

**UNIVERSIDAD NACIONAL INTERCULTURAL DE LA
SELVA CENTRAL JUAN SANTOS ATAHUALPA**



**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE BIOSORCIÓN DE
CROMO (VI) CON LA BIOMASA DE LA CÁSCARA DE SAPOTE
(*Matisia cordata*)**

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental

AUTORA

Bianca Maricielo Vilcañaupa Rosas

ASESOR

Dr. Manuel Emilio Reátegui Inga

Chanchamayo, Perú

2025

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Rubí y Rosell, quienes me brindaron su apoyo incondicional durante toda mi formación académica y se esforzaron siempre por ofrecerme lo mejor, permitiéndome alcanzar mis metas personales y profesionales. Agradezco su presencia en cada etapa de mi vida, tanto en los momentos favorables como en los difíciles, y por enseñarme a enfrentar y superar cada desafío.

A mi hermano Víctor y a mis tías Liz, Yesi, Roxana, Luci, Sulma, así como a mi tío Jhonatan, por acompañarme siempre, brindarme su apoyo constante y transmitirme la confianza necesaria para seguir adelante, demostrando la gran fe que depositan en mí.

A mi maestra, la Dra. Carmencita Del Rocío Lavado Meza, por ofrecerme su guía, respaldo incondicional y orientación en el desarrollo de esta tesis; su acompañamiento fue fundamental para culminar este trabajo de investigación. Asimismo, agradezco a su esposo Aldo y a sus hijos por la hospitalidad que me brindaron en su hogar.

A mi asesor, el Dr. Manuel Emilio Reátegui Inga, por confiar en mí y respaldar este proyecto, dedicando su tiempo y compartiendo sus conocimientos durante todo este proceso académico.

A mis amigos y compañeros, con quienes compartí incontables momentos de alegría, bromas y también dificultades, pero siempre manteniendo el propósito común de concluir nuestra carrera. Hoy cumplimos ese sueño y fortalecemos nuestra amistad.

Finalmente, a todos los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, quienes con sus enseñanzas contribuyeron a mi formación y al desarrollo de mis capacidades profesionales.

DEDICATORIA

A Dios, por orientarme y darme la fortaleza necesaria para superar cada dificultad, por iluminar mi camino en la búsqueda de mis metas y por bendecir cada día de mi vida.

A mi familia, por su respaldo incondicional, ya que gracias a su apoyo hoy puedo hacer realidad un sueño más.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo por objetivo optimizar las variables que influyen en el proceso de biosorción de Cromo (VI) utilizando la biomasa de la cáscara de Sapote (*Matisia cordata*) (BCS), en la metodología de diseño experimental con optimización del proceso de biosorción se realizó empleando el diseño de Box Behnken empleando Desingn Expert, las variables evaluadas fueron pH (2, 3 y 4), concentración inicial de Cr (25, 75 y 125 mg/L) y dosis de BCS (0.5, 1 y 1.5 g/L). En los resultados, con el tratamiento a un pH = 2, concentración inicial de 75 mg/L y una dosis de 0.5 g/L se logró la mayor cantidad adsorbida de 32.76 mg de Cr (VI)/g de BCS; el ensayo cinético arrojó un tiempo de equilibrio de 120 minutos, los datos se ajustaron mejor a los modelos de Elovich ($R^2=0.989$) seguida de Pseudo segundo orden ($R^2=0.982$); respecto la isoterma de adsorción, el modelo de Temkin ($R^2=0.935$) seguida por Freundlich ($R^2=0.901$) por lo que la adsorción ocurre en multicapa no homogénea mediante la atracción electrostática, además de la formación de complejos. En conclusión, las variables pH, dosis y concentración inicial influyen significativamente ($p<0.05$) en la remoción del Cr, favoreciendo la remoción a un pH de 2; dosis de 0.5 g/L y 75 mg/L de concentración inicial de Cr; asimismo, según la predicción del modelo de Langmuir, la capacidad máxima de adsorción es 39.686 mg/g.

Palabras clave: Biosorción, capacidad de adsorción, pH.

ABSTRACT

The present research work had the objective of optimizing the variables that influence the biosorption process of Chromium (VI) using the biomass of Sapote (*Matisia cordata*) shell (BCS), in the experimental design methodology with optimization of the biosorption process was performed using the Box Behnken design employing Design Expert, the variables evaluated were pH (2, 3 and 4), initial concentration of Cr (25, 75 and 125 mg/L) and BCS dosage (0.5, 1 and 1.5 g/L). In the results, with the treatment at pH = 2, initial concentration of 75 mg/L and a dose of 0.5 g/L the highest adsorbed amount of 32.76 mg Cr (VI)/g BCS was achieved; the kinetic assay yielded an equilibrium time of 120 min, the data fitted best to the Elovich models ($R^2=0.989$) followed by Pseudo second order ($R^2=0.982$); regarding the adsorption isotherm, the Temkin model ($R^2=0.935$) followed by Freundlich ($R^2=0.901$) so the adsorption occurs in non-homogeneous multilayer by electrostatic attraction, in addition to the formation of complexes. In conclusion, the variables pH, dose and initial concentration significantly ($p<0.05$) influence the removal of Cr, favoring the removal at pH 2; dose of 0.5 g/L and 75 mg/L of Cr initial concentration; also, according to the prediction of Langmuir's model, the maximum adsorption capacity is 39.686 mg/g.

Keywords: Biosorption, adsorption capacity, pH.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
ÍNDICE.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
INTRODUCCIÓN.....	x
CAPITULO I.....	12
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
1.1 Fundamentación del Problema	12
1.2 Formulación de Problema.....	13
1.1.1. <i>Problema General</i>	13
1.1.2. <i>Problemas Específicos</i>	14
1.2. Objetivos	14
1.2.1. <i>Objetivo General</i>	14
1.2.2. <i>Objetivos Específicos</i>	14
1.3. Definición y Operacionalización de Variables.....	15
1.4. Hipótesis	15
1.4.1. <i>Hipótesis General</i>	15
1.4.2. <i>Hipótesis Específicas</i>	16
1.5. Justificación.....	16
CAPITULO II.....	18
MARCO TEÓRICO	18
2.1. Antecedentes.....	18
2.1.1. <i>Internacional</i>	18
2.1.2. <i>Nacional</i>	20
2.2. Bases Teóricas	24
CAPITULO III	35
METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN.....	35
3.1. Ámbito de Estudio	35

3.2.	Tipo, Nivel y Diseño de la Investigación	36
3.3.	Población y Muestra	38
3.4.	Procedimientos, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	38
	3.4.1. <i>Procedimientos</i>	38
	3.4.2. <i>Técnicas e Instrumentos</i>	40
3.5.	Análisis de Datos.....	41
CAPITULO IV		39
RESULTADOS Y DISCUSIONES		39
4.1.	Presentación de Resultados y Discusiones	39
	4.1.1. <i>Caracterización fisicoquímica la biomasa de la cáscara de sapote</i>	39
	4.1.2. <i>Valor óptimo del pH, dosis de biomasa y concentración inicial de Cr (VI) que influyen sobre la capacidad del proceso de biosorción de cromo ...</i>	42
	4.1.3. <i>Cinética de remoción del Cr (VI) sobre la biomasa cáscara de sapote...</i>	46
	4.1.4. <i>Isoterma de remoción del Cr (VI) sobre la biomasa cáscara de sapote ..</i>	47
4.2.	Prueba de Hipótesis	48
CONCLUSIONES.....		52
RECOMENDACIONES		53
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		54
ANEXOS.....		59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Ciclo del Cromo</i>	25
Figura 2 <i>Diseño experimental</i>	38
Figura 3 <i>Espectro FTIR de la BCS antes y después de la aplicación</i>	39
Figura 4 <i>Micrografías SEM acopladas por EDX de polvo de BCS antes de a diferentes aumentos</i>	40
Figura 5 <i>Micrografías SEM acopladas por EDX de polvo de BCS después de la adsorción de Cr a diferentes aumentos</i>	41
Figura 6 <i>Remoción de cromo en los diferentes tratamientos</i>	43
Figura 7 <i>Superficie de respuesta de concentración y pH</i>	44
Figura 8 <i>Superficie de respuesta de dosis y pH</i>	45
Figura 9 <i>Superficie de respuesta de dosis y concentración</i>	45
Figura 10 <i>Ajuste no lineal de modelos cinéticos de adsorción de Cr (VI)</i>	46
Figura 11 <i>Isotermas de adsorción de Cr (VI)</i>	47
Figura 12 <i>Diagrama de Pareto Estandarizado para la biosorción de Cr</i>	49
Figura 13 <i>Efectos principales para q_e</i>	50
Figura 14 <i>Interacción para para q_e</i>	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Operacionalización de variables.....	15
Tabla 2	Clasificación Taxonómica del sapote.....	28
Tabla 3	Diseño experimental.....	37
Tabla 4	Composición química elemental de cascara de sapote antes y después de adsorción de Cr42	
Tabla 5	Resultados del diseño experimental	42
Tabla 6	Parámetros de modelos cinéticos.....	47
Tabla 7	Parámetros de ajuste de datos a modelos de isothermas de adsorción.....	48
Tabla 8	Análisis de varianza para la biosorción de Cr	48

INTRODUCCIÓN

La contaminación de recursos hídricos es muy frecuente con metales pesados a nivel mundial, afectando a todas las personas, ya que la creciente escasez de agua de calidad es un problema ambiental grave. Los metales pesados son denominados así ya que poseen alta densidad con valores superiores 4 g/cm^3 , algunos de estos son el Cromo (Cr), Plomo (Pb), Arsénico (As), Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Mercurio (Hg), etc (Pabón et al., 2020).

Dentro de las contaminaciones hídricas por metales pesados principalmente se encuentra las producidas por actividades humanas relacionadas al sector extractivo de la minería, así como de actividades industriales de producción, ocasionando problemas serios de salud ya que los metales pesados son acumulativos y las enfermedades relacionadas a estos tienen la característica de presentar síntomas cuando se encuentran ya en estados avanzados (Villarraga, 2019)

La contaminación ambiental por cromo hexavalente [Cr(VI)] ha adquirido mayor relevancia debido a su amplia presencia a nivel mundial, alcanzando concentraciones elevadas tanto en el agua como en el suelo, como resultado de fuentes naturales y actividades humanas (Tumolo et al., 2020).

Estos incluyen minería y trabajos metalúrgicos, producción de acero y aleaciones metálicas, fabricación de pinturas, procesamiento de madera y papel, teñido y aumento del contenido de cromo en las aguas residuales. Además, la caída de cenizas producida por la incineración de carbón o residuos municipales para la generación de energía y la producción de fertilizantes de segunda generación contribuyen al elevado contenido de Cr (VI) en el suelo y el agua (Prasad et al., 2021).

Entre las actividades que contribuyen a esta problemática se encuentran la minería y la industria metalúrgica, la producción de acero y diversas aleaciones, la fabricación de pinturas, el procesamiento de madera y papel, así como el teñido de textiles, todas ellas responsables del incremento del cromo en los efluentes industriales. A esto se suma la dispersión de cenizas derivadas de la incineración de carbón y residuos municipales para la generación de energía, además de la producción de fertilizantes de segunda generación, los cuales aportan significativamente al aumento de Cr(VI) en los cuerpos de agua y en los suelos (Georgaki et al., 2023).

Debido a la problemática mencionada, nace el interés de encontrar variedad de métodos para la remoción de sustancias metálicas contaminantes y así reducir la toxicidad del agua y garantizar una buena calidad de vida humana y del ecosistema. Entre estos métodos podemos encontrar la precipitación, óxido- reducción, filtración, tecnologías de membrana, flotación, adsorción y biosorción (Bustos & Guáqueta, 2022).

La biosorción es un proceso por el cual materiales biológicos actúan como adsorbentes para remover contaminantes, como metales pesados, del agua. Este método se basa en la capacidad natural de ciertos materiales biológicos, incluyendo microorganismos como bacterias, hongos y algas, así como productos agrícolas y subproductos industriales, para capturar y acumular metales pesados desde soluciones acuosas, en el proceso existen factores muy importantes los cuales pueden ser temperatura, pH, tiempo de contacto y presencia de otros compuestos (Vallejo et al., 2021).

Además, para evaluar la influencia y optimizar los factores que intervienen en el proceso de biosorción es necesario crear modelos precisos con datos suficientes. Hay varios métodos disponibles para esto, sin embargo, requieren que se cree una matriz de diseño para medir los resultados, como el diseño Box-Behnken (DBB) (Corral et al., 2021).

Por ende, en este estudio se planteó el objetivo de optimizar las variables como pH, dosis de biomasa, concentración inicial y tiempo de contacto que influyen en el proceso de biosorción de Cr (VI) utilizando la biomasa de la cáscara de sapote (*Matisia cordata*).

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Fundamentación del Problema

A nivel mundial en las cadenas de suministro de prendas de vestir y calzado, es posible que se utilice el Cr en distintos estados de oxidación como en el curtido de pieles implica en muchos casos el uso de cromo trivalente (Cr (III)) (Pabón et al., 2020). La transformación de Cr (III) a Cr (VI) puede producirse en determinadas condiciones (Afirm Group [AG], 2022).

El Cr (VI) es uno de los contaminantes ambientales más comunes debido a sus enormes aplicaciones industriales. No es biodegradable ya que es un metal pesado y, por lo tanto, es motivo de gran preocupación. Por ende, es pertinente que el método de remediación sea tal que lleve el Cr dentro de los límites permisibles antes de que se descargue el efluente. Los microorganismos adoptan varias estrategias diferentes para la eliminación de Cr (VI), que en su mayoría implican biosorción y biotransformación la disponibilidad de reductores (Jobby et al., 2018).

El Cr(VI) constituye un serio riesgo para la salud humana, especialmente para quienes laboran en sectores como la industria del acero y la textil. Su exposición puede provocar reacciones alérgicas, irritaciones y lesiones cutáneas, así como inflamación nasal y episodios de sangrado al ser inhalado. Asimismo, puede debilitar el sistema inmunológico, generar daños en los riñones y en el hígado, afectar la función respiratoria, alterar el material genético, producir malestares gastrointestinales y úlceras, además de incrementar el riesgo de cáncer de pulmón, lo cual, en casos extremos, puede conducir a la muerte (Rodríguez, 2017).

A nivel nacional, las actividades de curtido en la industria textil representan una fuente importante de contaminación, ya que emplean diversas sales de cromo en sus procesos productivos. Esto genera efluentes líquidos con elevadas concentraciones de este metal, además de otros compuestos, lo que dificulta considerablemente su tratamiento. Como consecuencia, dichos vertimientos pueden ocasionar impactos negativos en las infraestructuras de saneamiento y en el funcionamiento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales (Huiman, 2022).

En ese sentido, para eliminar el Cr (VI) del medio acuático, se ha adoptado una gran cantidad de tecnologías, como la adsorción, la separación por membrana, la

ósmosis inversa, la coagulación-floculación, la precipitación química, degradación fotocatalítica e intercambio iónico.

Cada uno de los procedimientos tiene sus propias ventajas y desventajas dependiendo de la aplicación y concentración de contaminantes. (Datt et al., 2022) Entre ellos, se ha demostrado que la adsorción es un método muy eficaz para la eliminación de Cr (VI) de los acuíferos. En específico la bioadsorción, empleando diversos desechos agrícolas para eliminar el contaminante metálico mediante el proceso de adsorción, como las fibras de (Goria et al., 2022; Shen et al., 2010)

En Chanchamayo las diferentes actividades productivas provocan un degradamiento en la calidad del agua, suelo y aire particularmente el metal pesado Cr (VI) resulta protagonista de este estudio por su peligrosidad para la salud humana. Para eso hay varias normas que intentan controlar este problema. Una es el D.S. N° 003-2010-MINAM, que pone los límites de lo que pueden **verter las** plantas de tratamiento de aguas residuales. También está el D.S. N° 010–2010-MINAM, que dice hasta cuánto pueden descargar las empresas mineras o metalúrgicas sin pasarse. Y otro más, el D.S. N.º 010-2019-VIVIENDA, que regula los límites de aguas residuales, tanto las que vienen de casas como las que vienen de fábricas o cosas más industriales. Básicamente todas estas reglas están hechas para que el agua que se devuelve esté **dentro de los límites normativos.**

Para tal caso se propone tomar como solución, el empleo de la cáscara de sapote para la adsorción de Cr (VI) optimizando el tiempo de contacto, el pH, dosis de biomasa (cáscara de sapote) y concentración inicial de Cr (VI); la adsorción resalta por su viabilidad económica y ambiental, además de emplear un adsorbente de residuos que es abundante en la zona. Las ODS se alinean a los objetivos de Desarrollo Sostenible agendados hasta el 2030, ante ello se tienen diversas como ODS 3, salud y bienestar, ODS 6 Agua limpia y Saneamiento, ODS 9 Industria innovación e infraestructura, ODS 12 producción y consumo responsable y ODS 13 Acción por el clima. (García et al., 2022). En este contexto, surge la necesidad de la optimización del proceso de bioadsorción con cáscara de sapote para mejorar las practicas industriales creando al desarrollo sostenible en la región de Chanchamayo.

