



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA**

**EFFECTO DE LA ALTURA DE EMPAQUETAMIENTO DE UN  
COMPOSITO MAGNÉTICO EN LA REMOCIÓN DE CROMO  
MEDIANTE UNA COLUMNA DE ADSORCIÓN**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO QUÍMICO**

**AUTOR:**

**BRYAN ALEJANDRO GONZÁLEZ ZAMBRANO**

Riobamba – Ecuador

2024



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA**

**EFEECTO DE LA ALTURA DE EMPAQUETAMIENTO DE UN  
COMPOSITO MAGNÉTICO EN LA REMOCIÓN DE CROMO  
MEDIANTE UNA COLUMNA DE ADSORCIÓN**

**Trabajo de Integración curricular**

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO QUÍMICO**

**AUTOR: BRYAN ALEJANDRO GONZÁLEZ ZAMBRANO**

**DIRECTOR: DR. JORGE EFRÉN SILVA YUMI**

Riobamba – Ecuador

2024

**©2024, Bryan Alejandro González Zambrano**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Bryan Alejandro González Zambrano, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 24 de abril de 2024






---

Bryan Alejandro González Zambrano  
160053959-5

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA**

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular Certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto de Investigación, **EFFECTO DE LA ALTURA DE EMPAQUETAMIENTO DE UN COMPOSITO MAGNÉTICO EN LA REMOCIÓN DE CROMO MEDIANTE UNA COLUMNA DE ADSORCIÓN**, realizado por el señor: **BRYAN ALEJANDRO GONZÁLEZ ZAMBRANO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Ing. Luis Santiago Carrera Almendáriz <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>	 _____	2024-04-24
Dr. Jorge Efrén Silva Yumi <b>DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>	 _____	2024-04-24
Ing. Mabel Mariela Parada Rivera <b>ASESORA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>	 _____	2024-04-24

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo de titulación con profundo agradecimiento y amor a quienes han sido los pilares fundamentales en mi camino hacia este logro. A Dios, quien ha sido mi guía constante, brindándome fuerza y sabiduría para superar cada obstáculo y alcanzar mis metas. A mis amados padres, Marco González y Rita Zambrano, por su inquebrantable apoyo, motivación y enseñanzas que me han impulsado a perseguir mis sueños. Gracias por creer en mí y por estar a mi lado en cada paso del camino. A mi más grande amor, mi abuelita, Rita Montesdeoca, y mi querido Cocayito, quienes han sido fuentes inagotables de amor y sabiduría. Su ejemplo de valentía y cariño han sido mi inspiración constante. A mi ángel en el cielo, mi abuelito José Zambrano, cuyo legado y amor perduran en mi corazón. Este logro es también en honor a sus enseñanzas y afecto eterno. A mis hermanos, Rubén y Marco, por sus consejos y por ser mi inspiración constante. Su aliento y respaldo han sido fundamentales en mi camino. A toda mi familia y amigos, quienes han estado a mi lado brindándome su apoyo y amor incondicional. Su presencia ha sido un motor invaluable en este viaje hacia la culminación de esta meta.

Bryan

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, agradezco a Dios por haberme brindado salud y bienestar, permitiéndome cumplir este sueño universitario. A mis queridos padres, abuelita y hermanos, les agradezco de todo corazón por su incondicional apoyo, guía y motivación a lo largo de esta travesía. Su amor y confianza fueron el pilar fundamental que me impulsó en cada paso. A mi querida Tía Mary y primas Cristina y Valeria, les agradezco por siempre haber estado presentes guiándome tanto en mi crecimiento personal como académico. Su cariño y aliento fueron invaluable durante esta etapa. Extendiendo mi gratitud, agradezco a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por abrirme sus puertas y brindarme la oportunidad de formarme en esta prestigiosa institución. Agradezco especialmente a sus docentes por impartirme sus conocimientos y por su labor en la formación de profesionales éticos y morales. Mi más sincero reconocimiento al Dr. Jorge Silva, director de tesis, por su valioso tiempo y conocimientos durante la elaboración y culminación de este trabajo. Asimismo, agradezco a mi asesora, Ingeniera Mabel Mariela Parada Rivera, por su orientación y consejos durante el desarrollo de la investigación, así como por su dedicación en las tutorías para la culminación exitosa de este proyecto. Además, agradezco al Grupo de Investigación de Materiales Avanzados de la ESPOCH (GIMA) por su valioso apoyo en el desarrollo del Trabajo de Integración Curricular. Finalmente, a mis mejores amigos Lía, Grace, Dimas, Danny, Jessica, Jason, Ramón y Anita, les agradezco sinceramente por su amistad incondicional y por estar siempre presentes cuando más los necesitaba. Sin su apoyo y compañía, este camino habría sido mucho más difícil de recorrer. A cada uno de ustedes, mi más sincero agradecimiento. Este logro es también suyo.

