 16: observaciones de los enlaces presentes en la muestra de Cáscara de Coyol cruda según el FTIR y las descripciones de Hospodarova, Aguilar y Shahid.</i>	71
<i>Tabla 17 grupos funcionales de la cáscara de coyol después del lavado (libre de extraíbles)</i>	72
<i>Tabla 18 comparación de imágenes de análisis BET de diversos materiales lignocelulósicos</i>	80
<i>Tabla 19 Área superficial de la cáscara de coyol</i>	81
<i>Tabla 20 Comparación de área superficial y volumen de poro de diversos materiales lignocelulósicos estudiados como adsorbentes</i>	82
<i>Tabla 21 Composición de la cáscara de Coyol en función del estudio termogravimétrico</i>	82
<i>Tabla 22 comparación de composición de biomasa lignocelulósica</i>	83
<i>Tabla 23 Determinaciones del cambio del pH después de 24 horas</i>	85
<i>Tabla 24 Diferencia de pH de la cascara de coyol pretratada</i>	87
<i>Tabla 25 comparación de los puntos de carga cero de diferentes adsorbentes lignocelulósicos</i>	87
<i>Tabla 26 Porcentajes de elementos que constituyen a la cáscara de coyol y su Gross y Low Heat value</i>	88
<i>Tabla 27 Comparación de composición elemental de lignocelulósicos</i>	89
<i>Tabla 28 poder Calorífico de la Cáscara de coyol</i>	90

<i>Tabla 29 Obtención de la concentración de cromo (VI) en función de la absorbancia leída directamente a 390 nm. Utilizando cáscara de coyol pretratada.</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 30 Concentraciones iniciales y finales de Cr (VI) determinadas con difenil carbazida para los ensayos de adsorción con cáscara de Coyol pretratada</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 31 porcentajes de remoción para cada experimento de la MSR</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 32 comparación de la adsorción de Cr (VI).....</i>	<i>101</i>
<i>Tabla 33 Coeficientes de la cinética de adsorción linealizadas</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 34 Coeficientes isotérmicos del proceso de adsorción de Cr (VI).....</i>	<i>106</i>
<i>Tabla 35 ciclos de uso del bioadsorbente.....</i>	<i>109</i>

RESUMEN

Esta investigación evalúa el uso de la cáscara del fruto de coyol (*Acrocomia aculeata*) como bioadsorbente sostenible para la eliminación de cromo hexavalente (Cr (VI)) en aguas residuales. El estudio surge ante la creciente problemática ambiental por la descarga de metales pesados sin tratamiento adecuado en cuerpos de agua y la presión hídrica, situación común en México y en otros países industrializados, así como la perspectiva de la reducción de residuos agroindustriales reintroduciéndolos al sector económico como un producto de valor agregado. Considerando que el Cr (VI) es particularmente preocupante por su alta toxicidad y potencial carcinogénico, afectando tanto a humanos como al ecosistema. Aunado que en México, la cobertura y eficiencia del tratamiento de aguas residuales aún es limitada, especialmente ante descargas industriales. Aunque existen tecnologías eficaces como la ósmosis inversa o la electrocoagulación, estas resultan costosas y generan residuos adicionales. Por ello, se investigan alternativas sostenibles y de bajo costo, como los bioadsorbentes lignocelulósicos derivados de residuos agrícolas, entre ellos la cáscara de coyol, que posee componentes como celulosa, hemicelulosa y lignina, los cuales permiten una alta capacidad de adsorción.

A través de diversos análisis fisicoquímicos (FTIR, BET, SEM y TGA), espectroscópicos (Uv-Vis con difenilcarbazida) y experimentos de adsorción en sistema Batch, se comprobó que la cáscara de coyol presenta grupos funcionales activos que permiten la remoción eficaz de Cr (VI) Variando varias variables según la Metodología de superficie de Respuesta con el objetivo de optimizar la remoción de cromo hexavalente (Cr (VI)) se variaron cuatro variables: la cantidad de adsorbente, evaluada en tres niveles (1000 mg, 5500 mg y 10000 mg), El pH de la solución, ajustado a valores de 3, 5.5 y 7, la concentración inicial del contaminante, utilizando soluciones de dicromato de potasio a 10 mg/L, 55 mg/L y 100 mg/L y el tiempo de contacto 60, 270 y 480 minutos. El estudio logró remover el cromo alcanzando altos porcentajes de remoción. Además del beneficio ambiental, esta propuesta se alinea con los principios de economía circular y producción más limpia, ya que da valor a un residuo agrícola de bajo costo y alta disponibilidad en México y América Latina. Se promueve así una solución Sustentable, técnica y económicamente viable para el tratamiento de aguas contaminadas por metales pesados. Pudiéndose determinar la capacidad de adsorción de la cáscara de Coyol (*Acrocomia aculeata*) como agente bioadsorbente para la remoción del cromo (VI) en aguas residuales (agua sintética) obteniendo un valor de 0.28 mg/g. Así mismo El mayor porcentaje de remoción de Cr (VI) se obtuvo bajo las siguientes condiciones: pH 5.5, cantidad de adsorbente de 5.5 g, tiempo de contacto de 270 minutos y concentración inicial de Cr(VI) de 0.016 mg/mL, logrando un 92.53% \pm 1.61% de remoción. Además, se alcanzaron porcentajes de remoción superiores al 80% en condiciones de pH 5.5, con 5.5 g de adsorbente, incluso a 60 minutos de contacto y para concentraciones iniciales entre 0.019145 mg/mL y 0.032343 mg/mL de Cr (VI). Un punto de mejores condiciones de operación de pH: 3.7, adsorbente: 8.5g, tiempo: 450 min.

ABSTRACT

This research evaluates the use of the shell of the coyol fruit (*Acrocomia aculeata*) as a sustainable bioadsorbent for the removal of hexavalent chromium (Cr (VI)) from wastewater. The study arises in response to the growing environmental issue of heavy metal discharge into water bodies without adequate treatment and increasing water stress, a situation common in Mexico and other industrialized countries. It also considers the potential of reducing agro-industrial waste by reintroducing it into the economic sector as a value-added product. Cr (VI) is particularly concerning due to its high toxicity and carcinogenic potential, affecting both human health and ecosystems. Furthermore, in Mexico, the coverage and efficiency of wastewater treatment remain limited, particularly regarding industrial discharges. Although effective technologies like reverse osmosis and electrocoagulation exist, they are costly and generate additional waste. Therefore, sustainable and low-cost alternatives are being investigated, such as lignocellulosic bioadsorbents derived from agricultural residues, among them coyol shell, which contains components such as cellulose, hemicellulose, and lignin that offer high adsorption capacity.

Through various physicochemical analyses (FTIR, BET, SEM, and TGA), spectroscopic methods (UV-Vis with diphenylcarbazide), and batch adsorption experiments, it was confirmed that the coyol shell possesses active functional groups that enable the effective removal of Cr (VI). Using the Response Surface Methodology, four variables were varied to optimize Cr (VI) removal: the amount of adsorbent (evaluated at three levels—1000 mg, 5500 mg, and 10000 mg), solution pH (adjusted to values of 3, 5.5, and 7), initial contaminant concentration (using potassium dichromate at 10 mg/L, 55 mg/L, and 100 mg/L), and contact time (60, 270, and 480 minutes). The study achieved high chromium removal percentages. In addition to the environmental benefit, this approach aligns with the principles of circular economy and cleaner production, as it adds value to a low-cost, widely available agricultural residue in Mexico and Latin America. Thus, it promotes a sustainable, technically sound, and economically viable solution for the treatment of water contaminated with heavy metals. The adsorption capacity of coyol shell (*Acrocomia aculeata*) as a bioadsorbent for Cr (VI) removal in wastewater (synthetic water) was determined to be 0.28 mg/g. The highest Cr (VI) removal percentage was obtained under the following conditions: pH 5.5, 5.5 g of adsorbent, 270 minutes of contact time, and an initial Cr (VI) concentration of 0.016 mg/mL, achieving $92.53\% \pm 1.61\%$ removal. Additionally, removal efficiencies above 80% were achieved under conditions of pH 5.5 and 5.5 g of adsorbent, even with a contact time of only 60 minutes and initial Cr (VI) concentrations ranging from 0.019145 mg/mL to 0.032343 mg/mL. An optimal point of operating conditions was identified at pH 3.7, 8.5 g of adsorbent, and 450 minutes of contact time.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el tratamiento de agua residuales ha cobrado una importancia crítica debido a su impacto en la contaminación de cuerpos de agua naturales. De acuerdo con la CONAGUA (2015), se estima que a nivel mundial entre 85 y 95% del agua residual se descarga directamente a los ríos, lagos y océanos sin recibir tratamiento previo generando daños al ambiente (erosión, muerte o desplazamiento de especies), sociales y económicos (enfermedades y costos que no son subsanados por los involucrados). Según estimaciones del 2017, en México se descargan 14.21 miles de hectómetros cúbicos al año ($\text{hm}^3/\text{año}$) de aguas residuales, con 7.41 de origen municipal (domésticas) y 6.88 no municipales (industriales), de los cuales se tratan 6.92 miles de $\text{hm}^3/\text{año}^1$ (48.7% del total de descarga) a través de 2,526 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), mientras que la industria trata sus descargas con 3,025 plantas en operación a escala nacional (Comisión Nacional Del Agua, 2018). Para el 2018 la descarga de aguas residuales ascendía a 14.29 miles de $\text{hm}^3/\text{año}$ (Comisión Nacional del Agua, 2019).

Uno de los principales retos de la actualidad es la presencia de metales pesados en el agua residual, especialmente el cromo hexavalente Cr (VI), que representa un grave problema ambiental y de salud pública. El Cr (VI) es un contaminante industrial frecuente, que puede encontrarse en aguas residuales provenientes de todo el mundo, pues se ha registrado la presencia de este metal pesado en las aguas residuales en México, China, EE.UU. e India, o donde existan las principales fuentes de este contaminante, como las industrias metalúrgicas, la galvanoplastia, el curtido del cuero, la pintura, las industrias textiles, la fabricación de pigmentos, la industria de sales crómicas, el pulido de metales o bien la eliminación y desecho no regulada de las industrias (Bachmann S, et al., 2022; Nianhua C, et al. 2024; Liu, B, et al., 2023; Jobby, R, et al,2018; Hajira H, 2017). Cuando este metal pesado es liberado puede acumularse en los sedimentos, en cuerpos de agua y en suelo, de esta forma entran en las redes tróficas, afectando a especies terrestres, acuáticas y a la salud humana que se ven expuestos al contaminante por la dependencia recursos para su alimentación. El cromo en su forma hexavalente es altamente tóxico y carcinogénico (a diferencia del Cr (III), que es menos peligroso), capaz de provocar diversos problemas de salud, incluyendo problemas respiratorios, irritaciones en la piel e incluso cáncer de pulmón. Además, altera la biodiversidad y el equilibrio ecológico, lo que subraya la necesidad urgente de implementar y mejorar los sistemas de tratamiento de aguas para reducir la carga de estos contaminantes peligrosos (Londoño, 2016; Al-osman, 2019; Bachmann S, et al., 2022).

se ha observado la presencia de metales pesados en las refinerías de petróleo, en la perforación de pozos petroleros, sitios de producción de fertilizantes, mineras, textilerías, siderúrgicas y metalúrgicas, principalmente. Por su parte las descargas de aguas residuales domésticas sin tratar aportan grandes volúmenes de lodos enriquecidos con metales como plomo, zinc, cadmio y cromo (Aguilar, *et al.*, 2010),

por lo que se puede decir que la contaminación de metales pesados como el cromo es una problemática que impacta en todo el mundo, incluyendo México donde se han registrado contaminación por cromo en Baja California Sur, Estado de México, Guanajuato y sonora (Castro-Rodríguez et al., 2015; Armienta Hernandez, 2000; Gutiérrez R., 2020; & Zavala M., 2009) por mencionar algunos que se describen en esta investigación.

Existen muchos tratamientos para eliminar metales pesados de las aguas residuales, entre los métodos comúnmente utilizados se encuentran: la precipitación química, tratamiento electroquímico, intercambio iónico, filtración y osmosis inversa. Por ejemplo, en el estudio realizado por Goyburo C. *et al.*, (2024), demostraron que el uso de la membrana BW30 alcanzó una eficiencia de remoción de arsénico total que varía entre el 60,0% y el 99,9% en un proceso de osmosis inversa. Por su parte que Nianhua Chen *et al.*, (2024), estudiaron la remoción de Cr (VI), donde por medio de una electrocoagulación lograron reducir la concentración de Cr (VI) de 20mg/L a 0.05 mg/L. Las tecnologías mencionadas actuales pesar de ser eficientes para la remoción de metales pesados presentan diversas desventajas en su aplicación como costos elevados de operación, generación de lodos, costos por el manejo de dichos lodos y altas cantidades de energía consumida en comparación con otros métodos para la remoción de metales pesados (Balasubramanian, 2023). En los últimos años se han propuesto los biomateriales derivados de materiales lignocelulósicos como adsorbentes para la eliminación de metales pesados en el tratamiento de aguas residuales para atacarlas desventajas de las tecnologías actuales. Los materiales comúnmente estudiados son residuos de algodón, fibra de palma, coco, residuos de maíz, cascarilla de arroz, residuos de: piña, sandía, maíz, trigo, naranja y plátano, por mencionar algunos; los materiales lignocelulósicos son investigados debido a que presentan grupos funcionales en su estructura que son característicos de la lignina, la celulosa y hemicelulosa, los cuales permiten la eliminación de metales pesados como el cobre, plomo, mercurio y Cromo (III y VI) con eficiencias incluso mayores al 90% (Dias. *et al.*, 2023). Como se puede observar de lo explicado en las líneas anteriores, se puede decir que las principales fuentes de estos materiales son derivados de biomasa como residuos agrícolas, algas y subproductos industriales, de donde se destacan por su capacidad de adsorción, biodegradabilidad y baja toxicidad, comparados con las tecnologías que aplicadas en la actualidad.

Cuando se utilizan bioadsorbentes para eliminar metales pesados de aguas residuales, las condiciones que se evalúan típicamente para optimizar la remoción de metales incluyen el pH del agua, la temperatura, la concentración inicial de metal y la cantidad de bioadsorbente utilizado. El pH, en particular, es crucial porque afecta la carga de la superficie del bioadsorbente y la solubilidad del metal, influenciando directamente la capacidad de adsorción. Estudios previos han demostrado que ajustar estas variables puede maximizar la eficiencia de captura de metales pesados como el cromo, el plomo y el cadmio, ofreciendo una alternativa prometedora y sostenible frente a métodos tradicionales y

costosos de tratamiento de aguas (Días, *et al.*, 2023, Ruzhan, *et al.*, 2023, Moreira, *et al.*, 2022, Elaine F., *et al.*, 2020).

La *Acrocomia aculeata* también es conocida como coyol, cocoyol, coyol redondo, guacoyul y maap en lengua huasteca (Hermilo *et al.*, 2004), coco, “mbokaja” en idioma guaraní (Rodríguez, *et al.*, 2019), mbokaya (Ramírez, *et al.*, s.f), o bien *A. totai* (Degen de Arrúa, 2015). Es una especie con una gran potencial e interés de estudio al ser nativa de las regiones secas de América tropical, encontrándose desde el centro de México hasta el sur de América. Debido a su amplia distribución geográfica, esta palmera se ha utilizado en diversos ámbitos como la producción de aceite comestible y biocombustibles, la fabricación de jabones, fabricación de dulces, en medicina popular y como bebida. Además de su uso primario, los residuos de la *A. aculeata* como la cáscara, tanto en su forma natural como pirolizada, han encontrado aplicación en la industria como sustratos para diversos productos de valor agregado (Aguilar A. *et al.*, 2024).

En este contexto, la cáscara de *A. aculeata*, tradicionalmente considerada un subproducto de bajo valor industrial, presenta un potencial significativo como bioadsorbente natural para la remoción de metales pesados de aguas contaminadas. Este uso no solo ofrece una solución de bajo costo para los problemas de contaminación, sino que también promueve la valorización de residuos, alineándose con los principios de sostenibilidad y economía circular. De acuerdo con el estudio realizado por Aguilar-Aguilar *et al.*, (2024), el fruto de coyol tiene una elevada producción de frutos entre 6.49 a 23.09 t/ha, dependiendo de las condiciones de cultivo, así mismo, en el estudio citado se demuestra que la cáscara tiene un elevado rendimiento por hectárea y un elevado contenido de material lignocelulósico (celulosa, hemicelulosa y lignina).

De esta manera este estudio se centra en evaluar la capacidad y eficiencia de la cáscara de Coyol (*Acrocomia aculeata*) como bioadsorbente en la eliminación del cromo (VI) de aguas residuales. En particular, se busca determinar si el bioadsorbente puede ser efectivo en reducir la concentración de cromo (VI) a niveles que cumplan con la normatividad mexicana, como lo son la NOM-001-SEMARNAT-2021 (1.5 mg/l promedio diario Cr Total) y NOM-002-SEMARNAT-1998 (1 mg/l promedio diario Cr (VI)), abordando así la reducción de su toxicidad y el impacto ambiental en cuerpos de agua. Esta investigación pretende no solo contribuir a la gestión sostenible de residuos, sino también ofrecer una solución práctica y ecológica para la purificación de aguas contaminadas.

2. MARCO CONCEPTUAL

Adsorción: Fenómeno de superficie en el cual los contaminantes solubles en aguas se ven atraídos a un material sólido a través de enlaces químicos o fuerzas físicas (Kumar-Biswal, 2023). Castellan (1987); Maron y Prutton (1977), definen la adsorción como un proceso mediante el cual se concentra una sustancia sobre la superficie de otra fase sólida o líquida, por lo cual es considerado un fenómeno superficial. La sustancia que se concentra en la superficie recibe el nombre de adsorbato y la fase que

la retiene es llamada adsorbente (García et al, 2014). El proceso de adsorción es considerado uno de los métodos más usados para la separación y purificación. Podemos encontrar dos tipos de adsorciones: adsorción física: causada principalmente por las fuerzas de Van der Waals y electrostáticas, dándose estas entre las moléculas del adsorbato y los átomos que componen la superficie del adsorbente (García et al, 2014),y adsorción química que es el resultado de la interacción química entre el sólido y la sustancia adsorbida se lleva a cabo cuando la sustancia se une a la superficie mediante fuerzas covalentes (Millán, 2008).

Aguas residuales: Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos público urbano, doméstico, industrial, comercial, de servicios, agrícola, pecuario, de las plantas de tratamiento y en general, de cualquier uso, así como la mezcla de ellas, según la Ley de Aguas Nacionales (1992).

Bioadsorción: Proceso de adsorción en el cual se utilizan materiales de origen biológico (biomasa), debido a su bajo costo y alta disponibilidad (Torres Vaamonde, 2022).

Contaminación: La presencia en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural de materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos y forma o de cualquier combinación de ellos que cause una alteración de las relaciones de interdependencia entre los elementos naturales que conforman el ambiente, que afecta negativamente la existencia, transformación y desarrollo de la humanidad y demás seres vivos, según la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (1988).

DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno en 5 días): Es una estimación de la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana heterogénea para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua en un periodo de 5 días, conforme lo expuesto en la NMX-AA-028-SCFI-2001

DQO (Demanda bioquímica de Oxígeno): La concentración de la masa de oxígeno equivalente a la cantidad de dicromato consumida por la materia disuelta y suspendida cuando una muestra de agua se trata con este oxidante bajo condiciones definidas, según se define en la norma NMX-AA-030/1-SCFI-2012.

Lignocelulosa: constituye la parte principal de la estructura de las células vegetales compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina (Dias *et al.*, 2023).

Metales pesados: La Norma Oficial Mexicana NOM-243-SSA1-2010 los define como “los elementos químicos que causan efectos indeseables en el metabolismo aun en concentraciones bajas. Su toxicidad depende de la dosis en que se ingieran, así como su acumulación en el organismo”.

Muwaffak Al Osman (2018), define a los metales pesados como aquellos metales con densidades, números o pesos atómicos relativamente altos. Los metales pesados incluyen mercurio (Hg), plomo (Pb), cromo (Cr), cadmio (Cd), bario (Ba) y cobre (Cu).

Polisacárido: Los polisacáridos son cadenas formadas por la unión de múltiples unidades de monosacáridos, siendo considerados como biopolímeros dentro de la categoría de carbohidratos (Escalona, 2022).

Producción más limpia: Es la adopción de técnicas, prácticas y tecnologías para un aprovechamiento óptimo de la energía, minimización o eliminando de las emisiones y las descargas, reducción de la demanda de materias primas, reutilización y reciclaje interno y externo de los residuos generados (Mellos de santos, 2021).

Sólidos suspendidos: Son la porción de los sólidos totales que son retenidos por un filtro de tamaño específico que posteriormente pueden ser secados a una temperatura de 105 °C (Metcalf *et al.*, 2003).

CAPITULO I

3. ANTECEDENTES

Los metales pesados ingresan al agua a través de desechos industriales y aguas residuales municipales, impulsados por el crecimiento urbano y la expansión industrial. En México, diversos casos han evidenciado el impacto de la contaminación, como el derrame de 40,000 m³ de sulfato de cobre y otros metales pesados en el río Sonora (2014), afectando a cientos de personas. En Tultitlán, Estado de México, la contaminación por cromo hexavalente alcanzó hasta 116 mg/L debido a residuos industriales dispuestos de forma incorrecta desde 1978. En León, Guanajuato, la presencia de cromo en el agua subterránea se ha registrado desde 1975, con concentraciones cercanas a 50 mg/L. Además de la actividad industrial, la geología natural también contribuye al contenido de cromo en aguas subterráneas, como se ha observado en San Juan de los Planes, Baja California, donde el 72% de las muestras superaron el límite permitido. En Sinaloa, estudios en organismos acuáticos del río Baluarte encontraron acumulación de cromo en peces y crustáceos (Quynh et al, 2023; Aroche E, 2019; Raquel Gutiérrez, 2020; Armienta, 2024; Tirado, 2020 & Zavala M. 2009). Estos antecedentes evidencian la amenaza ambiental y de salud que representa la contaminación por metales pesados como el Cr(VI). Este contaminante industrial frecuente, puede encontrarse en aguas residuales provenientes de procesos de manufactura como el curtido de pieles, la producción de acero, la galvanoplastia, el curtido del cuero, la pintura, las industrias textiles, la fabricación de pigmentos, la industria de sales crómicas y la preservación de madera (Bachmann S, et al., 2022; Nianhua C, et al. 2024; Liu, B, et al., 2023; Jobby, R, et al, 2018; Hajira H, 2017) resaltando la necesidad de implementar estrategias de remediación efectivas para evitar mayores impactos en ecosistemas y poblaciones que son estrictamente dependientes del agua.

Por su parte el tratamiento de aguas residuales se realiza a través de diversos procesos físicos (sedimentación, filtración, remoción de grasas y aceites, cribado, homogeneización, flotación y adsorción física), químicos (floculación, cloración, neutralización, ozonificación, osmosis inversa, intercambio iónico y adsorción química, principalmente) y biológicos (lodos activados o reactores anaerobios, reactores anaerobios procesos de aireación prolongada o uso de biodiscos, por mencionar algunos, que buscan eliminar la presencia de contaminantes de acuerdo con los límites máximos permisibles en las normas aplicables, lo que permite que después del proceso puedan ser reutilizadas, consumidas o vertidas en los cuerpos naturales o alcantarillado sin impactos significativos al ambiente o hacia la salud humana. Dichos procesos tienen entre sus objetivos particulares la reducción de sólidos en suspensión con diversos tamaños de partículas, neutralización u homogeneización, remover la materia orgánica, remoción de agentes químicos como nitrógeno, fósforo, metales pesados o materia coloidal (Ramahlo, 1996; CONAGUA, 2019; SEMARNAT, 2022).

La eliminación de metales pesados a través del método de adsorción está siendo extensivamente investigada, dado que exhibe una óptima relación costo-beneficio, ya que es posible emplear sustancias adsorbentes de procedencia natural o inorgánica que en ciertos escenarios constituyen residuos o son especialmente abundantes en el entorno natural (Flores-Álamo, 2015). De acuerdo con algunos reportes se ha estudiado una diversidad de bioadsorbentes con diferentes parámetros o características de relevancia para los procesos de eliminación de metales pesados como cromo (Cr), arsénico (As) o el mercurio (Hg), en función de características morfológicas y fisicoquímicas de los materiales adsorbentes, tales como: superficie específica, tamaño de poro, propiedades químicas de la superficie, o competencia iónica, entre otras (Ruzhan, *et al.*, 2023), no obstante, la mayoría se centra en la generación de “biochar” o bioadsorbente modificados, aunado a esto no hay investigación sobre el Coyoil como bioadsorbente. A lo largo del mundo se han estudiado diversos bioadsorbente lignocelulósicos para la remoción de contaminantes, por ejemplo Sohail Ayub y colaboradores (2014), quienes en su investigación evalúan la capacidad del material de desecho agrícola de la cáscara de coco para eliminar el Cr (VI) de las aguas residuales, donde se menciona que existen variables de importancia tales como el pH, el tiempo de contacto, la dosis de adsorbente, la concentración de metal y el tamaño de las partículas, obteniendo con una adsorción máxima del 83%, de igual forma Erol Pehlivan y Turkan Altun (2008), investigaron la eliminación del ion Cr(VI) de soluciones acuosas utilizando las cáscaras de nuez y avellana, donde se expuso que La capacidad de adsorción de las cáscaras dependía del pH de la solución de cromo, siendo el pH óptimo 3,5 con una capacidad máxima de adsorción de iones Cr(VI) de 8 mg/g y un 85% de eficacia de remoción. Así mismo se han evaluado varios residuos lignocelulósicos como biosorbentes de Cr(VI), incluido el bagazo de caña de azúcar, la cáscara de plátano, la fibra de coco y la cáscara de arroz, debido a su alta disponibilidad, biodegradabilidad y presencia de grupos funcionales activos, como grupos hidroxilo, carboxilo y fenólico, que facilitan la adsorción de metales (Shoote,2020; Z. Wang,2023). Donde la eficiencia de estos materiales depende de su composición química, estructura porosa y capacidad de modificación de la superficie, así como su competitividad por la relación costo-beneficio (Bachmann *et al* 2022).

4. MARCO TEÓRICO

Se introduce el marco teórico con el diseño de investigación, basado en lo propuesto por Rivas Tovar en 2015, en su libro “¿Cómo Hacer una Tesis de Maestría?” Considerando un caso, como lo es la contaminación de aguas residuales por cromo (VI) y su remoción por medio de la adsorción por adsorbentes derivados de materiales lignocelulósicos (Figura 1).



*Figura 1 Diseño de investigación
Fuente: elaboración propia, 2024.*

4.1. Agua en México

Desde la implementación de la Ley de Aguas Nacionales de 1992, se ha observado un fenómeno de concentración y monopolización del agua por parte de 3,304 grandes usuarios privados; estos usuarios han recibido concesiones por parte de la Conagua para extraer más de 1 millón de metros cúbicos al año. Dentro de estos privados se encuentran ArcelorMittal una de las siderúrgicas más grande del mundo, la cual explota en México 100.5 hm³/año de agua. Por su parte, los usuarios con mayor volumen de agua explotado según el tipo “uso-otros” (industrial, agrícola, de servicios y diferentes) se encuentran: Buenavista del cobre, SA de CV. Minera peñasquito SA de CV. Braskem idesa, Mexicana de cobre, SA de CV, Consorcio de ingeniería integral y Villas solaris. Así mismo el autor concluye que el conjunto abarca 966 compañías, que incluyen empresas de energía eléctrica, cerveceras, siderúrgicas, agroindustrias, mineras, papeleras, automotrices y embotelladoras principalmente, las cuales explotan un total de 5,805 hm³/año de agua. Además, hay 1,537 individuos que poseen concesiones para un total de 2,547 hm³/año de agua (Gómez W., 2020).

Los datos de explotación del agua nos dejan ver que la mayoría se utiliza en el sector agrícola, seguido del sector industrial o de autoabastecimiento, de una manera descomunal. El uso del agua por consecuencia genera descargas de aguas residuales, y como se observa según los giros de las empresas que tienen mayor concesión del agua, son aquellas que potencialmente pueden generar aguas residuales contaminadas con metales pesados como es la extracción y explotación de minerales, y la fabricación de acero, la metalurgia y la siderurgia.

4.1.1. Uso del agua

Los volúmenes de aguas nacionales otorgados o asignados a los usuarios se registran en el Registro Público de Derechos de Agua (Repda) y se clasifican en usos consuntivos (como la agricultura, el abastecimiento público, la industria autoabastecida y las termoeléctricas) y no consuntivos (como las hidroeléctricas y la conservación ecológica). En 2018, el 60.8% del agua destinada a usos consuntivos provenía de fuentes superficiales (ríos, arroyos, lagos y presas), mientras que el resto provenía de aguas subterráneas. Del total del volumen concesionado para usos consuntivos en 2018, el 75.7% se destinaba a la agricultura detalla la Conagua (2019), para el 2020, el porcentaje de agua concesionada a agricultura mantuvo el porcentaje, dejando así un 14.7% para el abastecimiento público y un 9.6% para el industrial integrado (la Conagua 2019).

4.1.2. Diagnóstico y proyección

Conforme a lo expresado en el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos (2020), en el caso particular de México y Latinoamérica por parte de la UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura) en nombre de ONU-Agua (organización de las Naciones Unidas), se espera que, en los siguientes años, el territorio nacional presente sequías en mayor nivel. Existen preocupaciones sobre la disponibilidad del recurso hídrico derivado del cambio climático y el aceleramiento del calentamiento global (consecuencia en gran parte de las actividades antropogénicas), pues estas condiciones climáticas adversas agravan la escasez del agua, por el aumento en la temperatura, la baja del oxígeno disuelto, la interrupción en las estaciones y la alterando el ciclo hídrico. Estos impactos se verán en mayor medida en aquellos países que presenten climas tropicales, como es el caso mexicano.

En función de lo publicado por la CONAGUA (2018, 2019) en las “Estadísticas del Agua”, vemos que el agua renovable per cápita disminuye en 30m³/Hab-día del 2018 al 2019, por su parte en la calidad del agua, para el mismo periodo hubo una disminución de la calidad en función del parámetro DBO₅ del 2.8% de los sitios de monitoreo en aguas superficiales, lo que significa que del total nacional el 10.4% presentan algún grado de contaminación en este rubro. Con respecto a la DQO el 34.4% de los sitios presentan contaminación para el 2018, esto se resume en las Figuras 2 a 5. Aunado a que en aguas superficiales no se hace la determinación de presencia de metales en ninguno de los sitios de monitoreo. Con respecto a las aguas subterráneas no se encuentran disponibles los datos del monitoreo en el informe “estadísticas del agua en México” para 2017 y 2018. Por lo anterior se puede concluir que a lo largo de los años existe un deterioro en la calidad del agua, un declive en la gestión, monitoreo y disponibilidad, en otras palabras, se ilustra el detrimento de la accesibilidad a agua de calidad, ejes que ataca esta investigación.

En la Figura 2 se observa que en México hay una disminución de los sitios de monitoreo total (para aguas subterráneas, y aguas superficiales) con el paso de los años, con un recorte aproximado del 50 %, esto se debe, entre otros factores, a los recortes presupuestarios a las instituciones que se encargan de

este monitoreo, pero esa crítica no es el alcance de esta investigación. Lo que nos es relevante es que, al contar con menos sitios de monitoreo, se cuentan con menos datos para caracterizar e identificar cuál es la calidad del agua actual. Esto afecta en la línea base de las condiciones fisicoquímicas del agua, afectando así el diagnóstico, el tratamiento y, por ende, las metas que se quieran alcanzar en este y en cualquier otro proyecto de tratamiento de agua.

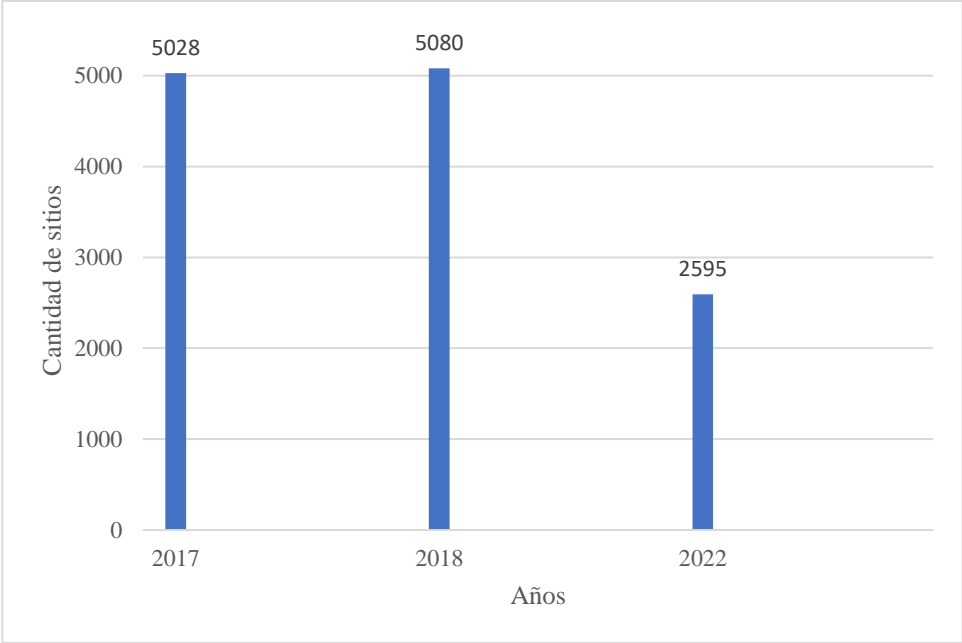


Figura 2 sitios de monitoreo
Fuente: elaboración propia con datos de CONAGUA 2017-2022

En las Figuras 3 a 6 se presenta la evolución de los parámetros de evaluación de la calidad del agua, se muestran 4 categorías de la calidad del agua, en donde E= Excelente, B=buena, A= Aceptable, C= Contaminada y EC= Extremadamente contaminada. Según la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) se observa una tendencia descendente en la calidad, disminuyendo hasta un 20% los sitios monitoreados con calidad Excelente, y una tendencia creciente en todos los sitios con contaminación. En caso similar con la DQO, disminuyendo su calidad buena y aumentando el número de sitios con algún grado de contaminación. Por su parte para los sólidos suspendidos totales (SST) no dista de la tendencia de los parámetros anteriores sobre los cuerpos contaminados.

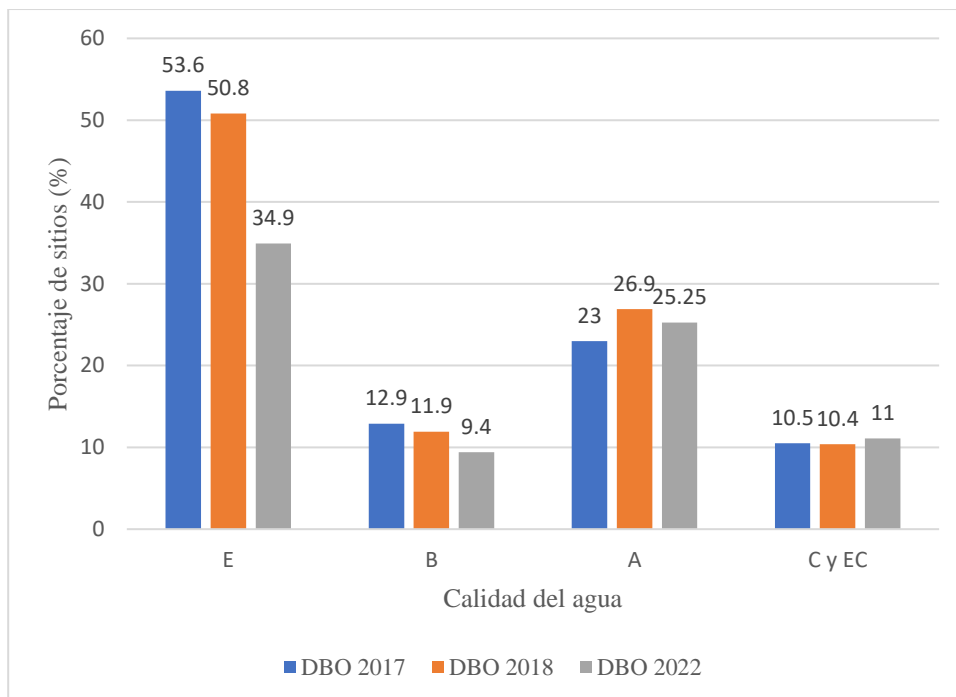


Figura 3 evolución DBO5

Fuente: elaboración propia con datos de CONAGUA 2017-2022

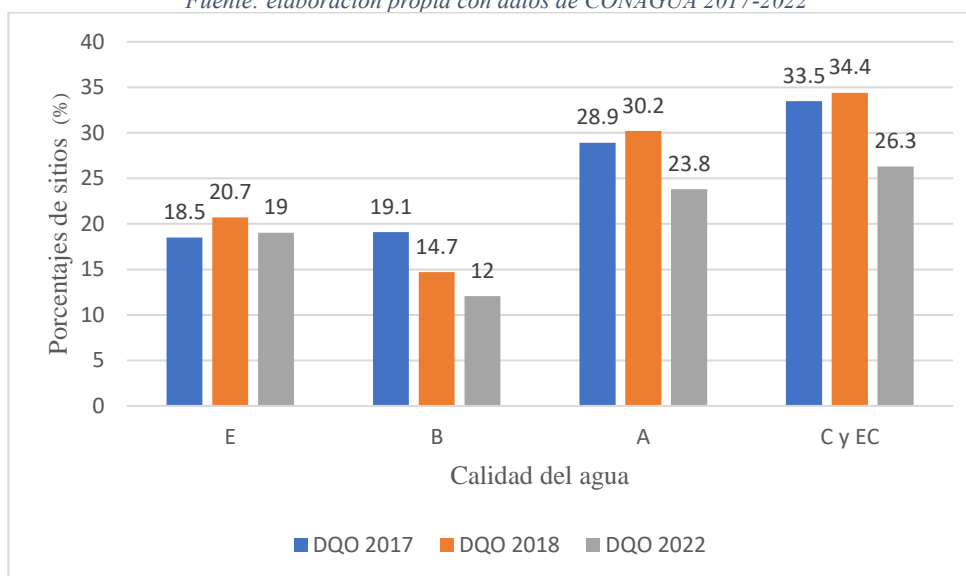


Figura 4 Evolución DQO

Fuente: elaboración propia con datos de CONAGUA 2017-2022

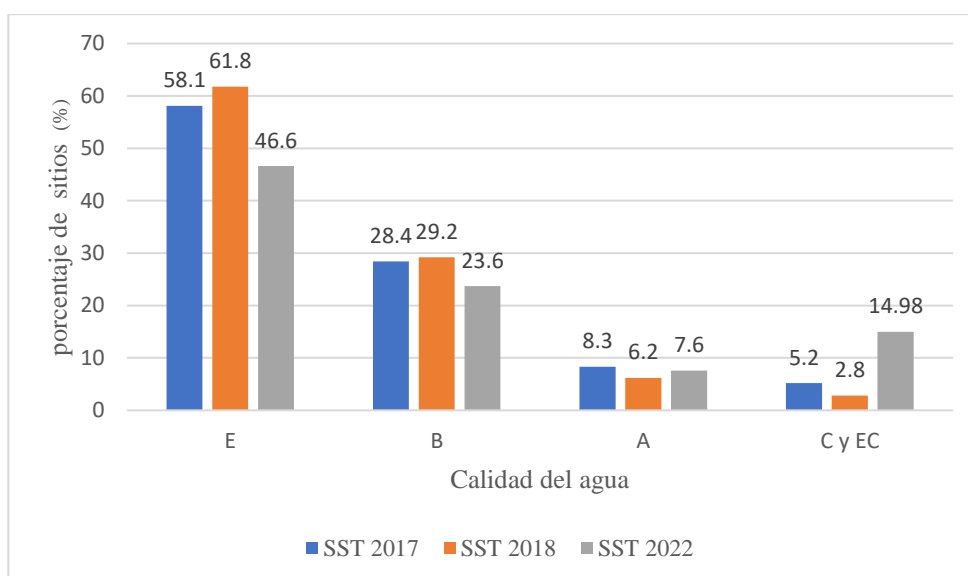


Figura 5 Evolución SST
Fuente: elaboración propia con datos de CONAGUA 2017-2022

En la Figura 6, se observa que, aunque 626 sitios se encuentran en una calidad potable, es alarmante que no se tengan registros de 148, 87 y 182 sitios respectivamente de cada categoría, pues sin este parámetro no se puede realizar un diagnóstico preciso y por ende no se puede dar una solución eficiente. Así mismo se añade que en el caso del cromo (cromo total) existen 10 sitios contaminados, reflejando áreas de oportunidad importantes en el tratamiento de agua residual en general y la contaminada con metales pesados. Es de relevancia el monitoreo de la calidad del agua subterránea porque es la principal fuente de agua potable.

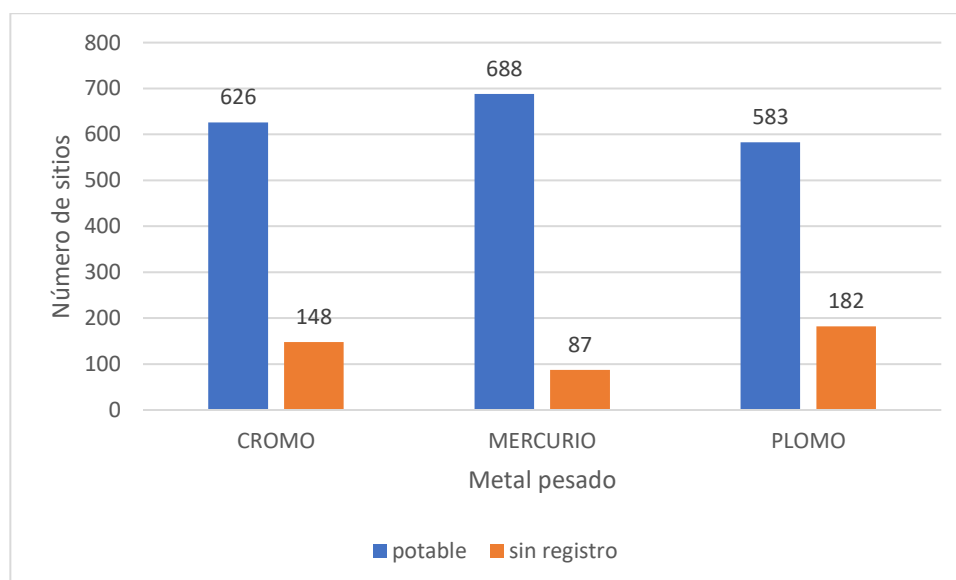


Figura 6 Presencia de metales pesados por sitios de monitoreo.
Fuente: elaboración propia con datos de la CONAGUA, 2021.

La CONAGUA a través de la red de monitoreo expone que calidad del agua subterránea: se categoriza de color verde cuando hay cumplimiento de los 14 parámetros indicadores, amarillo cuando se incumple

en uno o más de los siguientes parámetros: alcalinidad total, conductividad eléctrica, dureza total, sólidos disueltos totales, hierro total y manganeso total, y rojo cuando se incumple en uno o más de los siguientes parámetros: fluoruros, coliformes fecales, nitrógeno de nitratos, arsénico total, cadmio total, cromo total, mercurio total y plomo total. Con base en lo anterior, en 2022 se calificaron en verde el 42.5% de los sitios, el 18.6% de los sitios en amarillo y el 39% de los sitios en rojo (CONAGUA, 2022).

4.1.3. Generación de aguas residuales

Las industrias generalmente usan una gran cantidad de agua en sus procesos productivos y servicios auxiliares, generando aguas residuales (con algún grado de contaminación), la cual tiene que ser tratada antes de ser descargada hacia el ambiente. Cuando el proceso del tratamiento de agua residual industrial no se ha realizado y este se descarga directamente hacia los cuerpos de agua o el suelo, puede causar cambios físicos químicos y en general alteraciones ecológicas (Quynh Hoang, *et al*, 2023).

Las descargas de aguas residuales se dividen en municipales y no municipales. Las municipales provienen de áreas pobladas y se recogen en sistemas de alcantarillado urbanos y rurales. Las no municipales son generadas por otros usos, como la industria autoabastecida, y se descargan directamente en cuerpos de agua nacionales sin pasar por sistemas de alcantarillado, describe la CONAGUA en 2019. Esta institución federal también ofrece información referente a la generación de aguas residuales y su tratamiento para el 2018 (Tabla 1).