1.2 Formulación de Problema

1.1.1. *Problema General*

¿Cuáles serán los valores óptimos de las variables del proceso de biosorción de Cr (VI) utilizando la biomasa de la cáscara de Sapote (*Matisia cordata*)?

1.1.2. Problemas Específicos

- ¿Cuáles son las características fisicoquímicas de la biomasa de cáscara de sapote?
- ¿Cuáles serán los valores óptimos del pH, dosis de biomasa y concentración inicial de Cr (VI) que influyen sobre la capacidad del proceso de biosorción de cromo?
- ¿Cuál es el modelo adecuado que explica la cinética de remoción del Cr (VI) sobre la biomasa cáscara de sapote?
- ¿Cuál es el modelo adecuado que explica la isoterma de remoción del Cr (VI) sobre la biomasa cáscara de sapote?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Optimizar las variables que influyen en el proceso de biosorción de Cr (VI) utilizando la biomasa de la cáscara de Sapote (*Matisia cordata*).

1.2.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar fisicoquímicamente la biomasa de la cáscara de sapote.
- Determinar el valor óptimo del pH, dosis de biomasa y concentración inicial de Cr (VI) que influyen sobre la capacidad del proceso de biosorción de cromo.
- Identificar el modelo adecuado que explica la cinética de remoción del Cr (VI) sobre la biomasa cáscara de sapote.
- Identificar el modelo adecuado que explica la isoterma de remoción del Cr (VI) sobre la biomasa cáscara de sapote.

1.3. Definición y Operacionalización de Variables

Tabla 1

Operacionalización de variables

Variables	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores	Unidad de medida
Independiente:	Cantidad de biomasa aplicada en el proceso de			
Dosis de la biomasa	tratamiento, medida generalmente en gramos por litro de solución (Villalobos & Neyra, 2021)	Biomasa de cáscara de sapote (<i>Matisia cordata</i>)	0.5, 1 y 1.5	g/L
Potencial de Hidrógeno (pH)	Indicador del nivel de acidez o basicidad de una solución, esencial para establecer las condiciones más adecuadas en los procesos de biosorción de metales. (Anderson et al., 2022)	-pH Ácido - pH Base	2, 3 y 4	Escala de pH 0-14
Concentración Cr(VI)	Cantidad de cromo hexavalente presente en una solución, generalmente medida en miligramos por litro (Tejeda et al., 2015).	Concentración inicial de Cr(VI)	25, 75 y 125	mg/L
Dependiente: Biosorción de Cr(VI)	Es el acontecimiento generado que requiere ser interpretado y comprendido. (Tejeda et al., 2015).	Capacidad de Biosorción de Cr(VI)	Cantidad de Cr(VI) retenido por la biomasa durante el proceso de adsorción	mg Cr(VI)/g de biomasa

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis General

La cantidad de adsorbente ≤ 2 g/L, el tiempo de contacto ≤ 180 min y el pH óptimo ≤ 4 para la remoción de Cr (VI) influyen significativamente en el proceso de biosorción, utilizando la biomasa de la cáscara de Sapote.

1.4.2. Hipótesis Específicas

- Las características fisicoquímicas de la biomasa cáscara de sapote se establecería a través de un análisis estructural para la determinación del porcentaje de lignina (LGN), celulosa (CEL), y hemicelulosa (HMC).
- Al aumentar el valor inicial de pH, dosis de biomasa y concentración inicial se obtiene una mayor adsorción de cromo a partir de la optimización del proceso utilizando la cáscara de sapote.
- El modelo que mejor explica la cinética es el Modelo de primer orden y Modelo de pseudo segundo orden.
- El modelo que mejor explica la Isoterma de adsorción de Cr (VI) es la isoterma de Langmüir.

1.5. Justificación

A nivel social, esto se justifica porque en el Perú todavía hay un montón de problemas con las curtiembres, sobre todo porque mucha gente no sabe bien cómo tratar las aguas residuales. Entonces, todo eso termina afectando a las personas que viven cerca o en la zona donde se botan esos desechos. Lo que se busca acá es reducir la cantidad de cromo (Cr III) que queda en el agua, para evitar que siga contaminando el ambiente y que la gente esté expuesta a sustancias químicas peligrosas, que pueden hacer bastante daño si no se controla bien. (Aguilar & Pumachara, 2022). De igual manera, no hay control adecuado en los vertidos de efluentes residuales que contienen metales pesados entre ellos el Cr, los cuales desembocan a los cuerpos de agua sin depurar o insuficientemente depurados, Esto constituye una amenaza tanto para el medio ambiente como para la salud pública. Las tecnologías tradicionales utilizadas para la remoción de Cr(VI) no siempre alcanzan los niveles de eficiencia necesarios para cumplir con los límites de vertido establecidos, lo que hace indispensable desarrollar métodos o procesos alternativos que permitan disminuir o eliminar estas emisiones. Tales contaminantes afectan directamente a los ecosistemas y repercuten en la calidad de vida de la población.

Además, se justifica a nivel práctico que para eliminar el Cr (VI) de las aguas residuales, hay diversos métodos como absorción, filtración por membrana, electroquímicos, oxidación avanzada (Sánchez et al., 2025) Todos tienen ventajas y desventajas, en el campo de las desventajas por lo general el método de osmosis inversa

son muy caras y generan mucha cantidad de lodo, entonces es necesario plantear algunas otras medidas a través de las cuales podamos remover estos metales pesados de las aguas contaminadas, por lo que surge la biosorción.

A nivel teórico este proyecto de investigación es importante en cuanto a un nuevo conocimiento que se puede desarrollar con el Diseño box – behnken, este diseño combina los puntos medios de los bordes del proceso y del centro generando que estos puntos sean rotativos (Yañez et al., 2023). Es por ello que la optimización del proceso de biosorción de cromo con biomasa de la BCS con el diseño de box – behnken, es relevante pues según antecedentes no se encuentran muchos estudios sobre el uso del sapote como biosorbente, por ello sería un biosorbente novedoso e innovador.

Finalmente, se destaca la importancia de explorar el potencial de los residuos de sapote, una especie poco estudiada, como biosorbente con el objetivo de frenar la contaminación ambiental producida por los diversos metales pesados como el Cromo. Este aspecto ofrece una nueva dimensión de investigación que no sólo promete efectividad en la remoción de cromo, sino que también valoriza los residuos agrícolas, convirtiéndolos en una herramienta útil para la gestión ambiental, para el tratamiento de aguas residuales que afectan directamente en zonas como Chanchamayo y en consecuencia a los recursos hídricos. Se ha llevado a cabo una revisión de antecedentes que sugiere que la exploración de este material podría ser fructífera y beneficiosa tanto desde un punto de vista económico como ambiental. En adición a ello, se busca determinar si la cáscara de sapote sirve para quitar el cromo (Cr VI) del agua, suele estar en zonas donde hay industrias. Para eso se va a probar con algo que se llama diseño Box-Behnken, que básicamente ayuda a ver en qué condiciones funciona mejor todo esto, como el pH del agua, cuánto tiempo se deja la cáscara, cuánto cromo hay al comienzo y cuánta cáscara se usa. Es un estudio más práctico que teórico pues se va a hacer pruebas reales para ver qué tanto funciona y si vale la pena usarlo en otros lugares donde el agua está contaminada.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Internacional

En el ámbito internacional, Datt et al. (2022) en su investigación “*Efficient biosorption of hexavalent chromium from water by modified arecanut leaf sheath*”, tuvo por objetivo estudiar la eficiencia de adsorción de Cr (VI) a partir de una solución acuosa utilizando como bioadsorbente la vaina de la hoja de nuez de areca modificada químicamente (CALS). El adsorbente preparado se caracterizó mediante el uso de métodos instrumentales que incluyen espectroscopia infrarroja transformada de Fourier (FTIR), microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopia de dispersión de energía (EDS). Se examinó el efecto de varios factores, incluido el pH de la solución, el tiempo de contacto y las dosis de sorbente para identificar la condición óptima para la capacidad de sorción. Obteniendo como resultado al pH óptimo de la biosorción de Cr (VI) fue de 2.0 y el equilibrio se alcanzó en 150 min. Se demostró que la adsorción era de pseudo segundo orden en las investigaciones cinéticas, y la isoterma de Langmuir con la máxima eficiencia de adsorción se determinó en 109.89 mg/g. El biosorbente gastado se puede regenerar y reutilizar fácilmente para la biosorción de oxianiones de cromo, tanto la atracción electrostática como el mecanismo de intercambio de ligandos juegan un papel fundamental. A partir de los resultados, se concluye que el CALS parece ser un sorbente potencial y económico para eliminar el Cr (VI) del agua.

Rambabu et al. (2021) en su investigación “*Biosorption potential of Phoenix dactylifera coir wastes for toxic hexavalent chromium sequestration*”, tuvo por objetivo analizar la biosorción de iones tóxicos de Cr(VI), utilizando la fibra de coco de la palmera datilera (*Phoenix dactylifera*) (DPC). El biosorbente DPC fue sometido a estudios de caracterización, mediante el uso de métodos instrumentales de adsorción/desorción de SEM, EDX, FTIR, TGA y N₂. El resultado mostró que la superficie DPC rica en celulosa contenía mesoporos con una gran cantidad de funciones grupos y poseían atributos superficiales adecuados para el secuestro de iones Cr (VI). Pruebas de biosorción por lotes estableció el potencial de secuestro de iones Cr (VI) del biosorbente DPC con un cromo máximo eficiencia de eliminación del 87.2 % para una concentración de alimentación inicial de 100 ppm a pH 2, dosificación 0.3 g,

temperatura 30 C, tiempo de contacto 60 min y velocidad de agitación 100 rpm. Isotherma de Langmuir bien ajustada ($R^2 = 0.99$) con los datos experimentales, mientras que el análisis cinético mostró que el secuestro de iones Cr (VI) por DPC siguió el modelo de pseudo-segundo orden. Se concluye que el análisis económico mostró un costo de producción muy bajo de \$1.09/kg para el Biosorbente DPC con un costo total de \$ 4.36/m³ para una planta de tratamiento de aguas residuales de proceso por lotes a escala.

Según Dobrosz (2018) en su investigación titulada “Optimización del proceso de adsorción de Cr (VI) sobre carbón activado de origen bituminoso” El propósito de este estudio fue evaluar la viabilidad del carbón activado de origen bituminoso como material adsorbente para la eliminación de Cr(VI) en soluciones acuosas. Para ello, se empleó la metodología de superficie de respuesta con el fin de optimizar diversas condiciones operativas del proceso, tales como la temperatura, el pH y la dosis del adsorbente, considerando como variable de respuesta el porcentaje de remoción del cromo (VI). Como resultado, determinaron que las condiciones óptimas del proceso correspondían a un pH de 2, una temperatura de 40 °C y una dosis de adsorbente de 6 g/L. Bajo estas condiciones experimentales, se alcanzó una eficiencia de remoción del cromo hexavalente del 100%. Concluyeron que el carbón activado presentó una elevada capacidad de adsorción, alcanzando un valor de 16.53 mg/g, y que el equilibrio del proceso se logró en menos de 60 minutos. Los análisis termodinámicos indicaron que la adsorción ocurrió de manera espontánea, y el elevado valor de entalpía sugirió que el mecanismo correspondía a una quimisorción. Asimismo, el comportamiento cinético se ajustó al modelo de pseudo segundo orden, mientras que la adsorción se describió adecuadamente mediante la isoterma de Langmuir.

Según Martínez (2019) en su investigación titulada “Diseño de un adsorbente a base de bambú para la remoción de Cr (VI) en aguas contaminadas” tuvo como objetivo determinar la capacidad de adsorción de la hoja de bambú frente a concentraciones de Cr (VI) presentes en el agua, emplearon dos tratamientos diferentes donde el primero se refirió a la modificación química de la biomasa con hidrólisis ácida y el otro sin modificación química, para la metodología de su parte experimental utilizaron dos niveles de concentración que son de 10 y 25 ppm con tiempos de niveles de 1; 15; 30; 45 y 60 minutos, además de 25 y 50 mg de adsorbente, a temperatura ambiente y manteniendo un medio con pH de 3 y agitación constante, hicieron un total de 240

repeticiones, después de efectuado lo descrito determinaron una remoción de Cr (VI) que iba de 60% a un 84%, observaron también que los porcentajes más altos y bajos tuvieron en el tratamiento sin modificación química, concluyeron que los mejores resultados se alcanzaron a una concentración de 25 ppm, empleando un tamaño de partícula de 0.595 mm y 25 mg de adsorbente. En cuanto al porcentaje más bajo, este correspondió al ensayo realizado con una concentración de 10 ppm, utilizando 25 mg de masa y un tamaño de partícula de 0.297 mm.

Según Tejada (2014) en su investigación titulada “Biosorción de Cromo (VI) en aguas usando material lignocelulósico modificado” tuvo como objetivo estudiar la adsorción de cromo hexavalente en aguas usando cáscara de naranja modificada con quitosano y carbón activado, tuvo la metodología siguiente: diseño multiplicativo de tres niveles de pH correspondientes a 3; 4 y 5 además de tres niveles de concentración que fueron de (2;4 y 6 g/L), haciendo un total de 18 experimentos, los cuales fueron realizados mediante procesos en discontinuo a temperatura de 30 °C, donde el adsorbente estuvo en contacto con la disolución de cromo con concentración de 100 ppm, estudiaron la influencia del pH y la relación adsorbente/solución en la adsorción del cromo donde para determinar su concentración utilizaron un espectroscopio UV/vis Shimadzu UV 1700, a una longitud de onda de 540 nm mediante la prueba de difenilcarbazida, concluyeron que los mejores resultados de adsorción se dieron a un pH de medio de 3 y una relación de 6 g/L de adsorbente/solución, además los autores concluyeron que cuando utilizaron carbón activado obtuvieron porcentajes de remoción cercanos al 98% para un tiempo de 120 minutos, respecto a la cascara modificada con quitosano solo llegó a un 60% de remoción para el mismo tiempo de contacto.

2.1.2. Nacional

Andrade (2023) en su investigación titulado “El estudio titulado “Determinación de la capacidad de bioadsorción de cromo hexavalente en aguas residuales provenientes de la industria de curtiembres utilizando la cáscara de limón” tuvo como propósito evaluar la eficacia de este material como bioadsorbente para remover Cr(VI) de dichos efluentes. Para ello, se procedió primero a preparar el bioadsorbente y, antes de su uso, se realizó su caracterización mediante análisis elemental y espectroscopía FTIR-ATR. Posteriormente, se trabajó con la muestra de agua residual generada por la industria de curtiembres se puso en contacto con el bioadsorbente con una agitación constantes a diferentes concentraciones y condiciones de pH. Mediante la utilización del método

colorimétrico que se basa en la reacción del cromo hexavalente con 1,5-difenilcarbazida. En medio ácido se determinó la concentración final de cromo hexavalente. A partir de los diferentes ensayos realizados, se identificaron como condiciones óptimas un pH de 2.5, un tamaño de partícula de 0.5 mm y una concentración de bioadsorbente de 12 g/L, con las cuales se alcanzó un porcentaje de remoción del 89.77%. Bajo estas condiciones, se procedió a elaborar las isotermas de adsorción, siendo la isoterma de Langmuir la que mostró el mejor ajuste a los datos experimentales, con una capacidad máxima de adsorción de 1.7 mg/g. Asimismo, el análisis cinético reveló que el proceso seguía un modelo de pseudo segundo orden. En síntesis, se concluyó que la cáscara de limón presenta una adecuada capacidad para adsorber cromo hexavalente en aguas residuales, especialmente bajo condiciones de pH ácido, tamaño de partícula reducido y alta concentración de bioadsorbente.

Parra y Pérez (2023) en su investigación titulado El estudio titulado “Estimación de materiales lignocelulósicos residuales como adsorbentes de cromo y plomo” tuvo como finalidad evaluar la adsorción de iones metálicos en la superficie y los sitios activos de diferentes biomateriales. Esto se sustentó en el hecho de que los residuos lignocelulósicos pueden emplearse como adsorbentes de metales pesados en el agua, ofreciendo un método de remoción eficiente y de bajo costo. La investigación se desarrolló siguiendo la metodología establecida en el “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”. En este trabajo se propuso una alternativa innovadora mediante el uso de residuos agroindustriales, específicamente del fique (*Furcraea macrophylla*) y del capacho de maíz (*Zea mays*), como materiales adsorbentes para cromo y plomo. El objetivo fue evaluar su capacidad de retención de estos metales en muestras de agua, determinando parámetros clave como el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio, el modelo de isoterma que mejor describe el proceso y la capacidad máxima de adsorción. Obteniendo como resultado que, después de 12 horas de contacto, la fibra de fique presentó una capacidad de adsorción de 7.81 ± 1.40 mg/g para cromo y 169.51 ± 1.37 mg/g para plomo, ajustándose a una isoterma de tipo Freundlich. Por otro lado, la fibra proveniente del capacho de maíz alcanzó capacidades de adsorción de 13.35 ± 3.28 mg/g para cromo y 15.01 ± 3.47 mg/g para plomo, exhibiendo un comportamiento acorde con la isoterma de Langmuir. En conclusión, ambas fibras demostraron potencial para la remoción de los metales evaluados, destacándose especialmente la fibra de fique por su mayor eficiencia.