Bryan

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS .....	xi
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS .....	xiii
RESUMEN .....	xiv
ABSTRACT .....	xv
INTRODUCCIÓN .....	1

### CAPITULO I

<b>1. PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>2</b>
<b>1.1. Planteamiento del problema.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2. Limitaciones y Delimitaciones.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2.1. Limitaciones .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2.2. Delimitaciones .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3. Objetivos.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3.1. Objetivo General.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3.2. Objetivos Específicos .....</b>	<b>4</b>
<b>1.4. Justificación.....</b>	<b>4</b>
<b>1.5. Hipótesis .....</b>	<b>5</b>

### CAPÍTULO II

<b>2. MARCO CONCEPTUAL Y TEÓRICO .....</b>	<b>6</b>
<b>2.1. Marco conceptual .....</b>	<b>6</b>
<b>2.1.1. Antecedentes de investigación.....</b>	<b>6</b>
<b>2.2. Marco teórico .....</b>	<b>9</b>
<b>2.2.1. Metales pesados .....</b>	<b>9</b>
<b>2.2.2. Cromo (III) .....</b>	<b>9</b>
<b>2.2.3. Adsorción .....</b>	<b>10</b>
<b>2.2.4. Bioadsorción.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2.5. Columnas de adsorción.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2.6. Modelos de adsorción.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2.6.1. Modelo de Thomas (TM) .....</b>	<b>12</b>



2.2.6.2.	<i>Modelo de tiempo de servicio de profundidad de lecho de Thomas (BDST)</i> .....	12
2.2.6.3.	<i>Modelo Bohart-Adams (ABM)</i> .....	13
2.2.6.4.	<i>Modelo de Yoon-Nelson (YNM)</i> .....	13
2.2.6.5.	<i>Modelo de Clark (CM)</i> .....	13
2.2.6.6.	<i>Modelo Wolborska (WM)</i> .....	13
2.2.6.7.	<i>Modelo dosis modificado (MDRM)</i> .....	14
2.2.7.	<i>Totora (Schoenoplectus californicus)</i> .....	15
2.2.8.	<i>Características morfológicas y composición química</i> .....	15
2.2.9.	<i>Técnica para el tratamiento en aguas residuales de metales pesados</i> .....	15
2.2.9.1.	<i>Filtración por Membrana</i> .....	16
2.2.9.2.	<i>Nanofiltración</i> .....	16
2.2.9.3.	<i>Ultrafiltración</i> .....	16
2.2.10.	<i>Óxido de hierro</i> .....	17
2.2.11.	<i>Magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)</i> .....	17
2.2.12.	<i>Microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopia de energía dispersa (EDX)</i> . .....	17

### CAPÍTULO III

3.	<b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	19
3.1.	<b>Enfoque de investigación</b> .....	19
3.2.	<b>Alcance de Investigación</b> .....	19
3.3.	<b>Nivel de investigación</b> .....	19
3.4.	<b>Diseño de investigación</b> .....	20
3.4.1.	<i>Según la manipulación o no de la variable independiente</i> .....	23
3.4.1.1.	<i>Variables independientes</i> .....	23
3.4.2.	<i>Según las intervenciones en el trabajo de campo</i> .....	23
3.5.	<b>Tipo de estudio</b> .....	24
3.6.	<b>Población y planificación. Selección y cálculo del tamaño de la muestra</b> .....	25
3.6.1.	<i>Unidad de análisis</i> .....	25
3.6.2.	<i>Población de estudio</i> .....	25
3.6.3.	<i>Tamaño de muestra</i> .....	25
3.7.	<b>Métodos, técnicas e instrumentos de investigación</b> .....	25
3.7.1.	<i>Trituración de la fibra</i> .....	25
3.7.2.	<i>Hidrólisis de la fibra de totora</i> .....	26
3.7.3.	<i>Síntesis de magnetita</i> .....	26

3.7.4.	<i>Determinación de concentración de cromo III mediante la oxidación a cromo VI</i>	27
3.7.5.	<i>Caracterización de aguas residuales de los procesos de curtiembre</i>	28
3.7.6.	<i>Método de adsorción mediante columnas de lecho fijo</i>	29
3.7.6.1.	<i>Modelos isotérmicos de adsorción</i>	30