Tabla 1 Generación de aguas residuales en México

Concepto	Valor
Generación de aguas residuales municipales	7.43 miles de hm ³ /año
Se recolectan en alcantarillado	6.81 miles de hm ³ /año
Se tratan	4.34 miles de hm ³ /año
Generaciones no municipales, incluyendo a la industria	6.86 miles de hm ³ /año
Se tratan	2.75 miles de hm ³ /año
	Se generan 10.29 millones de toneladas de DBO ₅ al año
Carga contaminante	Se remueven en los sistemas de tratamiento 1.85 millones de toneladas de DBO ₅ al año

4.1.4. Contaminación por Cr(VI), origen e impacto

Los metales tóxicos pueden ingresar a los sistemas de agua a través de las aguas residuales municipales y los desechos industriales (no municipales). La creciente población urbana y la expansión de diversas industrias y las concesiones contribuyen significativamente al aumento de contaminantes, particularmente metales pesados, en nuestra agua potable. (Quynh *et al*, 2023). Aunado a lo anterior, en México han existido muchos casos de contaminación de cuerpo de agua por malas prácticas de las industrias, dentro de estos se encuentra la contaminación del río Sonora en 2014, donde se derramaron

40,000 m³ de sulfato de cobre mezclados con ácido sulfúrico y otros metales pesados, provenientes de la mina de Buenavista. Los acuíferos de la zona son utilizados para bebederos escolares sin ningún tratamiento de purificación previo. Se tienen contabilizadas 381 personas afectadas por la contaminación, el 1.5% de la población de la ribera del río, y una serie de promesas incumplidas de la empresa y gobierno. Relata el periodista Ernesto Aroche Aguilar para el periódico de crítica “Animal Político” (Aroche E, 2019).

Además de las contribuciones de la industria en la incorporación de cromo a los cuerpos de agua superficiales y subterráneas, la composición geológica (de forma natural) puede aportar cromo al agua subterránea, dicho aporte se debe a la composición geológica correspondiente metamórficas, ígneas, sedimentarias y depósitos aluviales (Raquel Gutiérrez, 2020).

En Tultitlán, Estado de México en 2009, se midieron concentraciones de 3,93 a 116 mg/L de Cr(VI) en pozos poco profundos cerca de una antigua fábrica de cromato, dicha fábrica lleva cerrada desde 1978, la contaminación de las aguas subterráneas de esta zona en Tultitlán fue consecuencia de la disposición deficiente de cromita (casi 120 mil toneladas). Por su parte en Guanajuato en el municipio de León, se encontró presencia de una concentración de más de 0.015 mg/l de cromo desde 1975, las concentraciones de cromo pueden llegar hasta 50mg/l en las zonas cercanas a la industria de cromato, de igual forma, la contaminación es derivada de una disposición inadecuada de los residuos de esta fábrica (Armienta, 2024).

De acuerdo con Tirado R (2020), en San Juan de los Planes, Baja California se han encontrado concentraciones de cromo total que presentan un valor promedio de 83.7 ± 45.2 , 71.9 ± 38.4 y 78.5 ± 53.6 µg/L de acuerdo con los tres muestreos que se realizaron, siendo el mayor aporte de Cr (III) de 68 al 99%. Dentro de lo relevante es que el 72% de las muestras analizadas superan el límite máximo permisible estipulado en la normatividad mexicana.

Los resultados de Zavala M. (2009) después de un análisis de organismos acuáticos obtenidos diversos sitios en la cuenca del río Baluarte, Sinaloa, donde en las cercanías existió actividad minera se registraron concentración de cromo en peces ascendió a un valor máximo de 0.0197 µg/g. Con respecto a los crustáceos estudiados se obtuvieron los valores siguientes: mínimo de 0.0129 µg/g y un máximo de 0.3369 µg/g, en estiaje, mientras que en temporada de lluvias se alcanzó 0.1027 µg/g como máximo.

Este panorama de la industria nos ayuda a concebir que existen y existirían riesgos potenciales por la descarga de agua residual con metales pesados, derivados de la industria, por lo que la contaminación y por ende la remediación son temas de actual preocupación.

4.2. Externalidades Ambientales derivadas de la contaminación del agua

La contaminación de cuerpos de agua genera diversos efectos adversos tanto para la sociedad como para el ambiente. Estos efectos pueden describirse en relación con los actores principales y sus afectaciones por la contaminación. Sin embargo, los impactos negativos no son siempre evidentes, ya que resulta difícil cuantificar los daños ambientales y las enfermedades a largo plazo que afectan a las formas de vida cercanas. Así mismo, se observa un deterioro en los servicios ambientales que proporciona el cuerpo de agua afectado. Desde una perspectiva económica, este daño socioambiental puede considerarse como una falla de mercado, conocida como externalidades. Según Stiglitz en su libro "La economía del sector público" publicado en el 2000, las externalidades son los actos de una persona o empresa que afectan a otras personas o empresas sin compensarlas (externalidad negativa). En el caso de la contaminación de cuerpos de agua, converge la generación de beneficios para el actor económico, como la empresa o la sociedad civil, debido al bajo costo en el manejo de desechos o descargas, y la generación de efectos externos de diferentes índoles (positivos y negativos, ambientales, económicos y sociales) para la población aledaña, el ecosistema y el gobierno.

Los efectos que pueden ocasionar a terceros incluyen la disminución del oxígeno disponible, olores desagradables, contaminación paisajística, disminución de la calidad del agua, emisiones de vapores y gases, crecimiento bacteriano nocivo, daños a la salud y bienestar de las especies animales en general, y la pérdida de la calidad del agua, suelo y aire. Estas afectaciones se traducen en costos no compensados, tanto públicos como privados, según lo describe amplia literatura en materia de contaminación del agua.

4.3. Exposición al Cr(VI): Efectos adversos a la salud Humana, Animal y al Ecosistema

En animales, la ingestión de cromo (VI) principalmente afecta el estómago, intestino delgado (irritación y úlceras) y a la sangre (anemia), así mismo se han observado daño de los espermatozoides y del sistema reproductivo, La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) ha determinado que los compuestos de cromo (VI) son carcinogénicos en seres humanos (ATSDR, 2012). Caso similar, el Cadmio, que cuando pequeñas partículas de cadmio son absorbidas por el aparato respiratorio, En exposición crónica se ha observado anemia, disfunción renal, cálculos renales, osteoporosis, osteomalacia, trastornos respiratorios, hipertensión, trastornos nerviosos. (Londoño *et. al.*, 2016, Sharma *et al* 2021).

Entre las repercusiones del derrame en el Río Sonora, los vecinos han señalado el aumento en la frecuencia de aparición de enfermedades dermatológicas y malestares en el estómago; así como impactos en la comercialización de sus productos agrícolas ahora que riegan con agua de calidad incierta; los efectos han impactado también en el ámbito sociocultural (Aguilar *et al*, 2023). En este caso, se requiere una buena gestión de la industria, sus efectos no solo son económicamente positivos y, si no se tiene una filosofía de prevención y protección al ambiente, las consecuencias pueden ascender a panoramas devastadores, por lo que hay que dotar de opciones sostenibles para subsanar estas problemáticas.

La presencia de metales pesados en los ecosistemas afecta toda la cadena trófica iniciando un proceso de cambios en todo el entorno pues tienen diferentes rutas de acción, una vez en el medio forman una complejación de estos con ligandos orgánicos, con otros aniones o sufren volatilización siendo liberados hacia la atmósfera, o ser adsorbidos sobre la superficie de arcillas y humus volviéndose un elemento disponible para ser asimilado por la vegetación y por tanto entrando en la cadena trófica lo cual implica que los metales pesados serán transportados y viajarán hasta contaminar una nueva área repitiendo el proceso indefinidamente (Pabón *et. al*, 2020).

4.4. Marco jurídico e instituciones vinculados en materia de agua, tratamiento de agua y saneamiento

Con base en el artículo 4 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos CPEUM (1917) que establece "Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar... El Estado garantizará el respeto a este derecho." exponemos que esta disposición constitucional sienta las bases legales y obligaciones del Estado mexicano en relación con la protección y preservación de los recursos hídricos. Además, los miembros de la comunidad tenemos la responsabilidad y obligación de respetarlo y promoverlo y hacer valer este derecho.

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente la cual tienen por objeto propiciar el desarrollo sustentable y establecer las bases para: La preservación, la restauración y el mejoramiento del ambiente, el aprovechamiento sustentable, la preservación y, en su caso, la restauración del suelo, el agua y los demás recursos naturales, de manera que sean compatibles la obtención de beneficios económicos y las actividades de la sociedad con la preservación de los ecosistemas, la prevención y el control de la contaminación del aire, agua y suelo, entre otras disposiciones (LGEEPA, 1988).

Con respecto a los metales pesados y considerados en la legislación mexicana, la NOM-001-SEMARNAT-2021, establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación y parametriza metales pesados: arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr) con un promedio diario de 1.5 mg/l como máximo, en función del cuerpo receptor, mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb) y zinc (Zn), también considera grasas y aceites, la norma también considera otros valores físicoquímicos que caracterizan la calidad del agua, pero no es la única que existe, también tenemos a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano, que establece los límites permisibles de la calidad del agua, la cual regula parámetros como: Dureza total como CaCO_3 , Nitrógeno amoniacal (N-NH_3), Aluminio (Al), Hierro (Fe), Selenio (Se), Bario (Ba), por mencionar algunas otras normas referentes a la calidad del agua son: NOM-002-SEMARNAT-1996, la cual también establece límites máximos permisivos para el Cr (VI), con hasta 1 mg/l promedio diario máximo y NOM-003-SEMARNAT-1997 y las que emite la CONAGUA en materia de agua.

4.5. Vinculación internacional

Una vez vista la vinculación y los referentes a la contaminación de cuerpos de agua, así como la gestión y calidad de esta, de manera Nacional, es importante revisar cuales son las relaciones con el mundo exterior, esto debido a la imponente globalización en la que estamos contextualizados como nación. La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, aprobada en septiembre de 2015 por la Asamblea General de las Naciones Unidas, establece una visión transformadora hacia la sostenibilidad económica, social y ambiental de los 193 Estados Miembros que la suscribieron y es la guía de referencia para el trabajo de la institución en los de esta visión durante los próximos 15 años (Alicia Bárcenas *et al*, 2016). Los 193 Estados Miembros de las Naciones Unidas, junto con un gran número de actores de la sociedad civil, el mundo académico y el sector privado, entablaron un proceso de negociación “abierto, democrático y participativo”, que resultó en la proclamación de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, con sus 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS); incluye 17 Objetivos y 169 metas, llamando a cambiar nuestro estilo de desarrollo, respetando el ambiente (Figura 7) (CEPAL, 2016). De los cuales, nos enfocaremos en los siguientes; 1) De aquí a 2030, lograr el acceso universal y equitativo al agua potable a un precio asequible para todos; 2) De aquí a 2030, mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial (ONU, 2015), complementando este enfoque, este trabajo también se ajusta a lo estipulado en los preceptos de la producción más limpia (CP, por su siglas en inglés), exhorto que se refiere a diseñar procesos que permitan minimizar los efectos adversos, e implementar acciones que contribuyan a mejorar la seguridad de los ciudadanos, en los procesos de fabricación, productos y servicios, en donde se incluye la conservación de materias primas y energía, la eliminación de materiales tóxicos y la reducción en cantidad y toxicidad de las emisiones y desperdicios antes de la terminación del proceso; en los productos, se orienta a la reducción de los impactos durante el ciclo de vida del producto (Figuroa *et al.*, 2015). Demostrando una vinculación fuerte de este proyecto con la legislación y el marco jurídico mexicano y con los acuerdos internacionales.



Figura 7 ODS 2030.
Fuente: Cepal, 2016.

La producción más limpia (PML; CP, por sus siglas en inglés *Cleaner production*) emerge como una forma práctica para que la industria se preocupe por la gestión de las problemáticas ambientales, esto a partir de la segunda guerra mundial (1945) expresa Hens, colaboradores y colaboradoras en su artículo *on the evolution of “cleaner production” as a concept and a practice* (en la evolución de la producción más limpia como concepto y práctica), publicado en la revista de producción más limpia (*journal of cleaner production*) en 2018, en este mismo escrito, finalmente, los autores discuten que la PML y en general los problemas ambientales generados por la industrial no puede ser resueltos únicamente por la tecnología, pues es menester que se vea combinada la tecnología, la política, la ecología, la sociedad y aspectos éticos y administrativos, haciendo hincapié en que el monitoreo y la obtención de datos especializada y sistemática es una herramienta esencial para cumplir con los objetivos de la PML (como huellas más delimitadas y específicas), la reducción de emisiones de CO₂, el combate contra el cambio climático, gestión y calidad del agua. El éxito de la PML está fuertemente influenciado por la implementación en pequeñas y medianas empresas, pero con dificultades en los países latinoamericanos.

4.6. Tratamiento de agua residual en México

Debido al crecimiento poblacional, la intensificación de las actividades productivas y el estrés hídrico. Históricamente centrado en preservar la salud pública a través de la ingeniería sanitaria, el enfoque contemporáneo integra también la protección de los ecosistemas bajo la ingeniería ambiental, con énfasis en la sostenibilidad y la economía circular. Se estima que en América Latina, solo el 66% de la población tiene acceso a una red de alcantarillado y únicamente el 40% del agua recolectada es tratada, lo que refleja la urgente necesidad de mejorar la cobertura y eficiencia del saneamiento (Red del Agua UNAM, 2022.) En México, el tratamiento de aguas residuales ha experimentado un avance notable, pasando de enfoques meramente constructivos y de ingeniería civil hacia sistemas integrales que integran diversas disciplinas y tecnologías más sofisticadas. Esta transformación ha sido impulsada por el crecimiento poblacional, los cambios en los estilos de vida y la necesidad de dar tratamiento a aguas residuales cada vez más diversas y complejas. Actualmente, el país cuenta con una variedad de tecnologías que responden a distintas necesidades técnicas, ambientales y normativas. El tratamiento convencional se divide en tres niveles: el primario, que incluye procesos físicos como cribado, desarenado y sedimentación para remover sólidos suspendidos; el secundario, que se basa principalmente en procesos biológicos como los lodos activados, utilizados para degradar materia orgánica disuelta; y el terciario, enfocado en la eliminación de nutrientes como nitrógeno y fósforo mediante procesos como la desnitrificación, coagulación-floculación y filtración avanzada. A lo anterior se suman procesos de desinfección con cloro, ozono o luz ultravioleta para eliminar patógenos, especialmente cuando se busca el reúso del agua tratada (Comisión Nacional del Agua, 2015).

En México, el tratamiento de aguas residuales presenta una cobertura desigual entre áreas urbanas y rurales, así como una capacidad aún limitada frente al volumen generado. En 2015, se contaba con una cobertura nacional de alcantarillado del 92.8%, siendo más alta en zonas urbanas (97.4%) que en rurales

(77.5%) (INECC, 2018). Desde 2020, México ha mantenido una capacidad estable de tratamiento de aguas residuales, aunque con desafíos persistentes en cobertura, eficiencia y aprovechamiento de los recursos hídricos. Para el año 2022, se registraron 2,809 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (PTAR), con un caudal tratado de 99.5 m³/s, lo que representa aproximadamente el 56% del agua recolectada en sistemas de alcantarillado, cifra inferior a la media de países desarrollados. Asimismo, existían 2,917 PTAR de tipo industrial, con un volumen tratado de 43.6 m³/s (CONAGUA,2024). las principales tecnologías utilizadas para el tratamiento de aguas residuales se clasifican en tratamientos primarios, secundarios y terciarios. Los tratamientos primarios incluyen procesos físico-mecánicos destinados a remover sólidos gruesos, grasas y aceites. Los secundarios consisten en procesos biológicos donde microorganismos degradan la materia orgánica en condiciones aeróbicas o anaeróbicas. Finalmente, los tratamientos terciarios incluyen procesos avanzados de remoción de nutrientes como nitrógeno y fósforo mediante nitrificación-desnitrificación, remoción biológica de fósforo o coagulación-floculación. La desinfección en esta etapa puede realizarse con cloro, ozono o luz ultravioleta, Entre las tecnologías específicas más empleadas destacan los sistemas de lodos activados, que representaron el 73.56% del caudal tratado en 2022. También se usan lagunas (11.56%), filtros biológicos (4.39%), lagunas aireadas (3.65%), tratamiento primario avanzado (3.23%), reactores anaerobios de flujo ascendente (0.45%), biodiscos (0.66%) y humedales artificiales (0.76%) (CONAGUA, 2024).

4.7. Coyol como material bioadsorbente

El sujeto de estudio de esta investigación es un fruto nativo que se encuentra dentro de la República Mexicana en los estados de Yucatán, Veracruz, Chiapas, Tabasco, Guerrero y Sinaloa. El coyol (Figura 8) presenta características de interés como la resistencia a heladas, sequías e incluso a suelos ácidos en condiciones naturales tarda 5 años en germinar el fruto se vuelve maduro después de 12 meses desde la fertilización, una densidad de 150 a 200 unidades por cada hectárea y una producción de frutos de 9.6 a 25 toneladas por la misma área (Aguilar-Aguilar *et al.*, 2023).



Figura 8 Palma de Coyal, ACM,2024.

El coyol se comercializa por sus propiedades medicinales y el aceite de coco es bien cotizado en cosmética, o bien es utilizado como combustible en industrias, mientras que Regina León Ovelar et al (2016), estudió el residuo como sustrato y en enmiendas de suelos, también es aprovechado para consumo de forma natural o para la producción de alimentos. A pesar de esto el residuo de estos aprovechamientos del coyol, no se ha explorado el uso potencial del residuo (epicarpio) como adsorbente de metales pesados en aguas residuales.

Este estudio propone determinar la capacidad y eficiencia de la cáscara de Coyal (*Acrocomia aculeata*) como agente bioadsorbente en la eliminación de cromo (VI) de aguas residuales. A través de una investigación meticulosa y detallada, se busca evaluar el potencial de este material natural en la eliminación de Cr (VI) de las aguas residuales, ofreciendo así una alternativa sostenible y económicamente viable para el tratamiento de contaminantes metálicos. Este enfoque no solo pretende generar una alternativa para mitigar los efectos adversos de estos contaminantes en el medio ambiente, sino también contribuir a los esfuerzos globales de conservación y gestión de recursos hídricos, dotándole de un valor agregado al subproducto (cáscara) del aprovechamiento del coyol, pues derivado del uso del coyol, se genera este subproducto que no tiene ninguna utilidad actual.

4.8. Caracterización del adsorbente

4.8.1.Lignocelulósicos

4.8.1.1. Lignocelulosa

La lignocelulosa, compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina (Figura 9), constituye la parte principal de la estructura de las células vegetales. La biomasa lignocelulósica generada a través de la fotosíntesis representa la fuente de carbono renovable más promisoría para abordar los desafíos

ambientales actuales como la remoción de metales pesados del agua residual. El material lignocelulósico se destaca por su asequibilidad y su amplia disponibilidad en diversas condiciones climáticas y ubicaciones geográficas. Cada año, se producen alrededor de 200,000 millones de toneladas de lignocelulosa en todo el mundo (Dias *et al.*, 2023).

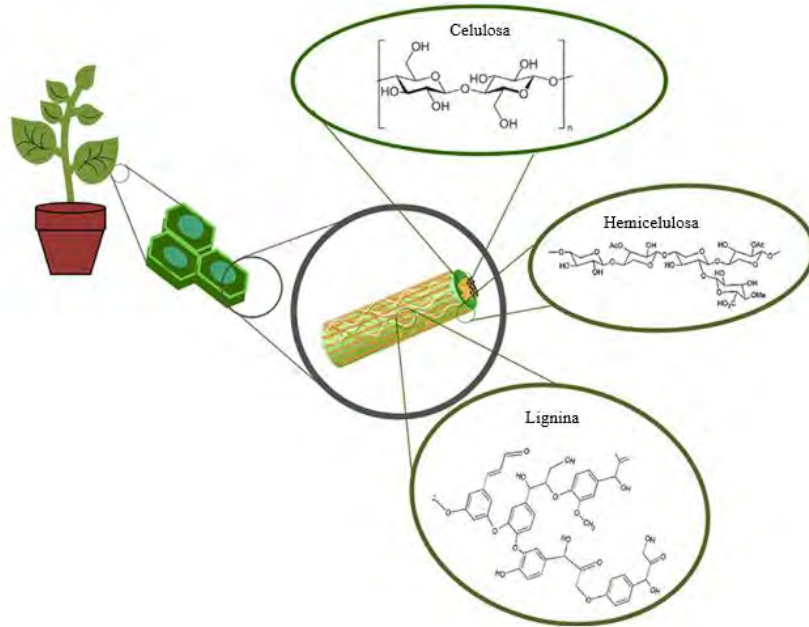


Figura 9 Estructura y composición química de la lignocelulosa
Fuente: Dias *et al.* (2023) Traducción propia.

4.8.1.2. Lignina

La lignina es un polímero ramificado formado principalmente por grupos fenólicos que forma parte de la pared celular del tejido vascular de las plantas (Lucas *et al.*, 2013). Se consideran tres tipos principales de lignina en plantas, uno que presenta lignina de tipo guayacilo e hidroxifenilo (briofitas, licofitas y gimnospermas), otro que presenta lignina de tipo siringilo, guayacilo e hidroxifenilo (predominante en angiospermas) y el que presentan los pastos (monocotiledóneas) que se compone de guayacilo, hidroxifenilo y en menor medida siringilo (Figura 10). La lignina está formada por tres principales unidades repetitivas fenilpropanoides: alcohol p-cumarílico (p-hidroxifenilo), coniferílico (guayacilo) y sinapílico (siringilo). Este compuesto tiene más de 20 enlaces, pero el principal enlace que se presenta en la lignina son los β -aril éteres (Maceda *et al.*, 2022).

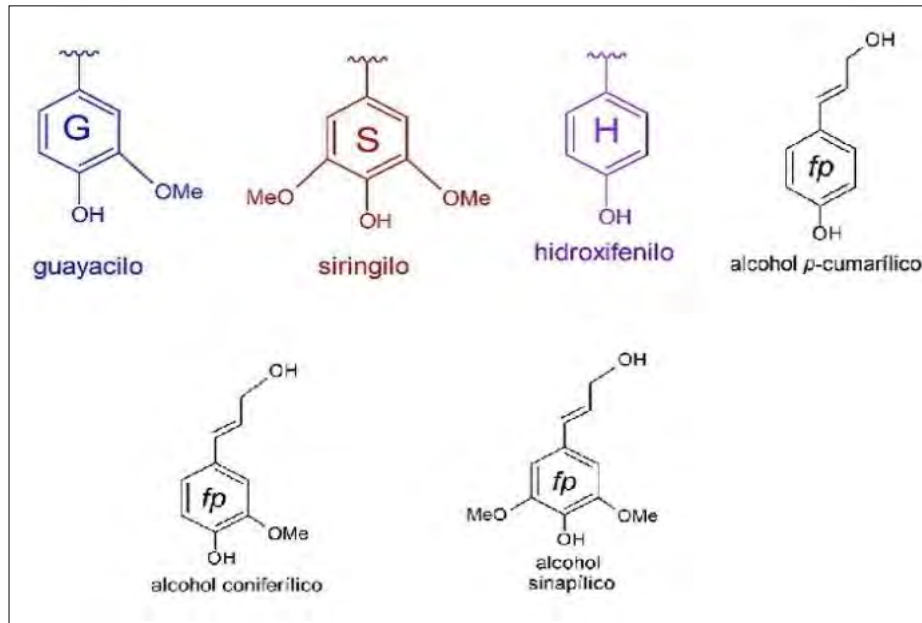


Figura 10 principales unidades repetitivas de la lignina.
Fuente: Maceda et al, 2021.

4.8.1.3. Celulosa

La celulosa (Figura 11) es un polímero natural con una estructura que se basa en enlaces glucosídicos 1,4-β. Su estructura es semicristalina (lo que significa que tiene regiones ordenadas <crystalinas>) y regiones desordenadas <amorfás>) y puede variar según la fuente de la que se extraiga. Tiene seis grupos OH en su unidades repetitiva. En el caso de la celulosa de origen vegetal, es relevante tener en cuenta la procedencia de la planta y la edad del árbol al momento de la extracción, ya que esto puede influir en el grado de cristalinidad y polimerización de la celulosa, lo que a su vez influye en sus propiedades mecánicas (Gañan et al,2017).

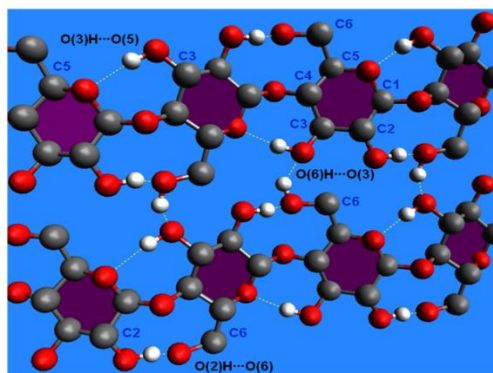


Figura 11 Dos cadenas adyacentes de celulosa mostrando el puente de hidrógeno intermolecular.
Fuente: Contreras et al (2010).

4.8.1.4. Hemicelulosa

La hemicelulosa constituye el 20% de la mayoría de las plantas. Es un polímero de diferentes unidades de monosacáridos, principalmente glucosa y xilosa, pero también manosa, galactosa, ramanosa y arabinosa, unidas en cadenas ramificadas, de alrededor de 200 unidades (Dias et al., 2023).

La caracterización del adsorbente es de gran relevancia para la implementación de un sistema de adsorción porque da información precisa y específica sobre las características fisicoquímicas del material, por lo que se tendrá información para poder explicar sus comportamientos. La caracterización espectroscópica y por microscopia permite determinar los grupos funcionales presentes en el material lignocelulósico, como la estructura física a escalas muy pequeñas (en función del método de caracterización empleado). Por ejemplo, los materiales lignocelulósicos han sido investigados debido a los grupos funcionales presentes en sus estructuras que están formados por lignina, celulosa y hemicelulosa, lo que les da su alta eficiencia en adsorción de metales en forma de sales y compuestos orgánicos (Dias *et al.*, 2023), estos grupos funcionales pueden ser identificados por algún método de caracterización como la espectroscopia por infrarrojo.

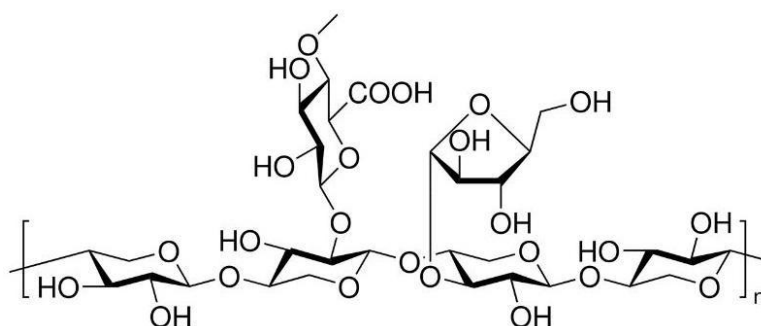


Figura 12 Hemicelulosa

4.8.1.5. Caracterización de grupos funcionales del adsorbente por Espectroscopia Infrarroja Con Transformada De Fourier (FTIR)

La espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) se emplea con el propósito de obtener la firma molecular característica de una muestra, la cual absorbe radiación infrarroja en consonancia con su configuración y enlaces químicos. Esta técnica suministra información detallada acerca de la estructura molecular a través de la identificación de una serie de bandas discernibles correspondientes a grupos funcionales en la franja del espectro electromagnético infrarrojo medio (Mata-Miranda *et al.*, 2017). Por lo que se hace una comparación con bandas bien conocidas de grupos funcionales para la comparación con las bandas obtenidas y así determinar cuáles son grupos presentes en nuestra muestra de bioadsorbente, así como los compuestos adsorbidos. La caracterización por FTIR realizada en el artículo “*Exploring the biorefinery potential of Acrocomia aculeata: A native Mexican palm for sustainable resource valorization*” del 2023, donde se expone que las bandas de enlaces C-H son observadas en las longitudes de onda $2970\text{-}2950\text{ cm}^{-1}$ y $2860\text{-}2880\text{ cm}^{-1}$, indicando la presencia de grupos funcionales de cadenas hidrocarbonadas de tipo alcano y alqueno, si estos picos presentan una intensidad alta, sugiere una alta concentración de los grupos funcionales en la muestra. El pico más grande y fuerte observado a 1747 cm^{-1} en la caracterización del núcleo y el mesocarpio de las muestras

de coyol indican la presencia de C=O (grupo funcional carbonilo), la presencia de este pico sugiere la presencia de ésteres de ácidos grasos de cadena larga en las muestras (Aguilar *et al.*, 2023).

4.9. Viabilidad técnica y económica de bioadsorbentes

Haciendo una comparación de las tecnologías de remediación ambiental en términos de su nivel de madurez tecnológica, rentabilidad, automaticidad y posible contaminación ambiental secundaria, se exponen algunas desventajas inherentes que incluyen la producción de lodos tóxicos, tiempos de tratamiento prolongados, baja eficiencia de eliminación, mantenimiento de alta tecnología, consumo de alta energía y altos costos operativos y de capital. El método de remediación basado en adsorción ha estado recibiendo cada vez más atención para la eliminación de metales pesados debido a varias ventajas que incluyen operación simple, alta eficiencia, bajo costo y regeneración favorable de adsorbentes para uso continuo. Además, la adsorción es eficaz para la eliminación de metales pesados incluso a concentraciones de metal por debajo de 0.1 mg/L (Dias *et al.* 2023). Dado que los adsorbentes obtenidos a partir de materia orgánica han sido objeto de numerosos estudios que detallan su aplicación en la eliminación de metales pesados de aguas residuales, es importante destacar su carácter económico. Por ejemplo, el biocarbón se emplea cada vez con mayor frecuencia en diversas estrategias de mitigación de la contaminación ambiental, incluyendo la purificación de entornos acuáticos, gracias a sus destacadas y singulares propiedades en la superficie. Además, se considera un adsorbente de bajo costo, sostenible y respetuoso con el ambiente (Biswal & Balasubramanian, 2023).

4.10. Isotermas de adsorción

4.10.1. Isotermas de adsorción

Las isotermas de adsorción pueden describir la interacción física entre el adsorbente y el adsorbato a una temperatura constante, en consecuencia, el entendimiento de los modelos del equilibrio es una forma esencial de la producción de los mecanismos de varios sistemas de adsorción, además las isotermas de adsorción en experimentos discontinuos se pueden utilizar para determinar el coeficiente de distribución de agua sólido (K_{id}) (Mohammad, *et al.*, 2020). Las isotermas de adsorción son ecuaciones matemáticas que describen la relación entre la cantidad de material adsorbido sobre un adsorbente y la concentración del adsorbato cuando se ha alcanzado el equilibrio a temperatura constante. Se llevan a cabo colocando un volumen determinado de solución con una cantidad conocida de adsorbato junto con varias dosis de adsorbente. La mezcla se mantiene a temperatura y agitación constante hasta que alcanza el equilibrio (Andrade *et al.*, 2007). Estas isotermas se construyen tomando en cuenta la relación que existe entre las concentraciones iniciales y finales después de una operación unitaria, así como la proporción del adsorbente, dicha relación esta descrita con la ecuación (1):

$$qe = \frac{V}{M} (C0 - Ce) \dots\dots\dots(1)$$

Donde:

q_e = Masa de soluto adsorbido por el adsorbente (mg/g)
 C_0 = Concentración inicial del adsorbato (mg/L).
 C_e = Concentración del adsorbato en el equilibrio (mg/L).
 V = Volumen de la fase acuosa (L).
 M = Masa del adsorbente (g).

Existen diferentes tipos de isoterma, los cuales estarán descritos por el comportamiento del proceso de adsorción como se muestra en la Figura 13.

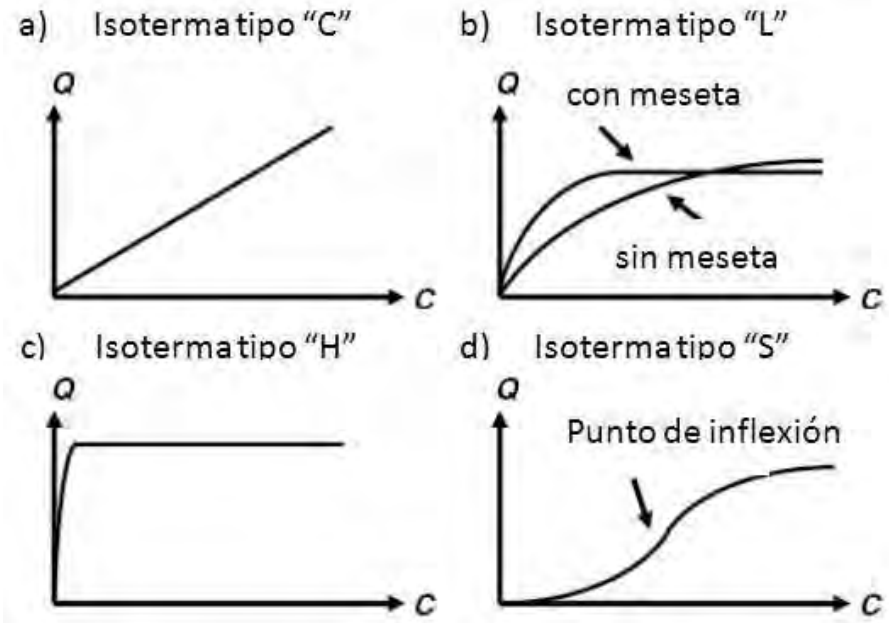


Figura 13 Tipos de isotermas.
 Fuente: Daniel O. 2012.

4.10.2. Isotherma de Freundlich

Dentro de los isotermas que son más frecuentes, se encuentra con la isoterma de Freundlich la cual describe el proceso de adsorción reversible y no ideal, no está restringido a la formación de monocapa en la que es posible su aplicación a la adsorción multicapa. En este modelo isotérmico, el calor y las afinidades de la adsorción no necesitan distribuirse uniformemente en la superficie heterogénea, La expresión define la heterogeneidad de la superficie, así como la distribución exponencial de los sitios activos y las energías de los sitios activos; esta isoterma está en su forma lineal y su forma no lineal como se muestra a continuación (Al-Ghouti & Da'ana, 2020):

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad \dots\dots\dots \text{lineal} \quad (2)$$

$$q_e = K * C_e^{1/n} \dots\dots\dots \text{no lineal} \quad (3)$$

Donde

K_F = Constante de Freundlich

C_e = Concentración de equilibrio de adsorbato en el adsorbente (mg/L)

q_e = Cantidad de adsorbato en equilibrio (mg/g)

n = orden de reacción

Así mismo en el artículo “*Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models :A review*” (Directrices para el uso e interpretación de modelos de isothermas de adsorción: una revisión) publicado en 2020 se expone que el tipo de isoterma es indicado por el valor de n , el cual tanto como K_F y n son parámetros que dependen de la temperatura. $1/n$ es la intensidad de adsorción o la heterogeneidad de la superficie que indica la distribución relativa de la energía y la heterogeneidad de los sitios de adsorbato. Cuando $0 < 1/n < 1$ la adsorción es favorable cuando $1/n$ es mayor que 1 el proceso de adsorción es desfavorable, y es irreversible cuando $1/n=1$.

4.10.3. Isoterma de Langmuir

Se ha utilizado para cuantificar la capacidad de adsorción de varios bioadsorbentes. Se identifican y clasifican seis mecanismos de adsorción diferentes debido a la diversidad química de la superficie y la geometría estructural de los materiales sólidos, donde la superficie tiene sitios de adsorción elementales idénticos capaces de albergar una sola molécula adsorbida, o bien, donde hay más de un tipo de sitios de adsorción elementales disponibles en la superficie y cada sitio puede adaptarse a una sola molécula adsorbida o un material amorfo que se trata como un continuo lo cual podría consistir en un número difícil de contar de varios sitios de adsorción con diversas afinidades de adsorbato (Mohammad *et al.* 2019) (Figura 14).

En la Figura 14 vemos los tipos de adsorción, donde se describe; I. Simple, II. Adsorción de multi sitio III. Adsorción generaliza de Langmuir, IV. Adsorción cooperativa, V. Adsorción disociativa y VI. Adsorción de multicapa. Dado que el proceso de adsorción depende del adsorbente, este debe tener una buena cinética, así como buena capacidad de adsorción. Buenas características de porosidad permiten que las moléculas lleguen al interior del adsorbente hacen que sea adecuado para realizar con éxito el proceso de adsorción (dependiendo de la naturaleza del adsorbente y el adsorbato). (Al-Ghouti, 2020).

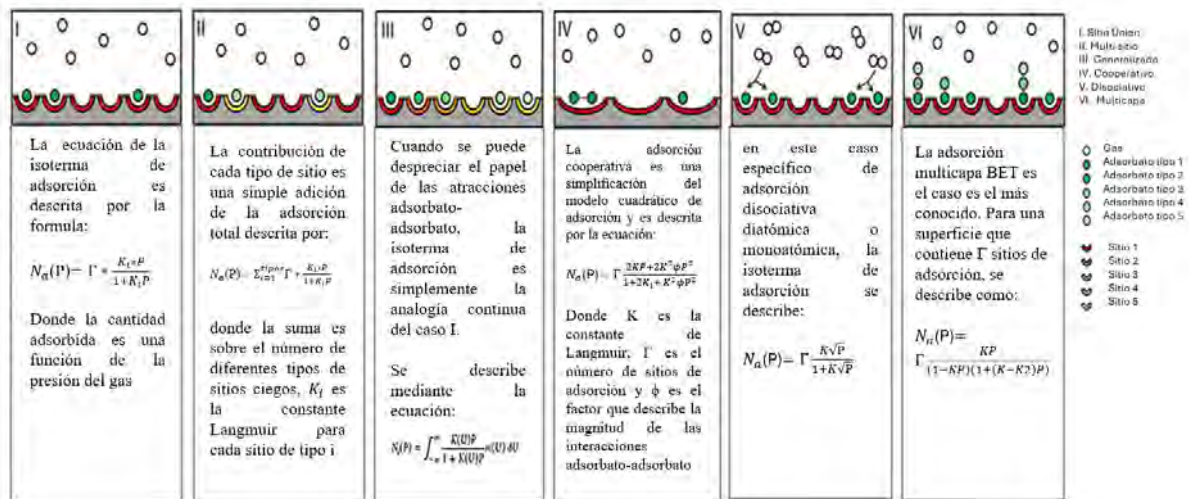


Figura 14 Seis clasificaciones de isothermas de adsorción de Langmuir
 Fuente: modificación de Mohammad et al.2022 De SwensonandStadie,2019, traducción propia.

4.11. Cinética de adsorción

4.11.1. Pseudo-primer orden y pseudo-segundo orden

Los modelos de pseudo-primer orden y pseudo-segundo orden son modelos derivados de la isoterma de Freundlich, sobre la base de la Teoría Estadística de $C_0 \gg C_e$ empleados cuando la condición donde C_0 es muy cercano a C_e , pero estos modelos no son los únicos, ya que para procesos de fase sólido-solución, o sólido-gas son empleados el modelo de Elovich, orden fraccional de Avrami y otros modelos cinéticos, como se muestra en la Figura 15, donde teta es la tasa de recubrimiento (Rohollah Ezzati, 2020)

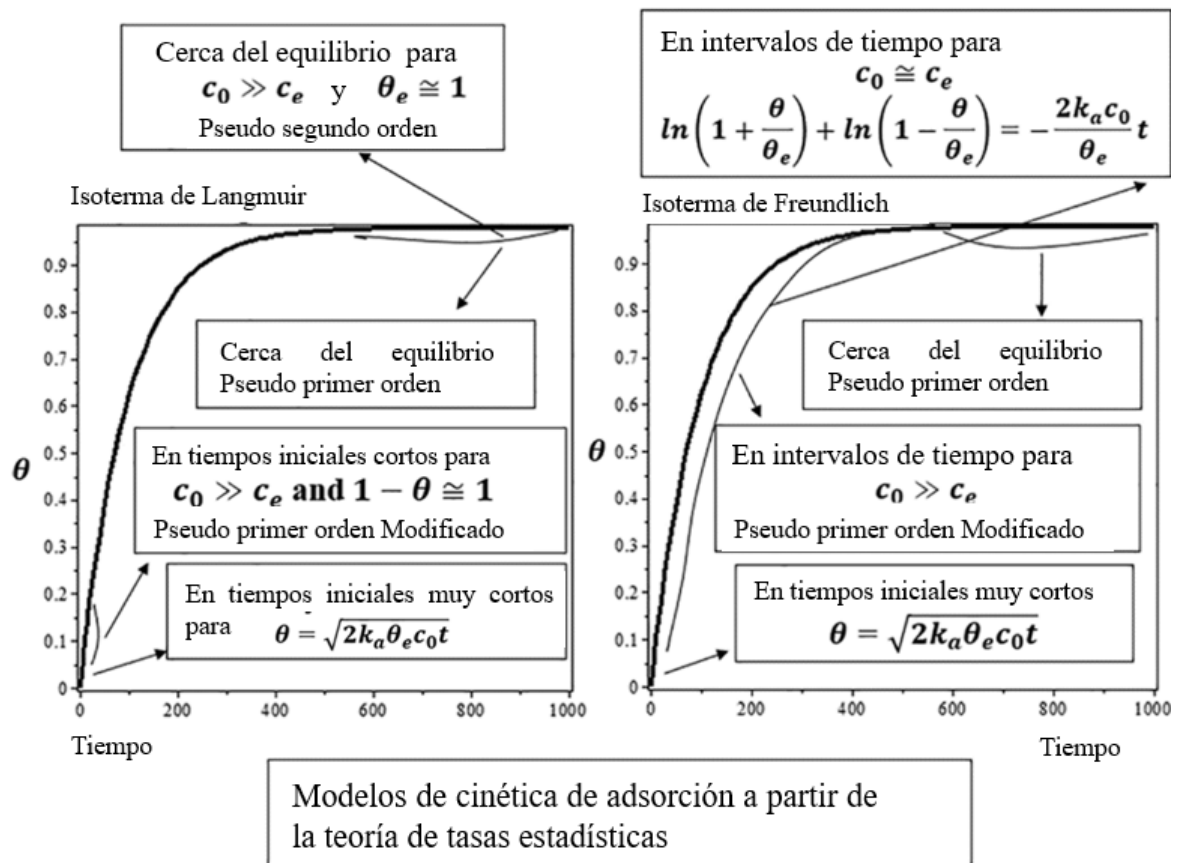


Figura 15 Cinética de adsorción para las isothermas de Langmuir y Freundlich en diferentes tiempos y condiciones sobre la base de la teoría de tasas estadísticas.
 Fuente: Ezzati (2020), Traducción propia.

4.11.2. Recuperación y disposición del adsorbente

Posteriormente a la adsorción, el objetivo es recuperar el adsorbente y el adsorbato para su correcta disposición, reutilización o reciclaje según sea el caso y las características de cada uno del proceso. Para tales efectos existen diferentes métodos para poder separar los materiales, por ejemplo: calentamiento, lavado, oxidación, electro regeneración, destilación al vacío o, actualmente existe una tendencia a realizar inmobiliaria o decoraciones con acrílico, donde se encapsula biomaterial (principalmente madera). Aunque algunos autores mencionan que existen altos costos durante la regeneración de adsorbentes, como es el caso del carbón activado. (Ayub & Changani, 2014).

4.11.3. Método de superficie de respuesta

Es un conjunto de técnicas utilizadas en el estudio de la relación entre una o más respuestas y un conjunto de factores o variables independientes y donde el objetivo es optimizar dichas respuestas permite al investigador inspeccionar una solución, que se puede mostrar como una superficie, cuando los experimentos investigan el efecto que tiene el variar factores cuantitativos en los valores que toma una variable dependiente, este método puede ser explicado matemáticamente por el modelo lineal de

primer orden con interacciones, primer orden (lineal) sin interacciones o productos cruzados (Figuroa *et al*, 2003). Este método se utiliza para hacer más eficiente el método experimental.

Debió a que el diseño de un experimento es la secuencia completa de los pasos que se deben tomar de antemano, para planear y asegurar la obtención de toda la información relevante y adecuada al problema bajo investigación, buscando ahorrar dinero, tiempo, personal y material experimental que se va a utilizar. La metodología de superficie de respuesta está sustentada en la estimación de los efectos de los factores, donde se hace una combinación de los tratamientos, tomando en cuenta si son valores cuantitativos o cualitativos y la cantidad de variables y se categorizan como alto y bajo, lo que ayuda a construir la superficie de respuesta (Figura 16), realizando un efecto promedio de cada variable, así como de la interacción (Nóchez *et al*, 2009). Para ello existen softwares especializados en este método, como el programa computacional “STASTICA” el cual es un *software* de análisis estadístico que se utiliza para realizar una variedad de tareas relacionadas con el análisis de datos y la estadística que facilita el diseño y análisis de experimentos para evaluar el impacto de variables independientes en una respuesta o resultado específico, por esto STASTICA utilizado en una amplia gama de campos, como la investigación científica, la industria, la medicina, la educación y más, donde se requiere análisis estadístico para comprender y tomar decisiones basadas en datos.