Según Silva (2021) en su investigación titulada “Capacidad de biosorción de cromo hexavalente en medio acuoso usando la borra de café” ubicada en el repositorio de la Universidad Nacional de Cajamarca tuvo como objetivo determinar la remoción de cromo hexavalente (Cr VI) en medio acuoso, utilizando como fuente de cromo al dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$), tuvo la metodología siguiente: arreglo factorial de 3 Se trabajó con factores de dos niveles para cada variable, realizándose cada ensayo por triplicado. Las variables independientes consideradas fueron: el tiempo de contacto, con niveles de 30 y 90 minutos; la concentración metálica, con niveles de 10 y 50 ppm; y el tamaño de partícula, determinado mediante los tamices N.º 10 y N.º 100. Los ensayos se realizaron bajo condiciones estandarizadas de pH ácido, agitación constante y utilizando 1 g de borra de café como biosorbente. Los resultados mostraron una eficiencia de remoción del 97.79%, concluyéndose que la borra de café es un material eficaz para el proceso de biosorción, además requirieron un mínimo de 30 minutos como tiempo de contacto para lograr una buena remoción correspondiente hasta un 95%, resaltando finalmente que los mejores resultados Estos resultados se obtuvieron a una concentración de 50 ppm, alcanzando porcentajes de remoción superiores al 90%. En relación con el tamaño de partícula, se observó que presentó un nivel de eficiencia similar en la eliminación del cromo hexavalente, sin mostrar variaciones significativas en el rendimiento.

Según Miranda (2019) en su investigación titulada “Biosorción de cromo Cr(VI) de soluciones acuosos por la biomasa residual de hojas de eucalipto (*Globulus labill*)” ubicada en el repositorio de la Universidad Nacional del Altiplano Puno, de la facultad de Ingeniería Química tuvo como objetivo realizar la remoción del Cr (VI), para lo cual prepararon elaboraron un biosorbente a partir de hojas residuales de *Eucalyptus globulus*, someténdolas previamente a un tratamiento en medio ácido con el fin de inducir modificaciones químicas a nivel molecular. para su identificación utilizaron análisis de IR para varios grupos funcionales presentes mediante variaciones en la intensidad de transmisión (%T) asociadas a las vibraciones espectrales de átomos como hidrógeno y carbono, así como de los enlaces correspondientes a los grupos funcionales involucrados en la captura del Cr (VI), como parámetros establecieron un valor de pH de 3, respecto al sorbente fue de 3 g/L a temperatura de 25 °C y agitación en equilibrio a 200 rpm por tiempo de 30 minutos, proceso tipo Batch, en ese proceso evaluaron muestras de agua residual de curtiembre, luego de efectuado el tratamiento Bajo las condiciones previamente establecidas, se obtuvo un porcentaje de adsorción

del 90.88% de Cr(VI) utilizando el biosorbente evaluado. En cuanto al estudio cinético, los resultados indicaron que el proceso seguía un modelo de pseudo segundo orden. Respecto al análisis de isothermas, los modelos de Freundlich fueron los mejores adaptados a los datos experimentales, reportándose una energía libre (ΔG) de -9.29 kJ/mol, lo cual evidencia un proceso de biosorción espontáneo. En conclusión, se determinó que este material es adecuado para **la remoción** de cromo hexavalente en efluentes procedentes de la industria de curtiembres, especialmente cuando presentan concentraciones superiores a 2.3 mg/L, previo a su descarga al sistema de alcantarillado, donde deben acatar los límites establecidos en la normativa vigente, específicamente los Límites Máximos Permisibles (LMP) definidos en el DS 010-2010-MINAM, así como los Valores Máximos Admisibles (VMA) contemplados en el DS 010-2019-Vivienda.

Según Terán (2020) en su investigación titulada “Biosorción de cromo (VI) del agua residual de curtiembre por la semilla activada de *Persea americana* variedad de palta fuerte-Cajamarca 2020” tuvo como objetivo analizar la capacidad de biosorción del Cr(VI) presente en efluentes procedentes de curtiembres utilizando semillas activadas de *Persea americana* (variedad plata fuerte). Para ello, se desarrolló una investigación de carácter experimental, tomando como población 4 kg de semillas provenientes del valle de Condebamba y una muestra de 20 litros de aguas residuales generadas por una curtiembre, empleándose finalmente 2 kg de dichas semillas como biomaterial adsorbente. El tratamiento estadístico incluyó análisis de regresión, pruebas ANOVA para la verificación de hipótesis y contrastes mediante estadístico F. En el laboratorio se determinó la concentración de Cr(VI) durante el ensayo cinético utilizando 10 litros del efluente contaminado, los cuales fueron mezclados con 250 g de semillas bajo una agitación constante de 200 rpm. Se recolectaron muestras a diferentes tiempos de contacto 30, 60, 90, 120, 150 y 180 minutos para cuantificar la concentración residual del metal. En la evaluación isotérmica, se distribuyó 1 litro del agua residual contaminada en seis recipientes y se adicionaron masas de semillas equivalentes a 10, 25, 50, 75, 100 y 150 g, respectivamente, con el objetivo de determinar la relación entre la cantidad de adsorbente y la capacidad de remoción. Los resultados permitieron concluir que las semillas de *Persea americana* constituyen un biosorbente eficaz para la remoción de Cr(VI) en matrices acuosas contaminadas. El ajuste cinético evidenció que el proceso responde al modelo de pseudo–segundo orden, alcanzando un coeficiente de determinación (R^2) de 99.9%, lo que indica un excelente grado de linealidad. Asimismo,

se determinó que, bajo las condiciones evaluadas, el material logró remover hasta el 96.52% del cromo hexavalente tras 180 minutos de tiempo de contacto.

2.2. Bases Teóricas

Metales pesados

Estos compuestos representan peligrosos contaminantes ambientales, caracterizados principalmente por su persistencia, capacidad de bioacumularse, sufrir biotransformaciones y presentar una alta toxicidad. Estas propiedades hacen que permanezcan en los ecosistemas durante períodos prolongados, debido a que su degradación natural resulta sumamente limitada (Rodríguez, 2017).

Entre los metales más comunes presentes los efluentes provenientes de actividades industriales suelen contener metales como cadmio, zinc, cromo, níquel, mercurio y plomo. Estas especies iónicas son ampliamente identificadas como compuestos de elevada peligrosidad, debido a los graves impactos que generan tanto sobre los ecosistemas como sobre la salud humana, lo que evidencia la necesidad de reducir sus concentraciones en los cuerpos de agua, el suelo y la atmósfera. (Tejeda et al., 2015).

Elementos metálicos de elevada masa atómica, entre ellos el plomo, el cadmio y el cromo, constituyen un riesgo significativo para las plantas, los animales y el ser humano, debido a su capacidad de bioacumularse, su naturaleza no biodegradable y su elevada toxicidad, aun cuando se encuentran en bajas concentraciones (Pabón et al., 2020).

Cromo (VI)

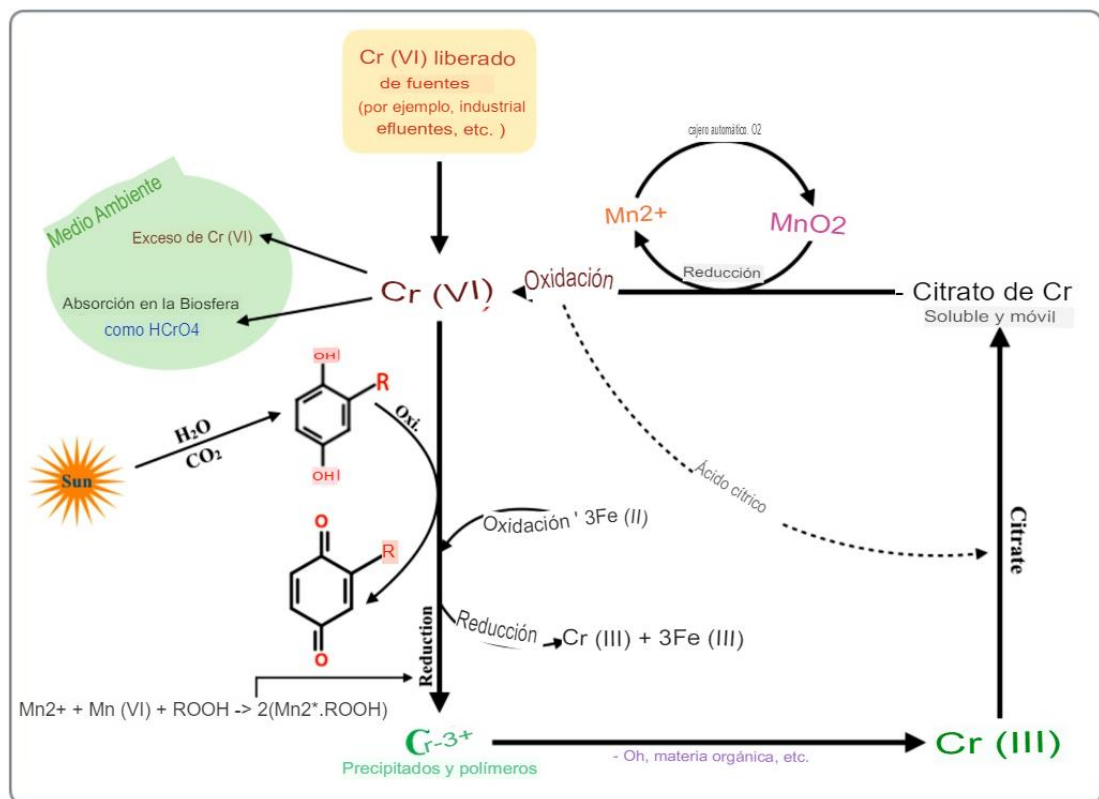
El cromo hexavalente se utiliza en una variedad de procesos industriales, como el desarrollo de acero inoxidable, la galvanoplastia, la producción de tintes y el curtido de pieles, además de emplearse en métodos de preservación de madera. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA) lo ha catalogado como una de las diecisiete sustancias químicas que evidencian un inminente riesgos para las integridades del hombre (Jobby et al., 2018). Entra en diversos sistemas ambientales (aire, agua, suelo, etc.) a través de algunos procesos naturales, así como a través de actividades antropogénicas como la minería, operaciones de fundición, procesamiento de metales, producción industrial, uso doméstico y agrícola de metales, etc. Los efluentes de la mayoría de las industrias son vertidos directamente a los cuerpos de agua

o en los campos sin ningún tipo de tratamiento, lo que conlleva a la contaminación y destrucción del ecosistema (Jobby et al., 2018).

El cromo es un metal duro de tonalidad gris acerada que se halla de manera natural en las cortezas terrestres, principalmente en tipo de los minerales cromitas. Se trata de elementos de transiciones perteneciente al grupo VI de la tabla periódica, siendo el primero de dicho grupo. Puede presentarse en diversos estados de oxidación, desde Cr(II) hasta Cr(VI), aunque los más comunes y estables son Cr(III) y Cr(VI). De manera natural, el cromo está presente en distintos componentes del ambiente aire, agua y suelo aunque generalmente en concentraciones muy reducidas. (Jobby et al., 2018). Durante el proceso de biosorción, parte del Cr (VI) puede ser reducido a Cr (III), liberando protones (H^+) al medio, lo que genera una ligera disminución del pH final (Xiaoli et al., 2020).

Figura 1

Ciclo del Cromo



Nota. figura adaptada de Abdulmalik et al. (2023).

Toxicidad del Cromo (VI)

Las concentraciones elevadas de cromo resultan siempre tóxicas, aunque el grado de toxicidad varía según su estado de oxidación. El Cr(VI), en particular, es reconocido

como altamente peligroso debido a los severos efectos adversos que puede generar en la salud humana y animal como diarrea, úlceras, ojos e irritaciones de la piel, disfunción renal y carcinoma de pulmón. No sólo es altamente cancerígeno y mutagénico, también se sabe que causa defectos de nacimiento y disminución de salud reproductiva. Una gran dosis de Cr (VI) puede causar la muerte en animales y humanos. El mecanismo dominante de toxicidad del Cr(VI) en organismos tanto procariotas y eucariotas se debe a su capacidad para atravesar con facilidad la membrana celular. Una vez dentro, el Cr(VI) es reducido, proceso durante el cual se generan radicales libres capaces de producir daños directos en el ADN, además de provocar otros efectos tóxicos en la célula (Jobby et al., 2018).

Mientras que las especies de cromo (III) tienden a ser más inmóviles con menor solubilidad en agua, las especies de cromo (VI) son fáciles de disolver en el agua y se mueve por el medio ambiente (Abdulmalik et al., 2023).

Contaminación de aguas por metales pesados

Las contaminaciones del agua por todo tipo metales pesados proviene principalmente de las descargas de aguas de residuo generadas por diversas actividades antropogénicas, especialmente las de origen industrial. El uso continuo de estos metales en los procesos productivos incrementa progresivamente su presencia en las fuentes hídricas, elevando así los riesgos directos para el hombre y otros seres vivos debido a las mayores probabilidades de exposición. Esta situación resulta preocupante si se considera que los límites permitidos para agua de consumo humano, establecidos por la normativa RD 140/03 y la NTC 183, son extremadamente bajos: 1.0 µg/L para mercurio, 10 µg/L para plomo y 50 µg/L para cromo (Pabón et al., 2020).

Técnicas de tratamiento de metales pesados

Se han desarrollado múltiples estrategias destinadas a la depuración y eliminación de contaminantes metálicos presentes en sistemas acuosos. Dichas técnicas pueden agruparse en dos categorías: los métodos convencionales, que comprenden las operaciones clásicamente utilizadas en la remoción de metales pesados como la filtración mediante membranas, el intercambio iónico, los procesos adsorptivos, la precipitación química, la electrocoagulación, la coagulación y la floculación, entre otros; y los enfoques no convencionales, que corresponden a tecnologías emergentes concebidas para incrementar la eficiencia y eficacia en la eliminación de metales en el medio hídrico (Pabón et al., 2020).

➤ **Biosorción**

La remoción de metales utilizando biomateriales se basa en la capacidad inherente que poseen ciertos componentes celulares para interactuar selectivamente con especies metálicas. El uso de biomasa inactiva ofrece múltiples ventajas operativas, entre ellas la ausencia de requerimientos nutricionales para conservar la actividad del material. Asimismo, la biomasa inmovilizada ha demostrado ser eficaz en la remoción y recuperación de metales en sistemas de operación continua. Este tipo de tecnologías es innovador y su aplicación se perfila como una alternativa altamente competitiva en el tratamiento de efluentes industriales, dado que facilita la recuperación de los metales retenidos y, adicionalmente, permite reutilizar tanto la biomasa empleada como el agua sometida al proceso (Chavez, 2016).

La bioadsorción es un proceso fisicoquímico que comprende tanto la adsorción como la incorporación de moléculas e iones en la matriz del material. Este procedimiento, clasificado como una alternativa no tradicional, se enfoca prioritariamente en la remoción de metales pesados presentes en efluentes residuales de origen industrial, empleando como sorbentes diversos materiales biológicos tanto vivos como inertes, entre los que se incluyen macroalgas, hongos, bacterias, residuos lignocelulósicos como cáscaras de frutos, diversos subproductos agroindustriales y determinados biopolímeros. Dichos materiales sobresalen por su carácter económico, amplia disponibilidad y porque su conversión en biosorbentes no requiere procedimientos complejos ni costosos. El proceso de bioadsorción implica la interacción entre una fase sólida constituida por la biomasa y una fase líquida correspondiente al medio acuoso, dentro del cual se hallan disueltos los contaminantes, en este caso, los iones metálicos. Para que este mecanismo sea eficiente, es imprescindible que se establezca una fuerte interacción entre los grupos funcionales presentes en la biomasa y los metales presentes, de modo que estos últimos puedan ser atraídos y fijados al material sólido mediante diferentes mecanismos de interacción (Tejeda et al., 2015).

El sapote (*Matisia cordata*)

Clasificación taxonómica. La clasificación taxonómica del sapote según Missouri Botanical Garden (2017):

Tabla 2*Clasificación Taxonómica del sapote*

Reino:	Plantae
Filo/División:	Magnoliophyta
Clase:	Magnoliopsida (Eudicotiledónea)
Orden:	Malvales
Familia:	Malvaceae
Subfamilia:	Bombacoideae
Género:	<i>Matisia</i>
Especie:	<i>M. cordata Bonpl.</i>
Sinónimo:	<i>Quararibea cordata</i> (Bonpl.) Vischer

Nota: Adaptada de Missouri (2017).

Nombres comunes: sapote, zapote de monte, chupa chupa, mamey colorado (en español), sapote do Perú (en portugués) y sapote colombiana (en inglés) (Gomez, 2017).

Origen y distribución. Esta especie es originaria de la Amazonía y se encuentra extendida en países como Brasil, Perú, Ecuador, Venezuela y Colombia, donde su fruto es ampliamente consumido por la población (Álvarez et al., 2020).