## CAPÍTULO IV

4.	<b>MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS</b>	32
4.1.	<b>Resultados de la trituración e hidrolización de la totora</b>	32
4.2.	<b>Resultados de la síntesis del composito Schoenoplectus californicus magnética</b>	32
4.2.1.	<i>Resultados de microscopía óptica de la fibra de totora, fibra hidrolizada y composito magnético</i>	34
4.3.	<b>Resultados de caracterización de la fibra de totora, hidrolizada y magnética</b>	36
4.3.1.	<i>Resultados de análisis FT-IR de la fibra de Totora</i>	36
4.3.2.	<i>Resultados de análisis FT-IR de la fibra de Totora Hidrolizada</i>	37
4.3.3.	<i>Resultados de análisis FT-IR del composito magnético</i>	39
4.3.4.	<i>Resultados de análisis SEM de la fibra de totora</i>	40
4.3.5.	<i>Resultados de análisis SEM de la fibra de totora hidrolizada</i>	41
4.3.6.	<i>Resultados de análisis SEM de composito magnético</i>	41
4.3.7.	<i>Resultados de análisis EDX de la fibra de totora</i>	42
4.3.8.	<i>Resultados de análisis EDX de la fibra hidrolizada</i>	43
4.3.9.	<i>Resultados de análisis EDX de composito magnético</i>	44
4.4.	<b>Resultados de la concentración de cromo III mediante la oxidación a cromo VI</b>	44
4.4.1.	<i>Cálculo de contenido de óxido de cromo</i>	44
4.4.2.	<i>Cálculo de concentración de piquelado</i>	45
4.4.3.	<i>Cálculo de concentración de curtido</i>	45
4.4.4.	<i>Cálculo de concentración de recurtido</i>	45
4.5.	<b>Resultados de la adsorción para determinación de la concentración de cromo</b>	47
4.5.1.	<i>Resultados de la adsorción a la primera altura</i>	48
4.5.2.	<i>Resultados de la adsorción a la Segunda Altura</i>	48
4.5.3.	<i>Resultados de la adsorción a la tercera altura</i>	49
4.6.	<b>Modelado de las curvas de ruptura del lecho</b>	50

4.7.	Curvas de rupturas a diferentes alturas.....	52
4.8.	Eficiencia de la remoción de cromo .....	54
4.9.	Validación del experimento para disminuir las cantidades de cromo III de aguas residuales .....	55
4.10.	Comparación de análisis fisicoquímico de agua residual del proceso de piquelado antes y después del tratamiento.....	56
4.11.	Discusión de resultados .....	57

## **CAPÍTULO V**

5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	60
5.1.	Conclusiones.....	60
5.2.	Recomendaciones.....	62

## **BIBLIOGRAFÍA**

## **ANEXOS**

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2-1:</b> Referencias bibliográficas antecedentes a la investigación. ....	8
<b>Tabla 2-2:</b> Detalles de los modelos de adsorción en columna. ....	14
<b>Tabla 3-1:</b> Porcentaje de totora sintetizada. ....	21
<b>Tabla 3-2:</b> Porcentaje de totora sintetizada en cada altura. ....	21
<b>Tabla 3-3:</b> Matriz de datos DCA para análisis ANOVA. ....	23
<b>Tabla 3-4:</b> Reducción de la materia prima para sus posteriores tratamientos. ....	25
<b>Tabla 3-5:</b> Método para la realización de la hidrólisis de la materia prima. ....	26
<b>Tabla 3-6:</b> Método para obtener fibra magnética. ....	26
<b>Tabla 3-7:</b> Determinación de contenido de óxido de cromo en agua residual. ....	27
<b>Tabla 3-8:</b> Determinación de pruebas Físicoquímico. ....	28
<b>Tabla 3-9:</b> Datos de material en cada columna a diferente altura. ....	29
<b>Tabla 3-10:</b> Obtención de muestras para medir la concentración de cromo III. ....	31
<b>Tabla 4-1:</b> Datos de las frecuencias de adsorción de la fibra de Totora. ....	36
<b>Tabla 4-2:</b> Datos de las frecuencias de adsorción de la fibra de totora hidrolizada. ....	38
<b>Tabla 4-3:</b> Datos de las frecuencias de adsorción del composito magnético. ....	39
<b>Tabla 4-4:</b> Datos de la composición de la fibra triturada mediante la prueba EDX. ....	42
<b>Tabla 4-5:</b> Datos de la composición de la fibra hidrolizada mediante la prueba EDX. ....	43
<b>Tabla 4-6:</b> Datos de la composición del composito magnético mediante la prueba EDX. ....	44
<b>Tabla 4-7:</b> Concentraciones de cromo en cada proceso. ....	46
<b>Tabla 4-8:</b> Análisis físicoquímico de los procesos de la curtiembre. ....	46
<b>Tabla 4-9:</b> Volumen de tiosulfato de sodio (ml) ....	48
<b>Tabla 4-10:</b> Datos obtenidos a la altura de 9cm. ....	48
<b>Tabla 4-11:</b> Volumen de tiosulfato de sodio (ml) ....	48
<b>Tabla 4-12:</b> Datos obtenidos a la Altura de 6cm. ....	49
<b>Tabla 4-13:</b> Volumen de tiosulfato de sodio (ml). ....	49
<b>Tabla 4-14:</b> Datos obtenidos a la altura de 3cm. ....	49
<b>Tabla 4-15:</b> Parámetros de los modelos usando regresión no lineal. ....	51
<b>Tabla 4-16:</b> Concentraciones de cromo III. ....	55
<b>Tabla 4-17:</b> Obtención de valores para análisis de varianza. ....	55
<b>Tabla 4-18:</b> Datos antes y después de la adsorción. ....	56