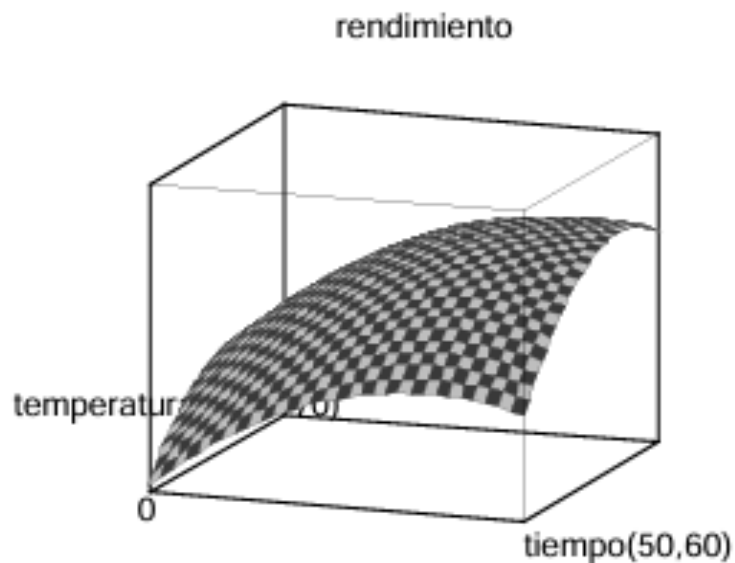


Figura 16 Ejemplo de superficie de respuesta con curvatura
Fuente: Nóchez et al. (2009)

5. ESTADO DEL ARTE

5.1.1. Bioadsorción con materiales lignocelulósicos como alternativa sostenible

Hasta mediados de los 70, la mayoría de las aplicaciones de la celulosa ya sea aislada o en combinación con otros componentes lignocelulósicos, se centraban en las industrias de la pulpa y el papel, y en la industria textil y sus derivados. actualmente, el desarrollo de materiales como la celulosa microcristalina ha llevado a encontrar uso como aditivo en alimentos a partir de la celulosa, en la fabricación de productos farmacéuticos e incluso en la producción de productos de soldadura (Gañan *et al.*, 2017). La absorción de fase sólida se usa mucho para metales y metaloides por su rapidez, sencillez y poca generación de residuos. La forma más usada de los lignocelulósicos es como adsorbente es como la fase sólida de la adsorción, y los más comunes son residuos de algodón, fibra de palma, coco, maíz y arroz. Estos materiales son investigados porque tienen presentes grupos funcionales en su estructura que son intrínsecos de la lignina, incluso algunos adsorbentes lignocelulósicos son utilizados sin algún tratamiento previo (Dias *et al.*, 2023). Virar la perspectiva de buscar materiales renovables provenientes de diversas industrias, especialmente en la biomasa lignocelulósica como insumo principal para fabricar adsorbentes innovadores, es debido a su bajo costo y facilidad de modificación química, lo que los convierten en una alternativa atractiva para el desarrollo de bioadsorbente eficientes (Cardoso L., 2021) y con ventajas dirigidas a la sostenibilidad, debido a la reducción de residuos, la introducción de estos residuos como materias primas con valor agregado para su aprovechamiento en concordancia con el objetivo del saneamiento de agua residual. estos subproductos han mostrado resultados prometedores en la eliminación de metales pesados, como el arsénico, aportando beneficios ambientales y económicos, debido a que la producción de bioadsorbentes es eficientes con alta capacidad de adsorción y la posibilidad de reutilización en varios ciclos de adsorción. Dado el avance hacia una economía circular y sustentable, es probable que la industria aumente su interés en estos bioadsorbentes lignocelulósicos para su aplicación en el tratamiento de agua y aguas residuales, contribuyendo a una gestión más ecológica de los contaminantes (Cardoso L. *et al.*, 2021).

El marco de la investigación en bioadsorbentes nos ponen de frente al trabajo de Hajar Belhassan *et al.*, (2023) el cual se enfoca en la eficiencia de remoción de metales pesados de aguas residuales usando carbón crudo, en donde se concluye que el tamaño más pequeño de partícula es más eficiente, con porcentajes de remoción de 86% de DQO, 69% de sulfatos y 100% de los metales pesado más dominantes (Ni, Ag y Hg), (Belhassan *et al.*, 2023).

Otro de los estudios recientes sobre la remoción de metales pesados del agua utilizando residuos bioadsorbentes es la investigación de Fabre *et al.* (2020), donde se evaluó la dosis de adsorbente y el tiempo de contacto, en dosis realistas de contaminantes, en la universidad de Portugal, se llevaron a cabo la valoración de la cáscara de plátano para la remoción de mercurio en concentraciones de 0.05 mg/L. las cáscaras de plátano fueron evaluadas en agua de mar, un efluente real y agua de la llave, obteniendo que el proceso es descrito de mejor forma mediante los modelos de pseudo segundo orden y el modelo de cinética de Elovich, el proceso fue mejor descrito por la isoterma de Freundlich. El bioadsorbente mostró una alta afinidad por el Hg (II), así mismo, la calidad del agua potable fue logrado. También mostró mayores niveles de adsorción en función de la cantidad de cáscaras de plátano y el

tiempo de contacto, obteniendo una capacidad de absorción descrita por la isoterma de Langmuir de 0.75 mg/g. La aplicación exitosa en matrices de agua complejas demostró la aplicabilidad de las cáscaras de plátano en sistemas realistas con bajas concentraciones iniciales de Hg (II), como las presentes en el ambiente. Considerando una aplicación industrial, el tratamiento de agua en una unidad de dos etapas a contracorriente es capaz de producir aguas purificadas de alta calidad con menores dosis de cáscaras de plátano, generando menores cantidades de residuos contaminados, concluyen los autores.

Moreira *et al.* (2022) en su investigación “Disminución de cromo y cobre en aguas residuales utilizando cáscaras de naranja y banano (*Citrus sinensis* y *Musa paradisiaca*) como bioadsorbente” estudiaron la cáscara de naranja y plátano para la eliminación de Cromo (VI) de aguas residuales, encontrando que usando cáscara de naranja con un tratamiento que consiste en 2 lavados, uno con agua destilada seguido de otro usando etanol al 96%, seguido de un secado manual, una hidrólisis alcalina, un tercer lavado, secado a 105 °C, molienda, reticulación, filtrado, secado y tamizado, puesto a condiciones de pH 4, 3 por 2h, obteniendo un porcentaje de remoción de cromo (VI) de 91.1%, así como una remoción de cobre (II) de 97.1% bajo las condiciones de pH 5.5, 5 g/l, 30 min. Se realizó el cálculo de remoción usando cáscara de plátano, la cual se trató con una desinfección y lavado, secado manual, secado a 105 °C, molienda y tamizado, obteniendo porcentajes de remoción de 92,96% para cromo (VI) a condiciones de pH 3, 4 g/l, 4h, de igual forma, para la remoción de Cu (II) a condiciones de pH 5.8, 3 g/l, 30 min, se obtuvo 69.57 %. Aplicando modelos de pseudo primer orden, pseudo segundo orden y Elovich, para describir la cinética de adsorción obteniendo que ambas cáscaras el modelo de Elovich es el que mejor describe el proceso de adsorción.

Para un aprovechamiento de los bioadsorbente hay que considerar diversidad de características, procesos u operaciones que nos pueden ayudar a volver más eficiente la adsorción, por ejemplo; abundancia y renovabilidad, estructura porosa, grupos funcionales, superficie específica, capacidad de intercambio iónico, biocompatibilidad, concentraciones, tiempos de contacto, modificación química o física, funcionalización, costo efectivo, potencial de reciclaje o bien modificación de los adsorbentes como: tratamiento químico, activación, impregnación, modificación con polímeros, cargado iónico, acidificación o tratamientos térmicos.

En la Tabla 2 se sintetizan algunos de los estudios relacionados a la bioadsorción para la remoción de metales pesados, de igual forma se mencionan otros biomateriales que han sido estudiados para tales efectos, describiendo las características de experimentación de cada uno de los procesos.

Tabla 2: Bioadsorbentes para la remoción de metales pesados y sus características de experimentación.

Adsorbente		Condiciones				Resultado	Referencia	
Bioadsorbente	Metales removidos	pH	Tratamiento	Tiempo de contacto	Concentración de contaminante	Remoción	Autor	Año
Residuos de conchas de ostión CaCO ₃	cobre (II) y cadmio (II)	5	molienda	600 a 840 min*	100 y 300 mg/l para cadmio (II) y de 60 y	Máximo Cd (II) de 91.4% y	Ramón de los Santos, <i>et al.</i>	2019

quitosano (Q) o poli(β-1-4)-2-amino-2-deoxi-D-glucopiranos	Zn (II)	5	Des acetilación	48h*****	190 mg/l para cobre (II)*	cobre (II) de 19.5%		
carbón crudo	Ni, Ag y Hg	4-10	Triturado y tamizado, secado a 80 °C	Intervalos de 10 min. ***	2 300 mg/l*****	5 08-574 mg/g,	flores-Álamo, <i>et al.</i>	2015
cáscara de plátano	Hg (II)	6	Lavado congelado, liofilizado, molido y separado	Diferentes tiempos por 72 horas	50 µg/ dm ³	0.75mg/g	Elaine Fabre <i>et al</i>	2020
Bagazo de caña de azúcar	Cr (VI) Cu	NI	química con ZnCl ₂ .	NI	NI	87% 96%	Días Flavio <i>et. al.</i>	2023
Cáscara de piña	Cu (II), Pb (II), Cd(II)	NI	Sin tratamiento modificada con (MPFF-PY), (MPPF-DMRT),	NI	NI	Mayor que con la fibra sin tratar	Días Flavio <i>et. al.</i>	2023
Cáscara de coco	Iones de Cd	7	Sin tratamiento		200-1000 mg	NI	Días Flavio <i>et. al.</i>	2023
Cáscara de naranja	Cr (VI)	4	Lavado con agua y alcohol, secado	2h	3g/L	91.1%	Moreira <i>et al</i>	2022

*Para Análisis de las cinéticas de adsorción e isothermas, *** adsorción en columna con cambios de flujo, *****NI= No se menciona, *****para las pruebas de equilibrio en Bach.

Aunado a la información de la Tabla anterior, se añade de manera complementaria la Tabla 3, con la finalidad de ampliar e ilustrar las capacidades de adsorción de metales pesados de diversos materiales lignocelulósicos, los cuales pueden ser tratados mediante alguna modificación química o física, convertidos en carbón activado o carbón vegetal. La información emana de una serie de investigaciones referentes a la utilización de lignocelulósicos para la remoción de metales pesados a lo largo del mundo. Se toma a Bachmann *et al* (2022) donde en su artículo “*Adsorption of Cr (VI) on lignocellulosic wastes adsorbents: an overview and further perspective*” (adsorción de Cr (VI) en adsorbentes de residuos de lignocelulósicos: una visión general y una perspectiva futura), donde se realizó una revisión de factores de relevancia en los procesos de adsorción, así como las cinéticas e isothermas que los describen. De igual forma, se retoma la investigación de Días *et al* (2023) “*Lignocellulosic materials as adsorbents in solid phase extraction for trace elements preconcentration*” (materiales lignocelulósicos como adsorbentes en fase sólida para la extracción de elemento traza en preconcentraciones), en la cual se presenta un panorama general de las estrategias de adsorción con materiales lignocelulósicos,

esencialmente en aquellas estrategias empleadas para la detección de metales y metaloides, considerando las fuentes de los materiales, características fisicoquímicas y variables de operación para conseguir las capacidad reportadas. De igual forma, la investigación de Cardoso *et al* (2021) “*A review on the use of lignocellulosic materials for arsenic adsorption*” (Una revisión sobre el uso de materiales lignocelulósicos para la adsorción de arsénico.) en la cual se reporta una revisión bibliométrica de las tendencias de uso de materiales lignocelulósicos para le remoción de arsénico de sistemas acuosos donde se consideran sus características fisicoquímicas así como las variables de operación, exponiendo las capacidad de adsorción de diferentes materiales en función de dichas características.

Tabla 3 Materiales lignocelulósicos empleados en la remoción de metales pesados, Modificada de Cardoso *et al* (2021), Días *et al* (2023) y Bachmann *et al* (2022)

Lignocelulósico	Capacidad de remoción (mg/g)	Metal
Cáscara cruda de almendra	4.6	As (III)
Carbón vegetal de bagazo de caña de azúcar	6.69	As (III)
Carbón vegetal de madera de pino	0.59	As(VI)
Carbón vegetal de pajas de maíz	6.88	As(VI)
Bambú	121.7	Ni (II)
Cáscara de naranja	37.1	Zn
Cáscara de mandarina	35.7	Zn
Cáscara de piña	37.2	Zn
Fibras de coco	285.7	Cd
Fibras de celulosa de cáscara de coco	38	Cu (II)
Fibras de celulosa de cáscara de coco	59.5	Cd (II)
Fibras de celulosa de cáscara de coco	73	Pb (II)
Aserrín	9.5	Cr (VI)
Carbón activado de cáscara de coco	42	Cr (VI)
Carbón activado de aserrín de "teakwood"	72.46	Cr (VI)
Carbón activado de cáscara de roble	17.69	Cr (VI)
Cáscara de pomelo cruda	0.32	Cr (VI)
Cáscara de naranja	0.39	Cr (VI)
Residuos de té	88.49	Cr (VI)
Hojas de piña modificadas	4.57	Cr (VI)
Cáscara de <i>Sterculia guttata</i>	47.61	Cr (VI)
Ceniza de cáscara de arroz negro	9.89	Cr (VI)

6. JUSTIFICACIÓN

La creciente demanda de bioproductos sostenibles para satisfacer las necesidades humanas y las exigencias de la industria ha resaltado la importancia de incorporar materias primas renovables en la economía actual. En este contexto, se ha seleccionado la cáscara del fruto de la palma *Acrocomia aculeata* (Coyol), originada del aprovechamiento del coyol en el sector agroindustrial del sureste de México, como un recurso valioso. La utilización de la cáscara de este fruto, un residuo generado durante el procesamiento de la pulpa y la semilla empleadas comúnmente en la elaboración de alimentos y

biocombustibles representa una oportunidad para promover prácticas de economía circular y producción más limpia. Esta iniciativa se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y los principios de la química verde, al valorizar un subproducto agroindustrial compuesto principalmente por material lignocelulósico como agente bioadsorbente para la remoción de contaminantes en cuerpos de agua, particularmente metales pesados como el Cr(VI). En este marco, se plantea como propósito central determinar la capacidad de adsorción de la cáscara de coyol como agente bioadsorbente para la remoción del cromo (VI) de aguas residuales, dada su abundancia, bajo costo y carácter renovable. Asimismo, se busca desarrollar un bioadsorbente a partir de estos residuos agroindustriales, mejorando su eficiencia mediante un pretratamiento destinado a la eliminación de compuestos extraíbles, lo cual optimiza la exposición de grupos funcionales activos en su superficie. Esta mejora puede aumentar significativamente la capacidad de retención de iones metálicos, permitiendo una mayor interacción entre el bioadsorbente y el contaminante objetivo. Así mismo se pretende determinar el porcentaje de remoción de cromo (VI) por parte del bioadsorbente derivado de la cáscara de coyol bajo condiciones experimentales controladas, considerando como variables principales el tiempo de contacto, el pH, la concentración inicial del contaminante y la cantidad de adsorbente utilizado. Para ello, se aplicará un diseño experimental basado en la metodología de superficie de respuesta, que permitirá optimizar estas variables y modelar su influencia sobre la eficiencia del proceso de adsorción.

Esta estrategia facilita no solo el análisis estadístico de los resultados, sino también la identificación de las condiciones óptimas para maximizar la remoción del Cr(VI), ajustando a las condiciones de operación previamente optimizadas para confirmar el rendimiento del material desarrollado. Esta etapa es fundamental para demostrar la aplicabilidad del bioadsorbente en el tratamiento de aguas contaminadas, lo cual podría derivar en beneficios económicos y ambientales significativos. No solo se contribuiría así a la mitigación de los efectos adversos provocados por la presencia de cromo (VI) en cuerpos de agua, sino que también se fomentaría el aprovechamiento integral del fruto del coyol, impulsando la generación de productos de valor agregado y promoviendo un modelo de desarrollo más sostenible y equitativo.

7. HIPÓTESIS

- ✓ Nula (H0): La cáscara de coyol (*Acrocomia aculeata*) es eficiente como adsorbente en la remoción de Cromo (VI) de las aguas residuales, ofreciendo una alternativa sostenible y de alta eficiencia en comparación con los métodos convencionales de tratamiento.
- ✓ Hipótesis Alternativa (H1): La cáscara de coyol (*Acrocomia aculeata*) no es eficiente como adsorbente en la remoción de Cromo (VI) de las aguas residuales, por lo tanto, no es una alternativa sostenible, ni de alta eficiencia en comparación con los métodos convencionales de tratamiento.

8. OBJETIVOS

General

- ✓ Determinar la capacidad de adsorción de la cáscara de Coyol (*Acrocomia aculeata*) como agente bioadsorbente para la remoción del cromo (VI) en aguas residuales.

Específicos

- Caracterizar la cáscara de coyol (*Acrocomia aculeata*) para determinar las características fisicoquímicas de importancia como bioadsorbentes en la remoción de metales pesados de aguas residuales
- Desarrollar un bioadsorbente a partir de los residuos de coyol mejorando su capacidad de bioadsorción de metales pesados, mediante un pretratamiento de eliminación de extraíbles.
- Determinar el porcentaje de remoción de cromo (IV) del bioadsorbente derivado de la cáscara de coyol bajo condiciones experimentales, en función de las variables: tiempo de contacto, pH, concentración del contaminante y cantidad de adsorbente, aplicando un diseño experimental de superficie de respuesta.
- Validar el rendimiento del bioadsorbente derivado del coyol mediante pruebas con aguas residuales sintéticas, ajustando las condiciones de adsorción para maximizar la remoción de contaminantes.

CAPITULO II

9. MATERIALES, MÉTODOS E INFRAESTRUCTURA

Los experimentos se realizan en las instalaciones del LaNDACBio (laboratorio nacional de la calidad y aseguramiento del biocombustible), así como el laboratorio de caracterización del CMP+L, ambos pertenecientes al Instituto Politécnico nacional, los cuales cuentan con los materiales, reactivos y equipos necesarios para realizar la caracterización y los ensayos de adsorción.

La metodología empleada para esta investigación se puede simplificar en cinco pasos, los cuales son: obtención y separación de la muestra, caracterización fisicoquímica, diseño y montaje experimental, evaluación de adsorción, y evaluación de desorción y recuperación. Estos pasos constarán de técnicas e instrumentos para su implementación, caracterización, documentación, registro y análisis. De hecho, la metodología se puede ver esquematizada y simplificada en la Figura 17.



Figura 17 Esquema metodológico.
Fuente: elaboración propia, 2024.

9.1. Obtención y separación de la muestra

Inicialmente, se recolectan frutos de coyol, con un peso total de 5 kg, procedentes del municipio de Copainalá, Chiapas, México. Las muestras fueron almacenadas a una temperatura de 4 °C para preservar su integridad hasta el momento de su utilización. Para la caracterización, se obtuvieron al azar 100 g aproximadamente, lo que equivale a 5 de estos frutos de estos frutos. Posteriormente, se procedió a la separar manual de las partes del fruto (Figura 18). Utilizando una espátula, se separará la cáscara, la pulpa, endocarpio y el núcleo. Cada componente del fruto fue pesado de forma individual utilizando una balanza analítica marca *Sartorius cp 324s* con una precisión de 0.1 mg. La muestra se almacena en recipientes de aluminio, para su posterior tratamiento para la determinación de humedad.



Figura 18 Componentes del coyol separados, a) pulpa, b) cáscara, c) cáscara de núcleo, d) núcielo.2024

9.2. Caracterización fisicoquímica de la cáscara

9.2.1. Determinación de humedad y peso seco

En el Laboratorio Nacional de Desarrollo y Aseguramiento de la Calidad de Biocombustibles (LanDacBio), se llevó a cabo la caracterización del fruto de coyol, el cual está compuesto de 4 partes, la cáscara, la pulpa, el endocarpio y la semilla. Para determinar el peso seco y la humedad, se utilizaron un recipiente el cual fue a peso constante y posteriormente se añadirán 20g de muestra, es decir, en cada recipiente se agregaron la de cáscara de coyol (epicarpio), la pulpa, el núcleo y la cáscara del núcleo, se llevó a una estufa marca Memmert® a 105 ± 2 °C, por 24 horas. Posteriormente se pesó cada hora hasta que la diferencia de porcentaje en el peso sea menor al 5% (peso constante). El porcentaje de humedad (H%) se calculó con la fórmula 4

$$H\% = \frac{\text{peso humedo (g)} - \text{peso seco (g)}}{\text{peso humedo (g)}} \times 100 \dots \dots \dots (4)$$

Cabe señalar que toda la caracterización se realizó por triplicado, calculando la desviación estándar de los valores obtenidos por medio del *software* “Excel”.

9.2.2. Eliminación de extraíbles

La preparación adecuada de la cáscara de coyol mediante la eliminación de extraíbles (azúcares, ceras y aceites) es un paso esencial para optimizar su desempeño como bioadsorbente en el tratamiento de aguas residuales, asegurando su efectividad, estabilidad y sustentabilidad en aplicaciones como bioadsorbente. En la eliminación de azúcares de la cáscara del coyol, se añadieron 10g de la muestra en un matraz balón de fondo plano. Se realizó una extracción por el método Soxhlet, con una recirculación por 6 horas a diferente temperatura (20°C, 40°C y 60°C), usando agua desionizada como solvente (100ml por extracción). Se realizó una extracción cada 2 horas. Esta extracción líquida se sometió a una cuantificación de azúcares reductores por el método DNS, mientras que se recuperó 0.1g de fase sólida

del filtrado, mediante una filtración por papel Whatman grado 40 para su determinación por FTIR. Para eliminar el contenido de extraíbles hidrofóbicos, es el mismo procedimiento, pero con alcohol isopropílico como disolvente (100ml por extracción). después del periodo de extracción, se recuperó el solvente por rotación con un rotador Buchi® Brand, con giro automático, temperatura del baño de agua a 75°C y una presión de 150mbar, bajando de 100 en 100 desde 550mbar para evitar proyecciones. Se dejó un remanente líquido para poder extraer los solubles en alcohol del matraz, posteriormente se colocó en un vidrio de reloj y se deja secar, obteniendo un polvo que se identifica por medio de FTIR.

Se realizó la curva de calibración haciendo reaccionar diferentes concentraciones de azúcares reductores por el método DNS desde 0 a 2 g/l en intervalos de 0.4 g/l. Se leyó en el espectrofotómetro Perkin-Elmer modelo *Frontier* a una longitud de onda de 540 nm (Tabla 4 y figura 19), el coeficiente de correlación y la ecuación de la gráfica lineal se obtuvieron a través del software *Excel*, donde se obtuvo una correlación de 0.9862, lo cual indica una correlación lineal extremadamente fuerte entre las variables absorbancia (cm⁻¹) y concentración (g/l), que es descrita por la expresión $y=0.2599x-0.0248$.

Tabla 4 Curva de calibración para la determinación de azúcares reductores mediante el método de DNS

Concentración AR (g/l)	Lectura (cm ⁻¹)
0	0
0.4	0.053
0.8	0.161
1.2	0.315
1.6	0.383
2	0.499
R ²	0.9862
Ecuación	$y=0.2599x-0.0248$

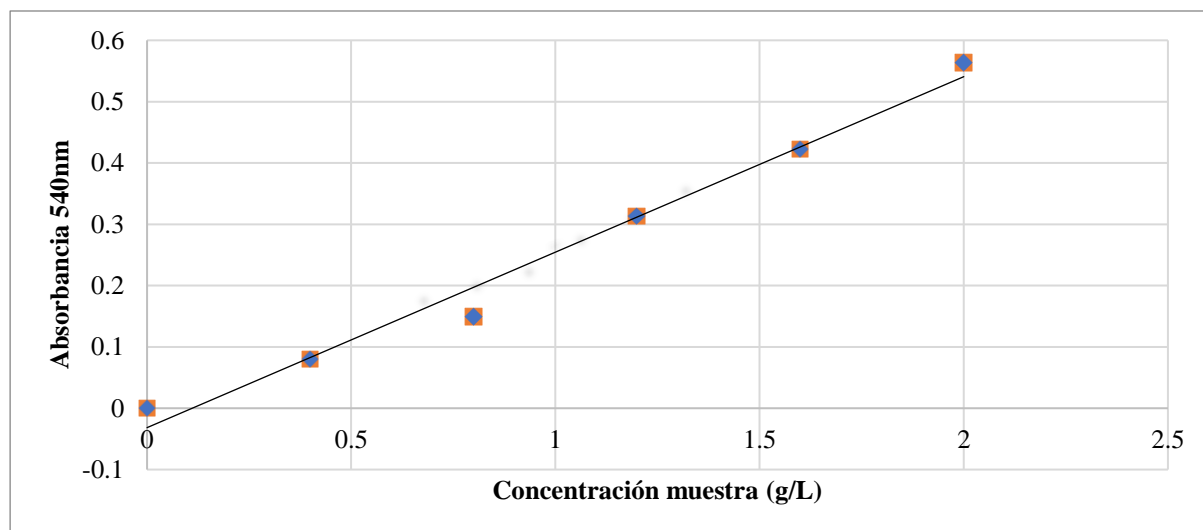


Figura 19 Curva de calibración de azúcares reductores absorbancia en función de la concentración

9.2.3. Caracterización por FTIR

Se utilizó el espectrofotómetro Perkin-Elmer modelo *Frontier* FTIR, equipado con ATR. Los datos fueron colectados al realizar escaneos, con una resolución de 4 cm⁻¹ en un rango de 4000–600 cm⁻¹.

La muestra de coyol se trituró y se secó a 80°C por 8 horas previo al escaneo. Se utilizó cáscara en polvo, debido a sus diferentes características de la parte interna y externa. Asimismo, se realizó la lectura de la cáscara a un tamaño de 2 mm, con la finalidad de descubrir si existían diferencias sustanciales entre la parte interna y externa. De igual forma, se analizaron por este método los residuos de los lavados con agua, los cuales se filtraron y secaron a 105°C para obtener los sólidos suspendidos presentes. Con respecto a los residuos de los lavados con alcohol isopropílico, se recuperó el alcohol con el rotavapor, dejando un remanente que se vertió en un vidrio de reloj y se dejó secar, obteniendo un polvo que fue leído.

9.2.4. Caracterización por SEM

Se recolectaron 0.5 g de cáscara de coyol (triturada y tamizada a 2 mm), en crudo, después del lavado con agua y después del lavado con agua y alcohol isopropílico (sin extraíbles), secas. Dichas muestras se guardaron en un lugar seco en tubos Eppendorf y se leyeron en el Laboratorio Multidisciplinario de Caracterización de Nanoestructuras y Materiales del IPN.

9.2.5. Caracterización por TGA

Se recolectan 0.5 g de cáscara de coyol (triturada y tamizadas a 2mm), en crudo, después del lavado con agua y después del lavado con agua y con alcohol isopropílico (sin extraíbles), secas. dichas muestras se guardan en un lugar seco en tubos Eppendorff. El análisis termogravimétrico (TGA) se realizó con un aparato PerkinElmer STA6000. Para este análisis se utilizó una muestra de 30 miligramos, que incluye la cáscara de coyol, la cáscara tratada (sin lípidos ni azúcares) y los materiales obtenidos por los diferentes métodos. El análisis se llevó a cabo en un entorno de nitrógeno, manteniendo un flujo de 10 mL por minuto, y la temperatura se varió de 30 °C a 800 °C. La velocidad de aumento de la temperatura se fijó en 10 °C por minuto. Antes de realizar el TGA, las muestras se calentaron inicialmente a 105 °C y se mantuvieron a esta temperatura durante cuatro minutos en condiciones isotérmicas para eliminar cualquier resto de humedad, después del secado, las muestras se sometieron a TGA, y los datos resultantes se analizaron utilizando el software Pyris, versión 13.3.1.0014, proporcionado por PerkinElmer. Además del TGA, también se realizó un análisis termogravimétrico derivado (DTG). Este análisis complementario es fundamental para determinar la temperatura a la que la biomasa experimenta su máxima pérdida de masa, arrojando así luz sobre las características térmicas de las muestras, incluida la eficiencia de la descomposición del material lignocelulósico. Para conocer el porcentaje de cada componente en la cascara de coyol se realizan los siguientes cálculos (Aguilar F., et al., 2024, Cutiño,M., 2011).

$$10. \% \text{ de Humedad} = \frac{\text{Masa perdida entre } 0 \text{ y } 100 \text{ }^{\circ}\text{C}}{\text{Masa total de la muestra}} * 100 \dots \dots \dots (5)$$

$$11. \% \text{ de Extractables} = \frac{\text{Masa perdida entre } 100 \text{ y } 250 \text{ }^{\circ}\text{C}}{\text{Masa total de la muestra}} * 100 \dots \dots \dots (6)$$

$$12. \% \text{ de Hemicelulosa} = \frac{\text{Masa perdida entre } 250 \text{ y } 350 \text{ }^{\circ}\text{C}}{\text{Masa total de la muestra}} * 100 \dots \dots \dots (7)$$

$$13. \% \text{ de Celulosa} = \frac{\text{Masa perdida entre } 350 \text{ y } 500^\circ\text{C}}{\text{Masa total de la muestra}} * 100 \dots \dots \dots (8)$$

$$14. \% \text{ de Lignina} = \frac{\text{Masa perdida entre } 500 \text{ y } 700^\circ\text{C}}{\text{Masa total de la muestra}} * 100 \dots \dots \dots (9)$$

$$15. \text{ Cenizas} = \text{Masa a } 700^\circ\text{C} - \text{Masa a } 800^\circ\text{C} \dots \dots \dots (10)$$

15.1.1. Análisis elemental

Se realizaron análisis elementales para determinar el contenido de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y azufre (S) en la cáscara de coyol sin tratar, así como en las muestras tratadas con los métodos NaOH, disolvente orgánico y NaOH/Na₂S. El análisis se llevó a cabo utilizando un analizador elemental CHNS/O, concretamente el *Thermos*. Se pesaron con precisión aproximadamente 2 mg de cada muestra y se introdujeron en una cápsula de estaño. A continuación, las muestras se quemaron en un horno de alta temperatura (a 925°C) en oxígeno puro para garantizar una combustión completa.

Durante el proceso de combustión, los elementos presentes en la muestra se convirtieron en sus respectivos gases: CO₂ para el carbono, H₂O para el hidrógeno, NO_x para el nitrógeno y SO₂ para el azufre. A continuación, una corriente de gas helio transportaba estos gases a través de una serie de trampas químicas para eliminar cualquier subproducto no deseado, lo que permitía medir los gases purificados mediante un detector de conductividad térmica.

Para garantizar la exactitud y la precisión, el instrumento se calibró utilizando un material de referencia estándar (metionina) con una composición elemental conocida. La composición elemental de las muestras se comunicó como porcentaje de la masa total. Este análisis permitió evaluar cómo afectaban los distintos métodos de tratamiento a la composición química del material lignocelulósico, proporcionando información sobre la eficacia de los tratamientos a la hora de alterar la estructura de la biomasa.

15.2. Punto de carga cero (pzc “point of zero charge”)

En un vaso de precipitados de 500ml se añadieron 100ml de agua desionizada, posteriormente se ajustó el pH alcalino o ácido con HCl (0.1 M) y/o NaOH (0.1 M) y midiendo con un potenciómetro manual “de pluma”, posteriormente se colocaron 0.5 gramos de muestra (cáscara de coyol cruda seca y de 2mm), se dejó en agitación constante de 700rpm por 24h, pasando este tiempo se tomó la lectura y se calculó el cambio de pH entre el valor inicial y el final. El mismo procedimiento se llevó a cabo para la determinación del pzc de la cáscara pretratada.

El potenciómetro se calibró con soluciones buffer de pH 4, 7 y 9. Registrando la lectura para conocer el margen de error.

15.3. Diseño y montaje experimentales

Se sistematiza el procedimiento para la obtención del adsorbente, la elaboración de las pruebas de adsorción obteniendo el siguiente procedimiento (Figura 20), del que se obtienen los datos de adsorción

necesarios para determinar el porcentaje de remoción, la cinética de adsorción y las isotermas de adsorción, así como el polinomio que describe el proceso y las variables con mayor influencia en el proceso.

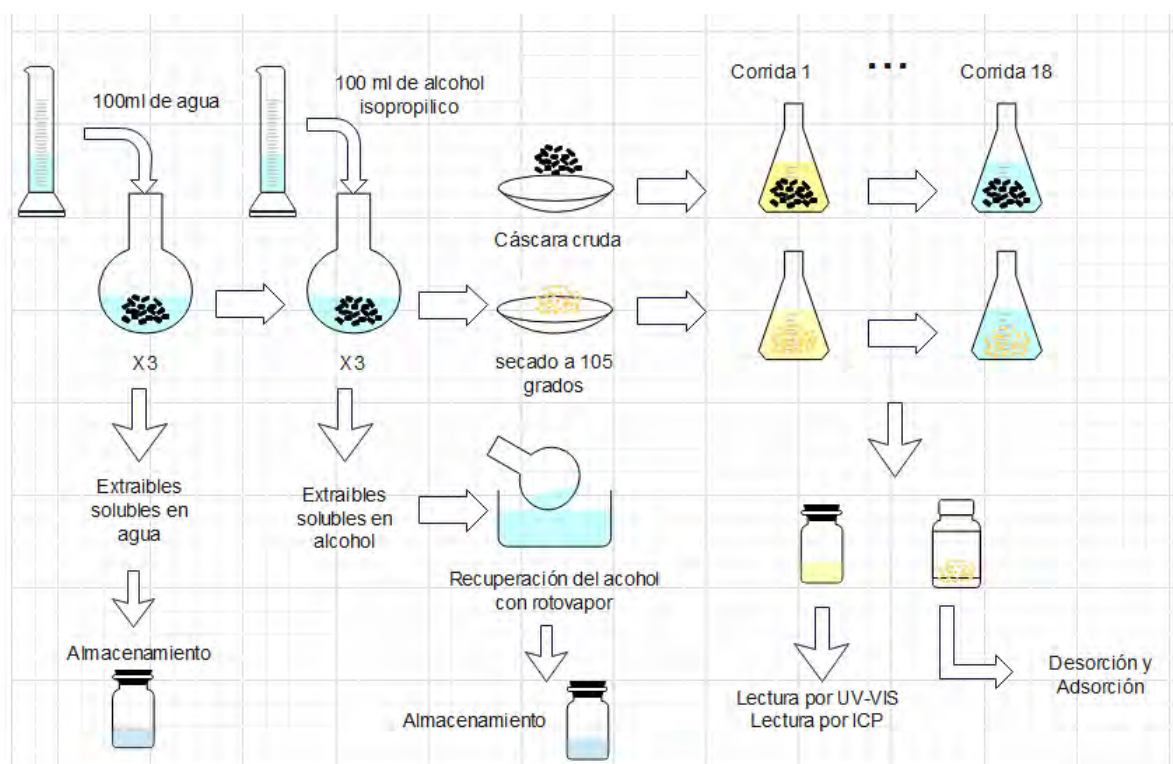


Figura 20 Montaje experimental
Fuente: Elaboración propia, 2024

Se llevarán a cabo 18 experimentos en el laboratorio de LanDacBio, utilizando como variables: la concentración de adsorbente (coyol), concentración de adsorbato (solución de dicromato de potasio), tiempo de contacto y pH del medio, dejando como condiciones fijas: tamaño de partícula, temperatura y pretratamiento (eliminación de extraíbles). El desarrollo de experimentos se realiza mediante el Método de Superficie de Respuesta con la ayuda del *software* STATISTICA, obteniendo las condiciones pH máximo= 7, pH medio=5.5 y pH mínimo= 3. Para la concentración de adsorbato (contaminante) 100, 55 y 10 mg/l. Con respecto al tiempo se tiene 60, 270 y 480 minutos como mínimo, medio y máximo. Así mismo para la cantidad de adsorbente se diseña 10000, 5500 y 1000 mg, como se ilustra en la Tabla 5.

Tabla 5 Diseño experimental mediante MSR

Corrida	Adsorbente (mg)	pH	Adsorbato $K_2Cr_2O_7$ (mg/l)	Tiempo (min)
MSR 1	10000	7	100	60
MSR 2	10000	7	10	60
MSR 3	10000	3	100	480
MSR 4	1000	7	10	480
MSR 5	10000	3	10	480

MSR 6	1000	3	100	60
MSR 7	1000	7	100	480
MSR 8	1000	3	10	60
MSR 9	1000	5.5	55	270
MSR 10	10000	5.5	55	270
MSR 11	5500	3	55	270
MSR 12	5500	7	55	270
MSR 13	5500	5.5	10	270
MSR 14	5500	5.5	100	270
MSR 15	5500	5.5	55	60
MSR 16	5500	5.5	55	480
MSR 17	5500	5.5	55	270
MSR 18	5500	5.5	55	270

Se utilizó un tamaño de partícula de 2 mm, la temperatura será de 25 °C (o temperatura ambiente). Se dejó en agitación constante mediante un agitador magnético, dentro de un matraz balón. El pH se medirá con un potenciómetro. Con respecto al gramaje de los componentes, se pesaron en la balanza analítica Sartorius CP 324s (d=0.1 mg), mientras que los volúmenes se midieron en probetas graduadas. Una vez que se concretó el tiempo de adsorción, se realizó de nueva cuenta la cuantificación por espectrofotometría para verificar la concentración de metales pesados en la solución resultante. Este procedimiento se realizó con la cáscara cruda y la cáscara sin extraíbles.

15.4. Caracterización después de la bioadsorción

15.4.1. Evaluación de adsorción de cromo hexavalente por UV-VIS

15.4.1.1. Método directo con Dicromato de Potasio

Se realizaron soluciones para la curva tipo de dicromato de potasio del 0 al 100% en intervalos de 20%, partiendo de una solución al 0.002M con las proporciones de agua desionizada y la solución al 0.002M (Tabla 6), las cuales son leídas en el espectrofotómetro UV-Vis a longitud de onda única de 350 nanómetros (nm), utilizando celdas de cuarzo de 1 mm, en las cuales se añadieron 2-3 ml de muestra. Las cubetas se enjuagan con agua deslizada y se secan con un paño suave evitando dejar rastro del pañuelo con unos ligeros toques. Se vierte la solución de cromo dentro de la cuba (o celda) y se limpia con suaves toques la pared externa de la celda antes de introducirse al espectrofotómetro. Una vez obtenida la curva tipo, se leyeron las soluciones a las concentraciones que marca el diseño experimental (100, 55 y 10 mg/L) para comprobar la concentración de las soluciones a emplear antes del proceso de adsorción. Una vez terminado el proceso de adsorción según la metodología de superficie de respuesta, se leyeron 2ml de muestra (dicromato de potasio) filtrada evitando que las partículas de cáscara interfieran en la lectura del UV-Vis de 350 nm.

Tabla 6 Proporciones para curva tipo

$K_2Cr_2O_7$ (%)	Concentración (mg/L)	ml de agua/ml $K_2Cr_2O_7$
0	0	2/0

20	117.67	1.6/0.4
40	235.34	1.2/0.8
60	353.02	0.8/1.2
80	470.68	0.4/1.6
100	588.36	0/2

Para el cálculo de la concentración de dicromato de potasio se obtuvo y se utiliza la ecuación $y = 0.0055x + 0.0307$, la cual presenta un coeficiente de correlación $R^2 = 0.9972$.

Las soluciones realizadas se leyeron a 390nm en un espectrofotómetro UV-VIS, por triplicado obteniendo la curva de calibración correspondiente (Figura 21) , la cual funge para conocer la concentraciones obtenidas después del proceso de adsorción, por lo que se obtiene a través del *software* “Excel” la ecuación de la correlación lineal $y = 0.0055x + 0.0307$, la cual representa la correlación de la concentración de dicromato de potasio con la absorbancia leída por el espectrofotómetro con un coeficiente de correlación $R^2 = 0.9972$, lo cual indica una dependencia fuerte.

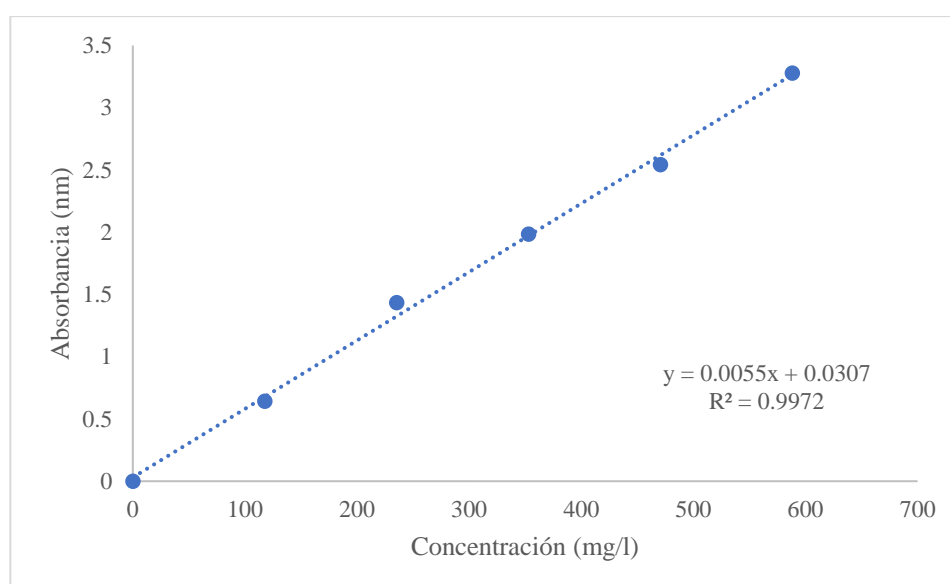


Figura 21 Curva tipo de dicromato de potasio
Fuente: elaboración propia, 2024.

En la Figura 22 se pueden observar los matraces aforados empleados para la elaboración de la curva tipo de dicromato de potasio como se describe en líneas anteriores, observando una clara de dilución de un color naranja hacia un color amarillo. La diferencia que se puede observar en el aforo se debe a que los matraces, aunque son del mismo volumen no son de la misma marca ni el mismo lote, pero para la elaboración de la curva tipo se observó la regla del menisco para aforar soluciones traslúcidas.



Figura 22 Curva tipo de dicromato de potasio II

15.4.1.2. Método indirecto por Difenil Carbazida

Se plantea el método indirecto mediante la reacción del difenil carbazida con el cromo hexavalente, donde se siguió lo estipulado por Gloria María Doria Herrera *et al.* (2013), por lo que para la preparación del reactivo se disolvió 150 mg de difenil carbazida en 50ml de acetona, y se almacenó en un frasco oscuro refrigerándose a 4°C.

Para la curva de calibración se prepararon soluciones estándar de concentración inicial de 0.0001 M (0.00103mg/ml de Cr⁺⁶). Se sigue la relación de 0%, 20%, 40%, 60%, 80% y 100%. Dichas soluciones se preparan en matraces aforados de 10 ml, donde se agrega 1ml de solución por cada 10%, se afora con agua ácida (pH 2) y a cada solución estándar se añadieron 0.2 ml del reactivo de difenil carbazida, se agita y se deja reaccionar por 5 minutos, posteriormente se leyó la absorbancia a 540 nm, debido a que se produce un complejo de color rojo-violeta, por la reacción del difenil carbazida con la especie HCrO₄⁻ del cromo (VI), como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7 concentraciones para la construcción de la curva tipo

k ₂ CrO ₇ (%)	K ₂ Cr ₂ O ₇ (mg/l)	K ₂ Cr ₂ O ₇ (M)	Cr ⁺⁶ (mg/ml)
0	0	0	0
20	0.58	0.00002	0.0021
40	1.17	0.00004	0.0042
60	1.76	0.00006	0.0063
80	2.35	0.00008	0.0084
100	2.94	0.0001	0.0105

Así mismo para el cálculo de la concentración de cromo (VI) se utiliza la ecuación lineal correspondiente a las concentraciones de la Tabla 7 $y = 481x + 0.0037$, con $R^2 = 0.9997$.

15.4.1.3. Curva de calibración de Difenil Carbazida (DFC)

Considerando que un mililitro de una solución donde se adicionan 141 mg de dicromato de potasio disuelto en 100 ml existe 0.5mg de Cromo (VI) (Cr^{+6}) por lo que;

$$\frac{141 \text{ mg K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7}{100 \text{ ml}} = \frac{1.41 \text{ mg K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7}{\text{ml}} \rightarrow 0.5 \text{ mg Cr(VI)}$$

Por lo tanto;

$$\text{si en } \frac{1.41 \text{ mg K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7}{\text{ml}} \text{ existen } 0.5 \text{ mg Cr(VI)}$$

$$\text{en } \frac{100 \text{ mg K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7}{\text{ml}} \text{ existen } 35.46 \text{ mg Cr(VI)}$$

Lo que es igual a

$$\text{en } 100 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{ de Dicromato de potasio existen } 0.035 \frac{\text{mg}}{\text{ml}} \text{ de Cr (VI)}$$

Así mismo considerando las concentraciones a las cuales se construyó la curva tipo de dicromato de potasio, se considera que;

$$0.002 \text{ M es equivalente a } \frac{588.38 \text{ mg}}{\text{L}} \text{ de dicromato de potasio}$$

Con estas consideraciones y cálculos se elabora la curva patrón del difenil carbazida obteniendo los expresado en las Figuras 23, así como el cambio de tonalidad como se muestra en la Figura 24.