Descripción morfológica. El sapote es un árbol semidecíduo que, bajo condiciones de cultivo, puede alcanzar entre 12 y 15 metros de altura y aproximadamente 50 cm de diámetro en el tronco; sin embargo, en estado silvestre puede llegar a medir entre 40 y 45 metros. Esta especie se caracteriza por contener abundante látex amarillo de consistencia pegajosa. Presenta ramas horizontales y verticiladas, generalmente de cuatro a cinco por nudo. Las hojas, simples y agrupadas hacia el extremo de las ramas, son de forma ovalada o casi redondeada, con base acorazonada. Las flores, de tipo caulinar, poseen cinco pétalos, son hermafroditas, de tonalidad blanco-amarillenta y se desarrollan sobre cojines florales. El fruto corresponde a una baya de forma casi esférica, caracterizada por presentar un cáliz persistente con apariencia de pequeño ápice. Sus dimensiones oscilan entre 7 y 15 cm de ancho y 5 a 15 cm de diámetro, y en su interior alberga de cuatro a cinco semillas con morfología cuneiforme. Los frutos crecen en las ramas, sujetos firmemente mediante un pequeño pedúnculo. Su cáscara es gruesa, de color marrón verdoso y con aspecto pulverulento. La pulpa, de un intenso color naranja, es comestible, fibrosa, dulce, aromática y presenta un notable potencial industrial (Gomez, 2017).

Requerimientos ecológicos. El sapote se desarrolla en regiones con precipitaciones anuales que varían entre 1500 y más de 4000 mm, y en altitudes comprendidas entre el 0 y los 2000 m.s.n.m. La temperatura óptima para su crecimiento oscila entre 18 y 24

°C. Durante sus primeras etapas necesita sombra, mientras que en la fase adulta requiere abundante luz solar para alcanzar un desarrollo vigoroso. Se adapta adecuadamente a climas tropicales y subtropicales, siempre que no se presenten heladas. No soporta suelos inundados y prospera mejor en terrenos profundos, bien drenados y con altos niveles de materia orgánica (Álvarez et al., 2020).

➤ **Parámetros que influyen en la adsorción**

Temperatura

Los incrementos considerables de las temperaturas pueden modificar la estructura del sorbente y deteriorar el material, lo que finalmente genera disminuciones en su capacidad de adsorción (Tejeda et al., 2015).

Efecto del pH

El valor de pH del medio líquido ejerce una influencia determinante sobre la eficiencia y el comportamiento del proceso adsorptivo. La magnitud de las cargas electrostáticas impartidas por las sustancias contaminantes ionizadas será absorbida por el pH del medio, lo que se traduce en una variación en la velocidad con la que el adsorbato es retenido por el material con el pH del medio. La retención de iones metálicos mediante procesos de adsorción está condicionada tanto por las propiedades intrínsecas de las superficies del material adsorbentes como por la forma en que las distintas especies químicas de los metales se encuentran distribuidas en el medio acuoso. Entre los parámetros operacionales, el pH de la solución constituye el factor de mayor relevancia, debido a su influencia directa sobre la ionización tanto del adsorbente como de los iones metálicos. No obstante, su efecto se manifiesta de manera distinta según se trate de cationes o aniones: mientras los primeros tienden a adsorberse con mayor eficiencia a valores de $\text{pH} > 4.5$, la captación de especies aniónicas se contribuye en condiciones marcadamente ácidas, generalmente dentro del intervalo de pH comprendido entre 1.5 y 4. (Anderson et al., 2022).

Efecto del tiempo de contacto

La tasa de eliminación incrementa conforme aumenta el tiempo de contacto. **Esto con base en la teoría de adsorción** de contaminantes en los puntos con actividad en la superficie del material adsorbente. Sin embargo, después de un período prolongado, no habrá más adsorción ya que todos los sitios disponibles estarán ocupados. En este punto, la cantidad de contaminantes desorbidos será igual a la cantidad adsorbida, alcanzando un estado de equilibrio. El tiempo necesario para llegar a este estado se conoce como

tiempo de equilibrio. La cantidad de contaminantes adsorbidos en este estado representa la facultad óptima de adsorción de los materiales adsorbentes bajo condiciones operativas ideales (Anderson et al., 2022).

Efecto del tamaño de partícula

La adsorción tiene lugar mayoritariamente dentro de la estructura porosa del sólido, desarrollándose sobre las superficies internas y en los distintos centros activos distribuidos en su red de poros activos bien definidos. Las cantidades de adsorbato (solute) que podrían ser retenida guarda una relación directa con el volumen accesible de dichos poros, el cual, a su vez, es proporcional al área superficial del material. Es ampliamente reconocido que, al disminuir el tamaño de partícula, se incrementan de forma significativa el área específica, ya que se expone una mayor superficie interna por unidad de masa debido a la mayor densidad de poros. (Tejeda et al., 2015).

Presencia de otros iones

La coexistencia de diferentes especies iónicas en el medio provoca que estas compitan entre sí por los sitios activos disponibles en la superficie del adsorbente, lo que puede interferir directamente en la adsorción del metal de interés (Tejeda et al., 2015).

Metodología de Superficie de Respuesta (MSR)

Consiste en un conjunto de métodos experimentales diseñados para la evaluación de la correlación entre una serie de factores experimentales controlados y las respuestas obtenidas de acuerdo con uno o más criterios seleccionados, a su vez nos permite conocer las interacciones entre los factores y sus impactos sobre el factor de respuesta a alcanzar con corridas experimentales mínimas, lo que reduce los costos y la generación de desechos. Últimamente, la RSM se ha aplicado para optimizar la biosorción de pesados metales usando diferentes biosorbentes de cáscara de residuos agroindustriales como: cáscara de café, cacao, etc (Yañez et al., 2023).

Diseño Box Behnken

Es un diseño experimental que proporciona un modelo matemático que muestra el impacto por cada variable y sus interacciones, a su vez proporciona valores óptimos. Este es un ejemplo de diseños 3k-p que introducen factores de 3 niveles, así como términos de interacción. Estos diseños son económicos y especialmente útiles para carreras experimentales costosas. Los diseños compuestos centrales requieren 3 niveles y dos puntos de estrella adicionales, y ocurren en variantes giratorias u ortogonales. Varios autores aplicaron con éxito metodologías de superficies de respuestas para las

optimizaciones de la remoción de metales pesados involucrando diferentes cepas microbianas de bacterias, levaduras o hongos filamentosos (Choińska et al., 2017)

El diseño Box–Behnken constituye una estrategia estadística empleada en estudios experimentales orientados a la optimización de procesos y a la evaluación eficiente de los factores que intervienen en un sistema. En el contexto de la bioadsorción, este diseño puede ser empleado para estudiar y optimizar los parámetros que impactan en las facultades de adsorción de un biomaterial, para ello contiene como primer procedimiento a procedimiento identificar las variables independientes que afectan la bioadsorción. (Jaramillo et al., 2013)

Estas podrían incluir concentración inicial de contaminantes, pH, temperatura, tamaño de partícula del biomaterial, tiempo de contacto, etc, posteriormente define los niveles de cada variable, estos representarán los extremos y el punto medio de cada variable y serán los puntos donde se realizarán los experimentos, luego se realiza la matriz de diseño donde se usa el diseño Box-Behnken para generar una matriz experimental que incluya combinaciones de los niveles seleccionados para cada variable independiente, posteriormente la realización de los experimentos, medición de respuestas, ajuste del modelo y análisis estadístico para una vez validado optimizar para encontrar las condiciones óptimas que maximizan o minimizan la respuesta deseada, como último paso la validación del modelo donde se realiza experimentos adicionales para validar el modelo y asegurarte de que las condiciones óptimas identificadas son robustas y reproducibles. (Jaramillo et al., 2013)

La Ecuación (1) describe el modelo de respuesta correspondiente al diseño Box–Behnken, incorporando los efectos lineales, los términos cuadráticos y las interacciones bilineales entre los factores (Gutiérrez & De la Vara, 2008)

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_{ii} x_{ii}^2 + \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

Dónde: β_0 representa el término independiente o constante del modelo; β_i expresa el efecto lineal asociado al factor x_i ; β_{ii} corresponde al efecto cuadrático del mismo factor x_i ; β_{ij} refleja la interacción lineal-lineal entre los factores x_i y x_j .

Modelos de isotermas de adsorción

En el ámbito de la adsorción y la eliminación de contaminantes, resulta ampliamente reconocido el empleo de modelos de isotermas para describir el comportamiento del proceso. Dentro de estos análisis, se determina habitualmente el

parámetro “q”, que cuantifica la capacidad adsorptiva del adsorbente y se expresa como la masa de soluto contenido por unidad de masa del material (mg de adsorbato por g de adsorbente). De manera complementaria, el parámetro “C” corresponde a la cantidad de adsorbato que persiste en la fase líquida después de que el sistema ha llegado a su estado de equilibrio. Entre los modelos isotérmicos más utilizados se encuentran:

Isoterma de Langmuir

Este modelo isotérmico se basa en el supuesto de que la superficie del adsorbente presenta sitios activos equivalentes y homogéneamente distribuidos y equivalentes entre sí, y que la adsorción de cada molécula ocurre de manera independiente, sin verse afectada por la ocupación de los sitios vecinos. Del mismo modo, el modelo plantea que no existen fuerzas de interacción entre las especies ya fijadas en la superficie y que la retención del adsorbato se limita exclusivamente a la generación de una única capa molecular sobre el adsorbente. Bajo estas consideraciones, la isoterma se expresa mediante la siguiente ecuación (Mayta et al., 2023).

$$q = \frac{q_m \times b \times C}{1 + (b \times C)} \quad (2)$$

En esta expresión, C representa la concentración del adsorbato en el estado de equilibrio (en mg/L), q_m corresponde a la capacidad máxima de adsorción que puede alcanzar el material (en mg/g) y b es la constante característica del modelo de Langmuir asociada a la afinidad energética del proceso, expresada en L/mg.

Isoterma de Freundlich

En este modelo isotérmico se plantea que la superficie del adsorbente presenta heterogeneidad energética, es decir, que los sitios de adsorción no poseen la misma afinidad adsorptiva. Asimismo, este modelo plantea que el proceso adsorptivo se limita a la formación de una única capa molecular sobre la superficie del material y que las especies ya fijadas no ejercen influencias laterales entre sí. Considerando estos postulados, la isoterma puede describirse matemáticamente mediante la siguiente expresión (Mayta et al., 2023).

$$q = k_f \times C^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

Dónde:

k_f denota la constante asociada a la capacidad adsorptiva del material, y n corresponde al parámetro que describe la intensidad del proceso de adsorción.

La forma linealizada del modelo de Freundlich suele expresarse mediante una transformación logarítmica, dando lugar a la siguiente ecuación:

$$\log(q) = \log(k_f) + \frac{1}{n}(\log(C)) \quad (4)$$

Los parámetros k y $1/n$ se obtienen a partir de la recta generada en la representación gráfica de $\log(q)$ frente a $\log(c)$.

Cinética

La evaluación del comportamiento cinético del proceso de adsorción aplicado al tratamiento de aguas residuales reviste gran importancia, ya que permite comprender las rutas de reacción y el mecanismo mediante el cual estas se desarrollan. Asimismo, ofrece información sobre la velocidad a la que el soluto es adsorbido, lo que determina el tiempo de permanencia del contaminante en la interfase sólido-líquido. En consecuencia, la capacidad de predecir la rapidez con la que los contaminantes son removidos de las soluciones acuosas resulta fundamental para el diseño adecuado de sistemas y plantas de evaluación. Para establecer la cinética de adsorción, es indispensable conocer la ley de velocidad que gobierna el comportamiento del sistema adsorbente-adsorbato (Mayta et al., 2023).

Modelo de primer orden reversible

La formulación matemática propuesta por Lagergren describe un modelo cinético de adsorción de 1er orden reversible. Este modelo se fundamenta en el supuesto por cada ion metálico le corresponde un sitio específico de adsorción en la superficie del elemento adsorbente. Bajo este enfoque, la relación entre la velocidad del proceso y la ocupación de dichos sitios puede expresarse mediante la siguiente ecuación (Andrade, 2023).

$$q_t = q_e \times (1 - e^{-k_1 \times t}) \quad (5)$$

Donde:

q_t : es la cantidad adsorbida en un tiempo t (mg/g).

q_e : es la cantidad adsorbida en el equilibrio (mg/g).

k_1 : es la constante cinética de primer orden (min⁻¹).

Modelo de pseudo segundo orden

El modelo propuesto por Ho y McKay en 1999 plantea que el adsorbato se fija sobre dos tipos de sitios activos presentes en la biomasa y que el proceso está gobernado por un mecanismo de quimisorción. Bajo estas premisas, la ecuación que describe la velocidad del proceso cinético de adsorción se expresa de la siguiente manera: (Andrade, 2023):

$$q_t = \frac{t}{\frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e}} \quad (6)$$

Donde:

q_e : representa la cantidad de adsorbato retenido por unidad de masa del material adsorbente una vez alcanzado el equilibrio (mg/g).

k_2 : corresponde a la constante cinética asociada al modelo de pseudo–segundo orden, expresada en unidades de (g/mg*min).

➤ Marco legal

Decreto Supremo N.º 003-2010-MINAM: LMP de efluentes/vertimientos

Decreto Supremo N.º 010-2010-MINAM: LMP para actividades minero-metalúrgicas

Decreto Supremo N.º 010-2019-VIVIENDA: VMA de descargas al sistema de alcantarillado.

CAPITULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. **Ámbito de Estudio**

Este estudio fue desarrollado en las instalaciones del laboratorio perteneciente a la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental.

- Materiales y equipos de laboratorio
- a. Equipos:
 - Balanza analítica
 - Agitador magnético
 - Agitador térmico
 - Espectrofotómetro UV-Vis
- b. Materiales:
 - pHmetro
 - Micropipeta 1000 y 5000 μL
 - Pipeta volumétrica 25 mL
 - Matraces de Erlenmeyer de 250 mL
 - Fiolas 100, 500, 1000 mL
 - Bombilla propipeta
 - Tips para micropipeta
 - Vasos de precipitación 50 mL
 - Frascos de 10 mL
 - Cinta parafilm
 - Espátula de acero inoxidable
 - Piseta
- c. Reactivos y Sustancias:
 - 1,5-Difenilcarbazida $C_{13}H_{14}NO_4$
 - Ácido Fosfórico H_3PO_4
 - Dicromato de potasio $K_2Cr_2O_7$
 - Acetona C_3H_6O
 - Agua destilada H_2O
 - Cáscara de sapote

3.2. Tipo, Nivel y Diseño de la Investigación

El presente estudio con análisis cuantitativo basado en un modelo experimental orientado a evaluar la viabilidad del uso de la cáscara de sapote como bioadsorbente para estimar la facultad de biosorción de Cr(VI) en aguas residuales, empleando para ello el diseño experimental Box–Behnken.

El estudio se enmarca en un nivel de investigación correlacional, debido a que se busca establecer la magnitud de la asociación existente entre la dosis de adsorbente empleada, el tiempo de interacción sólido–líquido y el valor de pH de la solución de cromo bajo distintas concentraciones iniciales. Esto permite analizar cómo se comportan y se interrelacionan estas variables dentro del proceso de biosorción (Hernandez & Mendoza, 2018).

En el marco de este estudio se efectuó un análisis detallado de la biomasa de sapote, orientado a reconocer y describir los grupos funcionales que conforman su estructura química, además de ejecutar diversos ensayos bajo diferentes condiciones experimentales con el fin de valorar el potencial adsorptivo de su cáscara en los procesos de remoción de contaminantes presentes en aguas residuales. Resulta fundamental analizar la influencia de variables como el pH, el tamaño de partícula y la concentración del bioadsorbente sobre dicho proceso. Finalmente, se procederá a interpretar los resultados obtenidos con el propósito de identificar las condiciones de operación que maximicen la eficiencia del proceso de biosorción.

- **Diseño experimental**

La optimización del proceso de biosorción fue desarrollado por medio de la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR), utilizando un diseño factorial 3^k , basado en el modelo estadístico Box–Behnken, implementado a través del software Design Expert. En este esquema experimental se evaluó la interacción entre las variables independientes masa de cáscara de sapote (g), tiempo de contacto (min) y Ph con el propósito de determinar las condiciones óptimas para la biosorción de cromo

Se implementó un diseño experimental de tipo (3x3x3), conformado por tres niveles de pH, tres niveles de concentración inicial de Cr(VI) y tres niveles de dosis de biomasa. Este esquema contempló la ejecución de 13 corridas experimentales, a las cuales se añadió una réplica completa empleando el mismo bioadsorbente (proveniente de la cáscara de sapote), obteniéndose 26 ensayos (Figura 2 y Tabla 3).