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 3-1:</b>	Diagrama del Diseño experimental .....	20
<b>Ilustración 3-2:</b>	Diseño experimental.....	22
<b>Ilustración 4-1:</b>	Inicio Síntesis composito-FA.B Composito finalizado .....	32
<b>Ilustración 4-2:</b>	Composito seco .....	33
<b>Ilustración 4-3:</b>	Estructura de la fibra de totora bajo el microscopio óptico.....	34
<b>Ilustración 4-4:</b>	Estructura de la fibra de totora hidrolizada bajo .....	34
<b>Ilustración 4-5:</b>	Estructura del composito magnético bajo .....	35
<b>Ilustración 4-6:</b>	Picos de la fibra de totora en (FT-IR).....	36
<b>Ilustración 4-7:</b>	Pico de la fibra de Totora hidrolizada en (FT-IR).....	37
<b>Ilustración 4-8:</b>	Picos del composito magnético en (FT-IR).....	39
<b>Ilustración 4-9:</b>	Fibra de totora en (SEM).....	40
<b>Ilustración 4-10:</b>	Fibra de totora hidrolizada en (SEM).....	41
<b>Ilustración 4-11:</b>	Composito magnético en (SEM) .....	41
<b>Ilustración 4-12:</b>	Fibra de totora en (EDX).....	42
<b>Ilustración 4-13:</b>	Fibra de totora hidrolizada en (EDX).....	43
<b>Ilustración 4-14:</b>	Composito magnético en (EDX) .....	44
<b>Ilustración 4-15:</b>	Esquema de filtros de lecho fijo.....	47
<b>Ilustración 4-16:</b>	Curva de ruptura utilizando Thomas y BDST altura de 9cm .....	50
<b>Ilustración 4-17:</b>	Curva de ruptura utilizando Thomas y BDST altura de 6 cm .....	50
<b>Ilustración 4-18:</b>	Curva de ruptura utilizando Thomas y BDST altura de 3 cm .....	51
<b>Ilustración 4-19:</b>	Curvas de ruptura empaquetadas a diferentes alturas. Primera repetición. ..	52
<b>Ilustración 4-20:</b>	Curvas de ruptura empaquetadas a diferentes alturas. Segunda repetición. .	52
<b>Ilustración 4-21:</b>	Curvas de ruptura empaquetadas a diferentes alturas. Tercera repetición. ..	53
<b>Ilustración 4-22:</b>	Comparación de Concentración final de cromo III .....	54