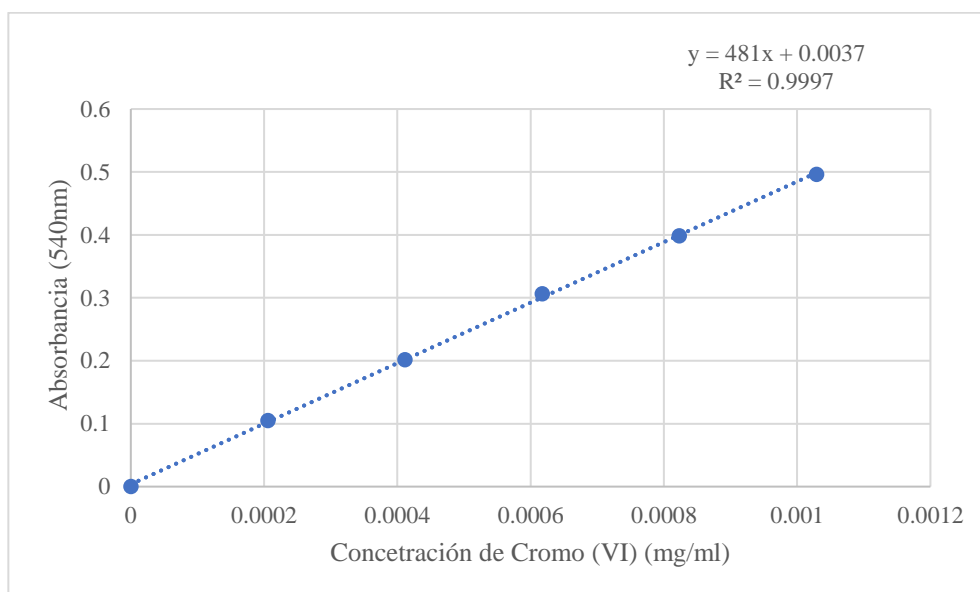


Figura 23 Curva tipo de Difenil Carbazida (DFC)

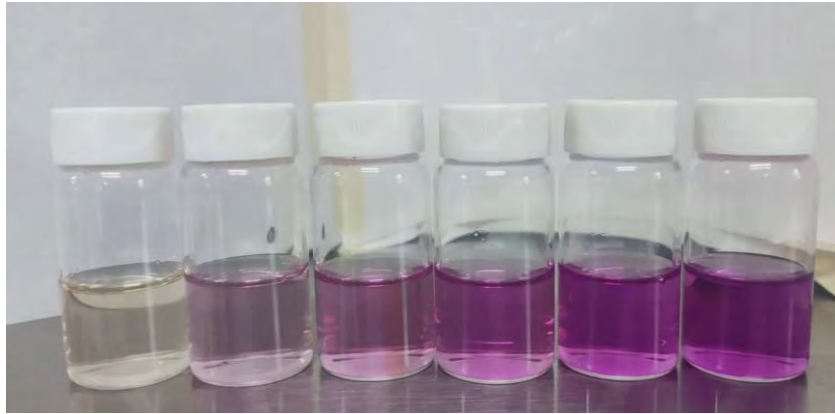


Figura 24 Fotografía del cambio ascendente de las concentraciones para la curva tipo de DFC

Usando la siguiente ecuación para conocer el porcentaje de remoción:

$$\%R = \frac{c_i - c_f}{c_i} * (100) \dots \dots \dots (11)$$

15.4.2. Regeneración de adsorbente

Tomando el procedimiento de Hajira Haroon, *et al.* (2017) Se toman 0.5 g de adsorbente que fue tratado con las diferentes concentraciones de dicromato de potasio, se seca a 105°C por 6 horas, y se lavaran en sistema Batch con metanol, a 300 rpm por 4 horas, a 20°C. posteriormente se cuantifica el porcentaje de desorción mediante la ecuación 12.

$$\% \text{ de desorción} = \frac{\text{Cantidad de Cr (VI) desorbida}}{\text{Cantidad de Cr (VI) adsorbida}} * 100 \dots \dots \dots (12)$$

CAPITULO III

16. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

16.1. Caracterización física

16.1.1. Determinación de humedad

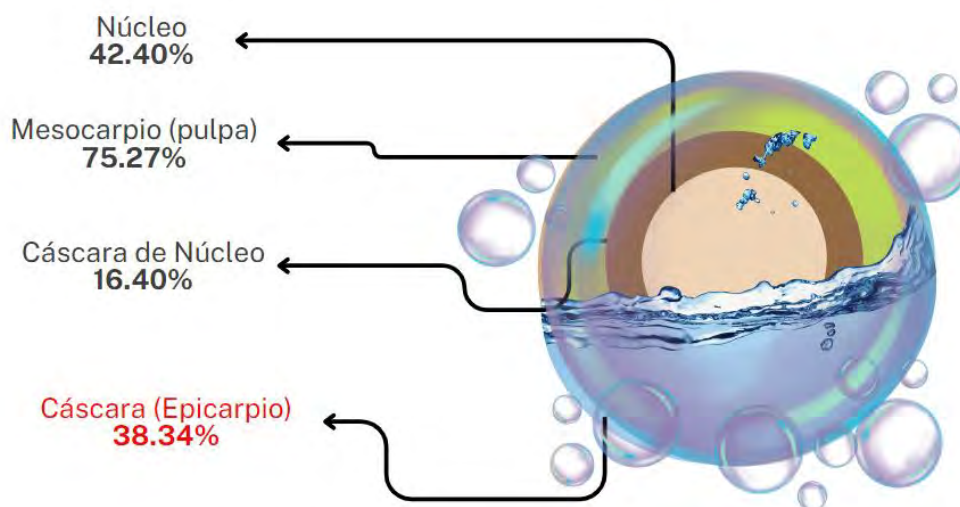
Para la determinación del porcentaje de humedad se realizó el método de peso constante como se ve expuesto en el apartado 8.2. de este escrito, se secaron las muestras y se pesaron hasta obtener una desviación estándar menor a 0.02 y/o una diferencia de peso menor a 0.05 gramos, posteriormente se realizó el cálculo del porcentaje de humedad (%H), donde el peso húmedo es el obtenido después de pelar y separar cada una de las partes del coyol y el peso seco el ultimo peso donde se alcanzó una diferencia menor a 0.05g, eliminando el peso de los respectivos contenedores. Realizándose por triplicado como se muestra en la Tabla 8.

Como se puede apreciar, la determinación se realizó por triplicado, lo que quiere decir que se calculó 12 veces el porcentaje de humedad, 3 por cada componente del coyol, posteriormente se realizó un promedio simple. Según lo expuesto en la Tabla 8 vemos que, de la cáscara, el 38.34%±1.6 es agua (Humedad), Así mismo el 75.27%±1.9 de la pulpa, el 16.40%±7.5 de la cáscara del núcleo y 42.40%±2.2 del núcleo como se representa en la Figura 25.

Tabla 8: Determinación de porcentaje de humedad por el método de peso constante

	Cáscara (%)	Pulpa (%)	Cáscara de núcleo (%)	Núcleo (%)
1	40.23	76.84	12.14	40.91
2	37.21	75.94	12.00	41.31
3	37.57	73.03	25.07	44.98
Promedio	38.34%±1.6	75.27%±1.9	16.40%±7.5	42.40%±2.2

Porcentaje de humedad (*Acrocomia. a*)



Esto quiere decir que del 100% del peso del epicarpio (cáscara) el 38.34% es humedad, así sucesivamente con los otros componentes

Figura 25 Representación gráfica del contenido de humedad de cada componente del Coyoil

La humedad al ser obtenida por el método de peso seco está dirigida al siguiente razonamiento: un peso inicial, que es el peso del fruto húmedo, es decir, el peso de la biomasa más el peso del agua contenida. Después del secado, se elimina toda cantidad de agua posibles al llegar a una temperatura de 105 ± 2 °C, por lo que el peso final es únicamente el peso de la biomasa (peso seco), por lo tanto, por medio de la fórmula 4 se puede conocer el peso de la cáscara de Coyoil, como se expresa en la Tabla 9 donde a su vez se compara con otros materiales lignocelulósico que son residuos agroindustriales.

Tabla 9 Comparación del porcentaje de humedad con residuos agroindustriales

lignocelulósico	Humedad (%)	Referencia
Cáscara de coyol	38.34 ±1.6	Propia
Papaya (<i>Carica papaya</i>)	88	
Toronja (<i>Citrus paradisi</i>)	77	
Cáscara de Naranja (<i>Citrus sinensis</i>)	72	(Campos M., 2015)
Cáscara Melón (<i>Cucumis melo</i>)	83	
Cáscara de Maracuyá (<i>Passiflora edulis</i>)	8.85	
Cáscara de <i>Jatropha curcas</i>	12.35	(Rodríguez C., 2022)
Cáscara de sandía	10.7	(Abhishek S., 2025)
Paja de mostaza	3.99	
Paja de caña de azúcar	3.12	
Bagazo de caña de azúcar	7.39	(Haris <i>et al.</i> , 2024)
Paja de trigo	7.1	
Paja de arroz	4.98	

Conocer el porcentaje de humedad es necesario para conocer la cantidad de producto (bioadsorbente) que se puede obtener en función de una línea base de materia prima (cáscara de coyol), así mismo nos

refiere a la cantidad de energía que se debe invertir para eliminar dicha humedad, lo cual está ligado al incremento de costos de procesamiento, consumo energético en secado y las condiciones de almacenamiento. Con lo expuesto en la Tabla y sabiendo que la biomasa bruta, especialmente la de clima tropical, puede contener hasta un 60% de humedad (Moni M., et al, 2016), se observa que el promedio de humedad de estas cáscaras y residuos agroindustriales (que han sido estudiadas para el mismo fin) es de 32% y la cáscara de coyol presenta una humedad de 38% aproximadamente. Así mismo es importante recordad que estas características dependen de las condiciones climáticas, de cultivo y las propias del fruto, lo cual lo hace muy variable. Aunado a esto, es beneficioso que no presente valores tan altos de humedad (comparado con los otros residuos que aquí se exponen) pues niveles elevados de humedad pueden favorecer el crecimiento de bacterias y la formación de aglomerados, así mismo, en porcentajes bajos el material mantiene su estabilidad a lo largo del tiempo y permite obtener partículas más pequeñas y uniformes (Moreira, L., 2022).

Para la composición se consideró como peso total el peso sumado después del pelado del fruto, pues se observó que el en el proceso del pelado se pierde aproximadamente el 10% de fruto. Se consideró el peso del fruto en peso húmedo (Tabla 10), se hace está consideración porque no se tiene la certeza de cuál de los componentes perdió mayor o menor cantidad de peso durante el proceso de pelado, con la finalidad de tener valores más precisos.

Tabla 10: porcentaje de composición del coyol en peso húmedo

Componente	Cáscara (%)	Pulpa (%)	Cáscara de núcleo (%)	Núcleo (%)	Total
Promedio	19.77±0.006	39.24±0.026	30.52±0.024	10.47±0.005	100%

Referente a lo expuesto en la Tabla 10, del peso total del fruto (menos el 10% aproximado por pérdidas) podemos aseverar lo que se resume en la Tabla 11 y como lo representa en la Figura 26, con la finalidad de ilustrar mejor la composición del Coyol considerando una tonelada, así como la cantidad potencial de bioadsorbente que se puede obtener.

16.1.2. Determinación de peso seco

En función del peso en seco (Figura 26) y del porcentaje que representa del fruto húmedo del Coyol, el cual se compone de diferentes partes: el epicarpio (cáscara), el mesocarpio (pulpa), la cáscara y el núcleo. El epicarpio constituye entre el 19.79% y el 23.23% del fruto húmedo, mientras que el mesocarpio representa entre el 18.08% y el 39%. La cáscara del núcleo constituye aproximadamente entre el 46.7% y el 30.7%, y el núcleo representa entre el 12.35% y el 10.17% del fruto húmedo. Estas proporciones se ilustran en la Tabla 12. En términos de peso seco, El epicarpio constituye entre el 19.6% y el 19.7% del fruto húmedo, mientras que el mesocarpio representa entre el 39.2% y el 39.5%. La cáscara del núcleo constituye aproximadamente entre el 30.5% y el 30.7%, y el núcleo representa entre el 10.4% y el 10.6%.

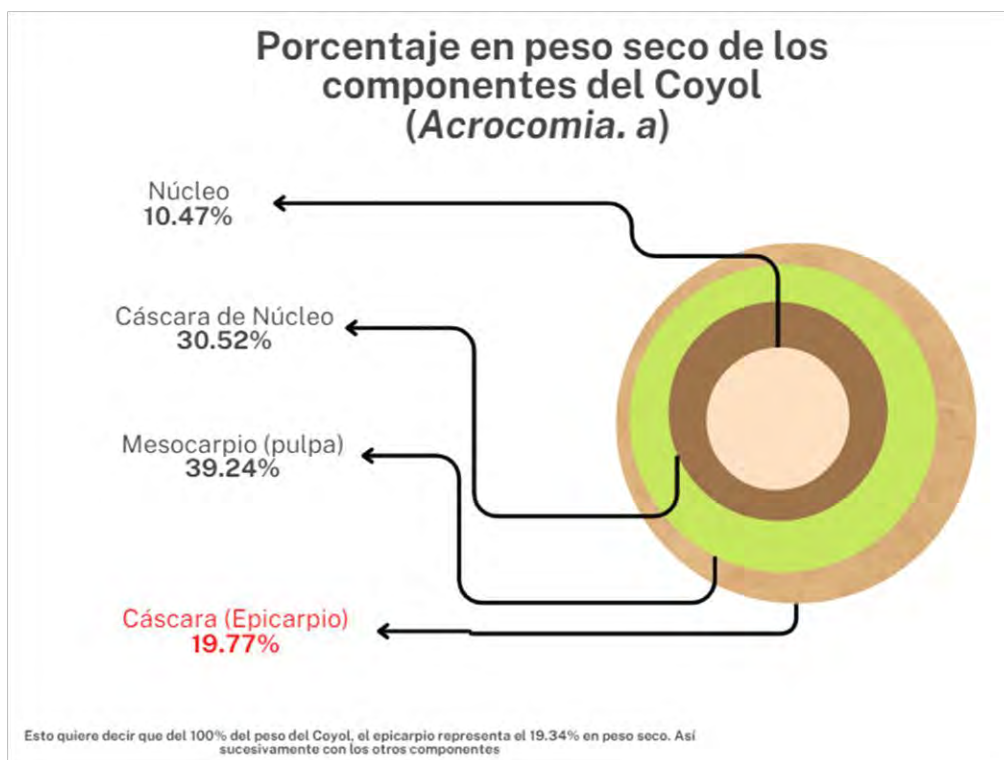


Figura 26 Porcentaje en peso seco de los componentes de Coyol

Tabla 11: cantidad de componentes del coyol en seco y húmedo con base de cálculo de 1 tonelada

De una tonelada de fruto se obtiene aproximadamente:					
	Cáscara (Kg)	Pulpa (Kg)	Cáscara de núcleo (Kg)	Núcleo (Kg)	Total (Kg)
Húmedo	197.70	392.45	305.17	104.69	1000
Seco	75.80	295.41	50.07	44.39	465.67

Por lo que comparando este resultado con los reportados con la literatura expresados en la Tabla 12 podemos decir que los resultados obtenidos son concordantes con los previamente reportados para este fruto nativo, pues en todos los valores de humedad con excepción la humedad base humedad de la pulpa y el núcleo en base seca, la diferencia es menor al 5%, los cuales presentan una diferencia menor al 8% con sus respectivos datos reportados.

Tabla 12 comparación de los porcentajes en peso obtenidos

Parte del coyol	Porcentaje en peso base húmeda (%)		Porcentaje en peso base seca (%)	
	Propia	Literatura (Aguilar et al., 2023)	Propia	Literatura (Aguilar et al., 2023)
Cáscara	19.77±0.006	20.21±0.89	22.9±0.3	25.47±0.08
Pulpa	39.24±0.026	45.37±0.74	19.9±0.5	23.54±0.17
Cáscara de núcleo	30.52±0.024	27.43±0.48	45.5±0.4	47.12±0.33
Núcleo	10.47±0.005	6.98±0.35	11.67±0.3	3.87±0.04

16.1.3. Rendimiento del adsorbente por hectárea

En función de la producción potencial de bioadsorbentes, como se puede observar en la Figura 27 se muestra la producción mexicana de distintos frutos con potencial para ser utilizados como bioadsorbentes, expresada en kg/Ha. El coyol presenta una generación potencial adsorbente derivada de los residuos de su aprovechamiento de 1,750 kg/Ha, lo que lo ubica en un rango intermedio en comparación con los demás frutos analizados. En comparación con el coyol, el residuo del plátano (11,250 kg/Ha) exhibe el mayor potencial para ser aprovechado como adsorbente, superándolo ampliamente. También destacan el melón (7,565 kg/Ha), la piña (7,200 kg/Ha) y el maracuyá (7,246 kg/Ha), que tienen valores significativamente más altos. Por otro lado, frutas como el maíz (138 kg/Ha), el arroz (69 kg/Ha) y el trigo (75 kg/Ha) presentan valores mucho menores, indicando un menor potencial como adsorbente en relación con el coyol. Residuos de frutas como el aguacate (871 kg/Ha) y la toronja (4,053 kg/Ha) también tienen menor o moderado potencial en comparación con otras opciones más eficientes.

En general, el coyol tiene un potencial para ser aprovechado como adsorbente aceptable, pero existen frutas como el plátano, el melón y el maracuyá que ofrecen una mayor cantidad de material adsorbente por hectárea, lo que podría hacerlas opciones más viables para aplicaciones de adsorción, esto considerando únicamente la cantidad que se puede recuperar de su habitual aprovechamiento. No obstante, hace falta una mayor caracterización fisicoquímica para llegar a una aseveración más completa de su funcionalidad como adsorbentes.

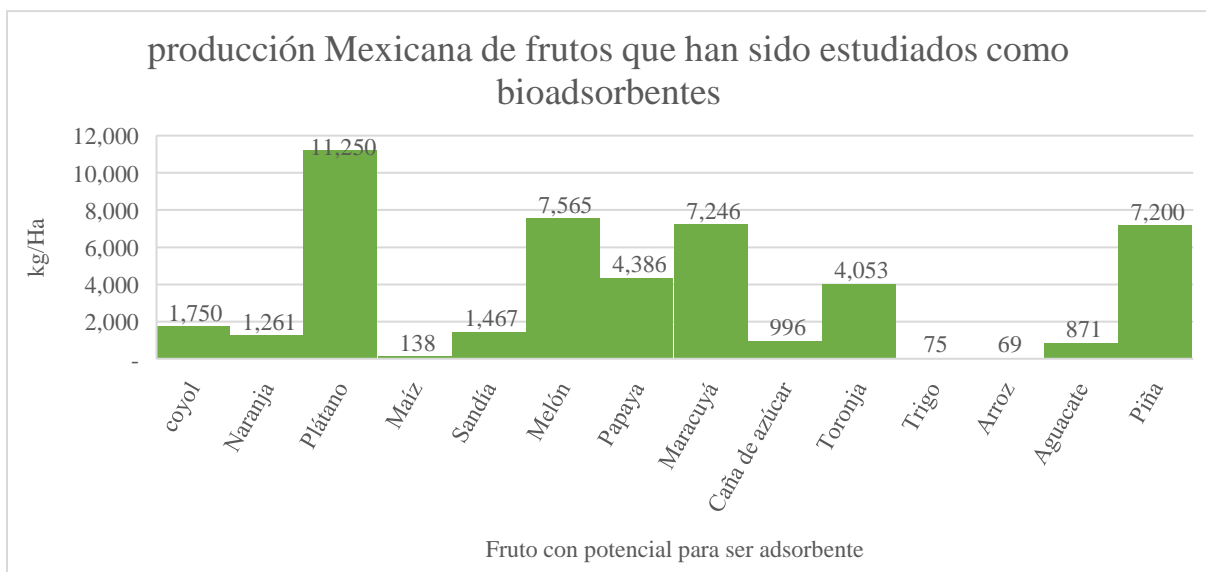


Figura 27 comparación de la cantidad de adsorbente que puede ser obtenida

La Tabla 13 presenta datos sobre diferentes frutas, centrándose en su producción por hectárea (kg/ha), proporción de cáscara (peso húmedo), peso de la cáscara (kg/ha), proporción de humedad de la cáscara, cantidad potencial de adsorbente (kg/ha) y cantidad total de adsorbente (ton/ha). El coyol tiene una producción de 23,090 kg/ha, con una proporción de cáscara de 0.19, lo que resulta en un peso de cáscara de 4,564 kg/ha. La proporción de humedad es de 0.38, y la cantidad potencial de adsorbente es de

1,750.22 kg/ha, lo que lleva a una cantidad de adsorbente de 1.75 ton/ha. En comparación con otras frutas, la caña de azúcar, el plátano, la papaya y la sandía tienen una producción significativamente mayor, pero su potencial de adsorción varía. El maracuyá, a pesar de tener una menor producción, destaca por una mayor cantidad de adsorbente (7.3 ton/ha), probablemente debido a su alta proporción de cáscara (0.55).

El potencial de adsorción del coyol es moderado, con frutas como plátano (11.3 ton/ha), melón (7.6 ton/ha) y maracuyá (7.3 ton/ha) mostrando valores más altos. La proporción de humedad de la cáscara influye en la eficiencia de adsorción, con el coyol teniendo un valor de 0.38, menor que el plátano (0.88) y la papaya (0.88). Esto sugiere que una alta proporción de cáscara y un menor contenido de humedad podrían mejorar la capacidad de adsorción. Si bien el coyol tiene potencial, otras frutas como el maracuyá y el plátano pueden ser más efectivas para aplicaciones de adsorción debido a su mayor cantidad de residuos de cáscara y menor retención de humedad.

Tabla 13 obtención de la cantidad de adsorbente en función de la producción y humedad del fruto

Fruto	Producción (kg/ha)	Proporción de cascara/residuo en peso húmedo	Peso de cascara (Kg/Ha)	Proporción de humedad de la cáscara	Posible cantidad de adsorbente (kg/Ha)	Cantidad de adsorbente (ton/ha)	Referencias
Coyol	23090	0.19	4565	0.38	1750	1.75	Este escrito, (Aguilar F, et al., 2023)
Naranja	7004	0.25	1751	0.72	1,261	1.26	(SIAP,2020, Jurado E. et al. 2023).
Plátano	30439	0.42	12784	0.88	11,250	11.25	(SIAP,2020, Jurado E. et al. 2023).
Maíz	6912	0.2	1382	0.1	138	0.13	(SE, 2015, SIAP,2020)
Sandía	39165	0.35	13708	0.107	1,467	1.46	(Campos M., 2015, SIAP,2020)
Melón	26828	0.3	8048	0.94	7,565	7.56	(Jurado E. et al. 2023, SIAP,2020)
Papaya	35200	0.14	4928	0.89	4,386	4.38	(Campos M., 2015, SIAP,2020)
Maracuyá	15500	0.55	8525	0.85	7,246	7.24	(Campos M., 2015, SIAP,2020)
Caña de azúcar	68190	0.2	13638	0.073	996	0.99	(Campos M., 2015, SIAP,2020)
Toronja	15040	0.35	5264	0.77	4,053	4.05	(Muhammad H., 2024, Jurado E. et al. 2023)
Trigo	6610	0.16	1058	0.071	75	0.07	(Muhammad H., 2024, Jurado E. et al. 2023)
Arroz	6970	0.2	1394	0.050	69	0.07	(Muhammad H., 2024)
Aguacate	10079	0.12	1209	0.72	871	0.87	SIAP,2020, Jurado E. et al. 2023).
Piña	40333	0.21	8470	0.85	7,200	7.20	SIAP,2020, Jurado E. et al. 2023).

Así mismo se hace hincapié que conocer el porcentaje en peso de materiales orgánicos, tanto en base seca como húmeda, es esencial para diversas aplicaciones científicas e industriales. En el control de calidad, el uso de la base seca permite estandarizar mediciones y comparar materiales

independientemente de su contenido de humedad, aspecto crucial en industrias como la alimentaria o energética. Además, en procesos industriales, como la bioenergía o el compostaje, conocer la base húmeda ayuda a optimizar las condiciones de operación, ya que la humedad influye directamente en la eficiencia de las reacciones químicas y biológicas. Por otro lado, la base seca es fundamental para calcular rendimientos precisos de componentes como azúcares o proteínas, eliminando la variabilidad causada por el contenido de agua. Finalmente, en análisis ambientales, estas mediciones son indispensables para evaluar el impacto de materiales orgánicos en suelos y residuos, ya que el contenido de humedad afecta la estabilidad y la degradación de los compuestos presentes

Considerando que por el proceso manual de la obtención de la muestra se pierde aproximadamente el 10% del fruto (según lo expresado en el punto 9.2. de este escrito) y que la cascara es el subproducto que será aprovechado para la fabricación del bioadsorbente derivado de Coyol. Podemos Tomar en cuenta lo estipulado en “*Small-scale Fruit and Vegetable Processing and Products*” del 2024, publicado por la Organización De Las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (UNIDO, por sus siglas en inglés), donde expresa que para los cálculos para el procesamiento de la materia prima se debe tener en cuenta los niveles probables de mermas y pérdidas durante el proceso donde el porcentaje de pérdida de diversos alimentos se ve expresado en la Tabla 14. Se expone que la pérdida de fruto en la obtención del producto del coyol es competitiva con otros frutos semejantes.

Tabla 14 pérdidas típicas de los frutos en la preparación

Fruta	Porcentaje de pérdida típica (%)	Observaciones
Coyol	10±0.034	Pelada y extraído el núcleo
Manzanas	25	Peladas y sin corazón
Mitades de albaricoque	12	Sin hueso
Plátanos	40	Peladas
Coles	30	NI
Zanahorias	4	(Compradas sin hojas)
Coliflor	38	NI
Grosellas	3	Semillas y piel eliminadas
Higos	2	NI
Uvas	19	Pieles y semillas eliminadas
Guayabas	22	NI
Limones	40	Peladas y sin semillas
Mangos	45	Peladas y sin hueso
Melones	42	Peladas y sin semillas
Cebollas	3	NI
Naranjas	25	Peladas y sin semillas
Frutas de la pasión	58	Peladas y sin semillas
Papayas	38	Peladas y sin semillas
Guisantes	50	Compradas en vainas
Pimientos (chile)	15	Semillas y tallo eliminados
Pimientos (verdes)	14	Semillas y tallo eliminados
Piñas	48	Peladas y sin corazón
Plátanos macho	39	Peladas
Tomates	4	Semillas y piel eliminadas

Fuente: UNIDO,2024, modificación y traducción propia

NI: no indica

El aprovechamiento de. coyol presenta claras ventajas frente a otros frutos en términos de aprovechamiento, ya que tiene un porcentaje de pérdida típica muy bajo (10 ± 0.034 %), significativamente menor que el de frutas como la piña (48 %), el mango (45 %) o el plátano macho (39 %). Esta baja pérdida implica un mayor rendimiento. Por ello, el coyol se perfila como una opción

eficiente y sostenible para usos industriales o alimentarios, no obstante, la cáscara es un subproducto sin utilidad, por lo que es necesario esta cuantificación para la proyección de subproductos generados por tonelada de producto.

16.1.4. Eliminación de extraíbles (o extractables)

16.1.4.1. Extractables Hidrofilicos

Se cuantificaron mediante la reacción con el DNS, esta reacción comprueba la presencia de un grupo carbonilo libre (C=O) de azúcares reductores (glucosa, xilosa y arabinosa, principalmente), pues da pie a la oxidación del grupo funcional aldehído (R-CHO) presente al ácido correspondiente. Se escogió este método debido a que fácil de realizar y se puede obtener una cuantificación rápida, en comparación con otros métodos, aunque hay discusión sobre su nivel de precisión, por ejemplo, la presencia de impurezas no deseadas, como el fenol, en la preparación del reactivo DNS aumenta la intensidad del color de la muestra (Deshavath *et al.*, 2020). En este caso en particular, la lignina presente grupos fenoles, por lo que se podría decir que se corre el riesgo que la cuantificación de los azúcares reductores sea sobreestimada.

Se espera que se extraigan azúcares debido a la hidrólisis (Figura 29) de la hemicelulosa, de la cual se pueden extraer Xilosa ($C_5H_{10}O_5$) y arabinosa ($C_5H_{10}O_5$) y de la celulosa, se puede obtener glucosa ($C_6H_{12}O_6$), Por su parte, la lignina es un hetero polímero aromático complejo que suele encontrarse como matriz hidrofóbica (Deshavath *et al.*, 2020). la extracción de pentosas y hexosas por el tratamiento del bioadsorbente abre una nueva ventana para el aprovechamiento de subproductos, pues estos azúcares son resultado del lavado con agua desionizada, por lo que, para evitar la generación de nuevos residuos por el aprovechamiento de la cascara, se plante a que los azúcares reductores pueden ser empleados para la producción de biogás, pues los azúcares reductores cumplen un papel fundamental como sustratos clave para la fermentación anaeróbica, proporcionando la fuente de carbono y energía necesaria para que los microorganismos involucrados generen biogás. Estos azúcares son el resultado de la hidrólisis de la biomasa lignocelulósica, y son transformados por microorganismos en compuestos más simples como ácidos grasos volátiles (AGVs), que posteriormente se convierten en metano y dióxido de carbono (Trelles, J., 2019). Es por esto por lo que en función de la inclusión de esta investigación en un proyecto integral sostenible de una refinería para la obtención energéticos los azúcares reductores pueden ser aprovechados como sustrato para la producción de biogás, pues se ha reportado que la producción de biogás tiene una relación proporcional con la cantidad de azúcares reductores presentes en el reactor, por lo que se da pie a la exploración de este extraíble como sustrato viable para la producción de biogás.

Como se observa en la Tabla 15 y en la Figura 28, para la determinación de concentración de azúcares reductores a diferentes temperaturas (20°C, 40°C y 60°C) realizando una extracción cada 2 horas. Cada lectura se realizó por triplicado obteniendo una desviación estándar menor a 0.005 por lo que para

determinar la concentración se promedió cada una de las lecturas, utilizando 10g de cáscara de coyol a 2mm, seca a 105°C.

Tabla 15: Determinación de absorbancia y concentración de 3 extracciones de azúcares reductores a diferentes temperaturas

Temperatura	Absorbancia (cm ⁻¹)			Concentración (g/L)		
	Extracción 1	Extracción 2	Extracción 3	Extracción 1	Extracción 2	Extracción 3
Ta (20°C)	0.139	0.0196	0.004	0.630	0.171	0.113
40	0.151	0.0276	0.011	0.679	0.202	0.139
60	0.192	0.0313	0.012	0.834	0.216	0.143
Desviación estándar	0.027	0.005	0.004	0.106	0.0229	0.016
Total, de azúcares reductores extraídos						
Temperatura	Concentración (g/L)					
Ta (20°C)	0.914					
40	1.020					
60	1.193					
Promedio	1.042±0.14					

Los datos se expresan redondeados a 3 decimales para su mejor lectura de este documento

En la gráfica (Figura 28) y en la Tabla 15 se observa que al pasar del tiempo las extracciones como se espera, pero a pesar de la diferencia de la temperatura solo existe una diferencia máxima de 0.2 g/L entre la Temperatura ambiente y 60°C, pues a temperatura ambiente se obtuvo 0.9147 g/L, a 40°C 1.02 y a 60°C 1.2 g/L de azúcares reductores. Por lo que se expresa que se obtuvieron 1.042 g/L de 10g de cáscara de coyol.

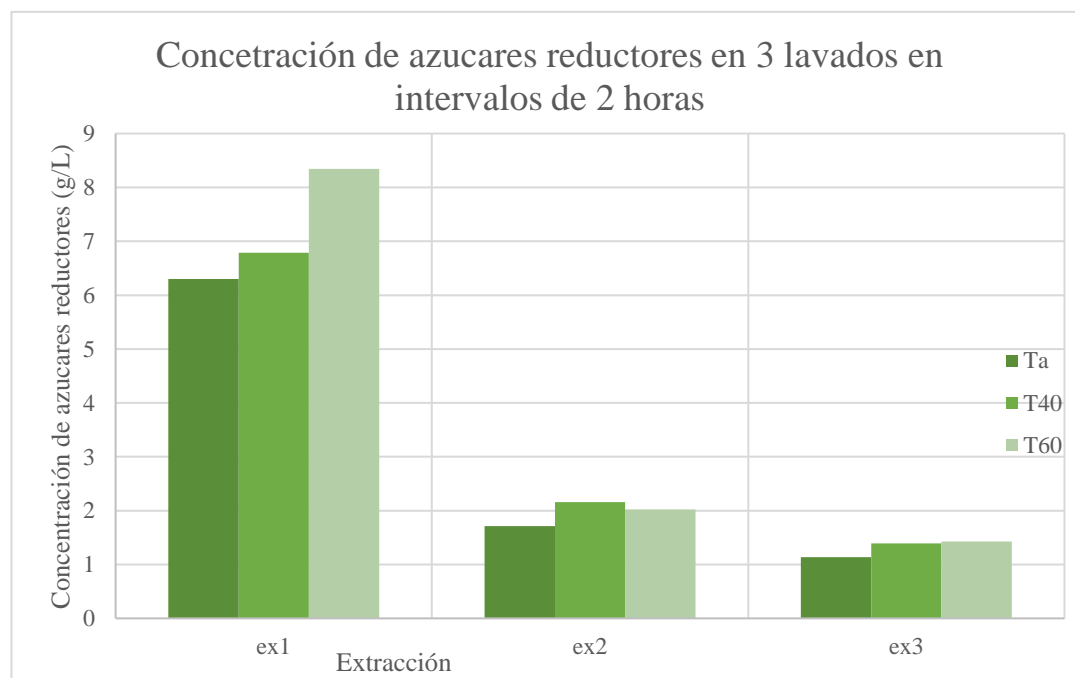


Figura 28 concetración de azúcares reductores en 3 lavados en intervalos de 2 horas a temperaturas de Ta (20°C aprox.), 40 y 60 °C.

Considerando que la cantidad obtenida fue de 1.042 ± 0.14 g/L. Por 10 g de muestra por lo tanto podemos decir que se obtuvo 1.042 ± 0.14 g de azúcares reductores por cada 10g de muestra., al hacer la extrapolación con el aprovechamiento de una tonelada de coyol, podemos obtener de 1.75 ton/ha según lo expuesto en este escrito, y que para la extracción total se necesitan 1000 ml de agua por cada 10g de muestra, para lavar las 1.75 toneladas, se necesitarían 175,000 litros de agua, y se extraerían aproximadamente 180kg/Ha de azúcares reductores.

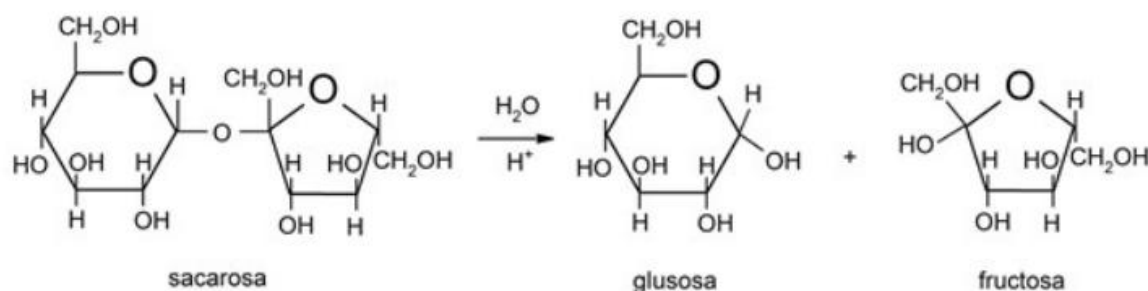


Figura 29 Hidrolisis de la sacarosa (ejemplo de hidrolisis de polisacáridos) Fuente: Edulat, 2025

Como consideración adicional, los resultados actuales indican fuertemente que el empleo del ensayo DNS para cuantificar los azúcares reductores en presencia de furanos no es apropiado, en este tenor es de importancia verificar el contenido de furanos antes de realizar la determinación por DNS, para tener mayor confiabilidad en la cuantificación de azúcares reductores.

16.1.4.2. Extraíbles hidrofóbicos

Los extraíbles hidrofóbicos, o bien solubles en alcohol, se esperan que sean ceras y aceites como, por su cantidad de vibraciones del enlace CH de cadenas alifáticas, CO de esterés alifáticos, estiramientos CH de anillos aromáticos, entre otros, como se describe en los apartados de caracterización por FTIR. Se espera que sean estructuras como el limoneno, pineno, octaconasol, compuestos fenólicos otras estructuras semejantes. Las cuales son hidrofóbicas, aunado a la caracterización propia, Nelson Alfonso Vega. En su artículo “Evaluación de compuestos fenólicos de (*Citrus sinensis*) y su capacidad antioxidante” del 2021 menciona que se extrajeron: ácido gálico, ácido para hidroxibenzoico, ácido vanílico, ácido cafeico, ácido p-cumarico, ácido felurico de la cascara de naranja, mediante extracción soxhlet y se identificaron por cromatografía por HPLC/DAD, con la finalidad de ser aplicados en la industria cárnica como antioxidantes. Así mismo, en la cascara de papaya y de nuez se pudieron extraer taninos, los cuales son compuestos polis fenólicos (Cenitagoya A., 2025, Hernández B., 2016). Los cuales tienen diversas aplicaciones, por ejemplo, como antioxidante.

Se recupera aproximadamente el 95% del alcohol isopropílico de cada extracción mediante el uso del rotavapor, el alcohol recuperado es almacenado en un recipiente para su uso posterior, la fase sólida se recolectó y se caracterizó por FTIR.

16.1.5. Caracterización por FTIR

16.1.5.1. Cáscara de coyol cruda

Considerando las absorbancias recopiladas y descritas por Viola Hospodarova, 2018, en su artículo “*Characterization of Cellulosic Fibers by FTIR Spectroscopy for Their Further Implementation to Building Materials*” (caracterización de las fibras celulósicas por FTIR y su futura implementación en la construcción de materiales), las cuales son las necesarias para la caracterización de las fibras de celulosa, observando los enlaces a C-H, OH y los grupos funcionales,

Para tales efectos se programó una función en el programa “*MATLAB*” donde se identificaron las longitudes de onda con los enlaces y las vibraciones características de las fibras de celulosa descritas en dicho artículo, con la finalidad de una mejor lectura del espectro (Figura 30 y 31).

Se puede observar que en el rango de la celulosa presenta bandas de adsorción en la región 1630 a 900 cm^{-1} , correspondientes a enlaces CH_2 , CH , $-\text{OH}$ y $\text{C}-\text{O}$. los picos en 2900 cm^{-1} y 3660 cm^{-1} se observan vibraciones de enlaces $\text{O}-\text{H}$ y $\text{C}-\text{H}$ característicos de los polisacáridos. Dentro del rango característico de la celulosa (1630 a 900 cm^{-1}) se observa un pico en 1034 cm^{-1} correspondiente a enlaces $\text{C}-\text{O}$, en 1375 cm^{-1} indicando enlaces $-\text{CH}$ y en 1418 cm^{-1} de enlaces $-\text{CH}_2$, 2892 cm^{-1} de enlaces CH de polisacáridos, así como en 3334 cm^{-1} del grupo funcional $-\text{OH}$

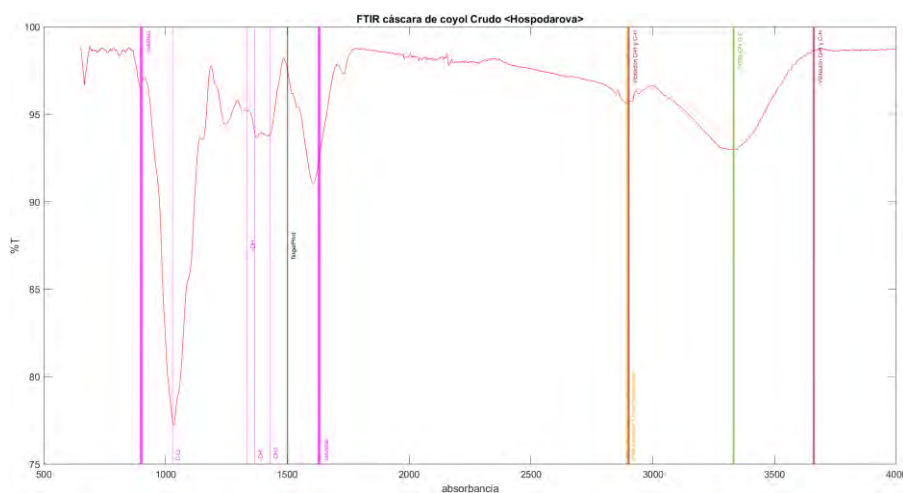


Figura 30 FTIR Cáscara de Coyol Crudo con las características que se describen el artículo de Hospodarova

```

function FtirSpectraFunctionHospodarova

%Viola Hospodarova, Eva Singovszka, Nadezda Stevulova%

%In the wave number range of 3660 - 2900 cm-1 is characteristic for stretching vibration of O-H %and C-H bonds in polysaccharides.
xline (3660,"LineWidth",2,"color","#A2142F","Label","Vibración O-H y C-H","FontSize",6);
xline (2900,"LineWidth",2,"color","#A2142F","Label","Vibración O-H y C-H","FontSize",6);

%The broad peak at 3331 cm-1 is characteristic for stretching vibration of the hydroxyl group in polysaccharides
%This peak includes also inter- and intra-molecular hydrogen bond vibrations in cellulose
xline (3331,"LineWidth",2,"color","#77AC30","Label","3660 -OH G.F.","FontSize",6)
%The band at 2894 cm-1 is attributed to CH stretching vibration of all hydrocarbon constituent in polysaccharides
xline (2894,"LineWidth",2,"color","#E0B120","Label","2894 vibración CH de polisacarido","FontSize",6,"LabelVerticalAlignment","bottom")
%Typical bands assigned to cellulose were observed in the region of 1630 - 900 cm-1
xline (1630,"LineWidth",3,"color","#FF00FF","Label","celulosa","LabelVerticalAlignment","bottom","FontSize",6)
xline (900,"LineWidth",3,"color","#FF00FF","Label","celulosa","FontSize",6)
%The absorption bands at 1428, 1367, 1334, 1027 cm-1 and 896 cm-1
% belong to stretching and bending vibrations of -CH2 and -CH, -OH and C-O bonds in cellulose [10] [15]. The band at around 1420 - 1430 cm-1
xline (1428,"LineWidth",0.3,"color","#FF00FF","Label","-CH2","LabelVerticalAlignment","bottom","FontSize",6)
xline (1367,"LineWidth",0.3,"color","#FF00FF","Label","-CH","LabelVerticalAlignment","bottom","FontSize",6)
xline (1334,"LineWidth",0.3,"color","#FF00FF","Label","-OH","LabelVerticalAlignment","middle","FontSize",6)
xline (1027,"LineWidth",0.3,"color","#FF00FF","Label","C-O","LabelVerticalAlignment","bottom","FontSize",6)
%fingerprint
xline (1500,"o","LineWidth",1,"color","#000000","Label","fingerprint","LabelVerticalAlignment","middle","FontSize",6)

```

Figura 31 Código en MATLAB para la función de caracterización

Para corroborar las lecturas obtenidas en este primer paso se programa una función con las observaciones realizadas en el epicarpio del coyol por Aguilar Fidel, 2023, obteniendo que, 1372cm^{-1} se observa un pico que es perteneciente a los enlaces OH y CH característicos de los carbohidratos, en 1605cm^{-1} se encuentra una vibración perteneciente a los anillos de la lignina, en 1730cm^{-1} hay presencia de un pico correspondiente del enlace C=O de la Hemicelulosa. Así mismo para tener un tercer punto de análisis se realiza otra función en el mismo software, con lo descrito por Shahid Ali Khan en 2018, en el capítulo 9 del libro *“Handbook of Materials Characterization”* el cual nos arroja un pico en 1730cm^{-1} correspondiente a enlaces C=O de esteres, un pico de 1780cm^{-1} indicando la presencia de ácidos carboxílicos, así como 3 picos pequeños dentro del rango de los enlaces C=O de aldehídos en 1700cm^{-1} , 1707cm^{-1} y 1720cm^{-1} , en 1607cm^{-1} se encuentra un pico muy prolongando llegando a 91%T, indicando la presencia de estiramientos C=C, en 1289cm^{-1} y 2913cm^{-1} los picos indican estiramientos C-C, por último en el rango de los estiramientos de los grupos funcionales -OH en el pico 3322cm^{-1} (Figura 32 y 33).