Tabla 3*Diseño experimental*

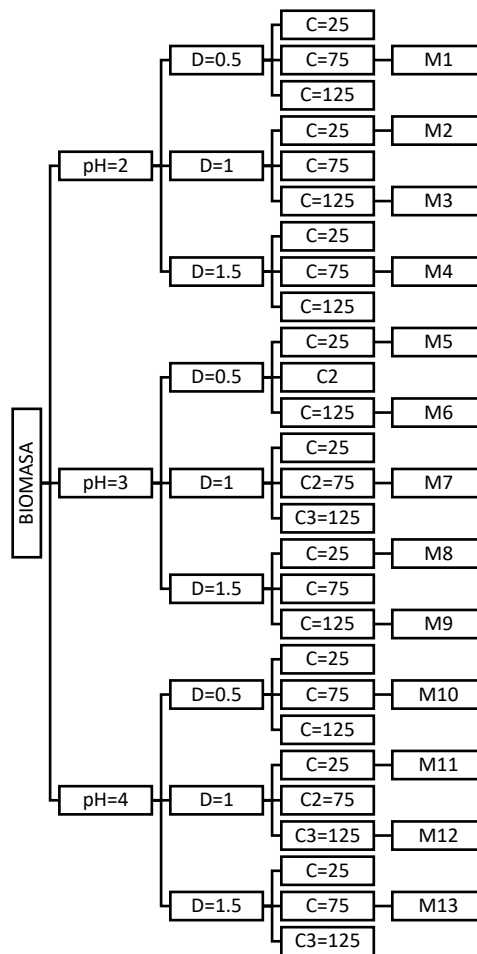
Tratamiento	Factor 1: pH	Factor 2: Concentración inicial de Cr (mg/L)	Factor 3: Dosis (g/L)	Capacidad de adsorción de Cr (mg/g)		
				R I	R II	R III
1	2	25	1	M1	M11	M21
2	2	75	0.5	M2	M12	M22
3	4	75	1.5	M3	M13	M23
4	3	75	1	M4	M14	M24
5	3	125	1.5	M5	M15	M25
6	4	75	0.5	M6	M16	M26
7	4	125	1	M7	M17	M27
8	3	25	0.5	M8	M18	M28
9	3	125	0.5	M8	M18	M28
10	4	25	1	M10	M110	M210
11	3	25	1.5	M11	M111	M211
12	2	125	1	M12	M112	M212
13	2	75	1.5	M13	M113	M213

Nota. M1, M11, M21, corresponde al resultado del tratamiento 1 y sus dos replicas.

Elaboración propia.

Figura 2

Diseño experimental



Nota figura de elaboración propia.

Donde:

pH= pH de cada muestra

D= Dosis de biomasa

C= Concentración de cromo (VI)

3.3. Población y Muestra

3.3.1. Población

El total de soluciones acuosas de Cr (VI) .

3.3.2. Muestra

Las soluciones acuosas en diferentes concentraciones preparadas en el laboratorio.

3.4. Procedimientos, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

3.4.1. Procedimientos

- Preparación del adsorbente a partir de la Biomasa de Cáscara de Sapote (BCS)

El residuo BCS se recolectó en el anexo Ricardo Palma - Satipo, luego se: lavaron, secaron, molieron, tamizaron, y almacenaron en un frasco de vidrio rotulado.

- **Caracterización (FTIR, SEM/EDX) la biomasa de cáscara de sapote preparada**

La caracterización se realizó mediante:

- ✓ Infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR)

Este constituye el método más utilizado en espectroscopía infrarroja. Cuando la radiación IR incide sobre una muestra, una fracción es absorbida y otra la atraviesa, generando un patrón característico. Esta técnica permite obtener espectros infrarrojos con alta precisión y facilita la caracterización de mezclas complejas de materiales, lo que a su vez posibilita la identificación de distintos grupos funcionales orgánicos presentes en la muestra.

Microscopio electrónico de barrido acoplado a un sistema de detección por energía dispersiva de rayos X (SEM-EDX)

- SEM: Los microscopios electrónicos de barrido utilizan un filamento que emite un haz de electrones dirigido hacia la superficie de la muestra. Al incidir sobre ella, estos electrones interactúan con su estructura y generan diversas señales que permiten obtener información detallada sobre sus características morfológicas y composicionales. que son interpretadas por distintos detectores. A partir de estos datos es posible caracterizar diversos atributos superficiales del material, tales como su morfología y topografía, la naturaleza de su textura y su composición elemental.

- Detector de Rayos X (EDX): Este sistema registra la energía emitida por los rayos X generados en la superficie de la muestra correspondientes a niveles electrónicos específicos los cuales son característicos de cada elemento. De esta manera, el detector proporciona información precisa sobre la composición elemental del material analizado. El análisis mediante EDX puede realizarse tanto en un punto específico de la superficie como sobre un área determinada.

- **Preparación de la solución de cromo**

-La concentración inicial de la solución de cromo una solución madre con una concentración de 1000 mg/L, de la cual se dispensaron alícuotas de 100 mL para la ejecución de cada uno de los ensayos experimentales.

- **Identificación de las condiciones óptimas de las variables que influyen en el adecuado proceso de biosorción de cromo**

-Para identificar las condiciones óptimas se realizó mediante el diseño Box Behnken.

- **Determinación de la capacidad de biosorción de Cr (VI)**

La capacidad se calculó mediante la fórmula para Capacidad de Adsorción

$$C_{ad} = \frac{(C_{inicial} - C_{final}) * Volumen}{Concentración Biomasa} \quad (6)$$

- **Estudio cinético del proceso de biosorción.**

Después de obtener óptimas condiciones se realizó, el estudio de cinética de adsorción variando el tiempo de contacto de 5 a 240 minutos a un volumen constante de 50 mL. Finalmente, se realizó los estudios de cinética (Modelo de primer orden y Modelo de pseudo 2do orden), de la gráfica de tiempo vs la capacidad de adsorción.

- **Estudio de isotérmico del proceso de biosorción.**

Para la determinación de las isotermas se consideró 8 concentraciones iniciales de Cr (VI) (10, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 150 y 200 mg/L) en un volumen constante de 50 mL. Los modelos de isoterma de Langmuir e isoterma de Freundlich fueron ajustados a la data experimental.

3.4.2. *Técnicas e Instrumentos*

- Técnicas de Investigación

Las técnicas empleadas en esta investigación incluyeron, en primer lugar, la ejecución de ensayos experimentales orientados a evaluar la capacidad de biosorción de cromo desde soluciones acuosas utilizando biomasa de cáscara de sapote (BCS). Asimismo, se realizaron análisis laboratoriales comparativos de las muestras antes y después del proceso de biosorción, con el fin de cuantificar los cambios en la concentración del metal. Finalmente, se llevaron a cabo pruebas específicas empleando la cáscara de sapote como bioadsorbente, con el propósito de determinar su eficacia y comportamiento dentro del sistema acuoso evaluado.

- Instrumentos de Investigación

Los instrumentos empleados incluyeron los informes emitidos por el laboratorio donde se evaluó la capacidad de biosorción del cromo en medio acuoso. Asimismo, se

utilizaron las síntesis y análisis derivados de revistas científicas, artículos especializados y literatura técnica relacionada con el uso de biomásas en la remoción de distintos metales pesados. Finalmente, se aplicó una fórmula estadística de carácter cuantitativo para determinar el tamaño de muestra correspondiente a poblaciones finitas.

3.5. Análisis de Datos

Se emplearon pruebas estadísticas de tipo paramétrico, específicamente el análisis de varianza (ANOVA), el cual permite evaluar las diferencias existentes entre las medias de distintos grupos pertenecientes a datos paramétricos. El software estadístico utilizado facilitó la ejecución de estos análisis, permitiendo establecer la relación entre las variables mediante las ecuaciones generadas a partir del ANOVA dentro del entorno de Design Expert. La interpretación experimental se complementó con representaciones gráficas, tablas, reportes y otros recursos que permitieron visualizar y documentar adecuadamente los resultados obtenidos.

Después del tratamiento, sí se vio que bajó la cantidad de cromo VI, aunque no fue igual en todos los casos. Por ejemplo, en el tratamiento 2 quedó algo de 58.6 mg/L, que ya es una reducción. el pH no fue monitoreado, pero se han explicado su variación con referencias bibliográficas.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Presentación de Resultados y Discusiones

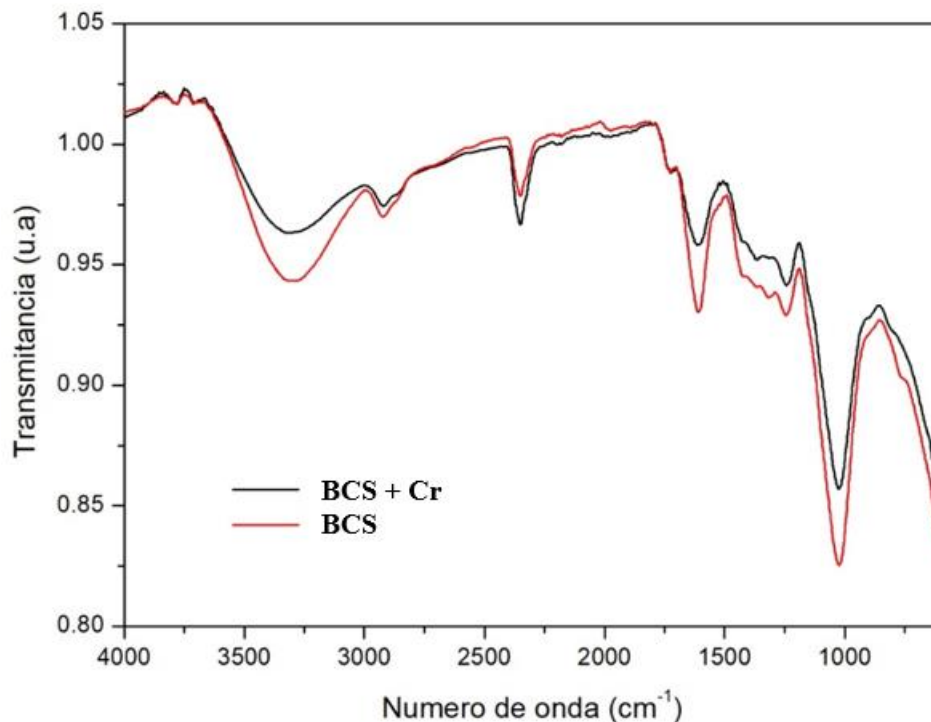
4.1.1. Caracterización fisicoquímica la biomasa de la cáscara de sapote

En la Figura 3, el espectro infrarrojo FTIR de la cáscara de sapote antes y después de la aplicación en la adsorción de cromo se muestra en el rango de 400-4000 cm^{-1} de número de onda, lo que permite identificar los enlaces químicos, así como los grupos funcionales presentes en el compuesto. La biomasa (cáscara de sapote) mostró una banda a 3345.82 cm^{-1} haciendo referencia a los hidroxilos de los carboxilos de los ácidos grasos libres en enlaces de hidrógeno (O-H). La banda a 2750 cm^{-1} representan el grupo funcional C-H, en 1000 cm^{-1} se refiere a la absorción del grupo funcional C-C. La banda en 1697 cm^{-1} se refiere a vibraciones de deformación axial de C=O (López-Morales et al., 2023; Pereira et al., 2019).

Se observa una reducción en la intensidad de los espectros de la cáscara empleada en la adsorción lo que confirma la presencia de Cr en la estructura de *Matisia cordata*.

Figura 3

Espectro FTIR de la BCS antes y después de la aplicación

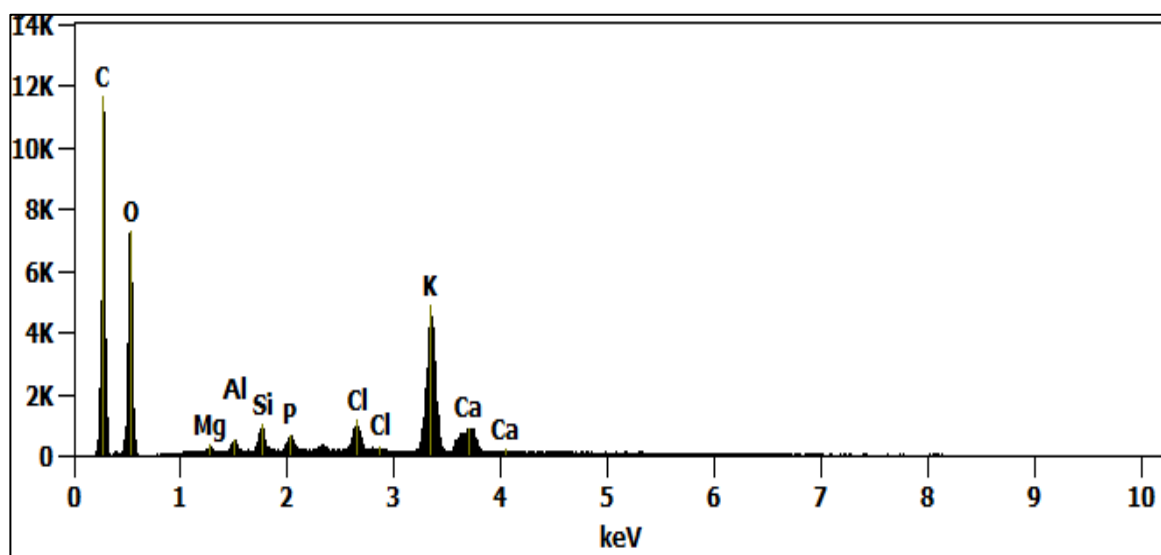
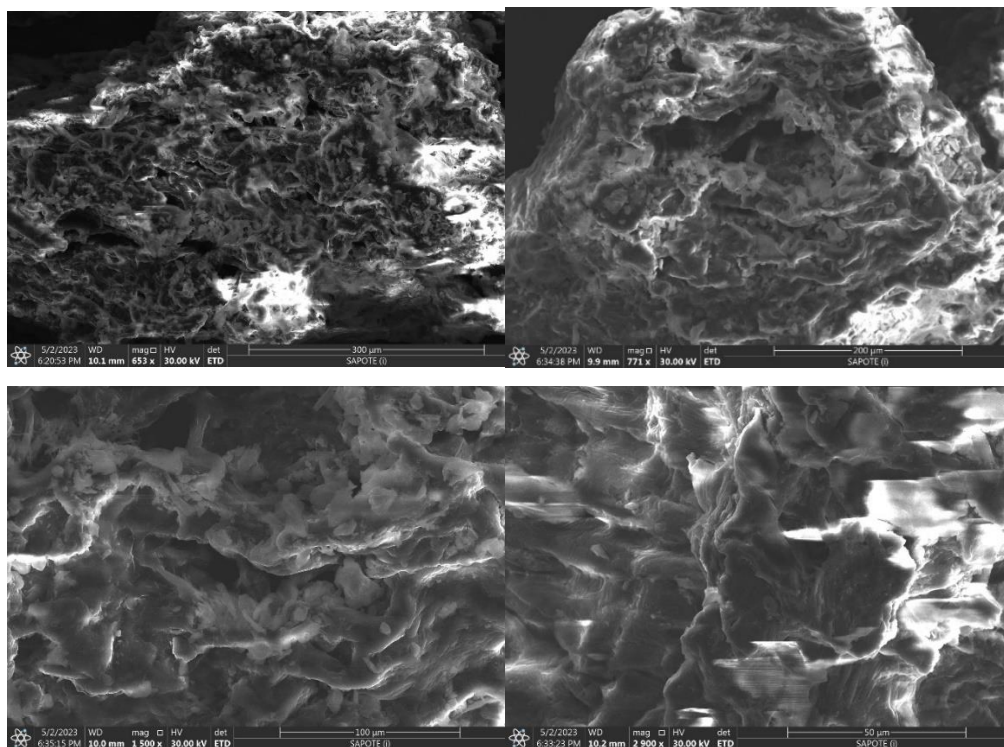


Nota: Se tomo la transmitancia en relación con el número de onda. Elaboración propia.

En la Figura 4 se muestran la morfología de la superficie irregular y la estructura poco porosa de la cascara de *Matisia cordata* a distintas resoluciones antes de aplicar en el proceso de adsorción de Cr.