## ÍNDICE DE ANEXOS

**ANEXO A:** TRITURACIÓN Y TAMIZADO DE LA MATERIA PRIMA

**ANEXO B:** HIDRÓLISIS DE LA FIBRA DE TOTORA

**ANEXO C:** LAVADO DE LA FIBRA

**ANEXO D:** SÍNTESIS DEL COMPOSITO SCHOENOPLECTUS CALIFORNICUS -  
MAGNÉTICA

**ANEXO E:** CARACTERIZACIÓN DEL COMPOSITO DE: IR, EDX, SEM

**ANEXO F:** CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL DE LA EMPRESA DE  
CURTIEMBRE

**ANEXO G:** DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE CROMO III

**ANEXO H:** ADSORCIÓN DEL AGUA RESIDUAL EN LA COLUMNA DE ADSORCIÓN

## RESUMEN

En la actualidad la industria de curtiembre presenta grandes problemas, principalmente en aspectos medio ambientales y sociales por tal motivo, no solamente es necesario la optimización de sus procesos, sino también en la tecnología de fabricación y el control en los impactos ambientales. Es por ello que el objetivo del presente trabajo fue determinar el efecto de la altura de empaquetamiento de un compuesto magnético en la remoción de cromo mediante una columna de adsorción. Utilizando una metodología con un enfoque cualitativo y cuantitativo, donde se cuantificó la cantidad de cromo III presente en las aguas residuales y se estableció la eficiencia del compuesto magnético en términos de capacidad de adsorción. También se consideraron aspectos cualitativos como la visión principal del proyecto de minimizar componentes contaminantes, el impacto positivo en el medio ambiente y la mejora de los costos operativos, se utilizó un diseño de tipo exploratoria, ya que se centra en el análisis, investigación e interpretación de diferentes aspectos y datos que se obtuvieron en los laboratorios de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH. Obteniendo como resultado un compuesto sintetizado de magnetita junto con la fibra de totora utilizado como compuesto para la retención de cromo III en la industria de curtiembre, además el proceso de piquelado presentó la mayor concentración de óxido de cromo, con un valor de 2258.46 mg/L. Se observó que la columna de 9 cm demostró una mayor eficiencia en la retención del Cromo III. Concluyendo que la altura de empaquetamiento de un compuesto magnético influye significativamente en la remoción de cromo del agua residual, destacando la eficacia del compuesto en este proceso de tratamiento. Recomendando emplear el compuesto magnético de totora como un material bioadsorbente para eliminar partículas de  $Cr^{+3}$  presentes en los tratamientos de las curtiembres.

**Palabras clave:** <METALES PESADOS >, < CROMO III>, <COMPOSITO MAGNÉTICO >, <TOTORA>, <EFICIENCIA >, <COLUMNA >.



1017-DBRA-UPT-2024

## ABSTRACT

At present, the tannery industry presents great problems, mainly in environmental and social aspects. For this reason, it is not only necessary to optimize its processes, but also in the manufacturing technology and the control of environmental impacts. For this reason, the objective of the present graduation work was to determine the effect of the packing height of a magnetic composite on the removal of chromium by means of an adsorption column. Using a methodology with a qualitative and quantitative approach, where the amount of chromium III present in the wastewater was quantified and the efficiency of the magnetic composites in terms of adsorption capacity was established. Qualitative aspects were also considered, such as the main vision of the project to minimize polluting components, the positive impact on the environment and the improvement of operating costs. An exploratory type design was used, since it focuses on the analysis, research and interpretation of different aspects and data obtained in the laboratories of the Faculty of Sciences of ESPOCH. As a result, a compound synthesized from magnetite together with cattail fiber was obtained and used as a composite for the retention of chromium III in the tanning industry. In addition, the pickling process showed the highest concentration of chromium oxide, with a value of 2258.46 mg/L. It was observed that the 9 cm column showed a higher efficiency in the retention of chromium III. Concluding that the packing height of a magnetic composite significantly influences the removal of chromium from wastewater, highlighting the efficiency of the composite in this treatment process. Recommending to employ the cattail magnetic composite as a bio adsorbent material to remove Cr<sup>(+3)</sup> particles present in tannery treatments.

**Key words:** <HEAVY METALS >, <CHROME III>, <MAGNETIC COMPOSITE >, <TOTORA>, <EFFICIENCY >, <COLUMN >.



Abg. Ana Gabriela Reinoso. Mgs.

Ced: 1103696132



## INTRODUCCIÓN

El proceso de empaquetamiento de un composito magnético en la eliminación de cromo a través de una columna de adsorción es esencial para encontrar soluciones efectivas en la depuración de efluentes industriales, especialmente en sectores como las curtiembres, donde la presencia de cromo III representa una preocupación ambiental significativa.

Los compuestos magnéticos, particularmente aquellos que se basan en materiales orgánicos como la totora, ofrecen una serie de ventajas clave en este escenario. La totora, derivada de plantas acuáticas, exhibe propiedades únicas que la convierten en un material adsorbente ideal para retener cromo III.

La totora es altamente porosa, lo que significa que cuenta con una extensa área superficial disponible para la adsorción de contaminantes, facilitando la captura eficaz de iones de cromo III en solución. Además, su estructura porosa permite un fácil acceso de los contaminantes a los sitios activos de adsorción, mejorando la eficiencia del proceso.