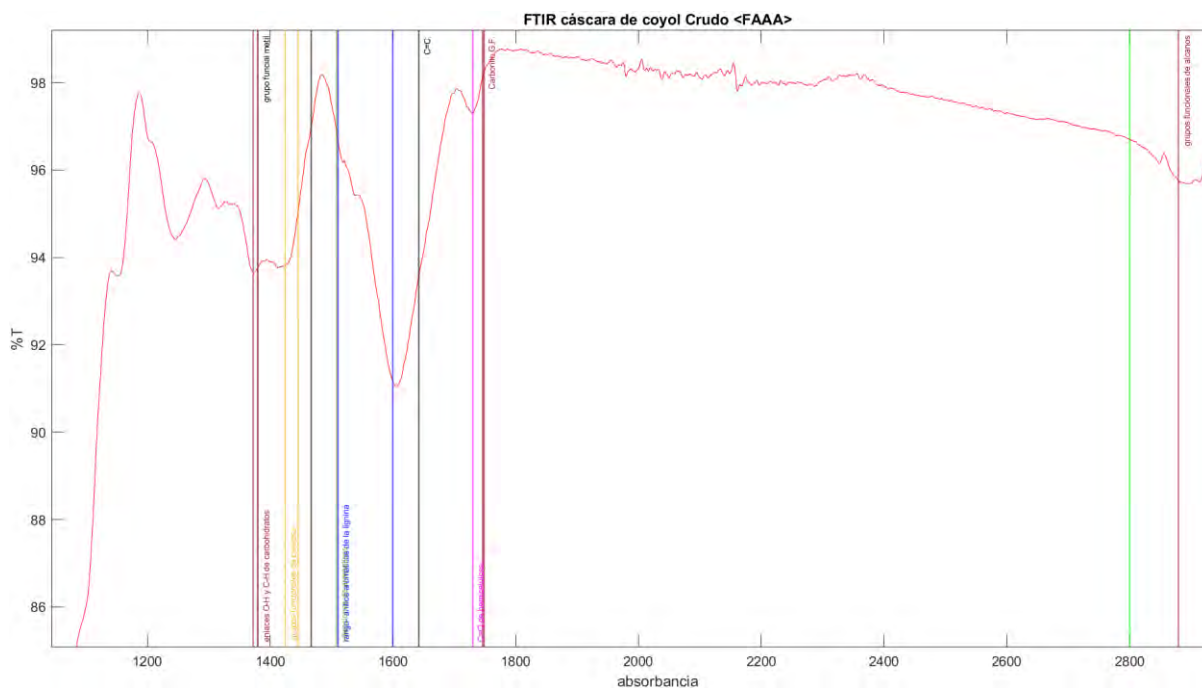


Figura 32 FITR Cáscara de Coyol Crudo con las características que se describen el artículo de Aguilar-Aguilar.

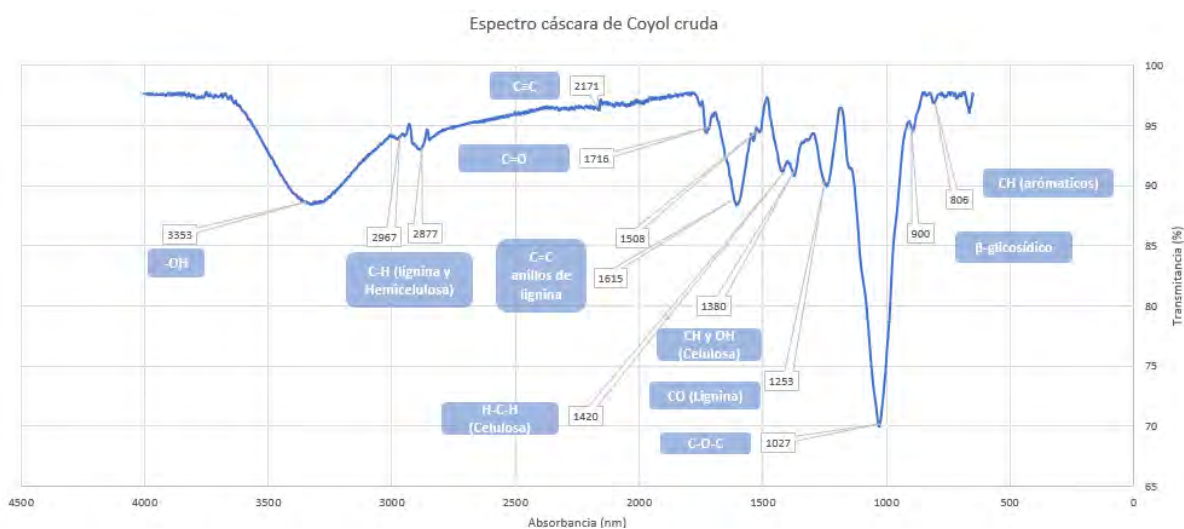


Figura 33 FITR Cáscara de Coyol Crudo

Estas observaciones expuestas en la Figura 33 las podemos resumir en la Tabla 16, donde se indican las observaciones según la literatura correspondiente a cada longitud de onda.

Tabla 16: observaciones de los enlaces presentes en la muestra de Cáscara de Coyol cruda según el FTIR y las descripciones de Hospodarova, Aguilar y Shahid.

Pico (longitud de onda cm^{-1})	Observación	Pico (longitud de onda cm^{-1})	Observación
1630 a 900	CH_2 , CH , -OH y C-O de celulosa	1720	C=O de aldehídos
1034	C-O	1730	C=O de ésteres
1289	C-C	1739	C=O de hemicelulosa
1372	OH y CH de Carbohidratos	1780	ácidos carboxílicos
1375	-CH	2892	CH de polisacáridos
1418	CH_2	2900	O-H de polisacáridos
1605	Anillos de lignina	2913	C-H

1607	estiramientos C=C	3322	grupos funcionales - OH
1700	C=O de aldehídos	3334	-OH
1707	C=O de aldehídos		

16.1.6. Cáscara de coyol libre de extraíbles (pretratada)

Se notan diferencias sustanciales en la existencia y elongación de ciertos picos, donde la línea azul es la cáscara de coyol cruda y la roja es después de los lavados con agua y con alcohol, dichas variaciones se visualizan en el espectro de IR en la Figura 34, donde se presenta el espectro de la cáscara de coyol cruda, después de extraer los azúcares reductores y después de eliminar todos los extraíbles, así mismo se sintetizan en la Tabla 17.

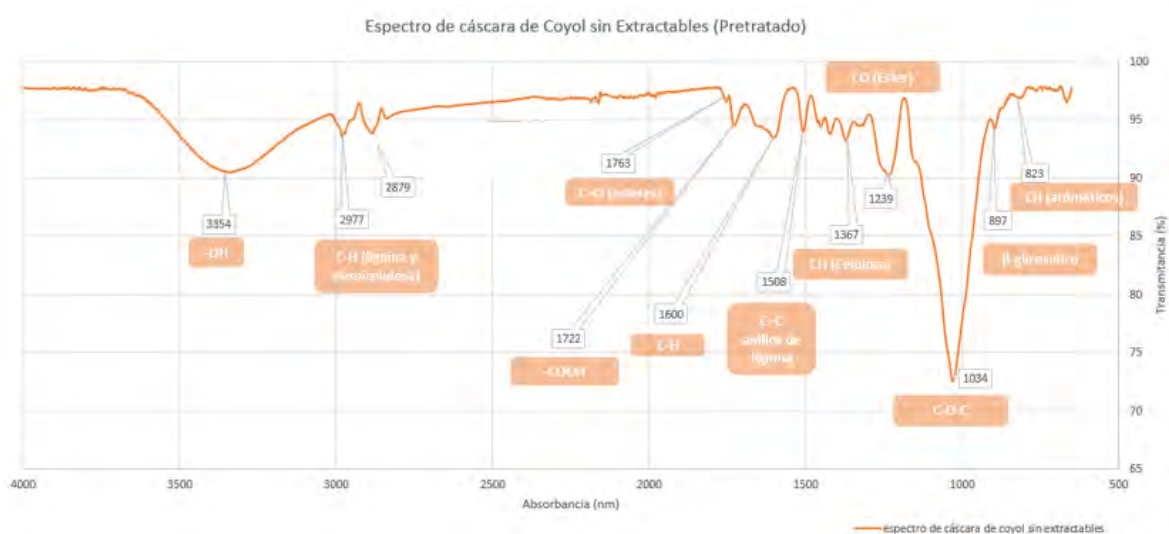


Figura 34 FTIR cáscara de coyol pretratada.

Tabla 17 grupos funcionales de la cáscara de coyol después del lavado (libre de extraíbles)

Pico (cm ⁻¹)	Enlace o estiramiento
354	-OH
2977	C-H (lignina y hemicelulosa)
2879	C-H (lignina y hemicelulosa)
1763	C=O (ésteres)
1722	-COOH
1600	C-H
1508	C=C (anillos de lignina)
1367	CH (celulosa)
1239	CO (éster)
1034	C-O-C
897	β-glicosídico
823	CH (aromáticos)

En la Figura 35 Se muestra la comparación del espectro obtenido por FTIR, de la cáscara cruda y se compara con el espectro de la cáscara después del tratamiento (lavado con agua y posteriormente con alcohol isopropílico) donde se pueden observar diferencias notables en los picos correspondientes a 3306cm⁻¹, 2978 cm⁻¹, 1609 cm⁻¹, 1539 cm⁻¹, 1423 cm⁻¹, 1377 cm⁻¹ y 1034 cm⁻¹ donde se observan

diferencias en la intensidad de las bandas, como la disminución del pico en 3306 cm^{-1} (-OH), indicando la posible eliminación parcial de azúcares, compuestos adheridos a cascara o posiblemente de hemicelulosa y lignina. También se registran modificaciones en los enlaces CH alifáticos (2978 cm^{-1}), C=C aromáticos (1609 y 1539 cm^{-1}) y CH-OH de carbohidratos (1377 cm^{-1}), lo que sugiere alteraciones estructurales en la biomasa. La variación en el pico 1035 cm^{-1} (COC) indica cambios en la celulosa y hemicelulosa, lo que podría influir en su reactividad y aplicaciones. En general, los resultados reflejan el impacto del pretratamiento en la estructura química de la cáscara de coyol.

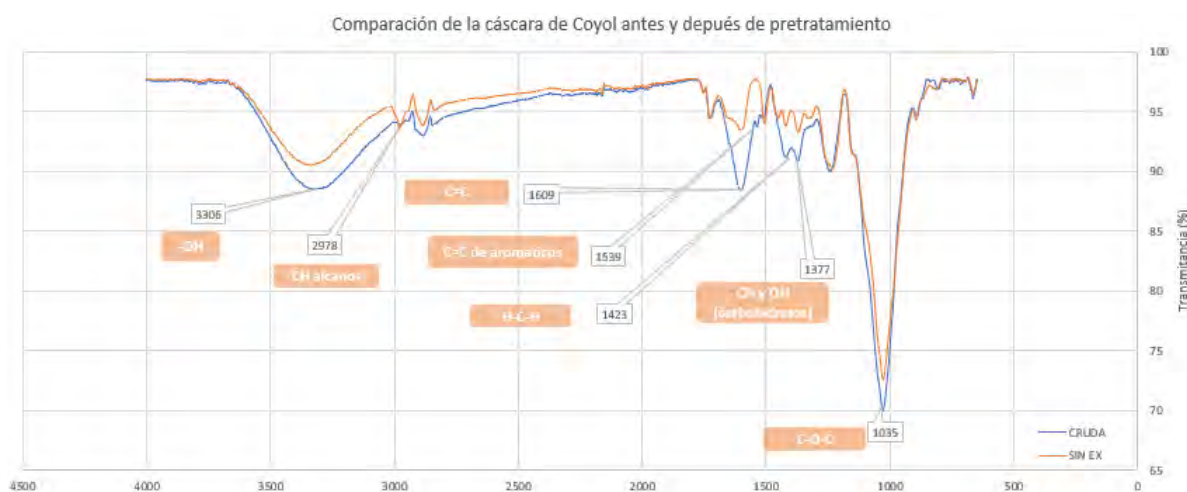


Figura 35 comparación de FTIR de la cáscara de coyol cruda y pretratada

16.1.6.1. Caracterización de extraíbles

Se realizó la lectura de la cáscara de coyol en polvo para conseguir una lectura homogénea de la cáscara, así como la lectura de los extraíbles después del lavado con agua (hidrosolubles) y después de lavado con alcohol (hidrofóbicos), obteniendo la gráfica siguiente, la cual se modificó restando 30 y 70 unidades en el eje de las coordenadas para presentar las tres lecturas en un mismo gráfico en función del eje de las abscisas.

La Figura 36 muestra un espectro infrarrojo (FTIR) correspondiente a los extractables hidrofóbicos. En el espectro se observan varias bandas que indican diferentes grupos funcionales presentes en la muestra. Entre ellas, se identifican vibraciones C-H en anillos aromáticos sustituidos alrededor de 805 cm^{-1} , y señales de grupos C-O en éteres aromáticos y alcoholes alifáticos en 1039 cm^{-1} . También se evidencia el estiramiento C-O-C en 1155 cm^{-1} , así como la presencia de C-O en lignina guaiacólica en 1230 cm^{-1} . A 1370 cm^{-1} aparecen vibraciones C-H en metilos y metilenos, mientras que en 1466 cm^{-1} se observan vibraciones C-H en anillos aromáticos. Los picos en 1515 cm^{-1} y 1605 cm^{-1} corresponden a enlaces C=C aromáticos. Una banda en 1744 cm^{-1} indica la presencia de grupos C=O asociados a ésteres o ácidos carboxílicos. Asimismo, las señales en 2919 cm^{-1} y 2852 cm^{-1} están relacionadas con C-H en cadenas alifáticas largas, y finalmente, a 3353 cm^{-1} se detectan enlaces O-H. Este espectro corresponde

a la fase sólida obtenida tras un lavado con alcohol, lo que permite identificar la composición química de los compuestos hidrofóbicos presentes en la muestra.

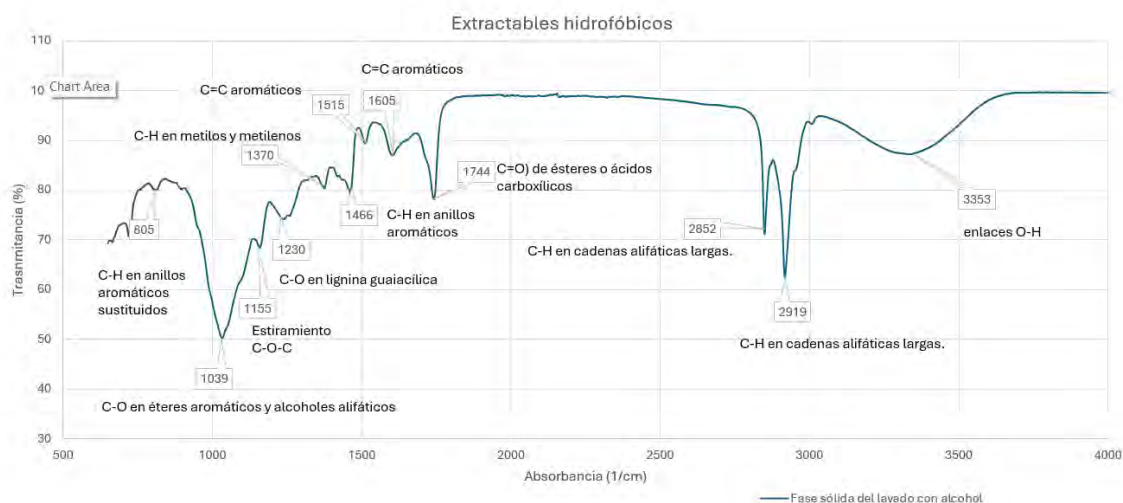


Figura 36 Enlaces, estiramientos y vibraciones de los extraíbles hidrofóbicos

En el espectro se marcan las lecturas de las principales diferencias (rectas verticales amarillas), las cuales se encuentran en los picos de 1030, 1640 y la curva de 2920 y 3330 cm^{-1} , los cuales son correspondientes según la literatura a estiramiento C=O, característico de los azúcares reductores, por lo que se espera y se comprueba que esté presente en la cáscara cruda seca (azul) y en los extraíbles hidrofílicos (anaranjado), C-O-C correspondientes a los grupos esterés de la celulosa y hemicelulosa, que aunque pueden llegar a ser solubles en agua, también se solubilizan en alcohol, mientras que la curva pertenece al huella del alcohol isopropílico, presente aún en los extraíbles, respectivamente. Así mismo los picos (verticales verdes) menos pronunciados pero que aún marcan una diferencia entre las lecturas pertenecen a estiramientos C-O (1245 cm^{-1}), vibración de deformación C-H (1375 cm^{-1}) y enlaces C=O de los grupos COOH (1735 cm^{-1}) (Kaur k, 2024).

La Figura 37 compara los espectros de absorción de los extractables hidrofílico (naranja) e hidrofóbico (gris) de la cáscara de coyol, mostrando diferencias en la intensidad y posición de los picos. El extractable hidrofóbico presenta una mayor intensidad en las bandas asociadas a los grupos -OH (3318 cm^{-1}), C-H (2924 y 2851 cm^{-1}), C=O (1638 cm^{-1}) y C-O-C (1028 cm^{-1}), lo que indica una mayor diversidad de compuestos polares. En contraste, el extractable hidrofílico exhibe una señal más uniforme con menor intensidad en los picos, sugiriendo una composición química menos variada.

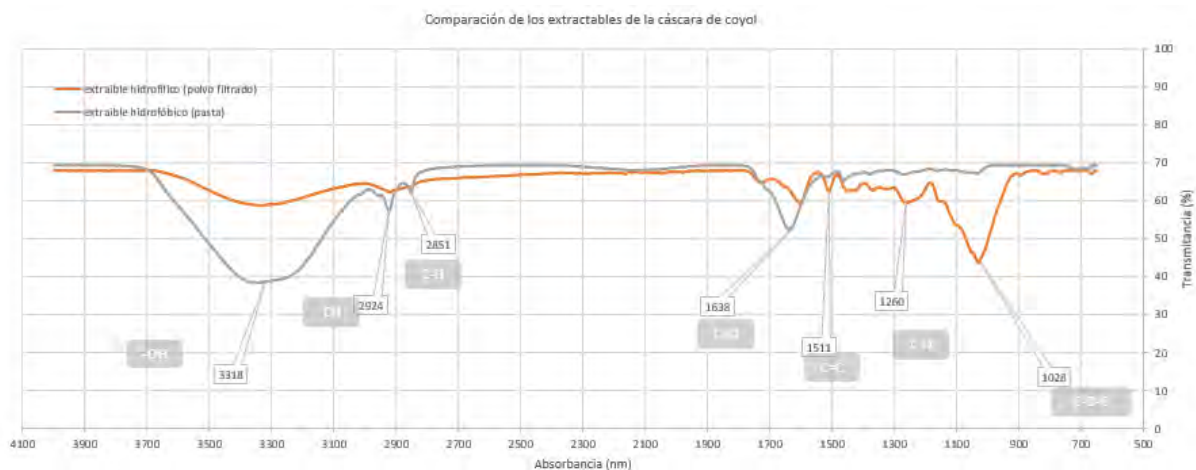


Figura 37 comparación de los extractables de la cáscara de coyol

16.1.6.2. Caracterización por SEM

SEM recubrimiento de oro-paladio para evitar que se cargue electrostáticamente la superficie de la cáscara de coyol cruda, donde se obtuvieron varias imágenes desde 200 a 10 micras (Figura 38 a Figura 41), en un análisis visual se puede observar que existen una superficie poco regular, pero sin llegar a consolidar poros bien definidos, se aprecian surcos importantes, pero poco profundos, caracterizando su superficie rugosa, de igual forma se observan grietas y fracturas.

En la Figura 38 se puede observar una toma tridimensional de la superficie del coyol, donde se observan varios tropiezos en su topología, donde el más destacado es en la parte superior central, donde se puede observar una cavidad de 300 micras de largo y por lo menos 10 micras de alto, obtenido mediante el uso del equipo JCM-7000 Benchtop SEM de la Empresa JEOL (al igual que las Figuras siguientes).

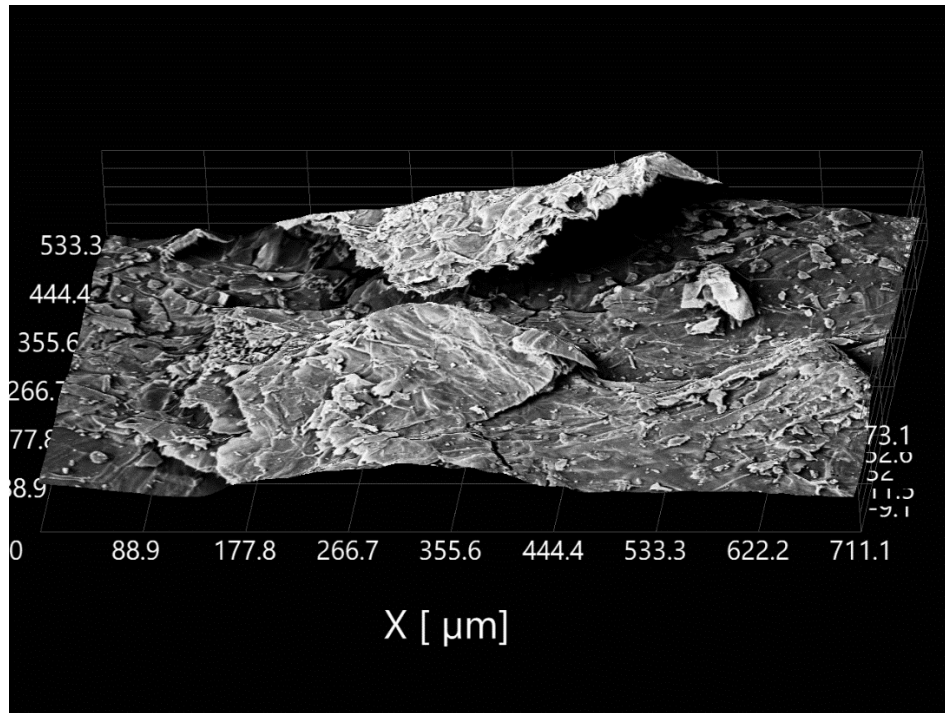


Figura 38 SEM 3D de cáscara de Coyol Cruda

Con respecto a la Figura 39 se observan grietas importantes en la parte superior, mostrando rugosidad en toda la superficie, de igual forma se aprecian las estructuras anisotrópicas del material lignocelulósico (línea irregular azul).

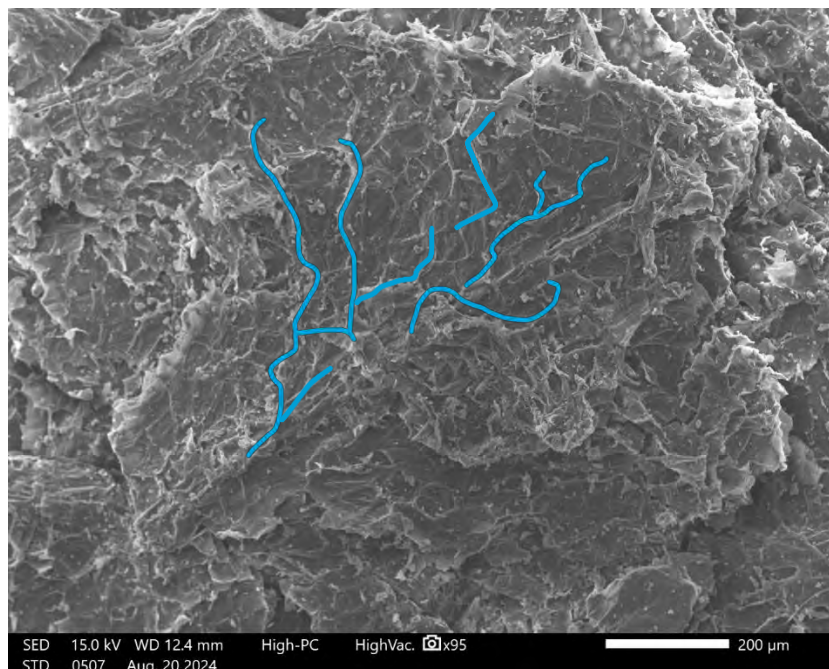


Figura 39 SEM Cáscara de coyol curda a 200 micrómetros

En la Figura 40 con un aumento a 100 micras, se observan fisuras y relieves de profundidad relevante, pero sin la constitución de un poro definido, se observan cavidades, las cuales pueden ser de interés al

momento de la adsorción, así mismo se observan restos de depósitos minerales o contaminantes adheridos a la superficie del material (Circunferencia roja).

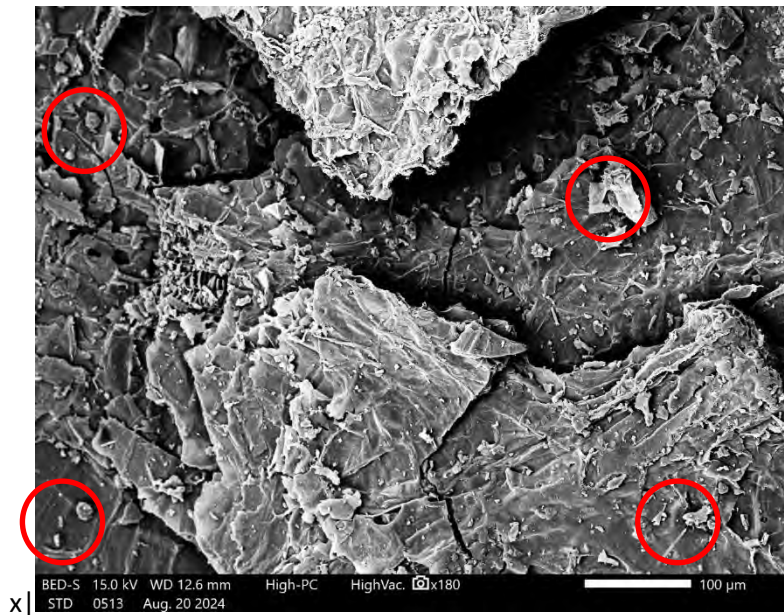


Figura 40 Cáscara de Coyol cruda a 100 micrómetros

Por su parte, en la Figura 41, se observa la posible constitución de varios poros (circunferencias azules), así mismo, se observan sitios en los cuales las moléculas por distribución y acomodo espacial podrían quedar atrapadas. Se observan con mayor claridad las estructuras anisotrópicas, que son comunes en materiales lignocelulósicos, y ciertos componentes adheridos.

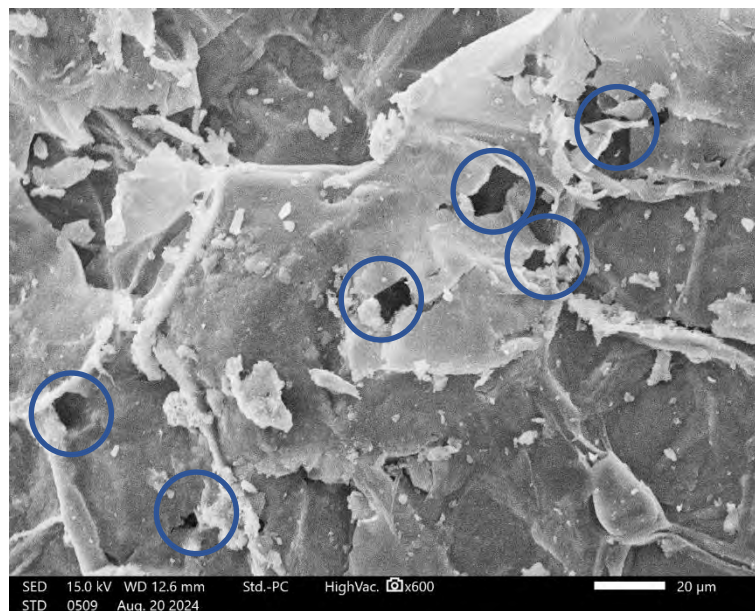


Figura 41 a Cáscara de Coyol cruda 20 micrómetros

Por su parte, el SEM obtenido de la cascara después del tratamiento de extracción de hidrofóbicos e hidrofílicos muestra cambios estructurales importantes como se muestra en las Figuras 42 a 44, donde en la Figura 42 se pueden ver intensificados los relieves y los tropiezos de la superficie de la cascara.

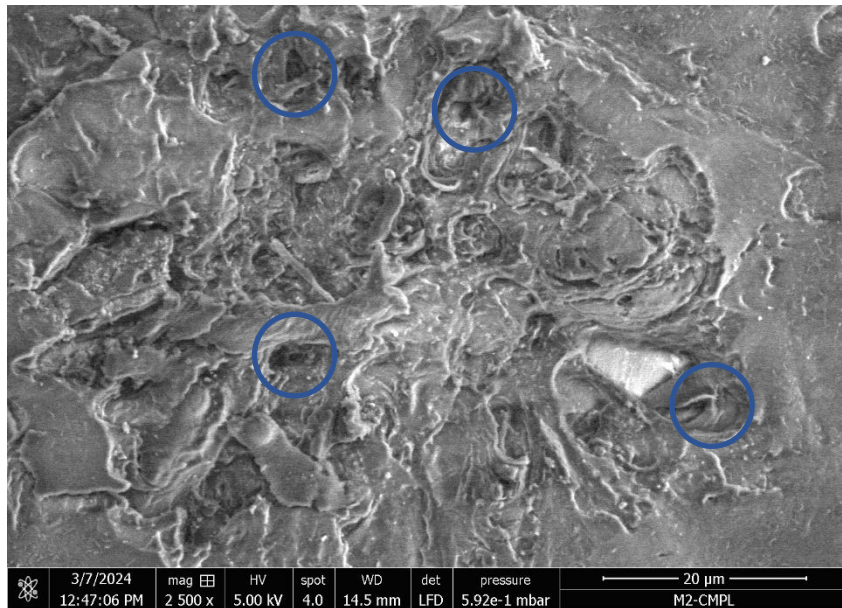


Figura 42 Cáscara de Coyol Tratada (lavada) a 20 micras

En la Figura 43 se observa una superficie con grietas más profundas e intensas que en la cáscara cruda, así como la formación de poros de diversos tamaños y profundidades

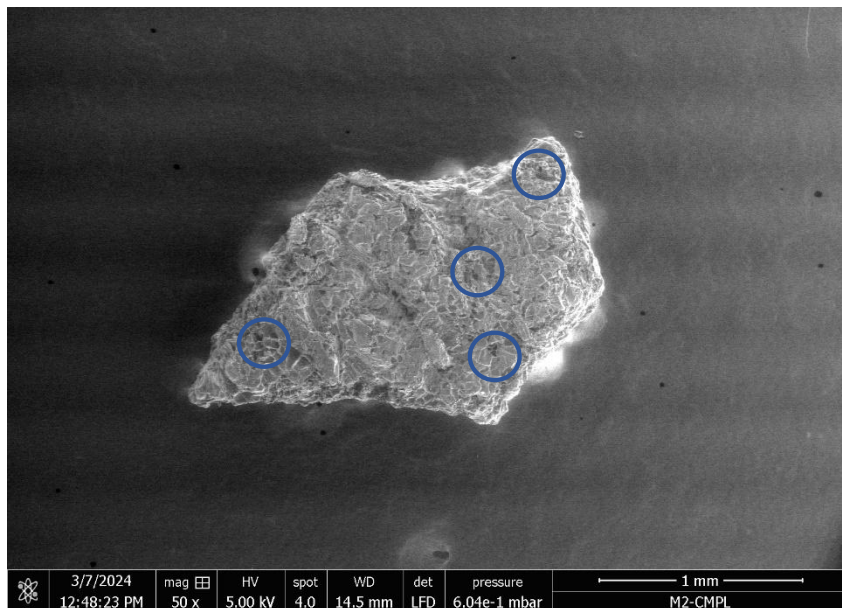


Figura 43 Cáscara de coyol Tratada (lavada) a 1 mm

Con respecto a lo observable en la Figura 44, se muestran poros en toda la superficie, relieves más profundos.

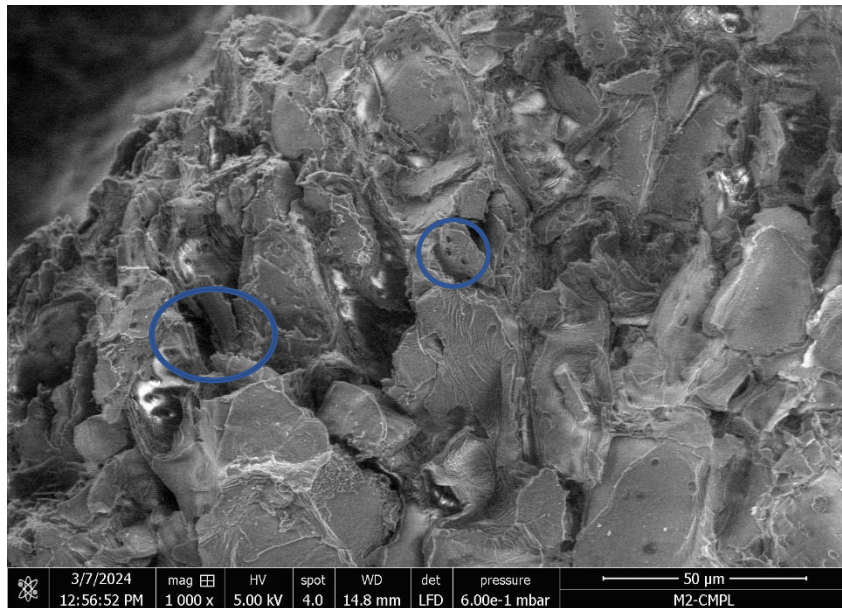




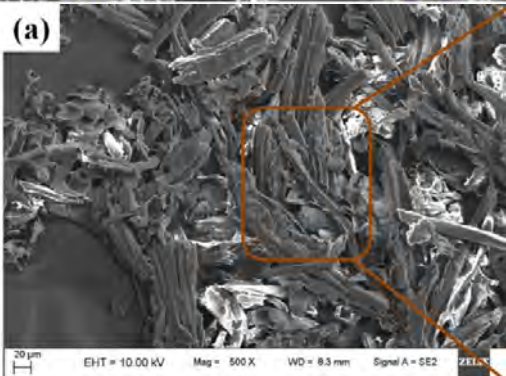
Figura 44 Cáscara de coyol Tratada (lavada) a 50 micras

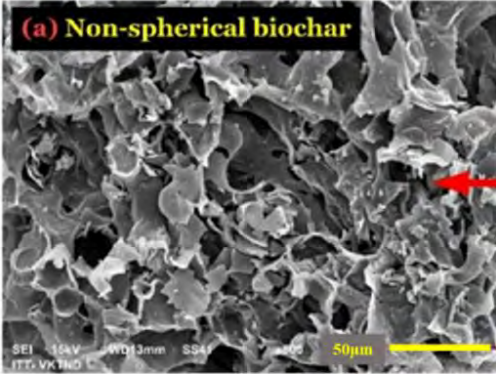
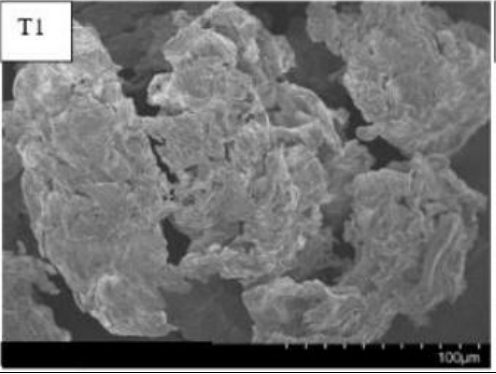
Se observa que después del pre tratamiento con agua y con alcohol, la superficie de la cascara de coyol aumento su área superficial y aumento la cantidad y profundidad de zonas porosas, lo cual se puede confirmar con el análisis de área superficial BET como se describe en el apartado 9.7 de este escrito, donde se observa que la cascara cruda a un tamaño de partícula de 2mm presentó nula área superficial por el método, por lo que se optó analizar con un tamaño de partícula menor (molida a 100micrometros), en la cual se obtuvo un área ligeramente mayor al área superficial después del tratamiento, aumentando en un 0.05 m²/g, forma similar con el volumen y diámetro del poro. Por lo que para la cáscara de coyol cruda se esperan valores menores a: Área por multipunto BET (m²/g) de 1.223E-01, Volumen total de poro (cm³/g) de 5.965E-04 y diámetro promedio de poro (Å) de 1.952E+02.

El cambio en el área superficial se puede deber a la eliminación de componentes que estaban adheridos a la superficie de la cáscara, o por la misma fractura de la cascara por el triturado, agitado y secado. Usualmente el área superficial aumenta cuando se realiza un tratamiento, como con una pirolisis que al aumentar la temperatura aumenta el área superficial de biocarbón derivado de material lignocelulósico, aumentando de 9.3 a 106 m²/g. caso similar con la cáscara de toronja, la cual cruda presenta un área de 3.85 m²/g mientras que funcionalizada con FeCl₃ alcanzó un área de 10.40 m²/g. aunque también se tiene reporte que al modificar la superficie puede disminuir el área superficial como es el caso de hojas de palma funcionalizadas con polietilenimina para la adsorción de Cr (VI) donde el área superficial se reducía de 122,2 a 86,52 m²/g después del injerto, así mismo en la Tabla 18 se muestran las características observadas por SEM de diferentes adsorbentes derivados de biomasa. El estudio del área superficial es de relevancia porque es ahí donde se encuentran los grupos funcionales que llevan a cabo el proceso de adsorción (Bachmann, 2023). Pero si bien es cierto que el área superficial y el área activa (compuesta por la suma de los sitios activos) son diferentes, y no necesariamente ligada con una relación lineal. Así mismo, Kuljit Kaur et. al. reportan en “A systematic review of lignocellulosic biomass for

remediation of environmental pollutants” del 2024 que las imágenes SEM del biocarbón obtenidas mostraron que la morfología superficial de las partículas originales se alteraba significativamente con los distintos tratamientos y pretratamientos, por ende, se espera que la cascara de coyol, después del tratamiento modificara su superficie, aunado a esto mencionan que la morfología de los materiales de carbono derivados de la biomasa varía mucho dependiendo del tipo de biomasa, pero todos tienen una estructura de poros homogénea en la superficie, que puede atribuirse a la liberación de pequeñas moléculas de la estructura original de la biomasa. Aunque hay que aclarar que este artículo menciona cambios debidos esencialmente a la pirolisis para la obtención del biocarbón. No obstante, en la misma investigación se menciona que habitualmente se obtienen mayores eficiencias de remoción cuando el biomaterial tiene mayor superficie superficial, mostrando que las biomazas no tratadas y las tratadas pueden tener diferentes áreas superficiales (Tabla 18). Por lo que podemos ver que si se ve modificada e incrementada el área superficial de la cascara de coyol sin la necesidad del consumo energético de un tratamiento térmico como es la pirolisis.

Tabla 18 comparación de imágenes de análisis BET de diversos materiales lignocelulósicos

Material	Especificaciones	SEM	Referencia
Bagazo de caña	Tratamiento térmico		(Kuljit Kaur, et al., 2024)
Aserrín	Tratamiento térmico		(Kuljit Kaur, et al., 2024)
Cáscara de sandía	secado al sol. Pulverizado, lavado con agua y filtrado		(Abhishek S., 2025)

Cáscara de toronja	Biocarbón con morfología no esférica pirolizado		(Kuljit Kaur, et al., 2024)
Cáscara de Sandía	Nanocelulosa obtenida por tratamiento alcalino con KOH, blanqueadas con tampón de acetato glacial y una hidrólisis ácida con 50% de ácido sulfúrico		(García D, et al., 2021)

16.2. Área BET

Inicialmente se analizaron las muestras cáscara de Coyoil Crudo (CR) 2mm y cáscara de Coyoil sin extraíbles 2mm (CEX) pero el área superficial obtenido fue nula para CR, dado lo anterior y para corroborar si moler la muestra ayudaba se analizó la muestra etiquetada como CRNK 1 (Cáscara de coyoil cruda a 0.1mm), en este caso al menos los valores de adsorción fueron positivos, pero de igual manera el área superficial es de magnitud 1×10^{-1} . Los resultados que se expresan en la siguiente Tabla corresponden a la muestra CEX (mayor cantidad de muestra analizada), con un coeficiente de 0.6 y CRNK 1 (molida) con un coeficiente de 0.9. Por otra parte, durante la desgasificación al parecer no hubo ningún tipo de desorción. El área superficial BET, se llevó a cabo en una atmósfera de nitrógeno, con un tiempo de duración de 472 minutos (Tabla 19).

Tabla 19 Área superficial de la cáscara de coyoil

	Peso de la muestra (g)	Área Superficial (m ² /g)	Volumen total de poro (cm ³ /g)	Diámetro promedio de poro (Å)
CRNK	1.51	1.728E-01	3.87E-03	8.96E+02
CEX	1.5	1.223E-01	5.965E-04	1.952E+02

Para conocer si el área superficial es una propiedad competitiva con otros materiales estudiados para la adsorción de metales pesados se presenta la Tabla 20, donde se expone el Área superficial en m²/g y el Volumen de poros en cm³/g.

Tabla 20 Comparación de área superficial y volumen de poro de diversos materiales lignocelulósicos estudiados como adsorbentes

Adsorbente de residuos lignocelulósicos	Área superficial (m ² / g)	Volumen de poros (cm ³ / g)	Referencias
Eucalipto	265	0.17	
Polvos de paja de trigo	215.70	0.03	
Cáscara de pomelo	3.85	0.08	
Crudo	10.40	0.24	
Cáscaras de naranja	2	-	(Bachmann,2021)
Residuos de té	9.94	0.01	
Cáscara de <i>Ariocarpus heterophyllus</i>	8.83	7.83	
Hoja de corona de piña modificada con Alcohol isopropílico	32.90	-	
Residuos de huesos de dátiles	1.20	0.02	
Cáscara de <i>Sterculia gutata</i> : Crudo	3.63	-	
Cáscara de coyol Cruda	1.728E-01	3.87E-03	
Cáscara de coyol pretratada	1.223E-01	5.965E-04	Este escrito

16.3. Caracterización por TGA

En función de lo manifestado por Manals-Cutiño (2011), en su investigación Análisis termogravimétrico y térmico diferencial de diferentes biomásas vegetales, donde describe que se pueden identificar cinco zonas de la descomposición de los materiales lignocelulósicos, en la primera que va de la temperatura ambiente hasta los 100°C se trata de la evaporación de la humedad, de los 101°C a los 250°C se presenta la descomposición de los extractables, de los 250°C a los 350°C se desarrolla la descomposición de la hemicelulosa, de los 350°C a los 500°C predomina la descomposición de la celulosa y la lignina y por ultimo arriba de los 500 se encuentra la evolución de descomposición de la lignina. Esto a aunado que arriba de los 800 grados se encuentran las cenizas, por lo tanto, con las ecuaciones (5) a (10) se obtienen los valores de la Tabla 21.

En este tenor se presenta la curva del TGA de la muestra de cáscara de coyol cruda previamente secada. con la división por zonas, donde se observa que, de la masa total, el 0.19±0.1% es humedad, 6.63±0.1 es correspondiente a los extractables, 43.36±1.5% correspondiente a la hemicelulosa, 15.29±2.5% de celulosa, 29.76±3.0 de lignina y 3.34±0% a las cenizas, lo cual representa el 98.58±1.5% del peso de la cáscara, destacando que la cáscara fue analizada después de secado a 105°C, por ende, la humedad no corresponde con la obtenida mediante el peso constante descrita en el apartado 9.2.1. (Figura 45 y Tabla 21).