Figura 4

Micrografías SEM acopladas por EDX de polvo de BCS antes de a diferentes aumentos

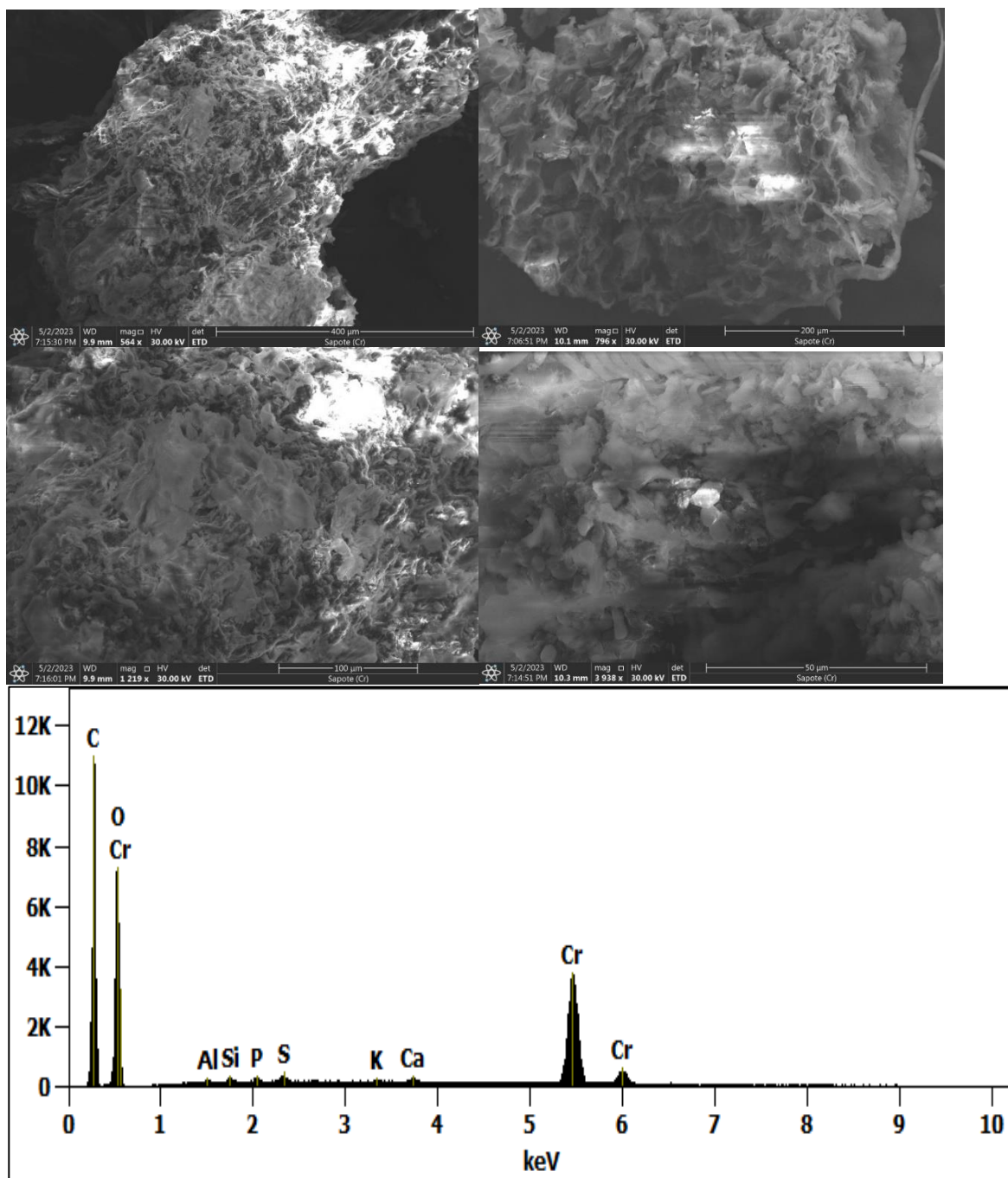


Nota. Se tomó aumento de 300 µm, 200 µm, 100 µm y 50 µm. Elaboración propia.

En la Figura 5 se muestran la morfología de la superficie de *Matisia cordata* que ha sufrido cambios con variación en la estructura porosa con superficie irregular con poros obstruidos parcialmente tras la adsorción de Cr.

Figura 5

Micrografías SEM acopladas por EDX de polvo de BCS después de la adsorción de Cr a diferentes aumentos



Nota: Se tomó aumento de 400 μm, 200 μm, 100 μm y 50 μm. Elaboración propia.

En la Tabla 4, en la biomasa (cáscara de sapote) tras la adsorción de Cr, se observa un incremento en el % peso de C de 34.78% a 44.04%; de O una reducción de

55.30% a 41.42%; de K de 5,70% a 0,07%; de Ca de 1.13% a 0.14; finalmente, se visualiza el 13% de Cr en la cáscara de sapote tras la adsorción de Cr.

Tabla 4

Composición química elemental de cascara de sapote antes y después de adsorción de Cr

Elemento	Cascara de sapote		Cascara de sapote + Cr	
	% peso	% atómico	% peso	% atómico
C	34.78	43.68	44.04	55.98
O	55.30	52.14	41.42	39.52
Mg	0.27	0.17	-	-
Al	0.43	0.24	0.25	0.14
Si	0.84	0.45	0.23	0.13
P	0.54	0.26	0.19	0.09
Cl	1.01	0.43	-	-
S	-	-	0.27	0.13
K	5.70	2.20	0.07	0.03
Ca	1.13	0.42	0.14	0.05
Cr	-	-	13.40	3.93
	100.00	100.00	100.00	100.00

Nota. Obtenida a una resolución de 100 μm de la figura 4 y 5. Elaboración propia.

4.1.2. Valor óptimo del pH, dosis de biomasa y concentración inicial de Cr (VI) que influyen sobre la capacidad del proceso de biosorción de cromo

La Tabla 5 muestra la cantidad adsorbida de Cr (VI) en los distintos tratamientos. Los valores de pH, la concentración inicial de adsorbato y la dosis del adsorbente dieron resultados diferentes en la cantidad adsorbida, con una capacidad máxima de 32.76 mg/G a un pH bajo de 2, concentración inicial de 75 mg/L de Cr (VI) y dosis de adsorbente de 0.5 g/L. Mientras que la mínima capacidad de 1.03 mg/g fue a un pH más alto de 2, concentración inicial de 25 mg/L de Cr (VI) y dosis de adsorbente de 1 g/L. Esta variabilidad de la cantidad adsorbida de Cr en los distintos tratamientos se muestra en la Figura 6. Asimismo, esta variabilidad también se relaciona con los cambios de pH durante la biosorción, ya que el proceso puede liberar protones (H^+) por la reducción parcial de Cr (VI), lo que tiende a disminuir ligeramente el pH final de la solución.

Tabla 5

Resultados del diseño experimental

TRATAMIENTOS	pH	Concentración (mg/L)	Dosis de biomasa (g/L)	qe (mg/g)
1	2	25	1	18.67

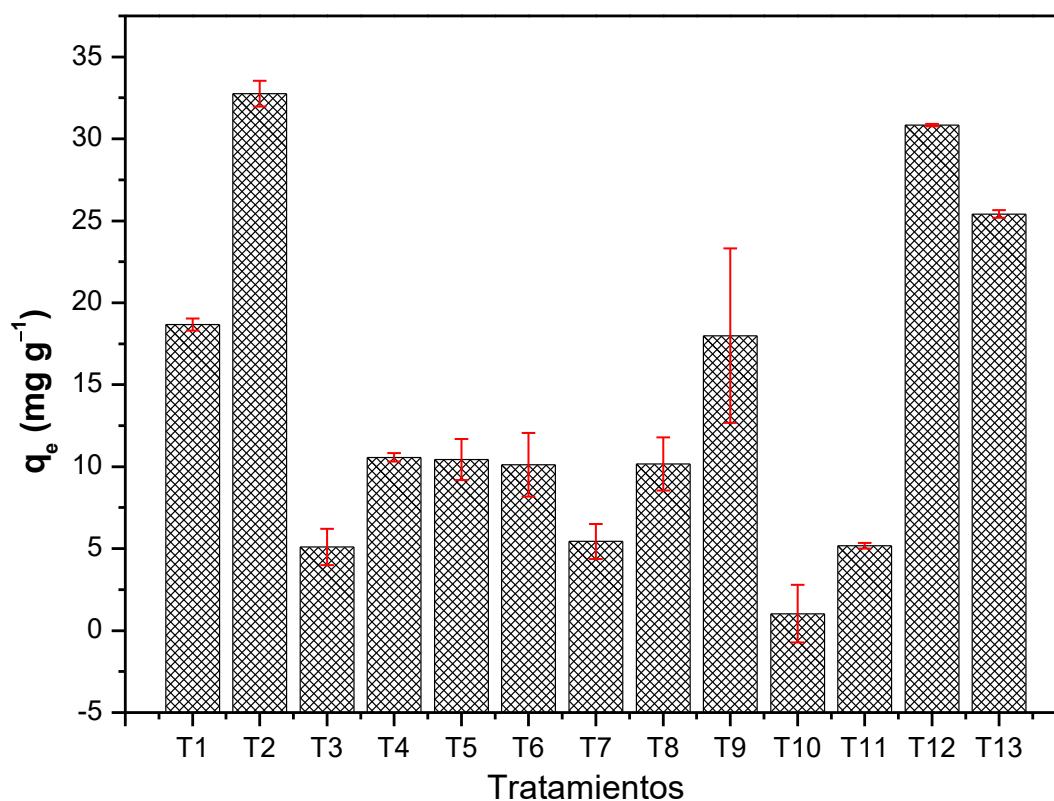
2	2	75	0.5	32.76
3	4	75	1.5	5.10
4	3	75	1	10.57
5	3	125	1.5	10.43
6	4	75	0.5	10.11
7	4	125	1	5.44
8	3	25	0.5	10.17
9	3	125	0.5	17.98
10	4	25	1	1.025
11	3	25	1.5	5.18
12	2	125	1	30.84
13	2	75	1.5	25.42

Nota: Elaboración propia

Después del tratamiento, la cantidad de cromo VI que quedaba en la solución bajó, y eso dependía bastante de cuánta biomasa se usaba. Por ejemplo, en el tratamiento 2, que tenía un pH de 2, una dosis chiquita de 0.5 g/L y empezó con 75 mg/L de cromo, al final terminó con algo así como 58.6 mg/L. O sea, no se eliminó todo, pero sí una parte importante. Igual, no fue igual en todos los casos, porque depende mucho de cómo se combinan las cosas: el pH, la dosis, la concentración inicial, todo eso.

Figura 6

Remoción de cromo en los diferentes tratamientos

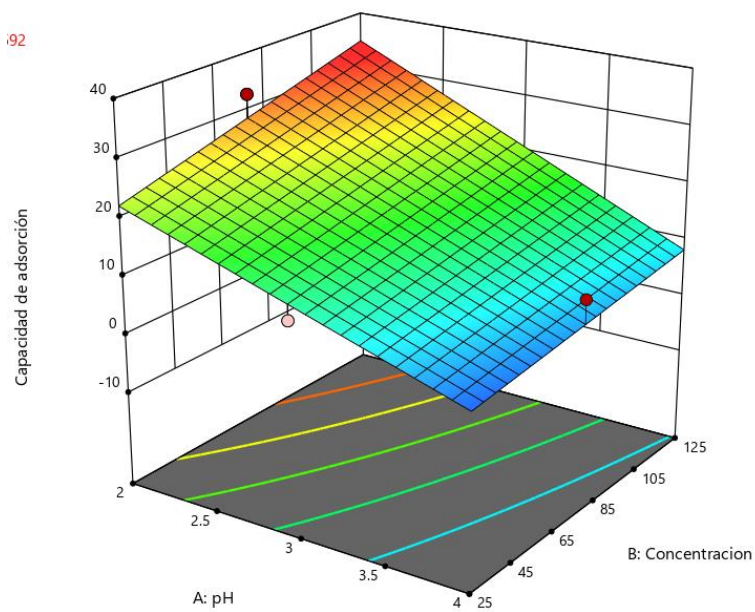


Nota: Elaboración propia

La Figura 7 muestra la cantidad adsorbida de Cr(V) fijando la dosis en 0.5 g/L, el cual es favorecida a menor pH y mayor concentración. El proceso está tanto más optimizado cuanto más nos acercamos al color rojo.

Figura 7

Superficie de respuesta de concentración y pH

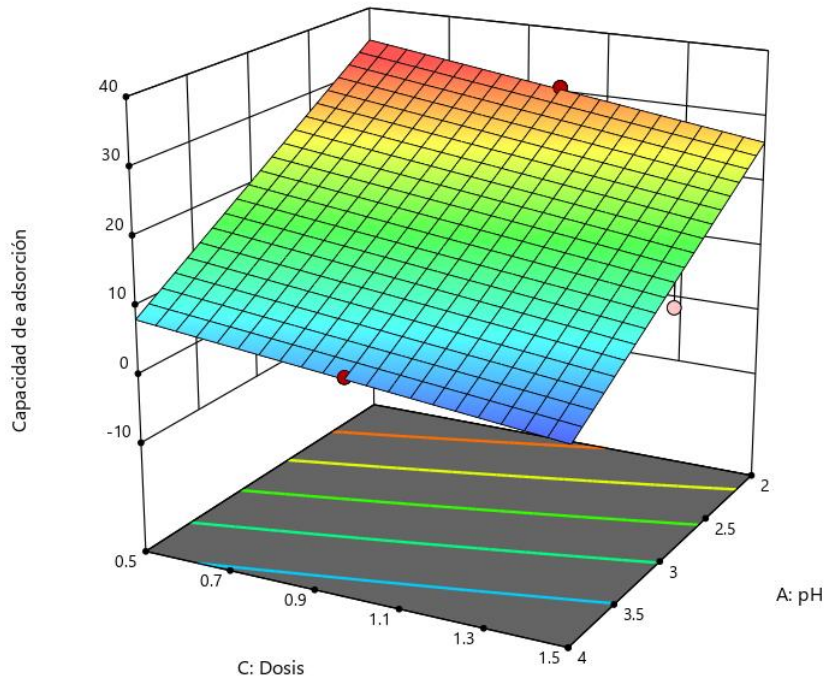


Nota: Desarrollo propio. Obtenido de software Design Expert

La Figura 8 muestra la cantidad adsorbida de Cr(V) fijando la concentración en 125 g/L, el cual es favorecida una menor dosis y pH más baja.

Figura 8

Superficie de respuesta de dosis y pH

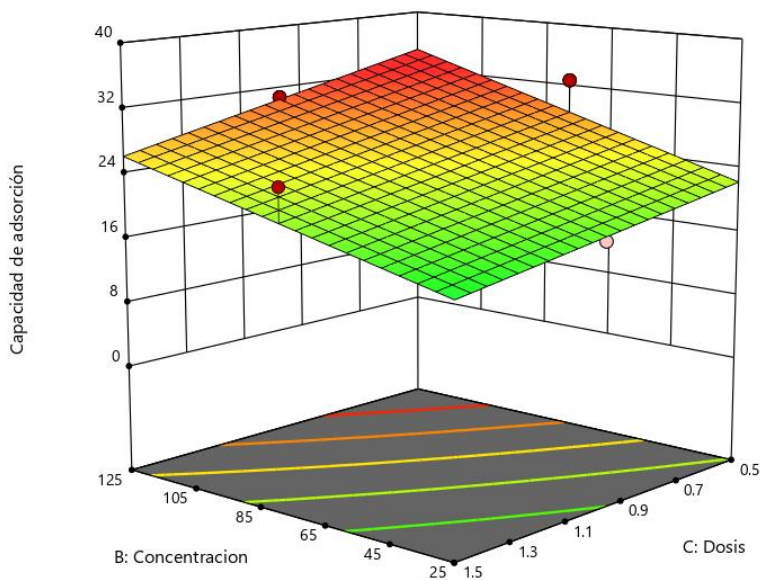


Nota: Elaboración propia. Obtenido de software Design Expert.

La Figura 9 muestra la cantidad adsorbida de Cr(V) fijando el pH en nivel baja de 2, el cual es favorecida a una mayor concentración y para las distintas dosis no tuvo mucha variación.

Figura 9

Superficie de respuesta de dosis y concentración



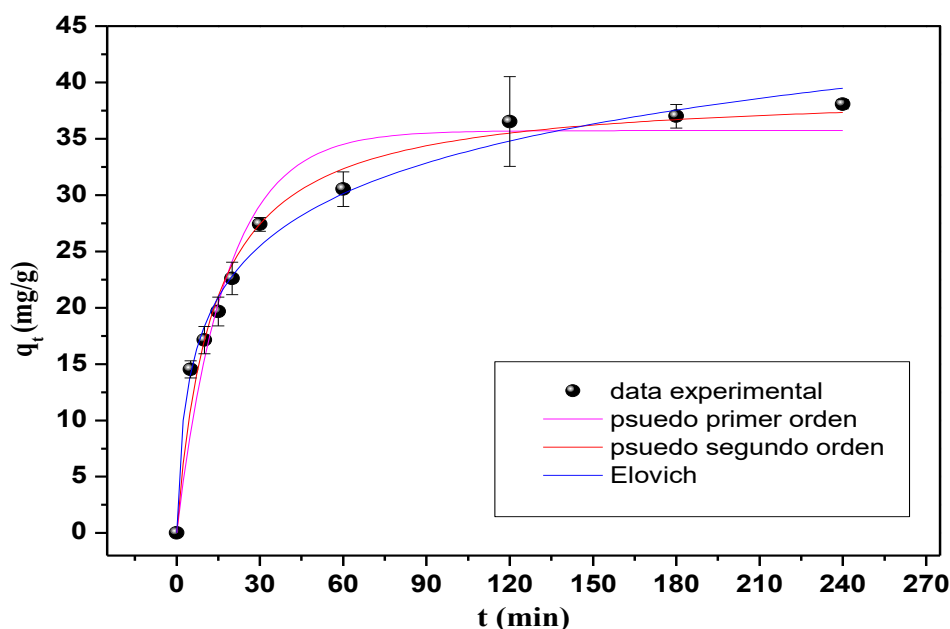
Nota: Elaboración propia. Obtenido de software Design Expert.