Otro beneficio importante del material es su capacidad para ser funcionalizadas con grupos químicos específicos que aumentan su afinidad por el óxido de cromo. Esto se logra mediante tratamientos químicos que modifican la superficie de la totora, lo que resulta en una mayor selectividad hacia el metal objetivo y, por ende, una mayor eficacia en la remoción del cromo.

La inclusión de propiedades magnéticas en el composito también proporciona una ventaja adicional al permitir la manipulación del material adsorbente mediante la aplicación de un campo magnético externo. Esto facilita la recuperación del composito una vez que ha alcanzado su capacidad máxima de adsorción, simplificando así el proceso de tratamiento de efluentes y reduciendo los costos asociados con la eliminación de residuos.

El efecto de empaquetamiento de un composito magnético basado en totora en la eliminación de cromo a través de una columna de adsorción ofrece una solución prometedora y eficiente para abordar los desafíos ambientales relacionados con este metal pesado en sectores industriales como las curtiembres. La combinación de las propiedades únicas de la totora como material adsorbente con la capacidad magnética del composito proporciona una estrategia efectiva y sostenible para la depuración de efluentes industriales contaminados con óxido de cromo.

## CAPITULO I

### 1. PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

#### 1.1. Planteamiento del problema

En la actualidad la industria de curtiembre presenta grandes problemas, principalmente en aspectos medio ambientales y sociales por tal motivo, no solamente es necesario la optimización de sus procesos, sino también en la tecnología de fabricación y el control en los impactos ambientales que conlleven a un problema para la sociedad.

Las curtiembres En la actualidad la industria de curtiembre presenta grandes problemas, principalmente en aspectos medio ambientales y sociales por tal motivo, no solamente es necesario la optimización de sus procesos, sino también en la tecnología de fabricación y el control en los impactos ambientales que conlleven a un problema para la sociedad.

. (Benítez et al., 2016, pág.458).

Por otro lado, muchos de los residuos sólidos contienen cromo, por lo que su gestión debe ser controlada con los tratamientos adecuados en los cuales utilizan a manera de insumo en sus procesos productivos metales pesados como el cromo, el plomo, el mercurio, el cadmio y el zinc entre otros; dichos compuestos perjudican la salud del ser humano y el medio ambiente por ende se consideran peligrosos y se evita su vertimiento hacia las fuentes hídricas (Buñay, 2022, pág.5).

Para realizar la remoción de metales presentes en fuentes hídricas existen diferentes métodos tales como: ultrafiltración, osmosis inversa y electrodiálisis, siendo procesos poco viables dado su nivel de efectividad y su alto costo (Bernal et al., 2022, pág.15).

Los metales pesados tales como el cromo se consideran un grave problema para el medio ambiente debido a que no son biodegradables ya que al estar a bajas concentraciones provocan efectos muy tóxicos para animales, plantas y seres humanos. Se remueven normalmente por precipitación convirtiéndolos en hidróxidos, pero por medio de este método sigue causando muchos problemas ambientales por su reactividad y corrosividad (Valladares et al., 2017, pág.58).

Para estudios de nuevos materiales renovables existen aplicaciones actuales de tratamiento residuales que tienen una elevada disponibilidad para ser beneficiosos como soportes que trabajen como filtro natural con propiedades adsorbentes y alta porosidad, además la compleja

composición de las aguas residuales de producción en actividades industriales demanda una utilización de métodos necesarios para adsorber con mayor eficiencia permitiendo el fácil manejo de los efluentes (Díaz et al., 2021, pág.48).

La investigación propuesta surge en el Grupo de Investigación en Materiales Avanzados (GIMA) con el objetivo de abordar el desafío de reducir la presencia de metales pesados, como el cromo III, en las industrias de curtiembre. Para lograr esto, se propone el uso de un composito magnético en una columna de adsorción. Sin embargo, es fundamental determinar la altura óptima del empaquetamiento para garantizar que la columna pueda retener la mayor cantidad posible de este metal pesado.

Al comprender este efecto, se podrán desarrollar estrategias más eficientes para el tratamiento de las aguas residuales de las industrias de curtiembre, permitiendo una reducción efectiva de los metales pesados y contribuyendo de forma oportuna la salud y bienestar tanto del ser humano como del medio ambiente.

## **1.2. Limitaciones y Delimitaciones**

### **1.2.1. Limitaciones**

- La efectividad de la remoción de cromo mediante el composito magnético puede variar en diferentes condiciones al cambiar la altura del lecho fijo.
- La síntesis del composito magnético podría obtener o no composito con nanopartículas magnéticas.