Tabla 21 Composición de la cáscara de Coyol en función del estudio termogravimétrico

Componente	(%)
Humedad	0.19±0.1
Extractables	6.63±0.1
Hemicelulosa	43.36±1.5
Celulosa	15.29±2.5
Lignina	29.76±3.0
Cenizas	3.34±0
Total	98.58±1.5

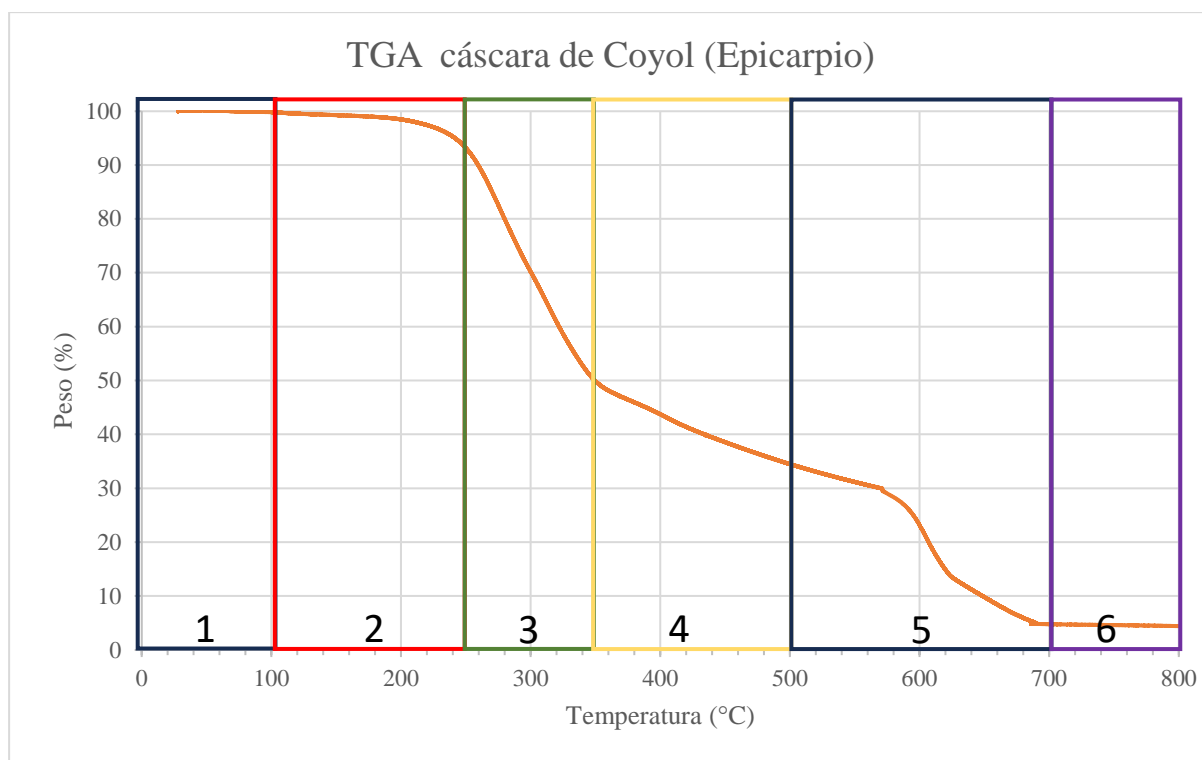


Figura 45 TGA cáscara de coyol pretratada por zonas para el cálculo de composición

La cáscara de coyol presenta características distintivas en su composición química en comparación con los materiales de biomasa presentados en la Tabla 22. Su contenido de celulosa, con un $15.29 \pm 2.5\%$, es significativamente más bajo que el rango observado en las demás biomásas que oscila entre 25.0 y 53.3%, así mismo presenta un alto porcentaje de hemicelulosa, con un $43.36 \pm 1.5\%$, destaca entre los materiales analizados, superando a la mayoría de las otras biomásas y acercándose al valor más alto registrado en pastos que es de 50.0%, mientras que en función del contenido de lignina de $29.76 \pm 3.0\%$, situándose en la parte superior del rango observado en los otros materiales, lo cual puede representar con ventajas significativas en términos de hemicelulosa y lignina, aunque con limitaciones en su contenido de celulosa como la proporción con la cantidad de grupo funciones como -OH y -COOH, los cuales son responsables de la adsorción del cromo (VI).

Tabla 22 comparación de composición de biomasa lignocelulósica

Biomasa	Celulosa (wt% ^{**})	Hemicelulosa (wt%)	Lignina (wt%)
Madera dura (Álamo)*	50.8–53.3	26.2–28.7	15.5–16.3
Madera blanda (Pino)*	45.0–50.0	25.0–35.0	25.0–35.0
Paja de trigo*	35.0–39.0	23.0–30.0	12.0–16.0
Mazorca de maíz*	33.7–41.2	31.9–36.0	6.1–15.9
Tallo de maíz*	35.0–39.6	16.8–35.0	7.0–18.4
Paja de arroz*	29.2–34.7	23.0–25.9	17.0–19.0
Cáscaras de arroz*	28.7–35.6	12.0–29.3	15.4–20.0
Bagazo de caña de azúcar*	25.0–45.0	28.0–32.0	15.0–25.0
Paja de sorgo*	32.0–35.0	24.0–27.0	15.0–21.0
Paja de cebada*	36.0–43.0	24.0–33.0	6.3–9.8
Pastos*	25.0–40.0	25.0–50.0	10.0–30.0
Hierba*	35.0–40.0	25.0–30.0	15.0–20.0
Promedio	37.78	28.15	16.8
Cáscara de Coyol	15.29±2.5	43.36±1.5	29.76±3.0

*Fuente: (Cai et al., 2017), **wt%= porcentaje en peso.

Por su parte la derivada termogravimétrica (DTG) que es una técnica analítica que mide la pérdida (o ganancia) de peso de un material en función de la temperatura y que se utiliza para determinar los parámetros cinéticos de diferentes materiales orgánicos (El-Sayed y Mostafa, 2014), La DTG es una técnica empleada para estudiar las transformaciones que ocurren en un adsorbente debido a variaciones de temperatura, incluyendo procesos como la fusión, cristalización, descomposición y otros fenómenos térmicos. Estos cambios térmicos generan eventos que se reflejan en la curva DTG como picos o descensos característicos (Solanki A,2025). Como se muestra en la Figura 46, los picos a temperaturas de 274°C, 300°C y en 590°C la DTG marcan los puntos donde la pendiente de la curva TGA es más pronunciada, lo que indica la máxima pérdida de masa con un valor de pérdida de peso de 3, 2.8 y 2.5 %/min, Este análisis ayuda a identificar temperaturas a la que se produce la máxima pérdida de masa de la biomasa, proporcionando información valiosa sobre el comportamiento térmico de las muestras, lo cual puede dirigir a futuras aplicaciones de la cascara de coyol después de su vida útil como adsorbente.

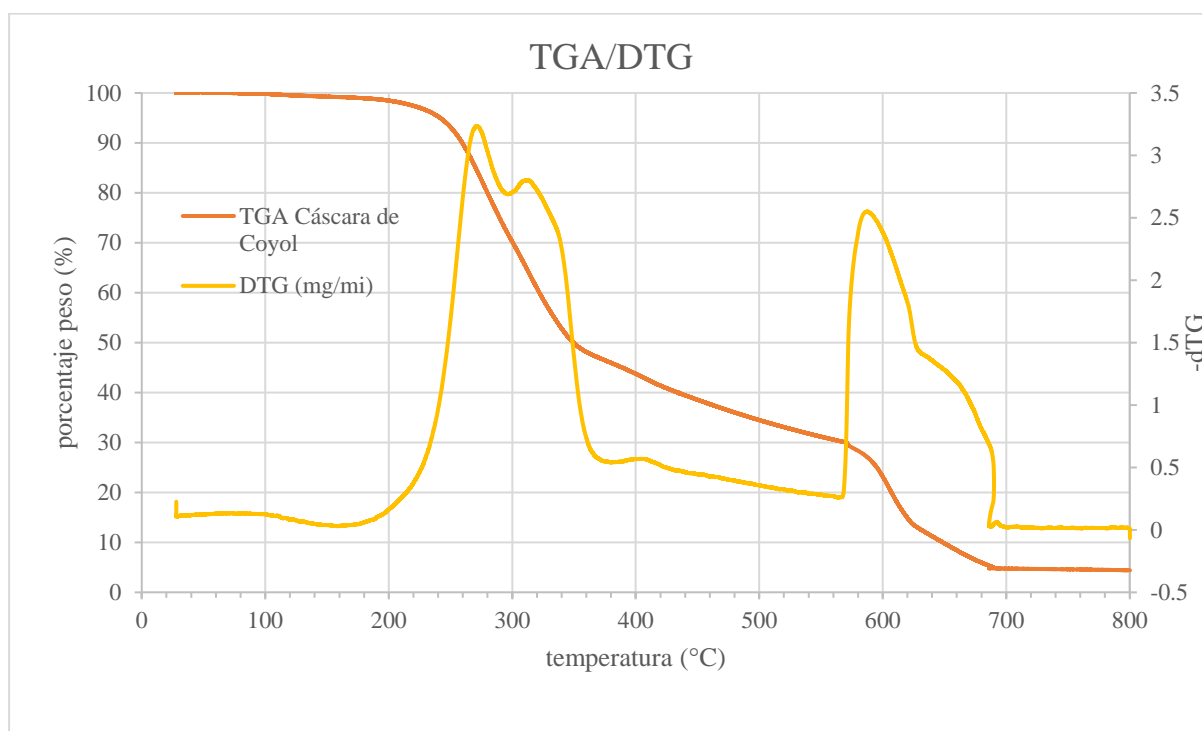


Figura 46 TGA y DTG de la cáscara de coyol pretratada

16.4. Determinación de punto de carga cero

Se realizaron 9 pruebas de pH, Partiendo de un pH 2 hasta 10, De unidad en unidad, por triplicado en las cuales a 100 ml de agua desionizada se le ajustó el pH con ácido clorhídrico al 0.1 M y con hidróxido de sodio al 0.1 M, midiendo el pH con un potenciómetro previamente calibrado. Se añade 0.5 g de cascara de coyol cruda. Se coloca a agitación constante 700 rpm durante 24 horas, terminado el tiempo

se lee nuevamente el pH y se calcula la diferencia desde pH_o hasta pH_f. Se obtuvieron los datos que se registran en la Tabla 23.

Tabla 23 Determinaciones del cambio del pH después de 24 horas

pH	pH _o	pH _f	ΔpH
2	2.05	2.32	-0.27
3	3.1	4	-1.78
4	4	3.75	0.25
5	5	4.75	0.25
6	6	5.5	0.5
7	7	5.5	1.5
8	8	6	2
9	9	7.5	1.5
10	10	7.5	2.5

Posteriormente se realiza la gráfica de la diferencia del pH en función del pH inicial, en la cual se observan diferencias más pronunciadas a pH alcalinos, tendiendo a cero cuando el medio es más ácido hasta un pH de 4, donde en pH más bajos la diferencia empieza aumentar (Figura 47).

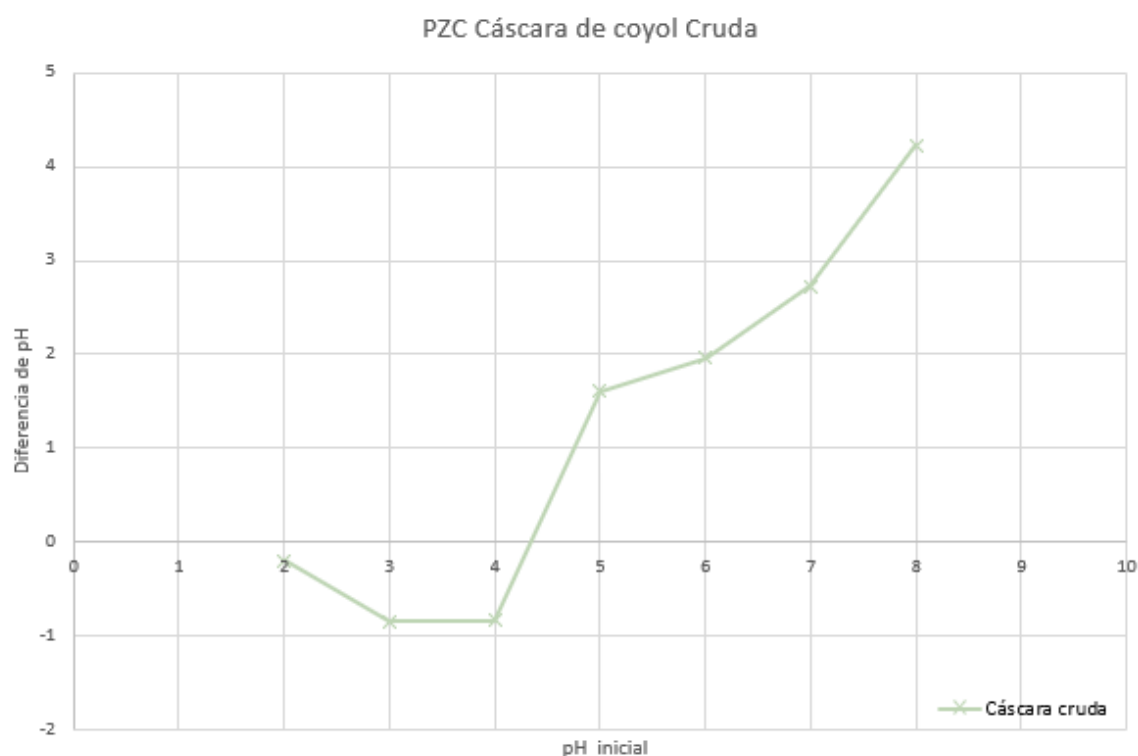


Figura 47 PZC de la cáscara de coyol cruda.

Se observa en la gráfica resultante (Figura 48) de la determinación de pH que el punto de carga cero se encuentra en un valor de pH de 3.5 a 3.8, punto en el cual la diferencia es 0. lo que significa que la carga total de la superficie del coyol presenta carga neutra, de tal modo que los iones H⁺ han neutralizado a los radicales OH de los grupos funcionales presentes en los lignocelulósicos (Ayub S., 2014).

El punto de carga cero (PZC) se refiere al pH en el cual la superficie del material adsorbente tiene una carga neta nula. En este estado, la cantidad de sitios con carga positiva es equivalente a la de sitios con carga negativa, en este particular caso la determinación de los parámetros PZC ha sido poco explorada

en los residuos agroindustriales. Generalmente, los estudios han explorado amplios rangos de pH (habitualmente entre 2 y 10) para determinar las condiciones óptimas que favorezcan la remoción de contaminantes, sin considerar que cada material presenta una distribución específica de carga neta en su superficie, la cual influye directamente en la retención de ciertos tipos de contaminantes. Esto destaca la importancia de seleccionar cuidadosamente el pH adecuado para optimizar el proceso de eliminación del contaminante en cuestión y lograr una mayor eficiencia. Dado que el punto de carga cero (PZC) representa el equilibrio de cargas en la superficie del material adsorbente, un pH superior al PZC genera una superficie con carga negativa, mientras que un pH inferior produce una superficie con carga positiva, caso que se comprueba en el estudio “Determinación del punto de carga cero y punto isoeléctrico de dos residuos agrícolas y su aplicación en la remoción de colorantes” donde en el caso de la adsorción de colorantes, se logró una remoción superior para un colorante aniónico en condiciones ácidas en comparación con un medio alcalino. Por otro lado, la eliminación de un colorante catiónico fue más efectiva a pH superiores al valor del PZC (5.4), es decir en pH alcalinos, debido a la formación de cargas negativas en la superficie del adsorbente (Villa A., 2013). Es decir, para remover compuestos aniónicos (con carga negativa), será más eficiente en medios ácidos por debajo del punto de carga cero, mientras para compuestos catiónicos (con cargas positivas) en medios alcalinos (por arriba del PZC). Por otro lado, Elaine Fabre y colaboradoras/es mencionan en “*Valuation of banana peels as an effective biosorbent for mercury removal under low environmental concentrations*” del 2020 que El PZC se alcanza cuando la superficie de los biosorbentes no tiene carga, por arriba de este pH la superficie dona protones a la solución y se carga negativamente y, por el contrario, por debajo de este valor el adsorbente se carga positivamente al aceptar protones de la solución. Donde se adsorbió Hg(II) (catión), a un pH =6 (alcalino), considerando el PZC=5.7 reportado por Moreria *et al.*, 2022, por lo que se espera que la superficie se cargue negativamente por estar en una solución con pH superior al PZC, favoreciendo la adsorción del Hg (II), alcanzando concentraciones finales con calidad de agua potable (aunque las variables con mayor influencia en este estudio fue el tiempo de contacto y la dosis de adsorbente). Así mismo en el estudio “Disminución de cromo y cobre en aguas residuales utilizando cáscaras de naranja y banano (*citrus sinensis* y *musa paradisiaca*) como bioadsorbente” de Laura Moreira R y colaboradoras/es Publicado en 2022, Menciona que el PZC para la cascara de naranja y de plátano es 4.8 y 5,7 respectivamente, dichos residuos agroindustriales fueron estudiados para la remoción de Cr (VI) y Cu (II), donde obtuvieron los mejores rendimientos para remoción de Cr (VI) (92.9%) en pH=3 para la cascara de plátano y para la remoción de Cu (II) (97.1%) con cascara de naranja a pH 5,5. Donde, se retoma que el PZC de la cascara de naranja es 4.8 y pH de mayor remoción es pH=3, vemos que la los grupos funcionales se protonan dotando a la superficie con carga positiva, por estar debajo del pzc, de manera complementaria las especies que contienen al cromo (VI) son aniónicas, por lo que se verá favorecida la atracción electrostática por las cargas contrarias. Caso similar con la cascara de plátano, donde el pH del medio está por encima del PZC, por lo que se favorece la adsorción de cationes.

Considerando que se mostró que las características fisicoquímicas de la cascara se modifican después del pretratamiento, se procede a la determinación del PZC (Tabla 24 y Figura 48) , lo cual ayuda a explicar los porcentajes de remoción obtenidos,

Tabla 24 Diferencia de pH de la cascara de coyol pretratada

pH	Δ pH
3	-0.47
4	-1.87
5	-1.04
6	-0.2
7	-0.08
8	0.82
9	0.63

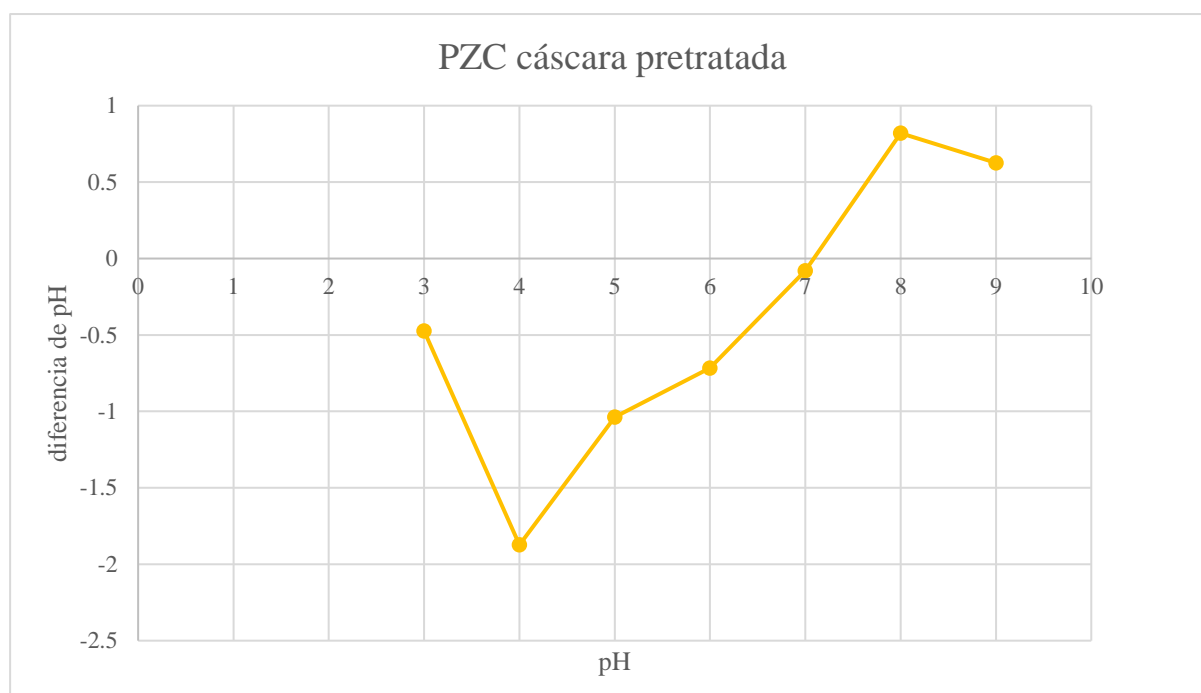


Figura 48 PZC cáscara de Coyol pretratada

Para que la carga de la superficie se neutralice, se deberán protonar los grupos funcionales con carga negativa, y en su caso desprotonar lo que presenten carga positiva, en el caso de la cascara de coyol, un material lignocelulósico, presenta una gran cantidad de grupos carbonilo, carbonilos, ester, éteres según la caracterización por FTIR, los cuales son grupos que pueden ser cargados negativamente, neutralizados o cargados positivamente según las condiciones del medio, también presenta grupos CH₃, como se puede observar en el espectro del IFTR, hay una gran cantidad de grupos -CO, de los esteres lignina y celulosa.

Tabla 25 comparación de los puntos de carga cero de diferentes adsorbentes lignocelulósicos

Residuo agroindustrial	Punto de carga cero	Referencia
Cascara de naranja	4.8	(Moreira L., 2022)
Cascara de plátano	5.7	(Moreira L., 2022)

Carbón activado (serrín de madera)	6.3	(Bachmann, 2023)
<i>Eucalipto camaldulensis</i>	6.8	(Bachmann, 2023)
Hierba Bermuda	6.8	(Bachmann, 2023)
Paja de maíz	4.8	(Bachmann, 2023)
Cáscara de cacahuete	4.8	(Bachmann, 2023)
Cáscara de roble castaño	3.5	(Bachmann, 2023)
Semilla de níspero	5.6	(Bachmann, 2023)
Cáscara de manzano	3.9	(Bachmann, 2023)
Corona de piña	4	(Bachmann, 2023)
Concha de <i>Sterculia guttata</i>	7	(Bachmann, 2023)
Cáscara de coyol cruda	3.8	Este escrito
Cáscara de coyol pretratada	7	Este escrito

16.5. Análisis Elemental

La Tabla 26 presenta los porcentajes de elementos que constituyen la cáscara de coyol en dos estados: cruda y sin extractables (o pretratada). Para cada tipo de cáscara, se reporta el peso en miligramos. Se utiliza un factor de proteína constante de 6.25. La humedad es nula en ambos casos (0%). El contenido de nitrógeno es de $0.688\% \pm 0.062$ para la cáscara cruda y de $0.54\% \pm 0.01$ para la cáscara sin extractables. El porcentaje de carbono es de $43.16\% \pm 0.3$ en la cáscara cruda y de $48.58\% \pm 0.78$ en la cáscara sin extractables. El contenido de hidrógeno es de $5.65\% \pm 0.14$ en la cáscara cruda y aumenta a $6.02\% \pm 0.04$ en la cáscara después del pretratamiento. El azufre está presente en pequeñas cantidades en la cáscara cruda ($0.062\% \pm 0.002$) y no se detecta en la cáscara sin extractables (0.00%). Además, se presentan los valores de poder calorífico bruto (o *gross*, GHV) y neto (o *low*, LHV), con valores de 5485 ± 23.7 cal/g y 5195 ± 16.5 cal/g para la cáscara cruda, respectivamente, y de 6056 ± 49.8 cal/g y 5747 ± 51.9 cal/g para la cáscara sin extractables, mostrando un incremento significativo en el contenido energético tras la extracción después del pretratamiento.

Tabla 26 Porcentajes de elementos que constituyen a la cáscara de coyol y su Gross y Low Heat value

	Peso (mg)	Factor de proteína	Humedad (%)	Nitrógeno (%)	Carbono (%)	Hidrogeno (%)	Sulfuro (%)	GHV (cal/g)	LHV (cal/g)
Cáscara de coyol cruda	3.62	6.25	0	0.688 ± 0.062	43.16 ± 0.3	5.65 ± 0.14	0.062 ± 0.002	5485 ± 23.7	5195 ± 16.5
Cáscara de coyol pretratado	3.29	6.25	0	0.54 ± 0.01	48.58 ± 0.78	6.02 ± 0.04	0.00 ± 0	6056 ± 49.8	5747 ± 51.9

Representa las relaciones molares de oxígeno (O), carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y azufre (S). Normalmente las relaciones de moles O/C y H/C se utilizan como indicadores del grado de carbonización, en la literatura se reporta que un biocarbón (*biochar* por su nombre en inglés) de calidad esta elementalmente compuesto por 2-5% de Hidrogeno 45-60% Carbono, y 10-20% de oxígeno, aunque también esta descrito que estos porcentajes variarán dependiendo de la materia orgánica y sus procesos de cultivo (Ali Fakhar, et al., 2025).

La Tabla 27 contrasta la composición elemental de varios materiales lignocelulósicos en relación con nitrógeno, carbono, hidrógeno y azufre, expresados en términos porcentuales. Resalta la cáscara de coyol pretratado, cuyas concentraciones (0.688% de nitrógeno, 43.16% de carbono, 5.65% de hidrógeno y 0.062% de azufre) se sitúan en el rango medio de los materiales estudiados, y cuyos datos se extraen de este estudio. Por otro lado, materiales como la cáscara de durián exhiben el mayor contenido de nitrógeno (3.1%) y carbono (60.3%), en cambio, los huesos de ciruela tienen los niveles más reducidos de carbono (41.4%). Además, ciertos materiales, como los huesos de ciruela y la cáscara de palma, no reportan un contenido de azufre, señalado como "NI". El estudio estadístico revela que, en términos generales, los materiales poseen un 1.275% de nitrógeno, 47.875% de carbono, 6.05% de hidrógeno y 0.155% de azufre, mostrando fluctuaciones moderadas en las desviaciones estándar. Esta información es vital para determinar la adecuación de estos materiales en usos como la fabricación de bioenergía. Por lo tanto, haciendo la comparación de la cáscara de coyol con los otros materiales lignocelulósicos, podemos observar que La cáscara de coyol pretratada presenta características distintivas en comparación con los demás materiales lignocelulósicos analizados. En cuanto al contenido de nitrógeno, la cáscara de coyol (0.688%) está por debajo del promedio (1.275%) y significativamente menor que materiales como la cáscara de durián (3.1%) o los tallos de algodón (2.6%), lo que podría indicar un menor contenido proteico. Su contenido de carbono (43.16%) también se encuentra por debajo del promedio (47.875%) y es menor que el de materiales como la cáscara de durián (60.3%) o la cáscara de palma (50.1%), reflejando un potencial energético ligeramente más bajo. Por otro lado, supera en carbono a materiales como los huesos de ciruela (41.4%) y los tallos de algodón (41.2%). En cuanto al contenido de azufre, el coyol (0.062%) presenta un valor relativamente bajo, estando por debajo del promedio esta característica puede ser favorable, ya que un bajo contenido de azufre reduce las emisiones contaminantes durante su uso en bioenergía, después de su vida útil como adsorbente.

Tabla 27 Comparación de composición elemental de lignocelulósicos

Material lignocelulósico	Nitrógeno (%)	Carbón (%)	Hidrogeno (%)	Sulfuro (%)	Referencia
Cáscara de coyol pretratado	0.688 ± 0.062	43.16±0.3	5.65±0.14	0.062±0.002	Este escrito
Tallos de maíz	0.9	45.5	6.2	0.13	
Mazorcas de maíz	0.6	46.3	5.6	0.0	
Tallos de algodón	2.6	41.2	5.0	0.0	
Paja de arroz	0.7	41.8	4.6	0.1	
Cáscara de durián	3.1	60.3	8.5	0.1	(Kaur K., et al., 2024)
Cáscara de palma	1.9	50.1	6.9	NI	
Cáscara de almendra	0.3	51.4	6.1	0.6	
Huesos de ciruela	0.1	46.4	5.5	NI	
Promedio	1.275	47.875	6.05	0.155	
Desviación estándar	1.044928227	5.739283492	1.143459663	0.205243758	

NI= no presenta este dato

16.6. Poder calorífico

La determinación del poder calorífico se llevó a cabo en un calorímetro, con un método dinámico estandarizado, en el que la temperatura inicial es de 26°C y un aumento de 2°C. se utiliza 1g de muestra para esta determinación, obteniendo 16.92 MJ/Kg y 19.1 MJ/Kg, como se muestra en la Tabla 28

Tabla 28 poder Calorífico de la Cáscara de coyol

Componente	Peso (mg)	Poder calorífico (MJ/kg)
Cáscara de coyol cruda	1.0002	16.92
Cáscara de coyol sin extractables	1.00110	19.1201

La biomasa es un recurso de gran importancia debido a su amplia disponibilidad en la naturaleza, con una producción global estimada en 100 mil millones de toneladas anuales. Como único recurso renovable de carbono, tiene el potencial de generar calor, electricidad, combustibles, productos químicos y otros bienes, por lo que proyectar su aprovechamiento después de su vida útil como bioadsorbente es de relevancia, tanto por la perspectiva integral de este trabajo como para la generación de conocimiento para él su aprovechamiento, pues este aprovechamiento de la biomasa contribuye a la transición hacia energías más limpias, reduciendo la dependencia de fuentes fósiles que todavía representan el 81% del suministro energético mundial (Afanasjeva N, et al., 2017). la biomasa combinada con tecnologías modernas puede subsanar diversidad de necesidad nacionales como lo es el saneamiento del agua, la reducción de residuos y la generación de energía, es por esto por lo que la información sobre el poder calorífico, así como la composición elemental de la cascara del coyol, es de relevancia para el avance en la mitigación de las problemáticas ambientales y sociales.

16.7. Evaluación de adsorción de cromo hexavalente

16.7.1. Método directo de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$)

Se hace un etiquetado de la corrida y el tipo de cáscara que se está utilizando, Por lo que. La nomenclatura “MSR1”, Significa método de superficie de respuesta corrida uno (de las 18), “CAL o CCR” significan cáscara de coyol Lavada y cruda, respectivamente, así como el número final de la nomenclatura hace referencia al número de repetición. de la prueba.

En la Figura 49 se pueden observar los frascos que contienen la fase líquida del proceso de absorción del lado izquierdo tenemos. La absorción de la corrida MSR1 De cáscara Sin extraíbles y cruda (Se observa de un color café), Mientras que del lado Derecho, tenemos de igual forma cáscara Cruda y cáscara sin extraíbles, pero de la corrida MSR6. Las cuatro de la repetición 1

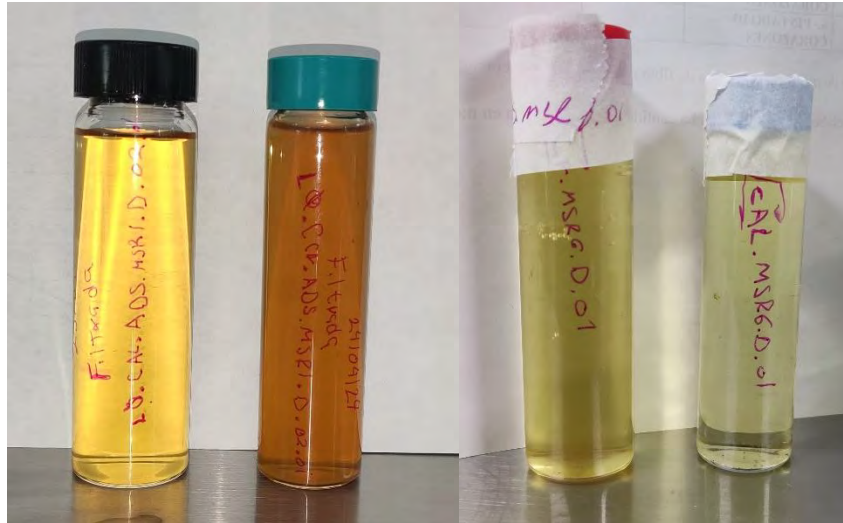


Figura 49 muestras líquidas después de la adsorción

Una vez realizado las corridas con cascara cruda, se procedió la cascara de coyol pretratada (MSR 1 a MSR 18) acatando los valores de las variables establecidas por la Metodología Superficie de Respuesta, se almacenan un mínimo de 20 ml de la fase líquida. De la fase líquida se extrae aproximadamente 2 ml para ser leídos en el espectrofotómetro con la finalidad de obtener la longitud de onda A 390 nanómetros (Tabla 29).

Con respecto a la fase líquida resultante del ensayo de adsorción con la cascara de coyol cruda, se descartó la lectura directa y la lectura específica con DFC, así mismo se descartó la continuación en el análisis de la cascara cruda para el proceso de adsorción, derivado la cantidad de extractables que desorbe durante el ensayo, y en función a que interfiere en la lectura, pues presenta turbidez incluso después del filtrado y centrifugado (700rpm por 5 min), aunado a esto, debido a la naturaleza de los extractables como se describe en el apartado 9.2. , es un nicho para el desarrollo de hongos y/u otros organismos, lo que complicaría el tratamiento de aguas residuales, añadiendo azúcares, terpenos y posible desarrollo de microorganismo (Figura 50). Derivado de estas observaciones el uso de las cascara de coyol cruda para la adsorción de contaminantes de aguas residuales no es viable por la complicación a la cuantificación, el almacén y el tren de tratamiento, así mismo los subproductos derivados del pretratamiento del cascara de Coyol tiene potencial de uso dentro de la biorrefinería del Coyol e incluso para el aprovechamiento energético.

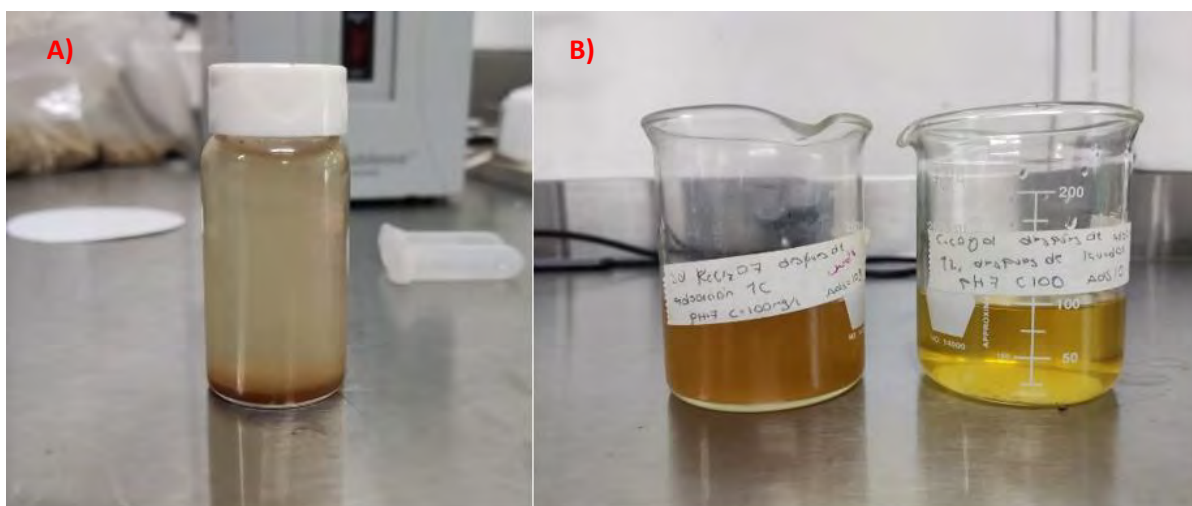


Figura 50 Comparación de la fase líquida después del ensayo de adsorción, A) Cáscara cruda, B) izquierda cáscara cruda-derecha cáscara pretratada

Tabla 29 Obtención de la concentración de cromo (VI) en función de la absorbancia leída directamente a 390 nm. Utilizando cáscara de coyol pretratada.

MSR	Concentración inicial (mg/L)	Concentración final (mg/L)
1	100	181.6909
2	10	46.96364
3	100	78.6
4	10	13.14545
5	10	95.87273
6	100	135.1455
7	100	27.50909
8	10	27.50909
9	55	69.50909
10	55	166.2364
11	55	37.69091
12	55	100.4182
13	10	116.9636
14	100	85.32727
15	55	121.6909
16	55	85.32727
17	55	333.1455
18	55	85.50909

Como se puede observar en la Tabla 29 las concentraciones finales (después del ensayo de adsorción y la filtración) resultaron ser más altas según el método de determinación a partir del espectrofotómetro. Así mismo las muestras en fase líquida presentan diferentes coloraciones dentro del rango del café y el amarillo, por lo que la determinación incluso con una dilución de 1:10 no es confiable para la determinación por espectrofotometría directa. Por lo que se opta por la determinación con difenil carbazida, obteniendo los siguientes resultados (Tabla 30).

Tabla 30 Concentraciones iniciales y finales de Cr (VI) determinadas con difenil carbazida para los ensayos de adsorción con cáscara de Coyol pretratada

MSR	Concentración inicial (mg Cr+6/ml)	Concentración final (mg/L)
1	0.036505	0.004227
2	0.019399	0.003478

3	0.036505	0.007272
4	0.003309	0.001248
5	0.003309	0.000521
6	0.036505	0.005328
7	0.036505	0.006701
8	0.003659	0.000334
9	0.019145	0.002958
10	0.019145	0.001893
11	0.019145	0.002111
12	0.031282	0.003593
13	0.003659	0.000723
14	0.032343	0.001799
15	0.019145	0.002314
16	0.025371	0.001654
17	0.019145	0.002839
18	0.019145	0.001451

En la Tabla 31 se muestran los resultados, resaltando en color verde los porcentajes de remoción mayores al 90% y en color naranja los valores menores al 80%, donde se presenta los porcentajes de remoción de Cr(VI) bajo las diferentes condiciones experimentales derivadas de la MSR, que incluyen la cantidad de adsorbente utilizada, el pH de la solución, la concentración inicial de Cr(VI), el tiempo de reacción y el porcentaje de remoción obtenido, Los mayores porcentajes de remoción se alcanzaron en los experimentos 14 y 16, con un $94.86 \pm 1.34\%$ y 93.40 ± 0.59 bajo las condiciones de 5.5 g de adsorbente, pH 5.5 y 270 y 480, así mismo en el ensayo 10 y 3 a pH de 5.5 y 3 con 10g de adsorbente y 270 y 480 minutos de tiempo de reacción. En contraste, el menor porcentaje de remoción, 42.10 ± 9.06 se observó en el experimento 4, donde se utilizaron 1 g de adsorbente, pH 7 y 480 minutos de reacción. Esto sugiere que un pH moderado y una cantidad de adsorbente menor favorecen la remoción del contaminante, mientras que valores más altos de pH y tiempo no siempre garantizan una mayor eficiencia. No obstante, se realiza el estudio estadístico correspondiente para conocer las condiciones óptimas, así como el efecto estandarizado.

Tabla 31 porcentajes de remoción para cada experimento de la MSR

MSR	Adsorbente (g)	pH	Concentración inicial de Cr (VI) (mg/ml)	Tiempo (Min)	Remoción (%)
1	10	7	0.036505	60	89.74±6.29
2	10	7	0.019399	60	83.68 ± 2.84
3	10	3	0.036505	480	95.16 ± 3.75
4	1	7	0.003309	480	42.10 ± 9.06
5	10	3	0.003309	480	80.34 ± 8.22
6	1	3	0.036505	60	86.72 ± 3.43
7	1	7	0.036505	480	83.10 ± 2.47
8	1	3	0.003659	60	91.10 ± 1.21
9	1	5.5	0.019145	270	85.25 ± 8.87
10	10	5.5	0.019145	270	95.33 ± 1.24
11	5.5	3	0.019145	270	94.94 ± 2.08
12	5.5	7	0.031282	270	91.06 ± 6.52
13	5.5	5.5	0.003659	270	78.17 ± 4.06
14	5.5	5.5	0.032343	270	94.48 ± 3.29
15	5.5	5.5	0.019145	60	87.66 ± 1.34
16	5.5	5.5	0.025371	480	93.40 ± 0.59
17	5.5	5.5	0.019145	270	92.53 ± 1.98
18	5.5	5.5	0.019145	270	89.74 ± 6.29

En la Figura 51 se aprecia que la corrida 10 obtuvo el mayor porcentaje de remoción con 95.33%, seguida de las corridas 3 (95.16%), 11 (94.94%) y 14 (94.48%), todas con valores superiores al 94%. En contraste, la corrida 4 presentó el menor porcentaje de remoción con 42.1%, destacándose como un valor significativamente más bajo en comparación con el resto de los experimentos

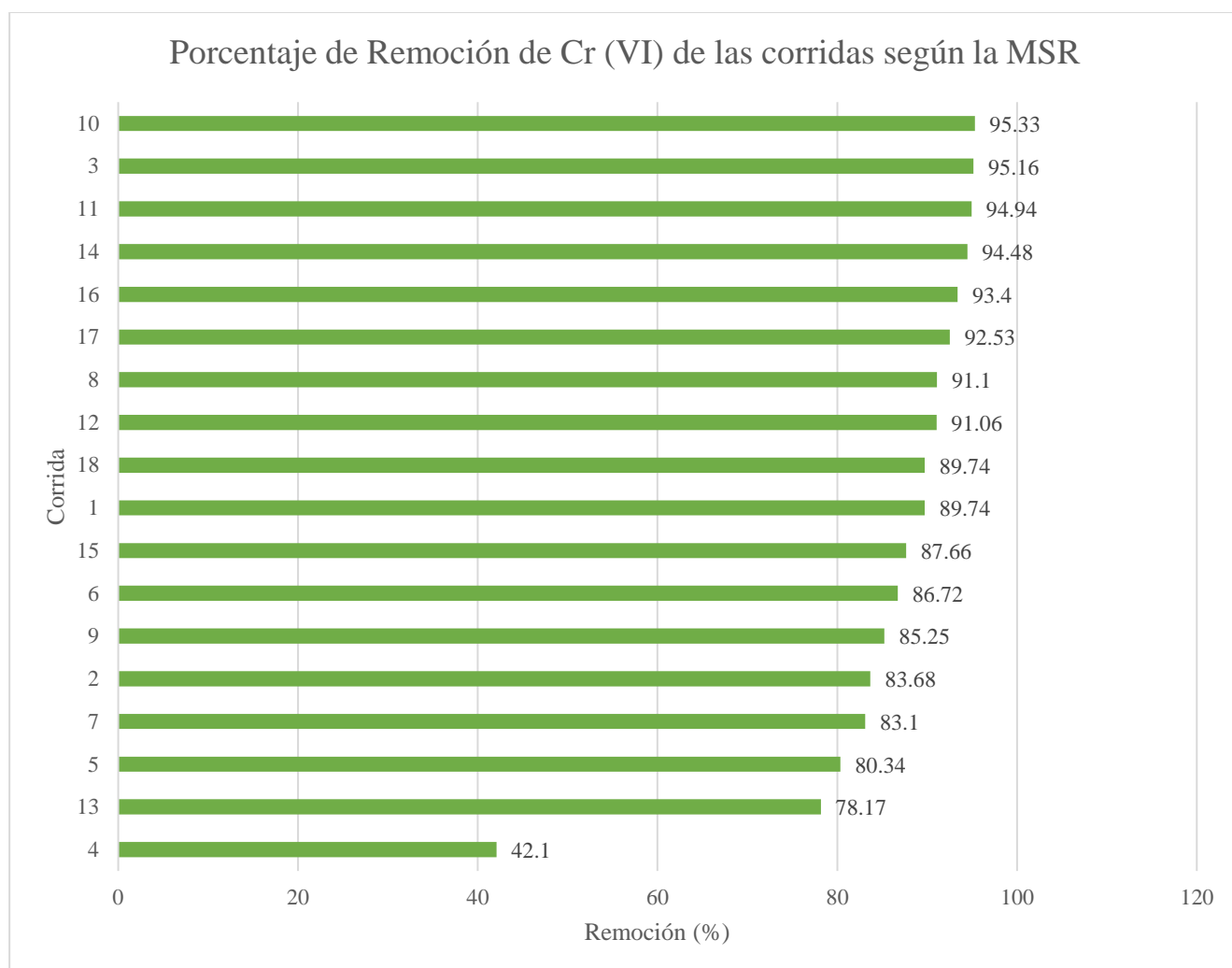


Figura 51 porcentajes promedio más altos y bajos de remoción

16.7.2. Remoción por relación de variables y Análisis Multifactorial (Pareto)

La eliminación de Cr (VI) puede ocurrir mediante distintos mecanismos, como la difusión intraparticular, la atracción electrostática y la reducción acoplada a la adsorción, por mencionar algunas. Se ha demostrado que los grupos funcionales carboxilo e hidroxilo presentes en los carbones oxidados mejoran significativamente la eficiencia de adsorción (Bo Liu, 2022), estos grupos, característicos de materiales lignocelulósicos facilitan la interacción con otras especies químicas al donar pares de electrones para la formación de complejos.

Diversos residuos lignocelulósicos han sido utilizados para la remoción de Cr(VI) debido a su capacidad para actuar como adsorbentes. Gracias a la presencia de grupos donadores de electrones y al alto potencial de reducción del Cr(VI), es posible que este se reduzca a Cr(III), especialmente en medios

ácidos con pH entre 2 y 4 (Bachmann, 2023). La capacidad de adsorción de estos materiales varía en función de su estructura, la concentración del adsorbato y el grado de modificaciones químicas aplicadas. Muchos residuos de bajo costo han demostrado ser altamente eficientes en la adsorción de Cr(VI), lo que los convierte en una alternativa viable para el tratamiento de efluentes industriales y la mitigación del impacto ambiental del cromo.

Las modificaciones químicas de los adsorbentes pueden mejorar sus propiedades superficiales, incluyendo el área específica, el volumen de poros, la carga superficial y la presencia de grupos funcionales (Bachmann, 2023). En este sentido, los polisacáridos, proteínas y lípidos presentes en las paredes celulares de la cáscara de naranja contienen grupos funcionales como carboxilos, hidroxilos, amino y sulfhidrilo, los cuales favorecen la unión de metales pesados a la superficie (Moreira *et al.*, 2022). Asimismo, los componentes estructurales de la celulosa, hemicelulosa, lignina y pectinas como los grupos hidroxilo, fenol, carboxilo, carbonilo y metoxilo facilitan la interacción con los iones metálicos en solución. De estos, los grupos hidroxilo han sido identificados como los más relevantes en la adsorción de metales pesados (Prabin Basnet, 2022).

En la Figura 52 se puede observar que, según la relación de las variables, se pueden obtener altos porcentajes de remoción (arriba de 90%) en un rango amplio de concentración de contaminante (20 mg/L a 100 mg/L), con un mínimo de 5g de adsorbente.