4.1.3. Cinética de remoción del Cr (VI) sobre la biomasa cáscara de sapote

La Figura 10, muestra los experimentos cinéticos de la biosorción de Cr (VI) en BCS, se observa que, durante los 60 primeros minutos, la cantidad adsorbida aumenta significativamente pasando los 30 mg/g, este aumento continuo hasta los 120 minutos llegando a 36.53 mg/g considerado como el tiempo de equilibrio, por encima de este tiempo ya no se observa un aumento significativo en la cantidad de adsorción de Cr (VI).

Figura 10

Ajuste no lineal de modelos cinéticos de adsorción de Cr (VI)



Nota: Ajuste de modelos cinéticos. Elaboración propia.

En la Figura 10 se muestra los ajustes de los modelos cinéticos y en la Tabla 5 los parámetros. Considerando el factor de correlación R^2 . El modelo cinético de Elovich y pseudo-segundo orden tuvieron un mejor ajuste con $R^2 = 0.989$ y $R^2 = 0.982$, respectivamente, lo que sugiere que la biosorción de Cr (VI) puede regirse por la quimisorción del Cr (VI) sobre la biomasa cáscara de sapote.

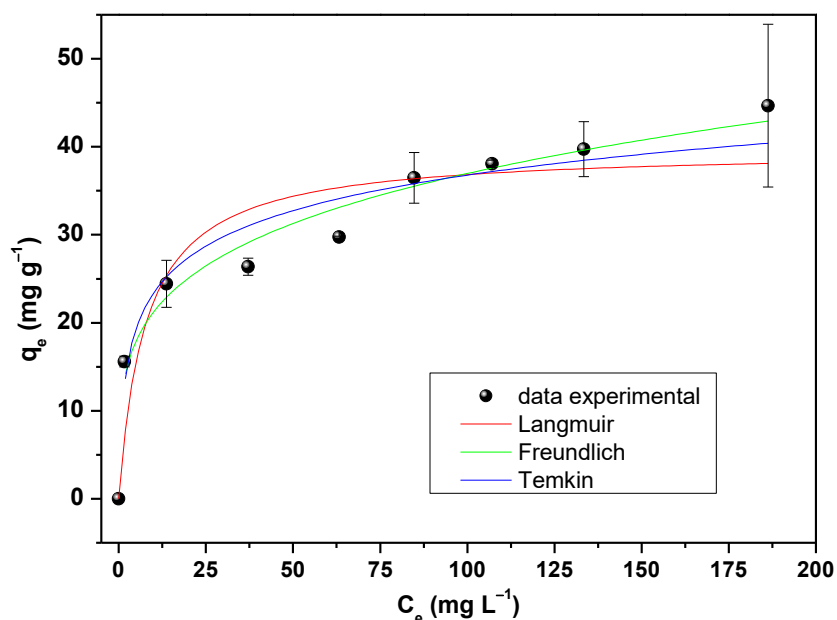
Tabla 6*Parámetros de modelos cinéticos*

pseudo primer orden		pseudo-segundo orden		Elovich	
q_e (mg g ⁻¹)	35.72	q_e (mg g ⁻¹)	39.37	β (g mg ⁻¹)	0.15
k_1 (h ⁻¹)	0.06	k_2 (g mg ⁻¹ h ⁻¹)	0.002	α (mg h ⁻¹)	9.35
R^2	0.94	R^2	0.98	R^2	0.99

Nota: Parámetros de modelos cinéticos. Elaboración propia.

4.1.4. Isoterma de remoción del Cr (VI) sobre la biomasa cáscara de sapote

Las isotermas de adsorción del Cr (VI) sobre la biomasa cáscara de sapote se muestran en la Figura 11. Se puede observar claramente un aumento en la capacidad de adsorción al aumentar la concentración de equilibrio del adsorbato, hasta que intenta alcanzar la saturación.

Figura 11*Isotermas de adsorción de Cr (VI)*

Nota: Isotermas de adsorción. Elaboración propia.

De los resultados de los parámetros de ajuste de la Tabla 7, se puede observar que el valor más alto de $R^2 = 0.94$ lo da el modelo Temkin, seguida del modelo de Freundlich $R^2 = 0.90$. Donde se tuvo la capacidad máxima de adsorción de 38.07 mg de

Cr/g de cáscara de sapote. En el caso del modelo de Freundlich, el parámetro n obtuvo un valor de 4.15. Dado que $n > 1$, este resultado confirma que el proceso de adsorción se desarrolla de manera favorable bajo este modelo. Además, dicho valor respalda que el mecanismo adsorptivo no responde a un comportamiento ideal, sino que tiene lugar sobre superficies energéticamente heterogéneas, donde la acumulación del adsorbato se produce mediante la formación de múltiples capas.

Tabla 7

Parámetros de ajuste de datos a modelos de isotermas de adsorción

	Langmuir	Freundlich	Temkin
q_e exp (mg g ⁻¹)	38.07	$k_F ((\text{mg g}^{-1})/(\text{mg L}^{-2-1})^{1/n})$	$K_T (\text{L g}^{-1})$
q_m (mg g ⁻¹)	39.69	$1/n$	$b_T (\text{J mol}^{-1})$
k_L (L mg ⁻¹)	0.13	n	
R^2	0.85	0.90	0.94

Nota: Modelos de adsorción. Elaboración propia.

4.2. Prueba de Hipótesis

La Tabla 8 presenta el análisis estadístico mediante el cual se evalúa la significancia de los factores estudiados y de sus interacciones, complementado con la tendencia observada en los resultados experimentales. De dicho análisis se evidencia que el pH, la dosis de biomasa y la concentración inicial de Cr(VI) ejercen una influencia estadísticamente destacada sobre la variable de respuesta. El modelo obtenido mostró un ajuste sobresaliente, con un coeficiente de correlación del 99.66%, lo que confirma la solidez predictiva del sistema analizado. Asimismo, la interacción de pH con la concentración tuvo un efecto significativo.

Tabla 8

Análisis de varianza para la biosorción de Cr

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: pH	924.72	1	924.72	3004.26	0.0000
B: dosis	77.46	1	77.45	251.64	0.0000

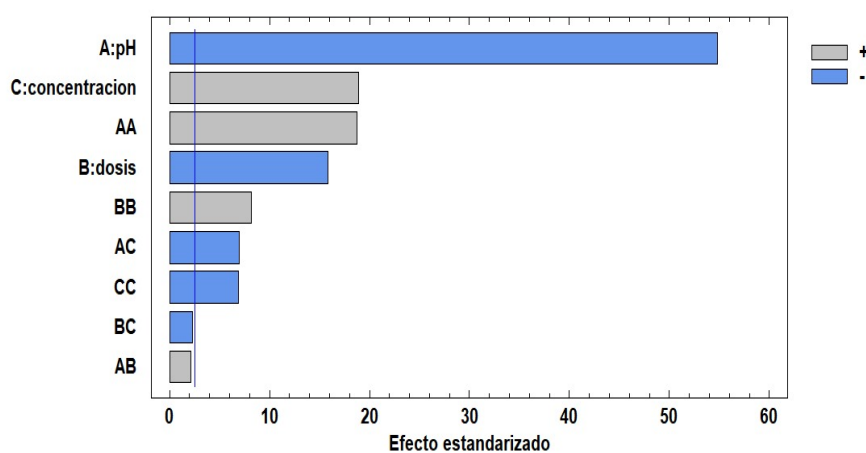
C: concentración	109.98	1	109.98	357.31	0.0000
AA	108.28	1	108.28	351.78	0.0000
AB	1.36	1	1.36	4.43	0.0893
AC	15.05	1	15.05	48.89	0.0009
BB	20.61	1	20.61	66.96	0.0004
BC	1.64	1	1.64	5.34	0.0689
CC	14.66	1	14.66	47.61	0.0010
Error total	1.54	5	0.31		
Total (corr.)	1278.33		14		

Nota. R-cuadrada = 99.8796 por ciento. R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 99.6629 por ciento. Elaboración propia. Obtenido de software Design Expert

El diagrama de Pareto presentado en la Figura 12, construido a partir de los valores reportados en la Tabla 6, permite identificar la magnitud del efecto individual y combinado de cada uno de los factores evaluados. El análisis revela que el pH constituye la variable de mayor influencia dentro del sistema, seguido por la concentración inicial y la dosis del biosorbente, los cuales también muestran efectos estadísticamente significativos. En particular, el pH destaca como el factor determinante, de modo que incluso pequeñas variaciones en este parámetro generan cambios sustanciales en la eficiencia de adsorción del Cr.

Figura 12

Diagrama de Pareto Estandarizado para la biosorción de Cr

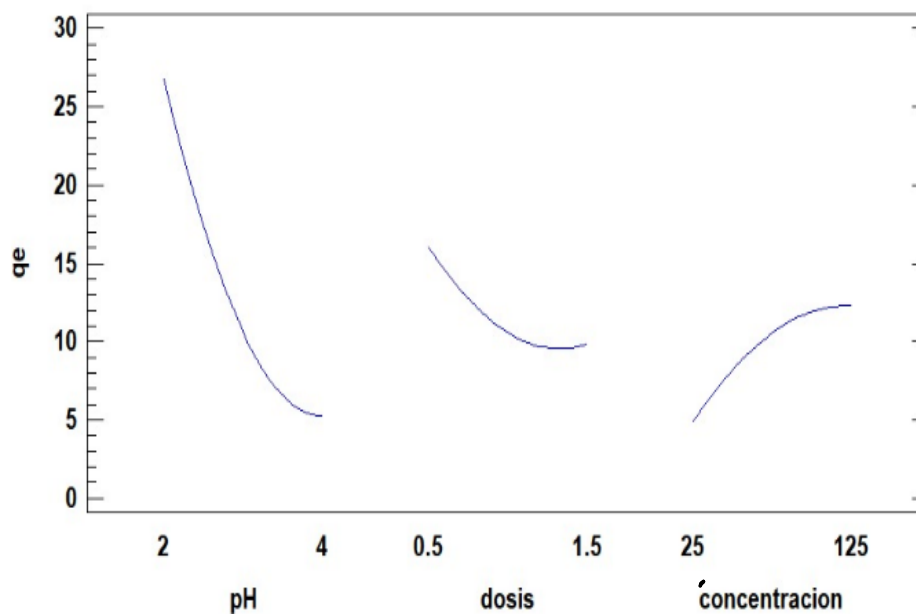


Nota: Diagrama de Pareto estandarizado. Obtenido de software Design Expert

En la Figura 13 se muestra el diagrama de efectos principales de los tres factores; donde la concentración cuenta con un vector de pendiente positivo, mientras que pH y dosis negativa. Por lo que, a menor nivel de pH, menor dosis y una concentración más alta se ve favorecida la biosorción de Cr.

Figura 13

Efectos principales para q_e

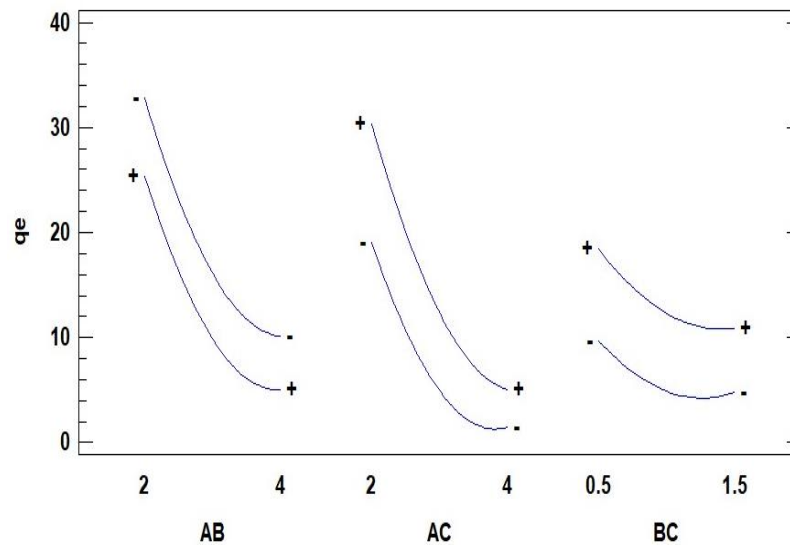


Nota. q_e es la capacidad de adsorción en mg/g. Obtenido de software Design Expert

La Figura 14 muestra que la interacción de ninguna de los factores fue significativa para la adsorción de Cr.

Figura 14

Interacción para para q_e



Nota. q_e es la capacidad de adsorción en mg/g. A: pH; B: Dosis; C: Concentración. .
Obtenido de software Design Expert

CONCLUSIONES

- Las variables que influyen significativamente ($p < 0.05$) en biosorción de Cr (VI) utilizando la biomasa de la cáscara de sapote (*Matisia cordata*), fueron el pH, la concentración inicial de Cr y la dosis de adsorbente; el tratamiento que obtuvo la capacidad de adsorción máxima de Cr (32.7592 mg/g) fue a un pH de 2, dosis de 0.5 g/L y concentración inicial de Cr de 75 mg/L; asimismo el tiempo de equilibrio en la adsorción de Cr (VI) fue de 120 minutos, por lo que, el sapote (*Matisia cordata*) tiene potencial para usarse como un adsorbente de Cr de aguas contaminadas.
- Se determinó el valor óptimo del pH, el cuál fue de carácter ácido con un valor correspondiente a 2, además la dosis de biomasa para el tratamiento más eficiente en remoción de Cr (VI) que fue de 0.5 mg/L y concentración inicial de Cr (VI) intermedia de 75 mg/L, los cuales afectan significativamente la capacidad de biosorción de cromo utilizando cáscara de sapote como biosorbente.
- El modelo más adecuado que explica la cinética de remoción del Cr (VI) sobre la biomasa cáscara de sapote, fue el modelo cinético de Elovich seguida del Pseudo segundo orden, con $R^2 = 0.989$ y $R^2 = 0.982$ respectivamente, lo que evidencia que la biosorción de Cr (VI) se puede regir por la quimisorción de este sobre la biomasa de cáscara de sapote.
- El modelo de isoterma que describe la remoción del Cr (VI) sobre la biomasa cáscara de sapote, fue el modelo de Temkin seguida del modelo de Freundlich lo que sugiere que la adsorción ocurre en multicapa no homogénea; asimismo, mediante el modelo de Langmuir se estimó la capacidad de adsorción máxima de 39.686 mg/g.

RECOMENDACIONES

- Debido a que el pH ácido del medio favorece la remoción de cromo hexavalente, se debe efectuar tratamientos con biomasa de cascara de sapote en un agua contaminado real donde el medio de la solución es naturalmente.
- Los valores que se sacaron en este experimento podrían servir para hacer pruebas más grandes, tipo a nivel piloto. **La implementación a escala industrial se complica**, porque en la vida real los volúmenes son enormes, más de 100 litros por segundo, y los tiempos de contacto tienen que ser menores porque no se puede estar esperando dos horas para que funcione.
- Sería bueno revisar bien el material biosorbente que se usa para los metales, tanto antes como después del proceso, para ver si cambia algo o cómo realmente llega a funcionar. Hay unas técnicas, como FTIR, DRX, SEM, que sirven para eso, para ver si la estructura o composición se modifica. También sería recomendable probar la cáscara de sapote con otros metales pesados tipo plomo, arsénico o hierro, porque a lo mejor tiene la misma reacción con diferente metales por lo que, sería algo práctico, barato y que además recicla un residuo que normalmente no se aprovecha del todo.
- Existen métodos más directos, como la precipitación química, que **sólo** necesita ajustar el pH y los metales ya empiezan a precipitarse. Estaría bueno comparar ambos procesos, para ver en qué casos conviene más usar la adsorción y cuándo es mejor lo otro. **Porque podría ser más** rápido, económico o fácil de implementar, según el tipo de agua o el metal que contenga el efluente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdulmalik, A., Yakasai, H., Usman, S., Jahun, M., Jagaba, A., Ibrahim, S., Babandi, A., & Yunus, M. (2023). Characterization and invitro toxicity assay of bio-reduced hexavalent chromium by *Acinetobacter* sp. isolated from tannery effluent. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100459>
- Afirm Group [AG]. (2022). Hoja de datos quimicos. https://afirm-group.com/wp-content/uploads/2022/11/afirm_chromium_VI_spanish_v4a.pdf
- Aguilar, A. A., & Pumachara, L. M. (2022). Propuesta de tratamiento de efluentes del proceso de curtido mediante la adsorción de Cr III con carbón activado de cáscara de coco, para reducir el riesgo químico en la empresa de curtiembre San Vicente. Arequipa: [tesis de licenciamiento, Universidad Tecnológica del Perú]. <https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/6435>
- Álvarez, V., Muriel, S., & Cotes, J. (2020). Morphological characterization of *Matisia cordata* Bonpl. in a tropical dry forest from Antioquia, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 73(1). <https://doi.org/10.15446/rfnam.v73n1.78997>
- Anderson, A., Anbarasu, A., Rao, R., Manigandan, S., & Praveenkumar, T. (2022). Treatment of heavy metals containing wastewater using biodegradable adsorbents: A review of mechanism and future trends. *Chemosphere*, 295. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133724>
- Andrade, M. F. (2023). Determinación de la capacidad de bioadsorción de cromo hexavalente en aguas residuales que provienen de la industria de curtiembres utilizando la cáscara de limón. [Tesis de pregrado para optar el grado académico de Ingeniero, Universidad Central del Ecuador]. <https://www.dspace.uce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/cdd6e402-bc0c-4cab-bbeb-345ce5e8b8b2/content>
- Bustos, A., & Guáqueta, V. (2022). Diseño de un proceso químico para la remoción de exceso de nitratos presentes en el agua de la fuente hídrica del Río Subachoque. Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8850>
- Chavez, P. (2016). Descripción de la nocividad del cromo proveniente de la industria curtiembre y de las posibles formas de removerlo. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 9(17). <https://www.redalyc.org/pdf/750/75017164003.pdf>