### **1.2.2. Delimitaciones**

- El estudio se realizará utilizando una columna de adsorción como método de remoción de cromo. No se consideran otros métodos de tratamiento de aguas residuales.
- La tesis se centrará específicamente en la remoción del cromo en su forma trivalente (cromo III)
- No se abordarán otras formas de cromo, como el cromo hexavalente (cromo VI).

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. *Objetivo General***

- Determinar el efecto de la altura de empaquetamiento de un composito magnético en la remoción de cromo mediante una columna de adsorción.

#### **1.3.2. *Objetivos Específicos***

- Sintetizar el composito Schoenoplectus californicus -magnética mediante métodos de química húmeda para evaluar su adsorción en sistemas de columna.
- Caracterizar un composito Schoenoplectus californicus mediante espectroscopia IR, SEM y EDX para corroborar el soporte de las partículas magnéticas.
- Evaluar la capacidad de adsorción del composito mediante el sistema de columnas de lecho fijo a través de la caracterización del agua de entrada y salida por la torre para determinar su eficiencia.
- Determinar las diferentes alturas de las variables mediante un análisis estadístico ANOVA.

### **1.4. Justificación**

Ante la gran problemática de contaminantes presentes en el agua como el cromo y al no tener una alternativa viable que sea sostenible y sustentable con el medio ambiente, nace la necesidad de generar nuevas tecnologías que permitan la eliminación de metales pesados, mediante filtros que absorban todos estos metales que al llegar a altas concentraciones a los afluentes se convierten en un riesgo ambiental porque pone en riesgo sistemas acuáticos provocando daños colaterales y produciendo cambios bioquímicos fisiológicos en los ecosistemas.

La adsorción es un método que remueve cromo, el adsorbente más utilizado y estudiado suele ser el carbón activado, sin embargo, su uso puede resultar no conveniente por su alto costo de producción. La tendencia entonces es encontrar un material absorbente que resulte económico y que sus porcentajes de remoción sean altos.

Por esta razón se propone mediante la utilización del composito Schoenoplectus californicus-Magnetita el cual al ser un compuesto orgánico y libre de contaminantes resulta como una alternativa favorable para emplear en el tratamiento de aguas contaminadas por adsorción en procesos de la industria de curtiembre a pequeña escala desarrollada en Ecuador, el uso de este

composito es recomendado por su alta eficiencia como absorbente también por ser altamente magnética y la facilidad de la disposición de este material por su bajo costo y fácil manejo en los equipos del laboratorio.

El proyecto pretende mediante esta investigación determinar la altura de empaquetamiento de un composito magnético en la remoción de cromo mediante una columna de adsorción utilizando material adsorbente como los óxidos de hierro, estas partículas retienen los metales pesados como el cromo y los precipitan haciendo más fácil su posterior eliminación.

### **1.5. Hipótesis**

A mayor altura de empaquetamiento en la columna de adsorción con composito magnético, se espera un incremento en la eficiencia de remoción de cromo, debido a una mayor superficie de contacto que facilita la interacción entre el composito y los iones de cromo en solución.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO CONCEPTUAL Y TEÓRICO

#### 2.1. Marco conceptual

##### 2.1.1. *Antecedentes de investigación*

En la época actual, se ha suscitado una enorme inquietud a escala global debido al notable aumento en los niveles de contaminación de los efluentes industriales causados por la presencia de metales pesados como el cromo, mercurio, cadmio, níquel y plomo. Estas sustancias tóxicas pueden persistir en el ambiente de forma indefinida comprometiendo el equilibrio y bienestar de la flora y fauna existente en el ecosistema además de ocasionar problemas de salud a residentes de las comunidades aledañas por permitir la acumulación de estas sustancias (Tejada et al., 2015, pág.109).

Los metales pesados son altamente relevantes como indicadores de la calidad ambiental de todo el flujo de agua, debido a su toxicidad y capacidad de acumularse en los organismos. Una de las macrófitas más reconocidas y extendidas en nuestro entorno es la totora (*Scirpuscalifornicus*), que forma parte de diversas plantas fitodepuradoras utilizadas en sistemas alternativos para el tratamiento de aguas residuales.