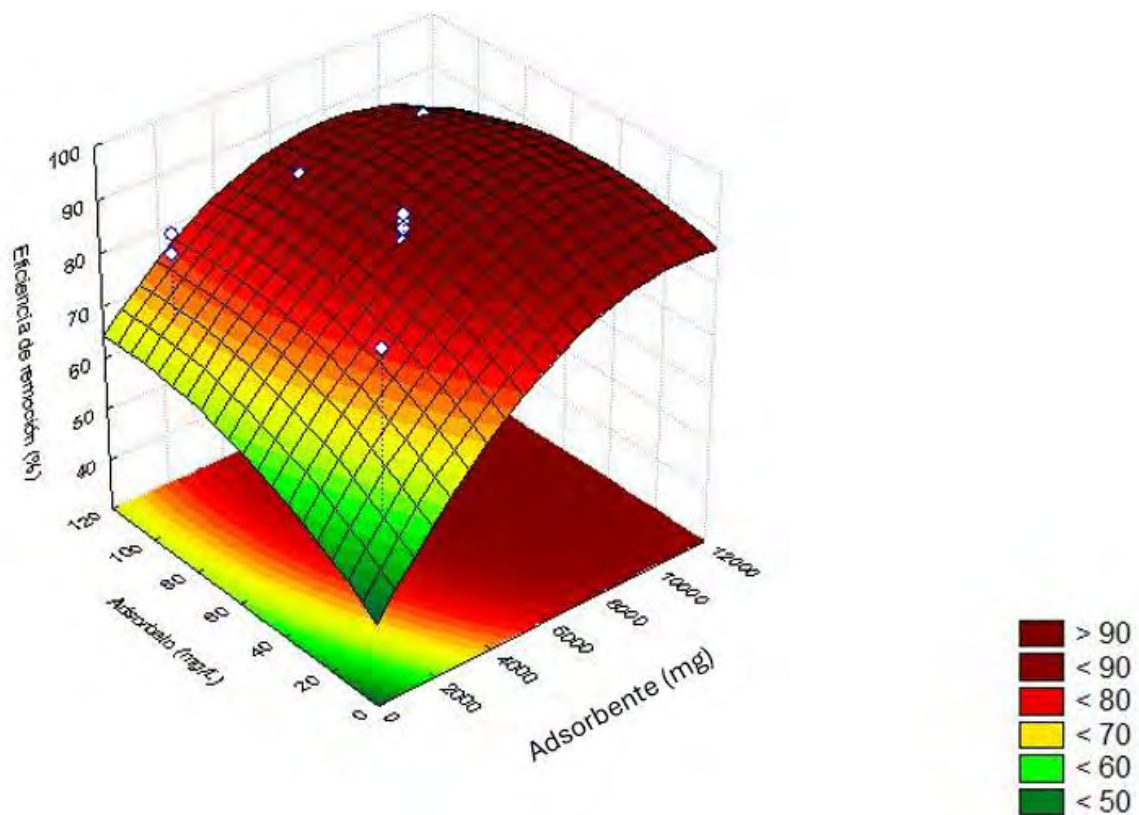


Figura 52 diagrama de superficie del porcentaje de Remoción por la actividad del adsorbente y el contaminante

En la Figura 53 se observa que los menor porcentajes de remoción ocurren con menores cantidades de adsorbente o valores extremos de pH (tanto muy ácidos) o cercanos al neutro, mostradas en las áreas verdes, mientras que las mayores remociones se observan con cantidades altas de adsorbente y pH cercanos a 5.5, como se ve representado por las regiones en rojo.

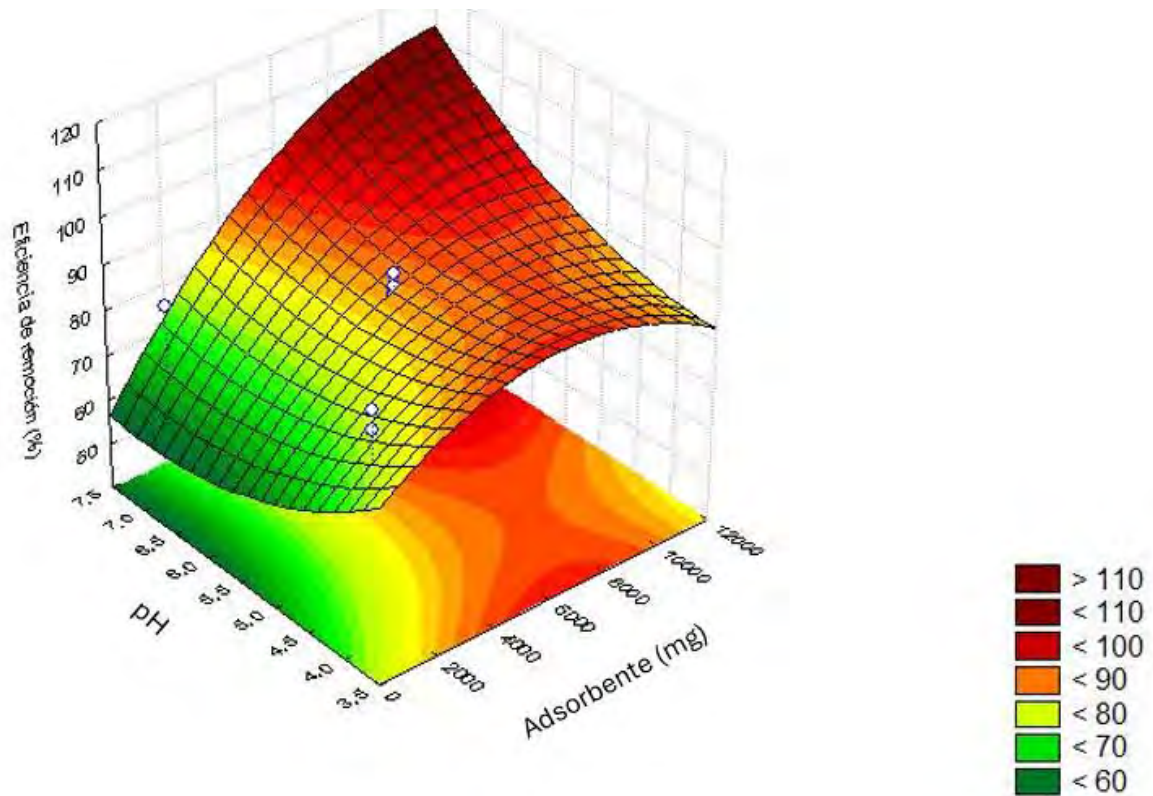


Figura 53 Diagrama de superficie del porcentaje de Remoción por la actividad del adsorbente y el pH

En la Figura 54 se observa el porcentaje de remoción del cromo (VI), en función del tiempo de contacto y la cantidad de adsorbente, donde se puede observar que los mayores porcentajes de remoción se obtiene a mayores tiempos de contacto y mayor cantidad de adsorbente, pero de igual forma se pueden obtener porcentajes arriba del 90% con 5 gramos de adsorbente y 100 minutos.

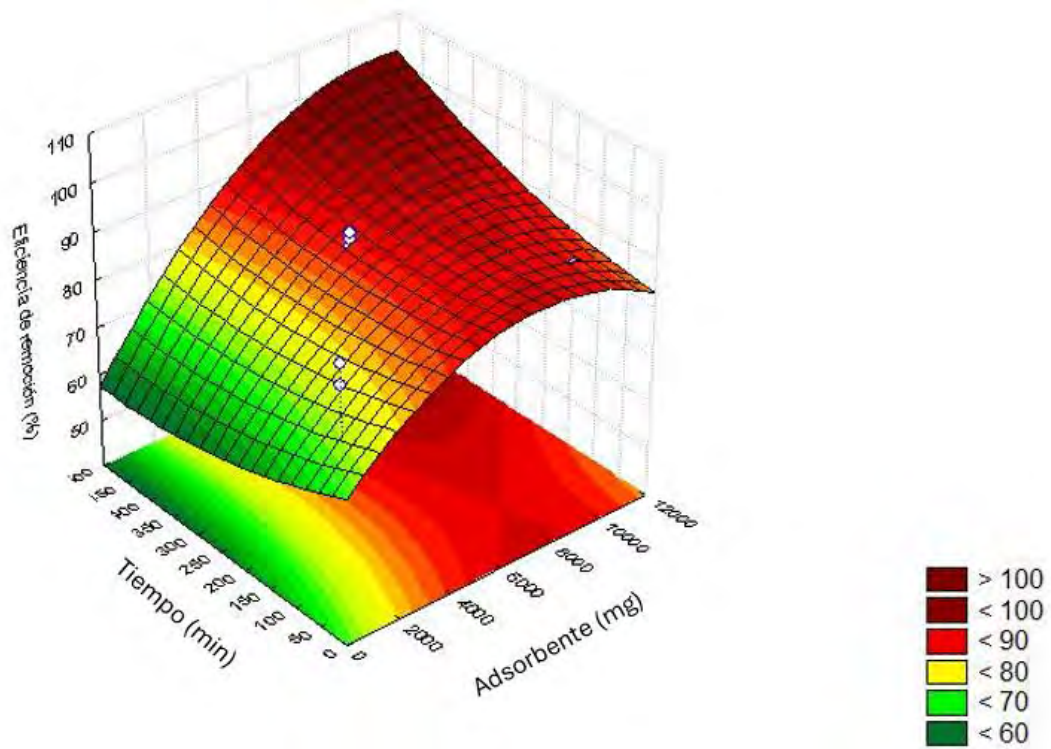


Figura 54 Diagrama de superficie del porcentaje de Remoción por la actividad del adsorbente y el tiempo de contacto

Se realizó el análisis estadístico donde se compara el caso ideal donde los valores predichos son calculados por el *software* y son comparados con las observaciones experimentales (círculos azules), donde se muestra que los valores experimentales se ajustan al modelo predictivo, por lo que el modelo tiene un grado de predicción alto, mostrando un valor de $MS=11.2$ cómo se observa en la Figura 55.

Valores observados vs Valores Predichos

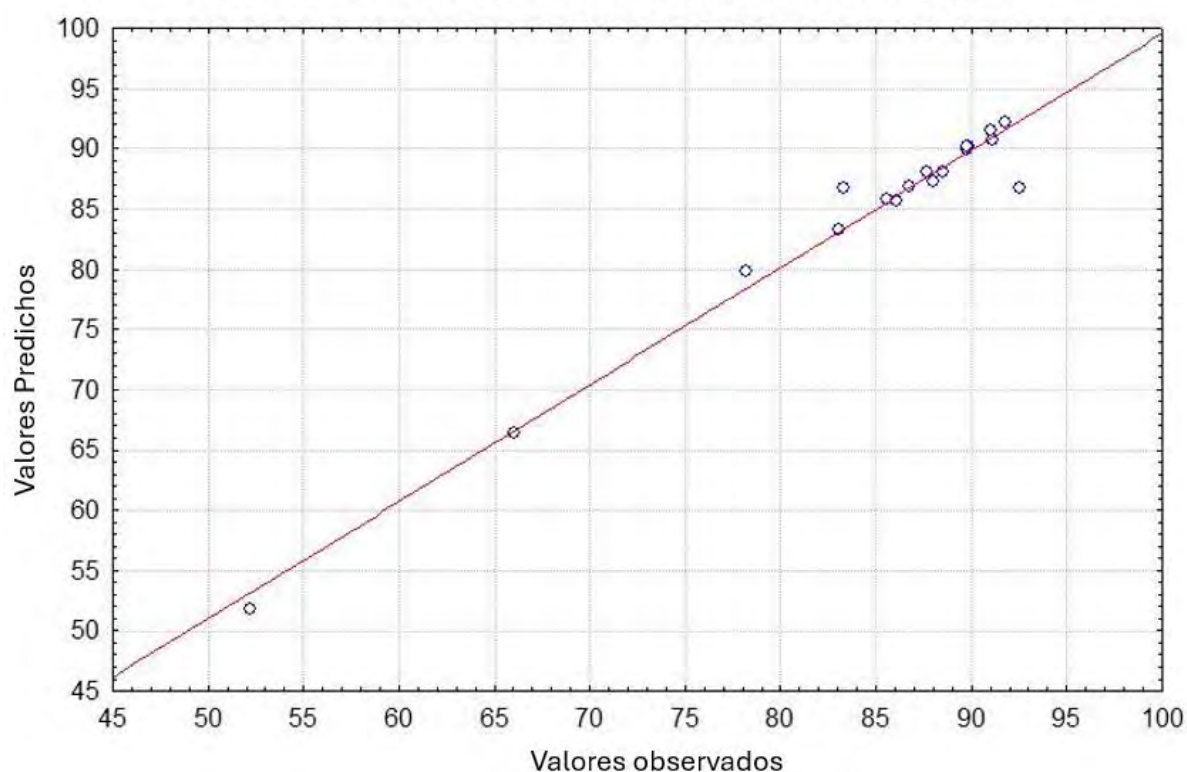


Figura 55 observaciones comparadas con la predicción del modelo (software Statistica)

Se analizó el efecto estandarizado de cada una de las variables, así como sus interacciones entre ellas sobre el porcentaje de remoción, con un nivel de confianza del 10% ($P=0.1$), donde se muestra que los factores con mayor efecto en el porcentaje de remoción son la cantidad de adsorbente y la cantidad de adsorbato, así como la interacción de estos efectos. Considerando que la vertical roja es el nivel de significancia, se expresa, según el análisis los factores que no contribuye significativamente al cambio en la eficiencia son el pH y el tiempo (Figura 56).

Diagrama de Pareto de los efectos estandarizados (variable de respuesta: porcentaje de remoción)

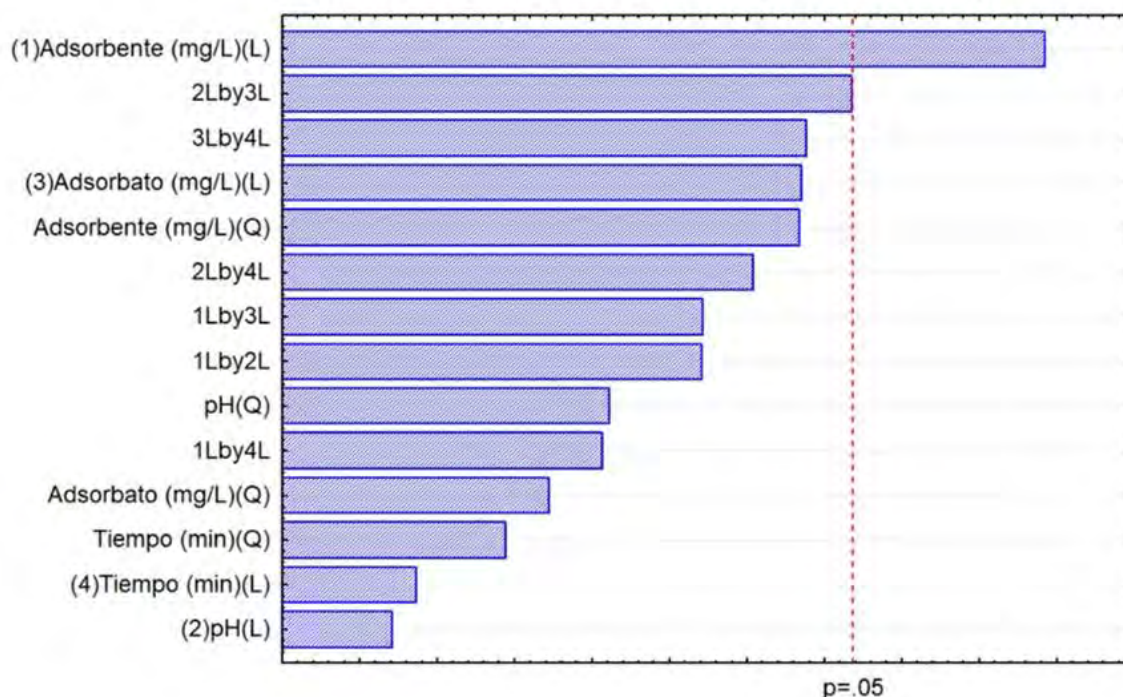


Figura 56 Pareto con nivel de significancia del 10%

Diferentes estudios muestran que las condiciones más significativas en el proceso de adsorción de metales con materiales lignocelulósicos son el pH, Temperatura, concentración inicial de contaminante (concentración de cromo, para este estudio), cantidad de adsorbente, tiempo de contacto y tamaño de partícula, por ejemplo, Zarifeh, Raji et al., menciona que para la adsorción de metales pesado con fibras de biomasa vegetal las condiciones de operación relevantes son; Temperatura, pues se ha registrado que al aumentar la temperatura se aumenta la eficiencia de adsorción; pH, debido a que la tasa de adsorción aumenta a medida que aumenta el pH; mayor área superficial específica, por su relación con la proporción de sitios activos y/o de sitios donde el contaminante queda atrapado; Tamaño de partícula: La eficiencia de adsorción aumenta al disminuir el tamaño de partícula; Potencial Zeta: por la correlación positiva entre el potencial zeta y la eficacia de adsorción y la porosidad: Una alta porosidad mejora la adsorción (Raji Z. et al., 2023). Así mismo Prabin Basnet et al., indican que la temperatura, la dosis de adsorbente, la concentración de iones, el pH y la velocidad de agitación influían significativamente en la biosorción de metales pesados (Basnet P., 2022).

Efecto del pH y PZC

El pH influye en varios aspectos del proceso de adsorción, incluida la especiación de del contaminante, en este caso el Cr(VI) como se aprecia en la Figura 57 donde se puede observar la especiación del cromo en función del pH, de igual forma afecta la carga superficial del adsorbente y el grado de ionización de las especies adsorbida y adsorbente, por lo que tiene relación con la formación de interacciones electrostáticas entre el adsorbente y el adsorbato (Abhishek Solanki, 2025), mostrando la relación entre

el porcentaje de remoción, la especiación del contaminante, la carga de la superficie (PZC) y el pH de la solución. En este estudio los pH medidos se encuentran por debajo del pzc de la cascara de coyol, por lo que la cascara a pH por abajo del pzc se encuentran protonados, con carga positiva, lo que genera atracción electrostática con las especies CrO_4^{2-} , $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ y HCrO_4^- que son aniones que contienen al Cr (VI), como describe Bachmaan y colaboradores que El pH influye en el proceso de adsorción de Cr (VI) porque afecta tanto la forma iónica del adsorbato como la carga superficial del adsorbente. En medios ácidos, la adsorción de Cr (VI) es más eficiente debido a la presencia de especies aniónicas de cromo y a la carga positiva en la superficie del adsorbente. Esto genera una fuerza electrostática entre los aniones de cromo (como $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ y HCrO_4^-) y los grupos funcionales positivos del adsorbente, lo que facilita la captura de los aniones desde la solución. Además, en pH bajos, la abundancia de iones H^+ neutraliza los grupos hidroxilo (-OH) con carga negativa en el adsorbente, reduciendo la resistencia a la difusión de los iones CrO_4^{2-} . En la otra mano se expone que, a medida que el pH aumenta, se incrementa la concentración de iones OH^- , lo que dificulta la difusión de los aniones $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ hacia la superficie del adsorbente. Asimismo, en condiciones alcalinas se genera CrO_4^{2-} , lo que intensifica las fuerzas electrostáticas repulsivas entre los aniones y la superficie del adsorbente, reduciendo así la capacidad de adsorción. (Bachmann *et al.*, 2022).

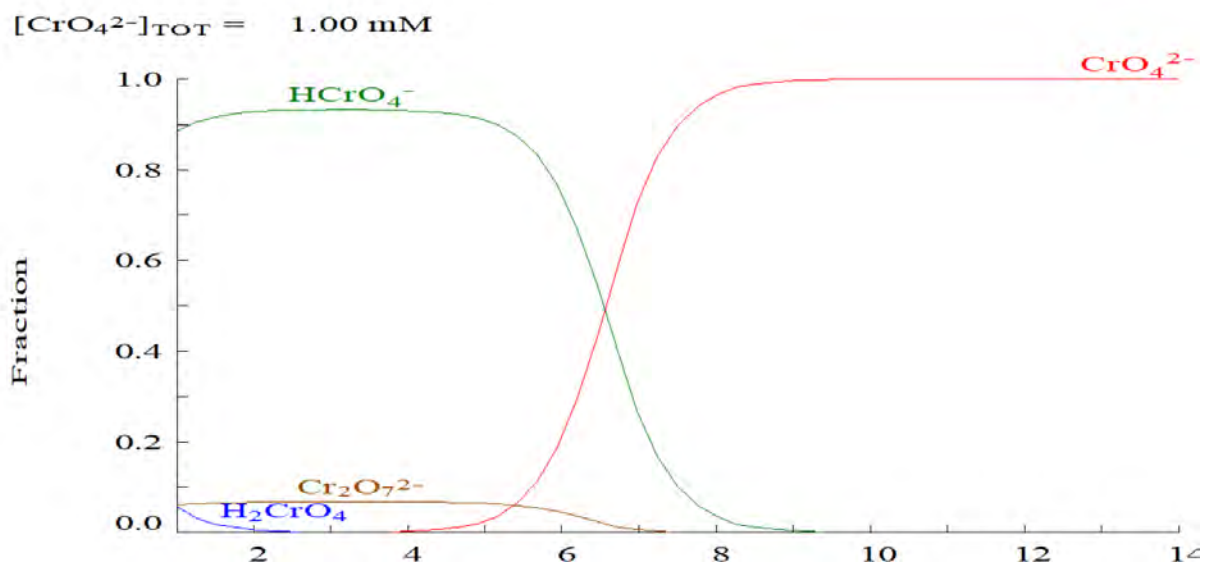


Figura 57 Especiación en Fracción vs pH del Cromo en solución

En la Figura 58 se describe que especie es la dominante en función del pH, así mismo se pueden observar las especies coexistentes, en este caso en particular, se observa que en todo el rango de pH, la especie dominante es un anión en el cual se encuentra el Cr (VI), por lo tanto, mientras se favorezcan las atracciones electrostáticas entre los grupos funcionales y la carga de la especie, se podrá llevar a cabo la adsorción del cromo, como se describe líneas arriba de este apartado y en el apartado 9.5. de este escrito.

Efecto de la cantidad de adsorbente y la relación de adsorbente-adsorbente

a medida que la dosis de adsorbente aumentaba, mejoraba la eliminación de cationes (como el Cu (II)), por lo tanto, con dosis más altas de adsorbente sugiere la presencia de sitios de unión adicionales disponibles para la adsorción, pero también a dosis muy altas puede generar aglomeración o agregación, que podría reducir el área superficial efectiva y dificultar la dispersión. No obstante, en términos generales se ha demostrado que el área superficial del adsorbente por unidad de masa disminuyó a dosis más elevadas (Abhishek Solanki, 2025). Para el caso de la adsorción de Cr (VI), se tiene registrado una relación directa entre la dosis de adsorbente y la eliminación de Cr (VI) del medio acuoso. El porcentaje de eliminación de Cr (VI) aumenta cuando aumenta la dosis de adsorbente, alcanza un equilibrio máximo y luego disminuye (en algunos casos). se observa una mejora en el rendimiento de adsorción de Cr (VI) cuando aumenta la cantidad de adsorbente, debido a la mayor disponibilidad de sitios activos.

Efecto del tiempo de contacto

Se analizó cómo influye el tiempo de contacto en la capacidad de adsorción de Cr(VI) de los adsorbentes tallos de tabaco, tallo de cedro blanco y corteza de eucalipto, utilizando intervalos de tiempo variables. El tiempo necesario para alcanzar el equilibrio se identificó con el fin de determinar el período mínimo requerido para una adsorción efectiva de Cr(VI) , Según los datos, al principio la capacidad de adsorción aumentó rápidamente con el tiempo. El equilibrio se obtuvo en un máximo de 180 minutos. Este aumento inicial se debe a la abundancia de sitios activos en la superficie del adsorbente, los cuales eventualmente se saturan con Cr(VI) (Haroon H, et al., 2017).

La Tabla 32 compara diversas biomásas vegetales utilizadas como adsorbentes para la remoción de contaminantes, evaluando parámetros como porcentaje de remoción, pH, cantidad de adsorbente, tiempo de contacto y tratamiento previo. Entre los materiales estudiados, destacan las cáscaras de naranja y plátano con altas eficiencias de remoción (91.1% y 92.96%, respectivamente), utilizando cantidades moderadas de adsorbente (3-4 g/L) en condiciones de pH ácido y un tiempo de contacto de 2 horas (Moreria L., 2022). Por otro lado, materiales como la *Acacia arábica* presentan el mayor porcentaje de remoción (99%), requiriendo una cantidad mínima de adsorbente (0.01 g/L), aunque con un tiempo de contacto más prolongado (48 horas) y un tratamiento químico para eliminar lípidos. En comparación, la cáscara de coyol demuestra un porcentaje de remoción alto (92%), aunque en primera instancia aparenta que se necesita una cantidad significativamente mayor de adsorbente (100 g/L), debido al volumen de solución y cantidad de adsorbente seleccionado para el experimento en Bach. y un tratamiento más elaborado con agua e isopropanol, lo que podría aumentar los costos operativos. A pesar de superar a materiales como *Corylus avellana* (55%).

Tabla 32 comparación de la adsorción de Cr (VI)

Biomasa vegetal	Remoción (%)	pH	Cantidad adsorbente	Tiempo de contacto	Tratamiento	Referencia
-----------------	--------------	----	---------------------	--------------------	-------------	------------

Cáscara de naranja	91.1	4 ¹	3 g/l	2 h	-	(Moreria L., 2022)
Cáscara de plátano	92.96	3 ²	4 g/l	4 h	-	(Moreria L., 2022)
Semilla cruda de <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	91.44%	1 ³	5g/L	80 min	Lavada con agua, secado a 70 °C por 24 h y pulverizado (90 - 100 µm)	(Suganya E,2020)
Aserrín de Maple	85%	5 ⁴	50g/l	200 min	Sin tratamiento	Li Jia Yu, 2003
Residuos de girasol	81.7	2	4.0g/L	180 min	Hervido	(Jain M., et al., 2009)
	76.5%	2	4.0g/L	180 min	Lavado con formaldehído tratada	
Acacia arábica	99%	6	0.01g/l	48 h	química para eliminar la lignina	(Kumar Meena, 2008)
<i>Corylus avellana</i>	55.00%	3.5	25g/L	2 h	Lavado con agua y secado	(Pehlivan & Altun, 2008)
Cáscara de coyol	92%	5.5⁵	100g/L	4.5h	Lavado con agua, isopropanol y secado	Este escrito

¹pzc=4.8, ²pzc=5.7, ³pzc=, ⁴pzc=6, ⁵pzc=7

16.7.3. Cinética de adsorción

El estudio cinético es importante para dilucidar la velocidad de transferencia de masa entre el sorbente y la solución a granel, y depende de las características químicas y morfológicas del sólido ((Fabre *et al.*, 2020), así mismo para estudiar la eliminación de metales pesados, como el cromo, en materiales adsorbentes como la cáscara de coyol. El modelo de pseudo-primer orden (PFO) asume que la fisisorción es la etapa controlante de la velocidad del proceso y se aplica en condiciones donde la concentración inicial (C_0) es muy cercana a la concentración en el equilibrio (C_e) (Rohollah Ezzati, 2020). Por otro lado, el modelo de pseudo-segundo orden (PSO) considera que la quimisorción es el mecanismo principal, suponiendo que la velocidad de adsorción es proporcional al número de sitios disponibles en el adsorbente y depende de la cantidad de soluto en la superficie del adsorbente (Moreira L, 2022). Por su parte el modelo de Elovich, asume que la tasa de adsorción de soluto disminuye exponencialmente a medida que aumenta la cantidad de soluto adsorbido (Elaine Fabre). Además, el modelo de difusión intrapartícula (IPD) asume la transferencia de masa externa y el transporte en la fase sólida (Abhishek Solanki, 2025). Estos modelos, especialmente el PFO, PSO y Elovich, se han ajustado a datos experimentales para describir procesos de eliminación de metales pesados (II), considerando que el proceso global está controlado por reacciones químicas en la superficie del adsorbente, lo que ha permitido su amplia aplicación debido a su simplicidad y capacidad para representar el proceso de eliminación (Elaine Fabre;2020, Moreira L, 2022).

Considerando lo con lo reportado (Figura 58) en la literatura se espera que para la adsorción de cromo con la cascara de coyol se espera que sea por medio del modelo de pseudo segundo orden, es decir que la quimisorción será mecanismo principal, y que la velocidad de adsorción es proporcional al número de sitios disponibles en el adsorbente, dependiendo de la cantidad de soluto en la superficie del adsorbente (Moreira L, 2022).

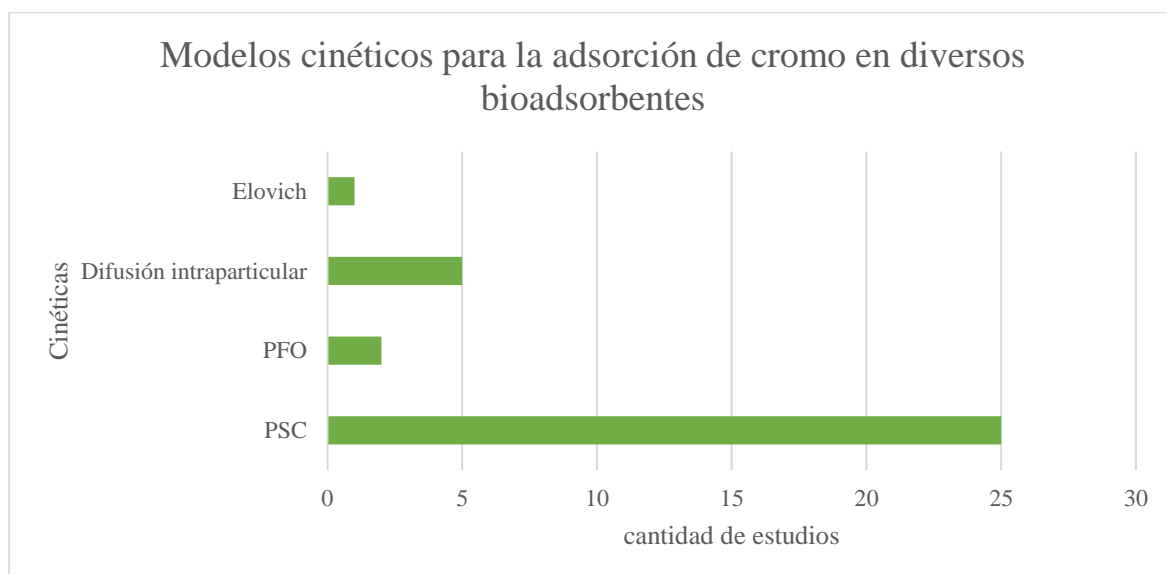


Figura 58: modelos cinéticos para a la bioadsorción de cromo en solución acuosa, Fuentes: elaboración propia con información de Bo Liu, 2022 y P. Miretzky, 2010

Por lo que el estudio cinético a diferentes concentraciones de Cr(VI) deriva en los parámetros expuestos en la Tabla 33 y en las Figuras 59-61.

Tabla 33 Coeficientes de la cinética de adsorción linealizadas

Cr (VI) (mg/ml)	Pseudo Segundo Orden		Pseudo Primer Orden		Elovich		
	R ²	K _L	R ²	K _L	R ²	a	b
0.030	0.687	0.590	0.758	0.001	0.522	0.016	19.011
0.026	0.752	0.333	0.860	0.001	0.613	0.012	32.787
0.018	0.687	0.273	0.879	0.003	0.872	0.027	31.447
0.017	0.962	0.206	0.954	0.002	0.727	0.210	5.208
0.008	0.699	0.203	0.976	0.001	0.636	0.180	4.673

La Tabla 33 presenta los coeficientes de ajuste y constantes cinéticas para la adsorción de cromo (VI) a diferentes concentraciones iniciales utilizando tres modelos cinéticos; Pseudo-segundo orden, Pseudo-primer orden y Elovich. Para cada modelo, se reporta el coeficiente de determinación R² que representa la varianza respecto a la media, se utiliza para analizar los grados de ajuste de los modelos cinéticos con los datos experimentales (Ebelegi A., et al, 2020), junto con las constantes cinéticas específicas K en los modelos de pseudo-segundo y pseudo-primer orden, y los parámetros a y b, donde a' da una idea de la constante de velocidad y 'b' muestra la velocidad de adsorción a cobertura cero (Salman M., 2015) en el modelo de Elovich. Se observa que los valores de R² varían entre modelos, sugiriendo diferencias en la capacidad predictiva de cada uno, pero como se expone en la Tabla, en todo el rango de concentraciones la cinética que describe de una forma más certera es de pseudo segundo orden, lo que indica un comportamiento de fisorción (Solanki A., et al, 2025), describiendo una velocidad de adsorción proporcional al número de sitios de unión desocupados en el (Ebelegi A., et al, 2020 &

Rohollah Ezzati, 2020) con una constante de equilibrio adsorción (K_L) entre un rango de 0.001 a 0.003. derivado de este estudio, y considerando que de los estudios revisados la mayoría se ven descritos por mecanismos de quimisorción según el modelo de pseudo-segundo orden, y en segundo lugar por un proceso de fisiorción, podemos asumir que la cinética es compatible con algunos de los procesos de adsorción de metales pesados con bioadsorbentes. La constante K del modelo de pseudo-primero orden representa la velocidad cinética a la que el adsorbato se adhiere al adsorbente al inicio del proceso de adsorción, por lo tanto, cuando la k es cercana a 0 la velocidad de adsorción es baja, lo cual indica que el sistema tarda más en alcanzar el equilibrio y sugiere una interacción cinética débil entre adsorbente y adsorbato (Revellame et al., 2020), donde se observa que la afinidad cinética del proceso de adsorción de Cr (VI) en el adsorbente derivado de la cascara de coyol a medida que aumenta la concentración de Cr (VI).

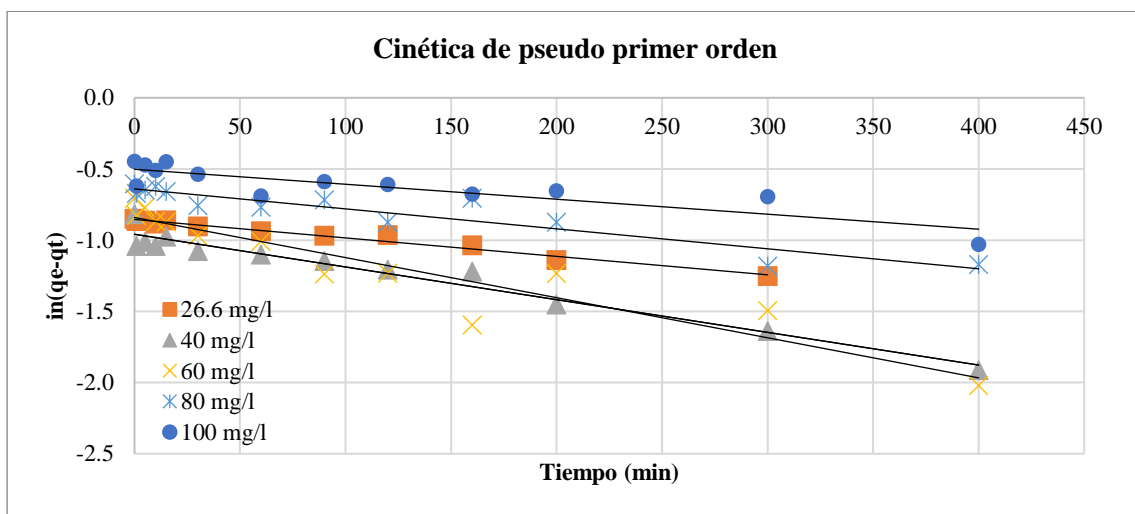


Figura 59 modelo cinético de Pseudo primer orden a diferentes concentraciones de dicromato de potasio

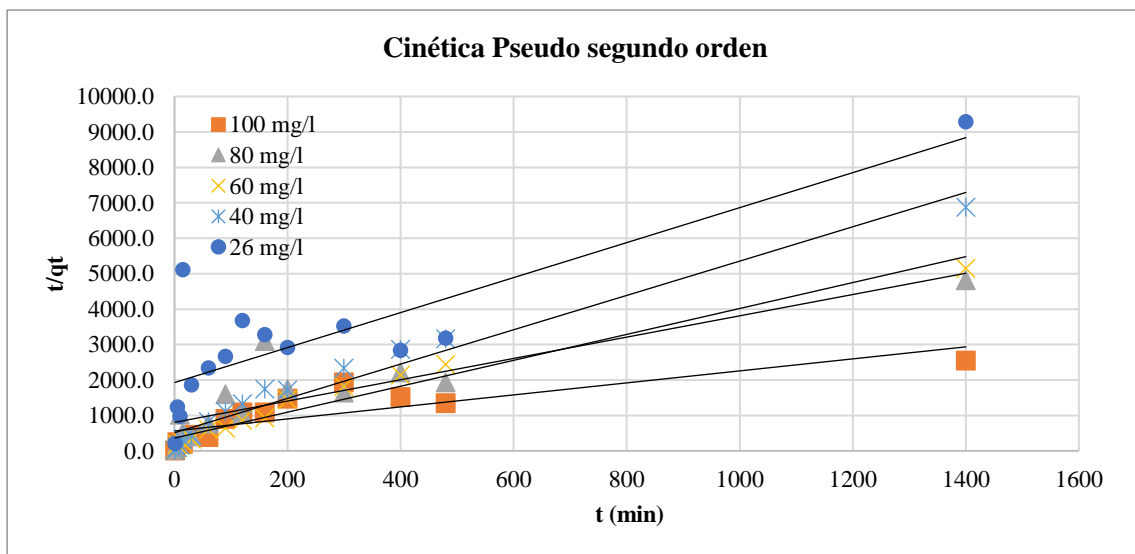


Figura 60 Modelo cinético de Pseudo segundo orden a diferentes concentraciones de dicromato de potasio

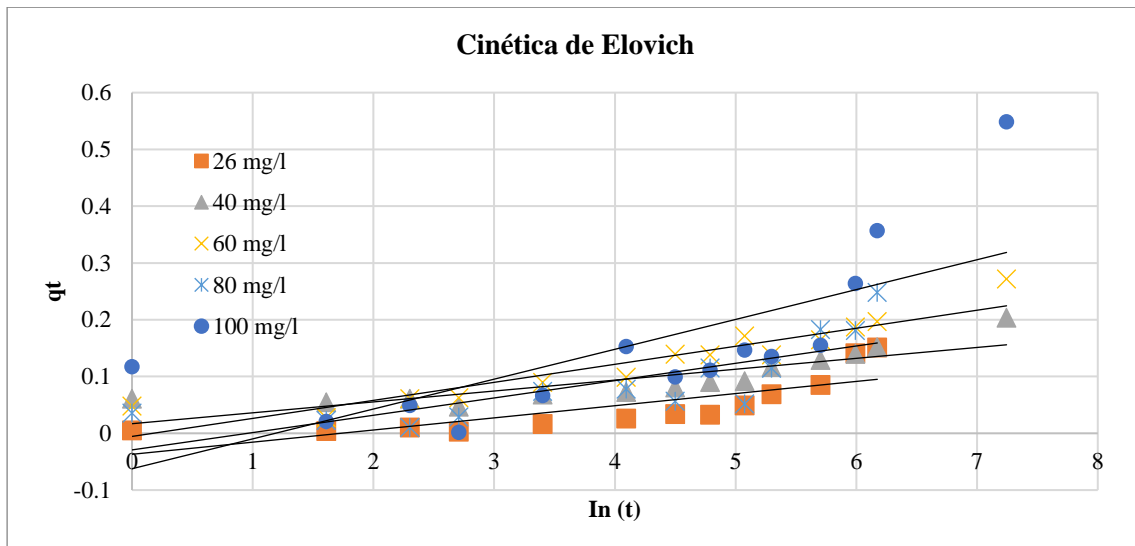


Figura 61 modelo cinético de Elovich a diferentes concentraciones de dicromato de potasio

16.7.4. Isotermas de adsorción

El estudio del equilibrio desempeña un papel importante en la decisión de las aplicaciones a escala. La evaluación de la isoterma proporciona información sobre la capacidad del material y sus características superficiales. En este trabajo se ajustaron las isotermas de Langmuir y Freundlich a los datos experimentales. El modelo de Langmuir predice un número finito de sitios activos idénticos en la superficie del adsorbente con una sorción de energía uniforme. El sorbato se acumula en una monocapa en la superficie sólida. La isoterma de Freundlich supone una sorción multicapa con una energía de sorción que decae exponencialmente (Fabre *et al.*, 2020). Como se puede observar en la Figura 62 las isotermas mayormente reportadas en los artículos revisados son Langmuir, Freundlich, Radley-peterson y Tempkin, en un orden descendente, por ello, para el proceso de adsorción de Cr (VI) con el bioadsorbente derivado de la cáscara de Coyol, se toman las primeras 3 isotermas para su análisis y comparativa.

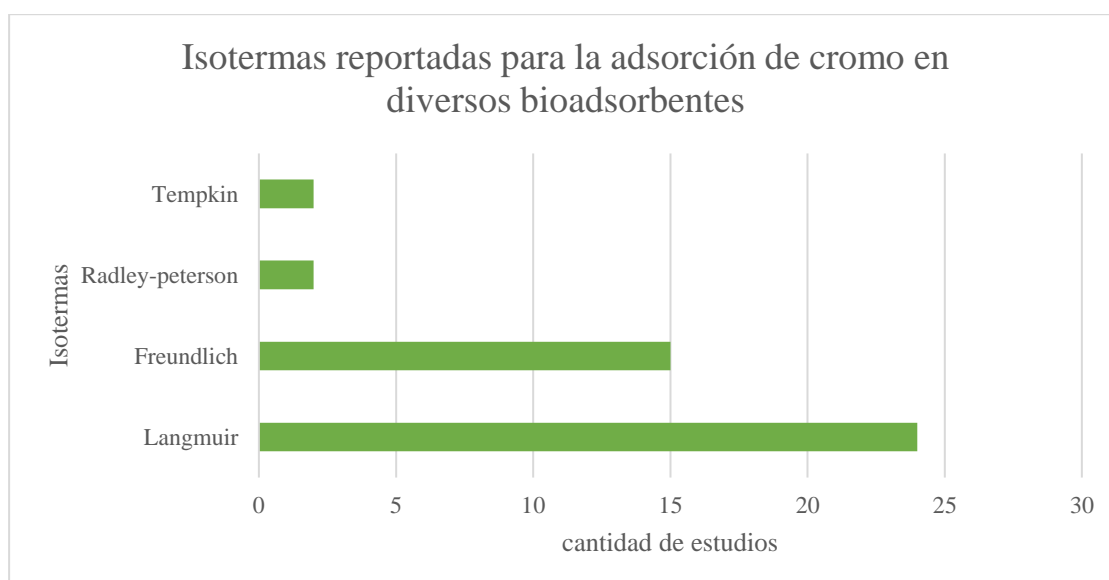


Figura 62 Isotermas para a la bioadsorción de cromo en solución acuosa, Fuentes: elaboración propia con información de Bo Liu, 2022 y P. Miretzky, 2010

Por lo que, como resultado de las pruebas de adsorción, controlando una temperatura de $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ se obtuvieron los datos necesarios para la aplicación de los modelos isotérmicos más reportados en la literatura para la adsorción sólido-líquido obteniendo los parámetros que se expone en la Tabla 34.

La Tabla 34 y las Figuras 63 a 65 presenta los coeficientes isotérmicos obtenidos para el proceso de adsorción de Cr(VI) según diferentes modelos de isoterma: Langmuir, Freundlich y Radley-Peterson. Se reportan los valores de la constante “K”, la capacidad máxima de adsorción “ q_{max} ” cuando aplica. El coeficiente de determinación R^2 que indica el ajuste del modelo, el error residual por la aplicación de mínimos cuadrados. Se observa que el modelo de Freundlich presentan un R^2 más alto, con un valor de 0.9518. La adsorción de Cr (VI) se ajusta a este modelo, lo que indica que se lleva a cabo una sorción multicapa con una energía de sorción que decae exponencialmente (Fabre et al., 2020), en función del valor de la constante de adsorción Abdul Sattar Ali Khan (2012), se explica que la constante de equilibrio de adsorción representa la afinidad entre el adsorbato y el adsorbente durante la formación de la primera capa de adsorción, cuando la constante es cercana a cero, indica que la adsorción es débil, ya que el adsorbato presenta baja afinidad por la superficie del material, por lo que se necesitaría una mayor concentración del adsorbato para lograr una cobertura significativa (Khan, 2012). En nuestro caso, las constantes de equilibrio se alejan de cero, lo que indica una buena afinidad entre el Cr (VI) y el adsorbente derivado de la cascar de coyol.