- Choińska, A., Sobolczyk, J., & Łaba, W. (2017). Optimization of copper, lead and cadmium biosorption onto newly isolated bacterium using a Box-Behnken design. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 149, 275-283. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.12.008>
- Corral, M., Lostado, R., Fatima, & Escribano, R. (2021). Effective use of activated carbon from olive stone waste in the biosorption removal of Fe(III) ions from aqueous solutions. *Journal of Cleaner Production*, 294. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126332>
- Datt, B., Neupane, D. P., Chandra, P., Kumar, S., Raj, M., & Raj, B. (2022). Efficient biosorption of hexavalent chromium from water by modified arecanut leaf sheath. *PlumX metrics*, 8(4). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09283>
- Diaz Dumont, J. (2018). Políticas públicas en propiedad intelectual escrita. Una escala de medición para educación superior del Perú. *Revista Venezolana de Gerencia*, 23(81). <https://www.redalyc.org/journal/290/29055767006/29055767006.pdf>
- Dobrosz, I., Gómez, M., & Santa, C. (2018, Diciembre 30). Optimización del proceso de adsorción de Cr (VI) sobre carbón activado de origen bituminoso. *SciElo*, 29(6), 43-56. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000600043>
- Fernández, J., Angosto, J., & Avilés, M. (2014). Biosorption of Hexavalent Chromium from Aqueous Medium with Opuntia Biomass. *The Scientific World Journal*, 14(8), 8. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2014/670249>
- García, M., de la Barrera, F., Plazas, N., Colmenares, A., Cancimance, A., & Soler, D. (2022). Los Objetivos de Desarrollo Sostenible en América: Panorama. 36(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.17163/lgr.n36.2022.04>
- Georgaki, M.-N., Charalambous, C., Kazakis, N., & Talias, M. (2023). Chromium in Water and Carcinogenic Human Health Risk. *Environments*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/environments10020033>
- Gomez, D. (2017). Polinización y su contribución a la fructificación de zapote (*matisia cordata* bonpl.) en dos fincas del municipio de sopetrán, antioquia. <https://repositorio.elpoli.edu.co/server/api/core/bitstreams/9e0ae95e-c1cb-4f1a-a521-837269202dc8/content>
- Goria, K., Bharti, A., Raina, S., Kothari, R., Tyagi, V., Mohan, H., & Kour, G. (2022). Chapter 6 - Low-cost adsorbent biomaterials for the remediation of inorganic and organic pollutants from industrial wastewater: Eco-friendly approach. *Sustainable Materials for Sensing and Remediation of Noxious Pollutants*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99425-5.00004-9>
- Gutiérrez, H., & De la Vara, R. (2008). Análisis y diseño de experimentos. McGrwaHill. <https://doi.org/978-970-10-6526-6>

- Hernandez, R., & Mendoza, C. (2018). Metodología de la investigación las rutas cuantitativas, cualitativas y mixta. McGrawHill.
- Huiman, A. (2022). Los residuos peligrosos generados en la industria textil peruana para el caso de la Alta costura, fibra de alpaca y curtiembre. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 25(49). <https://doi.org/https://doi.org/10.15381/iigeo.v25i49.21097>
- Jaramillo, A., Echavarría, A., & Hormaza, A. (2013). Diseño Box-Behnken para la optimización de la adsorción del colorante azul ácido sobre residuos de flores. *Ingeniería y Ciencia*, 9(18). <http://www.eafit.edu.co/ingciencia>
- Jobby, R., Jha, P., Kumar, A., & Desai, N. (2018). Biosorption and biotransformation of hexavalent chromium [Cr(VI)]: A comprehensive review. *Chemosphere*, 207. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.050>
- López-Morales, G., López-Páez, M., & p., L. (2023). Detection of moisture ratio and carotenoid compounds in mamey (*Pouteria sapota*) fruit during dehydration process using spectroscopic techniques. *J Food Sci Technol*, 60, 1952–1959. <https://doi.org/10.1007/s13197-023-05728-w>
- Martínez, D. (2019). Diseño de un adsorbente a base de bambú para la remoción de Cr (VI) en aguas contaminadas. Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Misantla, Veracruz, México. <https://rinacional.tecnm.mx/bitstream/TecNM/5198/1/TIA%2029%20DISE%C3%91O%20DE%20UN%20ADSORBENTE%20A%20BASE%20DE%20BAMB%C3%9A%20PARA%20LA%20REMOCION%20DE%20Cr%20EN%20AGUAS%20CONTAMINADAS.pdf>
- Mayta, A., Canchanya, Y., Pomalaya, J., Bendezú, Y., & Ramos, J. (2023). Enhanced Removal of As(V) and Pb(II) from Drinking and Irrigating Water Effluents Using Hydrothermally Synthesized Zeolite 5A. 15(10). <https://doi.org/10.3390/w15101892>
- Miranda, N. (30 de Enero de 2019). 'Biosorción de cromo Cr (VI) de soluciones acuosos por la biomasa residual de hojas de eucalipto (*Globulus labill*). *Revista de Ciencias Naturales*, 2(1), págs. 20-32. <http://revistas.unap.edu.pe/journal/index.php/RCCNN/issue/current>
- Missouri Botanical Garden. (abril de 6 de 2017). *Tropicos.org*. *Matisia cordata* Bonpl. <http://tropicos.org/Name/3900377>
- Pabón, S., Benítez, R., Sarria, R., & Gallo, J. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27). <https://doi.org/https://doi.org/10.31908/19098367.1734>

- Parra Reyes, J., & Pérez, E. (2023). Estimación de materiales lignocelulosicos residuales como adsorbentes de cromo y plomo. 21(1). <https://doi.org/10.18684/rbsaa.v21.n1.2023.1610>
- Pereira, A., DA Silva Malaquias, K., & de Souza Castro, C. (2019). Caracterização dos Compostos Químicos dos Óleos Extraídos da Casca, Arilo e Semente dos Frutos de *Hymenaea stigonocarpa* Mart. ex Hayne (Jatobá-do-Cerrado). *Ensaio e Ciência C Biológicas Agrárias e da Saúde*, 23(3), 171–174. <https://doi.org/10.17921/1415-6938.2019v23n3p171-174>
- Prasad, S., Kumar Yadav, K., Kumar, S., Gupta, N., & Cabral-Pinto, M. (2021). Chromium contamination and effect on environmental health and its remediation: A sustainable approaches. *Journal of Environmental Management*, 285. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112174>
- Rambabu, K., Thanigaivelan, A., Bharath, G., Sivarajasekar, N., Banat, F., & Loke, P. (2021). Biosorption potential of Phoenix dactylifera coir wastes for toxic hexavalent chromium sequestration. *Chemosphere*. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128809>
- Rodríguez, D. (2017). Intoxicación ocupacional por metales pesados. *MEDISAN*, 21(12). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1029-30192017001200012
- Sánchez, A., Romero, M., & Ramírez, C. (2025). Eliminación de complejos antibiótico-metal en aguas residuales mediante métodos electroquímicos. *Tecnológicas*, 28(63), 21. <https://doi.org/https://doi.org/10.22430/22565337.3344>
- Shen, Y.-S., Wang, S.-L., Tzou, Y.-M., & Huang, J.-H. (2010). Biosorption of Cr(VI) by coconut coir: Spectroscopic investigation on the reaction mechanism of Cr(VI) with lignocellulosic material. 179(1-3). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.02.073>
- Silva, M. (2021). Capacidad de biosorción de cromo hexavalente en medio acuoso usando la borra de café. Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/4322>
- Silva, V., Damiani, C., Ramirez, E., Castilho Orsi, D., & Faustino Nishi, A. C. (2012). Development and antioxidant capacity of sapota pulp Jelly (*Quararibea cordata* Vischer). *Food Science and Technology*, 36(3), 341-347. <https://www.scielo.br/j/cagro/a/mJJXdhBLXbdQhKL4d5mMSLz/?lang=en>
- Sivarajasekar, N., & Baskar, R. (2019). Adsorption of Basic Magenta II onto H2SO4 activated immature *Gossypium hirsutum* seeds: Kinetics, isotherms, mass transfer, thermodynamics and process design. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(27), 1322-1337. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.10.040>
- Tejada, C. (2014). Biosorción de Cromo (VI) en aguas usando material lignocelulósico modificado. *Educación en Ingeniería*, 85-88. <https://doi.org/10.26507/rei.v9n17.290>

- Tejeda, C., Villabona, A., & Garcés, L. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *Tecnologías*, 18(34). <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5062883.pdf>
- Terán, M., & Lezama, T. (2020). Biosorción de cromo (VI) del agua residual de curtiembre por la semilla activada de PERSEA AMERICANA variedad de palta fuerte-Cajamarca 2020. Universidad Privada Antonio Guillermo Urrelo, Cajamarca, Cajamarca, Perú. <http://repositorio.upagu.edu.pe/handle/UPAGU/2891>
- Tumolo, M., Ancona, V., De paola, D., & Losacco, D. (2020). Chromium Pollution in European Water, Sources, Health Risk, and Remediation Strategies: An Overview. *Int J Environ Res Public Health*, 17(15). <https://doi.org/10.3390/ijerph17155438>
- Vallejo, M., Marín, M., Ramos, M., Silva, S., Ibarra, D., & Tamariz, J. (2021, Marzo 31). Biosorción y tolerancia de Pb, Cr y Cd por la biomasa de *Pleurotus ostreatus* (Jacq. Ex Fr.) P. Kumm. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(2), 275-289. <https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/index.php/agricolas/article/view/2687/3893>
- Villalobos, R., & Neyra, D. (2021). Evaluación del efecto antiinflamatorio de un gel formulado a base del extracto hidroalcohólico de las hojas de *Quararibea Cordata* (BONPL.) Vischer ZAPOTE en ratones y evaluación analgésica del extracto hidroalcohólico. [Tesis de pregrado, Universidad Norbert Wiener]. <https://repositorio.uwiener.edu.pe/handle/20.500.13053/4414>
- Villarraga, D. (2019). Análisis de los factores de contaminación por metales pesados en el río Tunjuelo. Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. <http://hdl.handle.net/10654/32405>
- Xiaoli, G., Aiju, L., Jie, L., Xiaoyin, N., Man, J., Yanfei, M., Xinpeng, L., & Menghong, L. (2020). Adsorption Mechanism of Hexavalent Chromium on Biochar: Kinetic, Thermodynamic, and Characterization Studies. *Acs Omega*, 5(42), 9. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.0c03652>
- Yañez, Ó., Ríos, J., & Pantoja, Y. (2023). Diseños experimentales como herramienta de mejora de procesos (experimental designs as a process improvement tool). *Pistas Educativas*, 45(145), 18. <https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/view/3192>

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES, DIMENSIONES E INDICADORES	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN
<p>-Problema general ¿Cuáles serán los valores óptimos de las variables del proceso de biosorción de Cr (VI) utilizando la biomasa de la cáscara de Sapote (<i>Matisia cordata</i>) mediante el diseño Box – Behnken?</p> <p>-Problema Específico</p> <ul style="list-style-type: none"> •¿Cuáles son las características fisicoquímicas de la biomasa de cáscara de sapote? •¿Cuáles serán los valores óptimos del pH, dosis de biomasa y concentración inicial de Cr (VI) que influyen sobre la 	<p>-Objetivo general Optimizar las variables que influyen en el proceso de biosorción de Cr (VI) utilizando la biomasa de la cáscara de Sapote (<i>Matisia cordata</i>).</p> <p>-Objetivo específico</p> <ul style="list-style-type: none"> •Caracterizar fisicoquímicamente la biomasa de la cáscara de sapote. •Determinar el valor óptimo del pH, dosis de biomasa y concentración inicial de Cr(VI) que influyen sobre la capacidad del 	<p>-Hipótesis general La cantidad de adsorbente ≤ 2 g/L, el tiempo de contacto ≤ 180min y el pH óptimo ≤ 4 para la remoción de Cr (VI) influyen significativamente en el proceso de biosorción, utilizando la biomasa de la cáscara de Sapote.</p> <p>-Hipótesis específico</p> <ul style="list-style-type: none"> •Las características fisicoquímicas de la biomasa cáscara de sapote se establecería a través de un análisis estructural para la determinación del porcentaje de lignina (LGN), celulosa (CEL), y hemicelulosa (HMC). •Al aumentar el valor inicial de pH, dosis de biomasa y 	<p>a)Variable Independiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Dosis de la biomasa b) pH c) Concentración de Cr(VI) <p>Dimensiones</p> <ul style="list-style-type: none"> a)Biomasa de cáscara de sapote (<i>Matisia cordata</i>). b)pH ácido y pH Base c)Concentración inicial de Cr (VI) <p>Indicadores</p> <ul style="list-style-type: none"> a) g/L b) 0-14 c) mg/L <p>b)Variable Dependiente: Biosorción de Cr (VI)</p>	<p>a) Nivel, tipo y diseño de Investigación Nivel: explicativo Tipo: aplicada Enfoque: Cuantitativo Diseño: Experimental -Box-Behnken</p> <p>b) Población y muestra -Población: Residuos de los frutos del sapote que hay en la Selva central. -Muestra: 3 kg de residuos del sapote</p> <p>c)Técnicas e instrumentos de recolección de datos</p> <p>-Procedimiento</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Preparación: La biomasa recolectada de anexo Ricardo Palma – Satipo, lavado, secado, molido, tamizado, y almacenado en un frasco de vidrio rotulado. b) Caracterización: La caracterización se realiza mediante: <ul style="list-style-type: none"> -Infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR) -Microscopio electrónico de barrido con detector de energía dispersiva (SEM/ EDX)

<p>capacidad del proceso de biosorción de cromo?</p> <ul style="list-style-type: none"> •¿Cuál es el modelo más adecuado que explica la cinética de remoción del Cromo (VI) sobre la biomasa cáscara de sapote? •¿Cuál es el modelo más adecuado que explica la isoterma de remoción del Cromo (VI) sobre la biomasa cáscara de sapote? 	<p>proceso de biosorción de cromo.</p> <ul style="list-style-type: none"> •Identificar el modelo más adecuado que explica la cinética de remoción del Cr(VI) sobre la biomasa cáscara de sapote. •Identificar el modelo más adecuado que explica la isoterma de remoción del Cr(VI) sobre la biomasa cáscara de sapote. 	<p>concentración inicial se obtiene una mayor adsorción de cromo a partir de la optimización del proceso utilizando la cáscara de sapote.</p> <ul style="list-style-type: none"> •El modelo que mejor explica la cinética es el Modelo de primer orden o Modelo de pseudo segundo orden. •El modelo que mejor explica la Isoterma de adsorción de Cr (VI) es la isoterma de Langmüir . 	<p>Dimensiones</p> <ul style="list-style-type: none"> - Capacidad de biosorción de Cr(VI) <p>Indicadores</p> <p>Concentración de Cr(VI) adsorbido por la biomasa</p>	<p>c) Preparación de la solución de cromo:</p> <ul style="list-style-type: none"> - La concentración inicial de la solución de cromo 1000 mg/L en un volumen de 100 mL para cada prueba experimental. - Identificación de las condiciones óptimas de las variables que influyen en el adecuado proceso de biosorción de cromo <p>Para identificar las condiciones óptimas se realizará mediante el diseño Box Behnken</p> <ul style="list-style-type: none"> - Determinar la capacidad de biosorción de cromo - Realizar el estudio cinético e isotérmico del proceso de biosorción <p>d)Análisis de datos</p> <ul style="list-style-type: none"> - Técnicas de Procesamiento de Datos: Se utilizó el análisis de varianza (ANOVA) como técnica estadística paramétrica para evaluar las diferencias entre las medias de los grupos de datos paramétricos. Las representaciones de la parte experimental se desarrollarán por medio de gráficas, tablas, reportes entre otros.
---	---	--	---	--

Anexo 2. Panel fotográfico

1. Muestras de cascara de Sapote (*Matisia cordata*)



2. Solucion de Cr (VI), muestra seca de cascara de sapote y reactivos



3. Pesado de muestras de cascara de Sapote (*Matisia cordata*)



4. Etiquetado y medicion de cada unidad de tratamiento para remocion de Cr(VI)



5. Proceso de biosorción de Cr (VI) al inicio y finalizando/prueba de cinética



6. Medición y control de pH en el proceso de biosorción de Cr (VI)



7. Control de tiempo y muestras tratadas en el proceso de biosorción de Cr (VI)