Tabla 34 Coeficientes isotérmicos del proceso de adsorción de Cr (VI)

Modelo isotérmico	No linealizada				
	K	q_{max} (mg/g)	R^2	Residual	n

Langmuir	18.59739	1.269694	0.8742	0.003958	-	-
Freundlich	6.451154	-	0.9518	0.00	1.327492	-
Radley-peterson	25	-	0.9238	0.003816	-	-

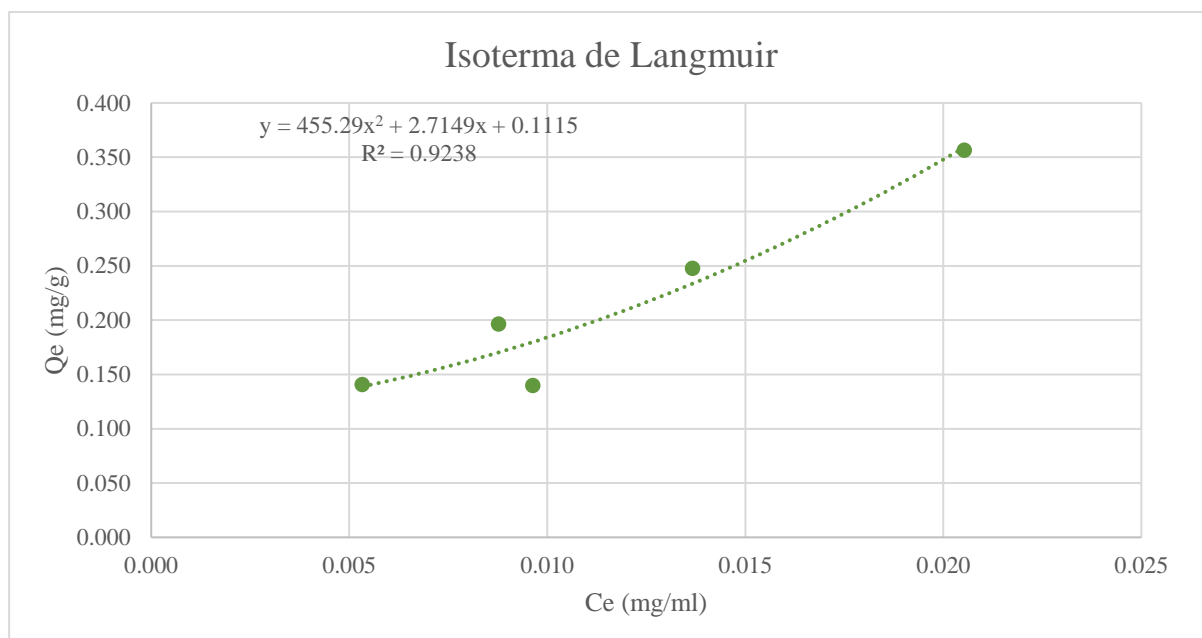


Figura 63 Isoterma de Langmuir no linealizada en concentraciones de Cr (VI) en mg/ml

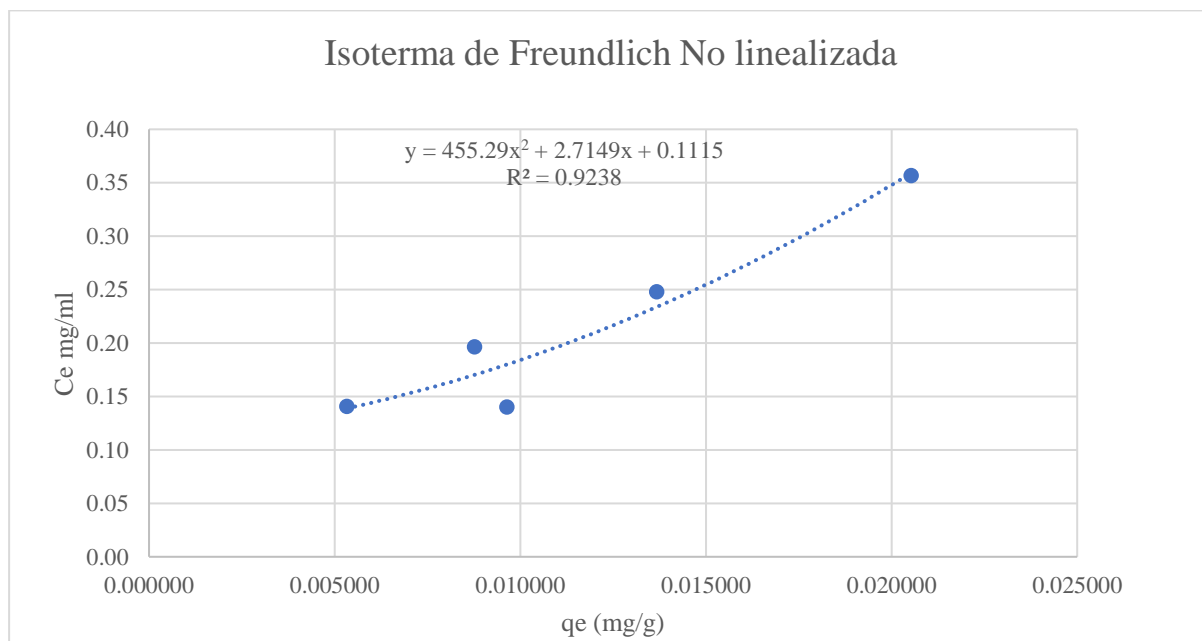


Figura 64 Isoterma de Freundlich no linealizada en concentraciones de Cr (VI) en mg/ml

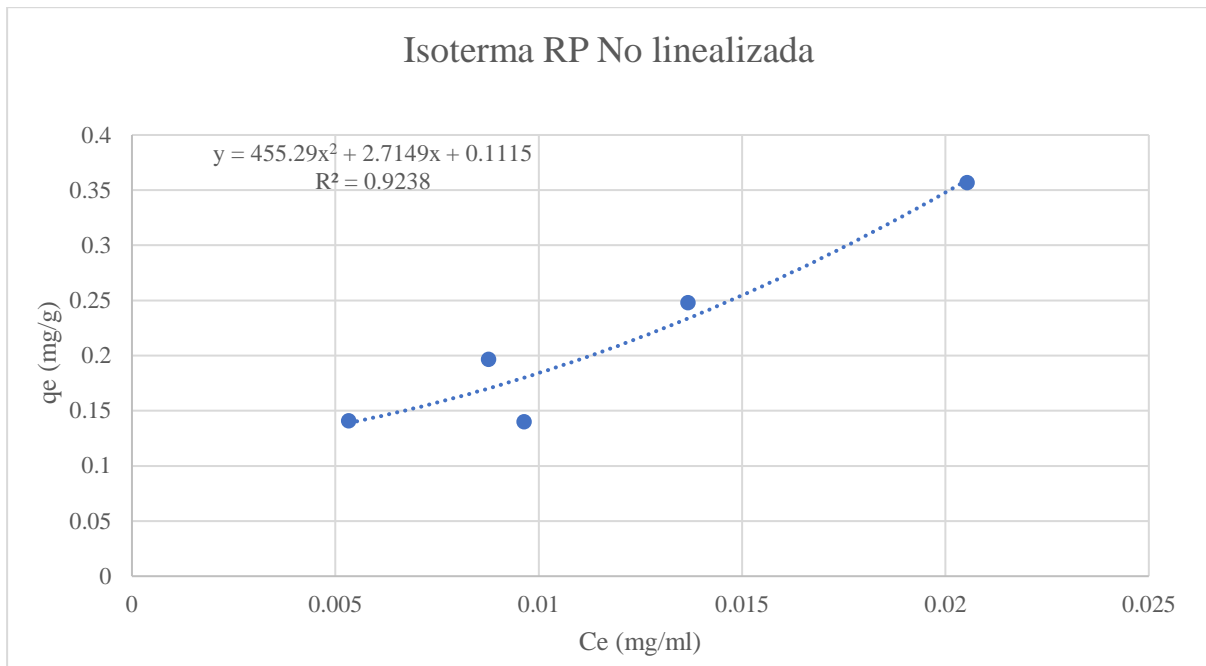


Figura 65 Isoterma de RP no linealizada en concentraciones de Cr (VI) en mg/ml

Elaine Fabre *et al.*, (2020) para la remoción de mercurio usando cascara de plátano como bioadsorbente obtuvieron los parámetros para los modelos de adsorción de Langmuir y Freundlich. El modelo de Langmuir muestra una capacidad máxima de adsorción de 0.75 mg/g y una constante de afinidad de 32.8 L/mg, mientras que para el modelo de Freundlich presentan un contante de 7.36 L/mg sugiriendo una adsorción favorable en una superficie heterogénea con posibles interacciones multicapas. Por su parte Hajira Haroon *et al.* (2017) evaluaron las isotermas de adsorción para tres adsorbentes lignocelulósicos: tallos de tabaco (TS), corteza de eucalipto (EB) y tallos de cedro blanco (WCS), en la eliminación de Cr(VI), de los cuales realizando las isotermas correspondientes. En el modelo de Langmuir, la capacidad máxima de adsorción fue de 42.08 mg/g para TS, 43.0 mg/g para EB y 15.39 mg/g para WCS, así mismo la constante de Langmuir, que representa la afinidad del adsorbato por la superficie, fue de EB 0.019 L/mg que en TS 0.007 L/mg y WCS 0.063 L/mg. En cuanto a la isoterma de Freundlich, la constante de equilibrio, fue de WCS (8.36 L/g), EB (6.13) y TS (5.91), el valor de $1/n$ que indica la intensidad de adsorción, fue inferior a 1 en todos los casos (TS: 0.47, EB: 0.38, WCS: 0.29). Que en comparación con los valores obtenidos de la adsorción de Cr(VI) con nuestro bioadsorbente derivado de la cascara de coyol, se encuentran en los mismos rangos, lo que indica que existe una competitividad y/o comprueban en estos parámetros, al encontrarse dentro de los mismos rangos.

16.7.5. Regeneración del bioadsorbente

Una vez realizada la regeneración del adsorbente, la cual se realizó con etanol a temperatura ambiente, 700 rpm, sin modificar el pH y otra con etanol, donde en la cuantificación del Cr(VI) por colorimetría con difenil carbazida obteniendo lo expresado en la Tabla 35.

Tabla 35 ciclos de uso del bioadsorbente

	Ciclo 1	Ciclo 2
Punto crítico (26.6 mg/l)	100%	82%
80 mg/l	61%	23%
100 mg/l	65%	24%

En la Tabla 35 se expone que se puede usar el bioadsorbente derivado de la cascara de coyol, un máximo de 2 ciclos con desorción con etanol con las condiciones del punto crítico obteniendo un porcentaje mayor al 80%, mientras que en condiciones de pH =5 y 5.5g de bioadsorbente, solo se alcanza un ciclo con un porcentaje de remoción mayor al 60%. Así mismo fue posible por colorimetría cuantificar la cantidad de Cr (VI) desasorbida presente en la fase acuosa por lo que no se tiene la certeza sobre que el Cr (VI) haya sido desasorbido. Aunado a esto y en función con lo reportado por Bachmann et al. (2022), para bioadsorbentes crudos o modificados reporta de 3 a 5 ciclos, mientras que para biocarbón derivado de lignocelulósicos se reporta que se han alcanzado hasta 7 ciclos.

17. ASPECTOS DE SOSTENIBILIDAD, PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA Y QUIMICA VERDE

La investigación está en concordancia con el objetivo de Agua limpia y saneamiento, ya que genera un material capaz de remover contaminantes como el Cr (VI) del agua residual industrial, promoviendo el acceso al agua potable, el saneamiento y la higiene. Esto es un derecho humano que se fortalece mediante la innovación y la acción basada en pruebas científicas operativas, teóricas y estadísticas, adoptando un enfoque integral. En este sentido, la investigación se presenta como un producto de desarrollo enfocado en la gestión sostenible del agua. Asimismo, la investigación se alinea con el objetivo de Industria, innovación e infraestructura, al promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación. La implementación de este proceso permite el aprovechamiento de residuos de la biorrefinería del coyol, optimizando el uso eficiente de los recursos. A su vez, se vincula con el objetivo de producción y consumo responsable, ya que fomenta un uso eficaz e integral de los recursos, productos y subproductos de la cáscara de coyol como bioadsorbente. De este modo, se busca reducir la generación de residuos y fomentar prácticas de economía circular (Naciones Unidas, s.f.).

En cuanto al principio de Prevención, que establece que es mejor evitar la generación de residuos en lugar de tratarlos o eliminarlos después de su formación, esta investigación es coherente con dicho enfoque. Se aprovechan los residuos generados en el procesamiento integral del fruto para la producción de biocombustibles, comestibles y bioproductos específicamente la cáscara, transformándola en un bioadsorbente de Cr (VI) para darle un valor agregado. Además, los subproductos resultantes del tratamiento de la cáscara son caracterizados como una primera aproximación para su reintegración en procesos productivos como materiales con valor agregado. En relación con el principio de Solventes y Auxiliares Más Seguros, se promueve la eliminación de sustancias auxiliares siempre que sea posible.

En este estudio, solo se utiliza agua desionizada y alcohol isopropílico (que es recuperado) para el tratamiento de la cáscara de coyol. Adicionalmente, se optó por una preparación más segura del difenil carbazida, eliminando el uso de ácido sulfúrico en la reacción y disolviendo el reactivo únicamente en acetona y para un proceso con menor impacto se realizó a escala reducida (1ml) (Doria Herrera, Paz Ordoñez, & Hormaza Anaguano, 2013).

También se considera el principio de Diseño para la Eficiencia Energética, ya que se minimizan los requisitos energéticos del proceso. Las extracciones y análisis se realizan a temperatura y presión ambiente, demostrando que es posible extraer tanto los componentes hidrofóbicos como los hidrofílicos sin necesidad de aumentar la temperatura. Esto se evidencia en el apartado 9.2 del estudio. Además, se recomienda la integración de energía solar térmica para el secado de la cáscara, con el fin de mejorar la eficiencia energética del proceso.

La investigación también contempla el principio de Uso de Materias Primas Renovables, asegurando su viabilidad técnica y económica. Se emplea un subproducto del procesamiento del coyol para la creación de un bioadsorbente, promoviendo la valorización de residuos. Asimismo, se incorpora el principio de Diseño para la Degradación, pues el bioadsorbente es biodegradable y, al final de su vida útil, puede ser pirolizado para la obtención de biochar, siempre y cuando se tenga las medidas correctas para no generar más contaminantes, que valdría la pena un estudio extendido de la pirólisis de estos materiales impregnados con cromo lo que amplía su funcionalidad antes de su degradación final.

En el marco de la estrategia de Producción Más Limpia (PML), definida por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), esta investigación busca reducir desechos y emisiones mediante estrategias como la minimización en la fuente y el reciclaje interno. Se enfatiza en la mejora de la eficiencia y la reducción de costos (Homem V. et al., 2022), promoviendo el aprovechamiento de residuos agroindustriales para su transformación en un producto de valor agregado, como el bioadsorbente para la remoción de cromo hexavalente en aguas residuales. Además, la investigación adopta una perspectiva integral al reintroducir los subproductos generados en procesos económicos, considerando reactivos más seguros y fomentando su recuperación.

18. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se determinó la capacidad de adsorción de la cáscara de Coyol (*Acrocomia aculeata*) como agente bioadsorbente para la remoción del cromo (VI) en aguas residuales (agua sintética) obteniendo un valor de 0.28 mg/g.

El mayor porcentaje de remoción de Cr (VI) se obtuvo bajo las siguientes condiciones: pH 5.5, cantidad de adsorbente de 5.5 g, tiempo de contacto de 270 minutos y concentración inicial de Cr(VI) de 0.016 mg/mL, logrando un $92.53\% \pm 1.61\%$ de remoción. Además, se alcanzaron porcentajes de remoción superiores al 80% en condiciones de pH 5.5, con 5.5 g de adsorbente, incluso a 60 minutos de contacto y para concentraciones iniciales entre 0.019145 mg/mL y 0.032343 mg/mL de Cr(VI).

La cinética que describe el proceso de adsorción en un rango de concentraciones de 0.030 a 0.008 mg/ml de Cr(VI) es de pseudo segundo orden, lo que indica una fisisorción.

La isoterma que describe el proceso de adsorción es el modelo de Freundlich con un valor de r^2 de 0.9518, lo que indica una sorción multicapa.

El adsorbente se puede regenerar una cantidad de 2 obteniendo resultados mayores al 80% de remoción, por lo que se recomienda explorar el fenómeno de desorción con metanol, NaOH o HCl, así como técnicas de cuantificación como la cromatografía de iones.

Se determinó que, a partir de una tonelada de fruto, es posible obtener hasta 75.8 kg de bioadsorbente, lo que equivale a una producción de hasta 1.75 toneladas por hectárea. Esto posiciona al coyol como una biomasa lignocelulósica competitiva en comparación con otros materiales estudiados para el mismo propósito.

Se logró la separación manual de los componentes del coyol, con una pérdida del 10% en peso respecto al total del fruto. Se recomienda buscar estrategias para optimizar el proceso de pelado y descascarado, de modo que las pérdidas no superen el 5%. No obstante, incluso con un 10% de pérdida, este valor se encuentra dentro del rango típico en comparación con otros frutos.

La caracterización del coyol mostró que los porcentajes de humedad en sus diferentes componentes son los siguientes: 38.34% en la cáscara, 75.2% en la pulpa, 16.4% en la cáscara del núcleo y 42.4% en el núcleo. Además, la cáscara o epicarpio representa el 19.77% en peso seco del fruto total.

Mediante el método de DNS se cuantificó la eliminación de los extractables hidrofóbicos, mientras que la técnica de FTIR permitió caracterizar los compuestos hidrofóbicos e hidrofílicos. Se obtuvo una concentración de 1.042 g/L a temperatura ambiente, lo que indica que no se requiere un gasto energético adicional para la extracción.

El análisis de FTIR de la cáscara de coyol crudo reveló la presencia de grupos funcionales como CH, -OH, C-O, C-O-C y C=O. Tras el pretratamiento, se identificaron los grupos funcionales OH, C=O, C-O, C-O-C y COOH, los cuales participan en el mecanismo de adsorción del Cr(VI). Asimismo, al comparar la caracterización de la cáscara antes y después del tratamiento, se observaron diferencias en la intensidad de los picos correspondientes a los enlaces y vibraciones de OH, C=C, CH y OH de los carbohidratos, así como C=C de compuestos aromáticos.

Se recomienda complementar la caracterización con técnicas más robustas, según los requerimientos específicos.

El análisis de SEM mostró que el proceso de extracción de compuestos hidrofóbicos e hidrofílicos incrementa la rugosidad y porosidad de la superficie de la cáscara de coyol. Además, el análisis BET, en conjunto con SEM, evidenció un aumento en el área superficial de la cáscara tratada, alcanzando un

valor de $1.223\text{E}-01 \text{ m}^2/\text{g}$ y un volumen de poro de $8.96\text{E}+02 \text{ \AA}$. No obstante, estos valores son menores a los reportados para otros materiales lignocelulósicos utilizados para el mismo propósito.

Mediante análisis TGA y DTG se determinó la composición de la cáscara de coyol pretratada: humedad (0.19%), extractables (6.6%), hemicelulosa (43.3%), celulosa (15.29%), lignina (29.7%) y cenizas (3.34%). La curva DTG indicó los puntos de mayor pérdida de masa, con valores de 3%, 2.8% y 2.5% por minuto.

El punto de carga cero de la cáscara de coyol crudo se estableció en pH 4.8, mientras que para la cáscara pretratada fue de pH 7.

El análisis elemental mostró que la humedad es nula en ambos casos (0%). El contenido de nitrógeno fue de $0.688\% \pm 0.062$ en la cáscara cruda y de $0.54\% \pm 0.01$ en la cáscara sin extractables. El porcentaje de carbono aumentó de $43.16\% \pm 0.3$ en la cáscara cruda a $48.58\% \pm 0.78$ en la cáscara sin extractables. El contenido de hidrógeno también presentó un incremento, pasando de $5.65\% \pm 0.14$ en la cáscara cruda a $6.02\% \pm 0.04$ tras el pretratamiento. En cuanto al azufre, se detectó en pequeñas cantidades en la cáscara cruda ($0.062\% \pm 0.002$), pero no se encontró en la cáscara sin extractables (0.00%).

El análisis calorimétrico mostró que el poder calorífico de la cáscara de coyol aumentó después del tratamiento, pasando de 16.92 MJ/kg a 19.12 MJ/kg.

19. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

ACTIVIDADES	BIMESTRE											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Elaboración de protocolo (TESIS)												
Asistencia al curso de maestría en ingeniería en producción más limpia												
Analizar la composición química y estructural de los residuos de coyol. mediante las técnicas de IFTR, TGA, SEM												

Determinar las isothermas que describan de con mayor índice de correlación la adsorción de metales pesados del coyol												
Evaluar, la eficiencia de adsorción de la A. aculeata de metales pesados evaluando los parámetros como el tamaño de partícula, tiempo de contacto, pH, y concentración de adsorbente												
Comparar los-beneficios del aprovechamiento de la A. culata como bioadsorbente con otros adsorbentes y/o tecnologías actuales												
Presentación de resultados												

20. REFERENCIAS

- Agencia para las sustancias tóxicas y el registro de enfermedades. (2012). Resumen de la salud pública. Estados Unidos. recuperado el 14 de agosto de 2023 de: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs7.pdf
- Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible Una oportunidad para América Latina y el Caribe. (2016). Publicación de las Naciones Unidas Copyright © Naciones Unidas, mayo de 2016 Todos los derechos reservados Impreso en Santiago S.16-00505. Recuperado de <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/311197/agenda-2030-y-los-objetivos-de-desarrollo-sostenible.pdf>
- Agua. (2017). Usos, abusos y contaminación del agua en México: Industria y minería (I). recuperado de: https://agua.org.mx/editoriales/ usos-abusos-contaminacion-del-agua-en-mexico-industria-mineria-i/#_edn1
- Aguilar Ibarra, A., & Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Investigaciones Económicas. (2010). *Calidad del agua : un enfoque multidisciplinario*. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Instituto de Investigaciones Económicas.
- Aguilar-Aguilar, F. A., Mena-Cervantes, V. Y., García-Solares, M., & Hernández-Altamirano, R. (2023). Exploring the biorefinery potential of *Acrocomia aculeata*: A native Mexican palm for sustainable resource valorization. Research Square. Extraído de <https://www.researchsquare.com/article/rs-3059939/v1>
- Al osman, M., Yang, F. & Massey, I.Y. Exposure routes and health effects of heavy metals on children. *Biometals* 32, 563–573 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10534-019-00193-5>
- Al-Ghouti, M. A., & Da'ana, D. A. (2020). Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 393, 122383. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2020.122383>
- Amaringo Villa, F. A., & Hormaza Anaguano, A. (2013). *Determinación del punto de carga cero y punto isoeléctrico de dos residuos agrícolas y su aplicación en la remoción de colorantes*. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 4(2), 27-36.
- Armienta, M. A. (2024). Chapter 18 - Advances in the development of adequate, affordable, and sustainable treatment alternatives to drinking water contamination by arsenic, heavy metals, and nitrates in Mexico. In S. Bandyopadhyay (Ed.), *Advances in Drinking Water Purification*. Elsevier.
- Bachmann S., I. V. J. Dávila, T. Calvete. L. A. Féris. (2022). Adsorption of Cr (VI) on lignocellulosic wastes adsorbents: an overview and further perspective. *International Journal of Environmental Science and Technology*. Brasil. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-03928-z>.

- Basanta Kumar Biswal, Rajasekhar Balasubramanian.(2023). Use of biochar as a low-cost adsorbent for removal of heavy metals from water and wastewater: A review, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Volume 11, Issue 5, 2023, 110986, ISSN 2213-3437, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110986>.
- Bernal Figueroa, A. A., Beltrán Parada, C. J., & Márquez Márquez, A. F. (2017). Producción Más Limpia: una revisión de aspectos generales. *I3+*, 3(2), 66–85. <https://doi.org/10.24267/23462329.219>
- Bravo, A. (2017, 4 agosto). Promesas incumplidas y pozos envenenados: así vive la gente cerca del contaminado Río Sonora – agua.org.mx. <https://agua.org.mx/promesas-incumplidas-pozos-envenenados-asi-vive-la-gente-cerca-del-contaminado-rio-sonora/>
- Campos Mondragón, M. G., & Cervantes Delfin, K. I. (2015). Análisis de cáscaras de frutas aprovechadas en la obtención de un subproducto de fibra. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 65(Supl. 2). Recuperado de <https://www.alanrevista.org/ediciones/2015/suplemento-2/art-552/>
- Carlos Cabrera Marutz, C. D. Velásquez-Alcalá, S. Vrhovac-Biljesko, J. (2014). Enfermedades profesionales en la industria del cobre: extracción, manufactura y reciclaje. In *Med Segur Trab (Internet)* (Vol. 60, Issue 237).
- Castellanos, J. Z., & Pratt, P. F. (1981). Mineralization of manure nitrogen—correlation with laboratory indexes. *Soil Science Society of America Journal*, 45(2), 354–357. <https://doi.org/10.2136/sssaj1981.03615995004500020027x>
- Cindy Goyburo-Chávez, Jonathan I. Mendez-Ruiz, Samantha Jiménez-Oyola, Paola Romero-Crespo, Leonardo Gutierrez, Priscila E. Valverde-Armas.(2024).Pilot-scale reverse osmosis treatment of gold cyanidation effluent for the removal of cyanide, heavy metal(loid)s, and ionic species. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* Volumen 9. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100688>
- Comisión Nacional del Agua. (26 de junio de 2023). Calidad del agua en México. blog. Recuperado el 17 de septiembre de 2023 de: <https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua#:~:text=Con%20base%20en%20ello%2C%20en,agua%20superficial%20a%20nivel%20nacional>
- Comisión Nacional del Agua. (2024). *Estadísticas del Agua en México 2023*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/>
- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. (1917). Artículo 4. Reformado DOF 08-02-2012.
- Cuervo, L., Folch-Mallol, J. L., Estela, R., & Castañeda, Q. (2008). *Lignocelulosa Como Fuente de Azúcares Para la Producción de Etanol*. Cuernavaca, Mor. 62209, México <https://www.researchgate.net/publication/266610846>
- De la Cruz, F. B., Pilon, R., & Sullivan, R. G. (2020). Importance of moisture content in composting processes: A review. *Waste Management*, 102, 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.11.025>

- Degen de Arrúa, R., Britos, L., Delmás, G., Velázquez, E., & Gonzales, Y. (2015). Sistema de colecta y almacenamiento de frutos de *Acrocomia aculeata* y aprovechamiento del aceite de la pulpa con miras a su utilización como materia prima para la obtención de biodiesel [Diapositivas]. Programa Prociencia - Convocatoria 2015, Paraguay. PROCIENCIA. <https://repositorio.conacyt.gov.py/bitstream/handle/20.500.14066/3257/14-INV->
- Deshavath, N. N., Mukherjee, G., Goud, V. V., Veeranki, V. D., & Sastri, C. V. (2020). Pitfalls in the 3,5-dinitrosalicylic acid (DNS) assay for the reducing sugars: Interference of furfural and 5-hydroxymethylfurfural. *International Journal of Biological Macromolecules*, 156, 180–185. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.045>
- Dias, F. de S., Meira, L. A., Carneiro, C. N., dos Santos, L. F. M., Guimarães, L. B., Coelho, N. M. M., Coelho, L. M., & Alves, V. N. (2023). Lignocellulosic materials as adsorbents in solid phase extraction for trace elements preconcentration. In *TrAC - Trends in Analytical Chemistry* (Vol. 158). Brasil. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116891>
- Doria Herrera, G. M., Paz Ordoñez, P. A., & Hormaza Anaguano, A. (2013). *Estandarización de la difenilcarbazida como indicador y acomplejante en la identificación de cromo hexavalente – Cr (VI)*. **Producción + Limpia**, 8(2), 9-20.
- Ebelegi, A. N., Ayawei, N., & Wankasi, D. (2020). Interpretation of adsorption thermodynamics and kinetics. *Open Journal of Physical Chemistry*, 10(3), 166-182. <https://doi.org/10.4236/ojpc.2020.103010>
- Elaine Fabre, Cláudia B. Lopes, Carlos Vale, Eduarda Pereira, Carlos M. Silva. (2020) Valuation of banana peels as an effective biosorbent for mercury removal under low environmental concentrations, *Science of The Total Environment*, Volume 709, 2020, 135883, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135883>.
- El-Sayed, S. A., & Mostafa, M. E. (2014). Pyrolysis characteristics and kinetic parameters determination of biomass fuel powders by differential thermal gravimetric analysis (TGA/DTG). *Energy Conversion and Management*, 85, 165–172. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.05.068>
- Escalona, J. R., Larqué, C. A., Sánchez, A., Montiel, K. L. y Gutiérrez, R. (2022). Carbohidratos: características químicas y clasificación. Unidades de Apoyo para el Aprendizaje. CUAIEED/Facultad de Medicina-UNAM. Extraído de <https://uapa.cuaieed.unam.mx/sites/default/files/minisite/static/475f3f71-e344-45d7-9768-85f6d38eca2f/contenido/index.html>
- Ezzati, R. (2020). Derivation of Pseudo-First-Order, Pseudo-Second-Order and Modified Pseudo-First-Order rate equations from Langmuir and Freundlich isotherms for adsorption. *Chemical Engineering Journal*, 392. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123705>

- Fakhar, A., Galgo, S. J. C., Canatoy, R. C., Rafique, M., Sarfraz, R., Farooque, A. A., & Khan, M. I. (2025). *Advancing modified biochar for sustainable agriculture: A comprehensive review on characterization, analysis, and soil performance*. *Biochar*, 7(8). <https://doi.org/10.1007/s42773-024-00397-0>
- Figueroa, Andrea & Beltran, Claudia Johana & Márquez, Andrés. (2017). Producción Más Limpia: una revisión de aspectos generales.
- Flores-Álamo, N.; Solache-Ríos, M. J.; Gómez-Espinosa, R. M.; García-Gaitán, B. Estudio de adsorción competitiva de cobre y zinc en solución acuosa utilizando Q/PVA/EGDE *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 14, núm. 3, 2015, pp. 801-811 Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa Distrito Federal, México.
- Gañán, P., Zuluaga, R., Castro, C., Restrepo-Osorio, A., Cock, J. V., Osorio, M., Montoya, Ú., Vélez, L., Álvarez, C., Correa, C., & Molina, C. (n.d.). *CELULOSA: UN POLÍMERO DE SIEMPRE CON MUCHO FUTURO*.
- Gómez Arias Wilfrido a., Andrea Moctezuma (2020). Los millonarios del agua, Una aproximación al acaparamiento del agua en México. UAM-X, CDMX.
- Gudelia Figueroa Preciado. (2003). Optimización de una superficie de respuesta utilizando JMP IN. *Mosaicos Matemáticos* No. 11. Departamento de Matemáticas Universidad de Sonora. 17-23.
- Guillermo Andrade Espinosa. (2007). Activación y Caracterización De Materiales Nanoestructurados (CNx Y CST): Remoción De Cadmio. Instituto Potosino De Investigación Científica Y Tecnológica, A.C. Posgrado En Ciencias Aplicadas. San Luis potosí, México. Recuperado de: <https://ipicyt.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1010/610/3/TMIPICYTA5A32007.pdf>
- Gutierrez T. M.R. (2020). Niveles de Cromo en Aguas subterráneas en Zonas costeras asociadas a actividad minera y agrícola en San Juan de los Planees BCS, México. (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de México. CDMX.
- Hajar Belhassan, Mohammed Merzouki, Ghita El mouhri, Halima Amakdouf, Othmane Lamrani, EL Mehdi Haily, Yousra Massaoudi, Abdellatif Boukir, Mohammed Benlemlih, High efficiency removal of heavy metals and organic pollutants from brassware using raw coal: Kinetic adsorption and optimized process, *Results in Chemistry*, Volume 5, 2023, 100855, ISSN 2211-7156, <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2023.100855>.
- Haris, M., Amjad, Z., Usman, M., Saleem, A., Dyussenova, A., Mahmood, Z., Kukybayeva, D., Guo, J., & Wang, W. (2024). A review of crop residue-based biochar as an efficient adsorbent to remove trace elements from aquatic systems. *Biochar*, 6(47). <https://doi.org/10.1007/s42773-024-00341-2>
- Hermilo, P., & Quero, J. (1943). Hortorium and The International Palm Society. In *Flora of Guatemala. Fieldiana Bot* (Vol. 24, Issue 1). Allen Press.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2018). *Desarrollo de rutas de instrumentación de las contribuciones nacionalmente determinadas en materia de mitigación de gases y compuestos de efecto invernadero (GyCEI) del sector aguas residuales de México*. <http://www.inecc.gob.mx>

- Joaquín Nóchez Hernández, Alan Jesús Ventura Hernández. (2009). Metodología de Superficie de Respuesta (MSR), conceptos y aplicación para obtener el valor óptimo en un experimento. UNIVERSIDAD De El Salvador. Facultad De Ciencias Naturales Y Matemática. trabajo de graduación para optar al título de: Licenciado En Estadística. Ciudad Universitaria, San Salvador
- José Enrique Torres Vaamonde. (2022). Special Issue “Applications of Biosorption in Wastewater Treatment”. Departamento de biología, Facultad de Ciencias. Universidad de Coruña, 15008. España. <https://doi.org/10.3390/pr10010022>
- Joseph E. Stiglitz. (2000). La economía del sector público. Tercera edición. Columbia University.
- Khan, A. S. A. (2012). *Theory of adsorption equilibria analysis based on general equilibrium constant expression. Turkish Journal of Chemistry*, 36(2), 219–231. <https://doi.org/10.3906/kim-1110-6>
- L. Hens, C. Block, J.J. Cabello-Eras, A. Sagastume-Gutierrez, D. Garcia-Lorenzo, C. Chamorro, K. Herrera Mendoza, D. Haeseldonckx, C. Vandecasteele, On the evolution of “Cleaner Production” as a concept and a practice, *Journal of Cleaner Production*, Volume 172, 2018, Pages 3323-3333, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.082>.
- Laird, D. A., & Fleming, P. D. (2008). Biochar amendments improve water quality. *Environmental Science & Technology*, 42(1), 150–156. <https://doi.org/10.1021/es0710424>
- Ley General Del Equilibrio Ecológico Y La Protección Al Ambiente Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de enero de 1988 Texto Vigente Última reforma publicada DOF 08-05-2023, Cámara De Diputados Del H. Congreso De La Unión Secretaría General Secretaría de Servicios Parlamentarios
- Londoño Franco, L. F., Londoño Muñoz, P. T., & Muñoz Garcia, F. G. (2016). LOS RIESGOS DE LOS METALES PESADOS EN LA SALUD HUMANA Y ANIMAL. *Biotechnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145. [https://doi.org/10.18684/bsaa\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/bsaa(14)145-153)
- León Ovelar, R., Fernández-Boy, M. E., & Knicker, H. (2016). Caracterización del endocarpio de *Acrocomia aculeata* como sustrato de cultivos. V Jornadas de la Red Española de Compostaje.
- Luisa Cardoso Maia, Liliane Catone Soares, Leandro Vinícius Alves Gurgel.(2021). A review on the use of lignocellulosic materials for arsenic adsorption. *Journal of Environmental Management*. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112397>
- Maceda, A., Soto-Hernández, M., Peña-Valdivia, C. B., Trejo, C., & Terrazas, T. (2021). Lignin: composition, synthesis and evolution. *Madera y Bosques*, 27(2). <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2722137>
- Manals-Cutiño, Enma, Penedo-Medina, Margarita, & Giralt-Ortega, Giselle. (2011). ANÁLISIS TERMOGRAVIMETRICO Y TÉRMICO DIFERENCIAL DE DIFERENTES BIOMASAS VEGETALES. *Tecnología Química*, 31(2), 180-190. Recuperado en 25 de mayo de 2024, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852011000200005&lng=es&tlng=es.

- Metcalf & Eddy. (2003). Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización (tercera edición). Volumen II. McGraw-Hill. España.
- Miriam Elba Cano Vega. (2007). Análisis de elementos residuales depositados en la mano después de disparar un arma de fuego usando espectroscopia de emisión. Óptica por plasma acoplado inductivamente. Tesis para obtener el título de ingeniero Químico industrial. Instituto Politécnico Nacional Escuela Superior de ingeniería química e industrias extractivas. Ciudad de México.
- Mohammad A. Al-Ghouti, Dana A. Da'ana. (2020) Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review, Journal of Hazardous Materials, Volume 393, , 122383, ISSN 0304-3894, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122383>.
- Moreira L., Pilligua Ponce, J. M García M., S., Burgos B., G., García V., O., Briones P., G., & Prado S., J. (2022). DISMINUCIÓN DE CROMO Y COBRE EN AGUAS RESIDUALES UTILIZANDO CÁSCARAS (NARANJA Y BANANO) COMO BIOADSORBENTE. InfoANALÍTICA, 10(2), 37–63. <https://doi.org/10.26807/ia.v10i2.234>
- Naciones Unidas. (s.f.). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Naciones Unidas. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>, Extraído el 19 de febrero de 2025.
- Nianhua Chen, Xintong Cui, Xiaolin Sun, Xu Yang, Wulin Yang, Nanqi Ren, Yujie Feng, Yushi Tian, Weihua He. (2024). Advanced Cr(VI) removal from wastewater using migrating electric field-assisted electrocoagulation combined with capacitive deionization technology. Journal of Water Process Engineering. Volumen 63. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105445>.
- NMX-AA-028-SCFI-2001. Análisis de agua - determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO5) y residuales tratadas - método de prueba. DOF: 17 de abril de 2001
- NMX-AA-030/1-SCFI-2012. Análisis de agua-medición de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.- método de prueba-parte 1-método de refluo abierto-(cancela a la NMX-AA-030-SCFI-2001). DOF 5 de abril de 2013
- Norma García, Rojas Paola, Villanueva Díaz Eduardo, Campos Medina Alma Velázquez Rodríguez (2014). Análisis de la adsorción como método de pulimento en el tratamiento de aguas Residuales. Universidad Autónoma del Estado de México
- NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021 Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. (11 de marzo de 2022) Diario Oficial de la Federación retomado el 17 de septiembre de 2023 de: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0

NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. Diario Oficial de la Federación retomado el 17 de septiembre de 2023 de: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0

Norfahana, A. S., Ilyas, R. A., Ngadi, N., Othman, M. H. D., Misenan, M. S. M., & Norraahim, M. N. F. (2024). *Revolutionizing lignocellulosic biomass: A review of harnessing the power of ionic liquids for sustainable utilization and extraction*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 256, 128256. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128256>

N.D. Shooto, Removal of toxic hexavalent chromium (Cr(VI)) and divalent lead (Pb(II)) ions from aqueous solution by modified rhizomes of *Acorus calamus*, *Surfaces and Interfaces* 20 (2020) 100624. <https://doi.org/10.1016/J.SURFIN.2020.100624>. Organización de las Naciones Unidas. (29 de agosto de 2023). Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>

Ovelar, R. L., Elena Fernández-Boy, M., & Knicker, H. (2016). *CARACTERIZACIÓN DEL ENDOCARPIO DE *Acrocomia aculeata* COMO SUSTRATO DE CULTIVOS*. Extraído de https://digital.csic.es/bitstream/10261/152415/1/caracterizacion_endocarpio_VJorREC_2016.pdf

Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria, R. A., & Gallo, J. A.. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9-18. Epub March 20, 2021. <https://doi.org/10.31908/19098367.000>

Pehlivan, E., & Altun, T. (2008). Biosorption of chromium(VI) ion from aqueous solutions using walnut, hazelnut and almond shell. *Journal of Hazardous Materials*, 155(1–2), 378–384. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.11.071>

Quynh Hoang Le, Kamel Smida, Zahra Abdelmalek, Iskander. (2023). Tlili, Removal of heavy metals by polymers from wastewater in the industry: A molecular dynamics approach, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Volume 155, Pages 1035-1042, ISSN 0955-7997, <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2023.07.034>.

Ramírez Haedo, E. (2019). *Caracterización morfológica, productiva y ambiental de poblaciones naturales de *Acrocomia aculeata* (Lodg.) Lodd. Ex Mart.) en el Departamento de Itapúa, Extremo Sur de Paraguay* [TESIS DOCTORAL]. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero.

Ramón De Los Santos, C., Barajas Fernández, J., Pérez Hernández, G., Hernández Rivera, M. Á., & Díaz Flores, L. L. (2019). Adsorption of copper (II) and cadmium (II) in aqueous suspensions of biogenic nanostructured CaCO₃. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 58(1), 2–13. México <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2018.05.003>

- Revellame, E. D., Fortela, D. L., Sharp, W., Hernandez, R., & Zappi, M. E. (2020). *Adsorption kinetic modeling using pseudo-first order and pseudo-second order rate laws: A review. Cleaner Engineering and Technology*, 1, 100032. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2020.100032>
- Rivas- Tovar L.A. (2015). *¿Cómo Hacer una Tesis de Maestría?* . Ciudad de México: Instituto Nacional. <https://www.researchgate.net/profile/Luis-Arturo-Rivas-Tovar>
- Rodríguez Bonet, Sergio, Chaparro Aguilera, Laura, Benítez Villalba, Julio, Villalba, Domitila, Arévalos Rotela, Laura, & Benítez Franco, Rossana. (2020). Caracterización fisicoquímica de la pulpa y almendra de *Acrocomia aculeata*. *Investigación Agraria*, 22(1), 46-52. Epub 00 de junio de 2020. <https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2020.junio.46-52>
- Rodríguez-Calle, Rosa María, Suárez-Hernández, Jesús, Iglesias-Gómez, Jesús Manuel, & Rodríguez Licea, Gabriela. (2022). Caracterización química de la cáscara del fruto de *Jatropha curcas*. *Terra Latinoamericana*, 40, e958. Epub 03 de febrero de 2023. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.958>
- Rubens S. Ramahlo. (1996). Tratamiento de aguas residuales. Facultad de ciencias e ingeniería, universidad de Laval, Quebec Canadá. Editorial Reverte S.A.
- Ruzhan Bai, Yan Feng, Lei Wu, Na Li, Quansheng Liu, Yingyue Teng, Runxia He, Keduan Zhi, Huacong Zhou, Xueyan Qi. (2023) Adsorption mechanism of methylene blue by magnesium salt-modified lignite-based adsorbents, *Journal of Environmental Management*, Volume 344 118514, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118514>.
- Secretaría de Economía. (2024). Curtido y Acabado de Cuero y Piel, y Fabricación de Productos de Cuero, Piel y Materiales Sucedáneos. Extraído de <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/industry/leather-and-allied-product-manufacturing?measuresIndicator=Total%20Employees%20Depends%20on%20the%20Economic%20Unit&optionsSelector1=Total%20Income>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2015). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Capítulo 6. Agua. Extraído el 29 de agosto 2023 de: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Cap6_Agua.pdf
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018). Estadísticas del Agua en México 2018. Editorial Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM_2018.pdf
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2019). Estadísticas del Agua en México 2019. Editorial Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM_2019.pdf
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2020). *Avance de Siembras y Cosechas*. Recuperado de <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>

- Servicio Geológico Mexicano (2017). Difracción de rayos X. <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Minerales/Difraccion-de-rayos-X.html>
- Sohail Ayub y Fezlollah Changani. Adsorption process for wastewater treatment by using coconut shell. (2014). International Journal of Civil, Structural, Environmental and Infrastructure Engineering Research and Development (IJCSEIERD) ISSN(P): 2249-6866; ISSN(E): 2249-7978 Vol. 4, Issue 3, Apr 2014, 21-34., Uttar Pradesh, India. Traducción de M.a Esther Rabasco y Luis Toharia Universidad de Alcalá. Antoni Bosch editor.
- Solanki, A., Ahamad, Z., & Gupta, V. (2025). *Upcycling waste biomass: Alkali-modified watermelon rind as a lignocellulosic bioadsorbent for copper ion removal. Industrial Crops & Products, 224*, 120340. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.120340>
- Sun-Kou, María del Rosario; Lazo, José Carlos 2009 estudio del efecto de la fuerza iónica en la adsorción de fenol con arcillas organofílicas. equilibrio y cinética Revista de la Sociedad Química del Perú, vol. 75, núm. 1, enero-marzo, 2009, pp. 17-25 Sociedad Química del Perú Lima, Perú
- Suganya, E., Saranya, N., Sivaprakasam, S., Varghese, L. A., & Narayanasamy, S. (2020). Experimentation on raw and phosphoric acid activated *Eucalyptus camaldulensis* seeds as novel biosorbents for hexavalent chromium removal from simulated and electroplating effluents. *Environmental Technology & Innovation, 19*, 100977. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100977>
- Vega Contreras, N. A., & Torres Salazar, M. L. (2021). Evaluación de compuestos fenólicos de (*Citrus sinensis*) y su capacidad antioxidante. *Revista Ciencia en Desarrollo, 12*(2), 109-117. <https://doi.org/10.19053/01217488.v12.n2.2021.11635>
- Vitor Homem de Mello Santos & Thalita Laua Reis Campos & Maximilian Espuny & Otávio José de Oliveira. (2022). Towards a green industry through cleaner production development. *Environmental Science and Pollution Research 29*:349–370 Brasil. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16615-2>
- Zavala Nevárez M.(2009). Diagnóstico de la contaminación por Cd, Cr, Hg y Pb en diversos sitios de la cuenca del río Baluarte Sinaloa. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México. CDMX.

ANEXO FOTOGRAFICO