Para abordar esta problemática y satisfacer las necesidades de saneamiento en estos sectores socioeconómicos cruciales, se ha desarrollado en Canadá un proceso de biofiltración por percolación utilizando material filtrante orgánico. Este proceso se basa en la capacidad de ciertos medios orgánicos para actuar como resinas naturales, capturando diversas sustancias contaminantes a través de mecanismos de adsorción/absorción y promoviendo el crecimiento de microorganismos capaces de biodegradar los contaminantes retenidos. Debido a su naturaleza descentralizada, esta tecnología se ha vuelto de interés en muchas áreas rurales y semiurbanas en México (Garzón et al., 2012, pág.153).

También se ha realizado una investigación de la utilización de materiales de bajo costo obtenidos a partir de diversas fuentes biológicas, como flora microbiana, algas y residuos agroindustriales, ha buscado reemplazar los métodos convencionales para eliminar contaminantes, especialmente los metales pesados, que representan una alta toxicidad y dificultades en su eliminación. Este estudio se centra en la adsorción como una alternativa para la remoción de contaminantes en

soluciones y explora las biomásas comúnmente utilizadas en estos procesos, así como las modificaciones realizadas para mejorar su eficiencia en la adsorción (Tejada et al., 2015, pàg.109).

La utilización del método de adsorción para remover contaminantes mediante biomasa residual en solución acuosa es adaptable a procesos de descomposición que prevé problemas en la generación de químicos en lodos y generando alternativas a materiales considerados desechos. Además, se identificaron factores que influyen en el proceso como la temperatura, concentración y pH (Tejada et al., 2015, pàg.109).

En el contexto de la investigación, se han llevado a cabo pruebas a escala de laboratorio utilizando materiales orgánicos locales para tratar efluentes urbanos e industriales. Con base en los resultados positivos, se ha instalado un sistema a escala real. El propósito de este estudio es presentar los logros más importantes de esta tecnología a escala real y analizar su impacto en sectores urbanos (pequeños municipios, zonas rurales), agropecuarios (granjas porcinas) y agroalimentarios (rastros avícolas) tanto en Canadá como en México (Garzón et al., 2012, pàg.153).

Según (Lara et al., 2017, pàg.114) se realizó una evaluación del rendimiento de la cáscara de cacao como material con capacidad de adsorción de metales pesados como el cadmio y plomo que están presentes en una solución acuosa, empleando una columna de lecho fijo de forma continua.

La implementación de experimento sirvió para conocer cómo la altura del lecho afecta la eliminación de estos contaminantes, mientras se mantenían constantes parámetros como el pH, la velocidad del flujo y la concentración inicial de los metales. Los resultados de las pruebas de adsorción mostraron una remoción del 91,32% para el plomo y del 87,80% para el cadmio después de 4,5 horas. Las concentraciones de los iones metálicos en la solución acuosa fueron medidas mediante adsorción atómica. Se evaluó mediante ciertos modelos como el de Adams-Bohart, Thomas, BDST y Dosis- Respuesta para obtener los parámetros cinéticos y la predicción del comportamiento de la comuna de forma dinámica.

La bioadsorción es un proceso fisicoquímico que engloba los fenómenos de adsorción y absorción de moléculas e iones. Este enfoque no convencional se centra en eliminar metales pesados de aguas residuales provenientes de la industria. Para lograr esto, se utilizan materiales biológicos (vivos o muertos), como algas, hongos, bacterias, cáscaras de frutas, productos agrícolas y ciertos biopolímeros que funcionan como sorbentes. Estos materiales son abundantes y de bajo costo en la naturaleza, y su transformación en biosorbentes no implica un proceso costoso (Tejada et al., 2015, pàg.109).

**Tabla 2-1:** Referencias bibliográficas antecedentes a la investigación.

Autor	año	Título	Tipo	Enlace
Silva, M. J., & Salinas Morales, D.	2022	La contaminación proveniente de la industria curtiembre, una aproximación a la realidad ecuatoriana.	Artículo científico	<a href="https://doi.org/10.35290/rcui.v9n1.2022.427">https://doi.org/10.35290/rcui.v9n1.2022.427</a>
Lara-Mendoza, I. M	2022	Evaluación del crecimiento de la seta <i>Pleurotus ostreatus</i> sobre residuos de totora ( <i>Schoenoplectus californicus</i> )	Tesis	<a href="http://dspace.espo.ch.edu.ec/handle/123456789/17619">http://dspace.espo.ch.edu.ec/handle/123456789/17619</a>
Cuadrado Campo, W. J., Vicuña Orihuela, C. E., & Torres Gutiérrez, E. R	2020	Evaluación de la planta <i>Scirpus californicus</i> (Totora) en la eficiencia de remoción de hierro en un prototipo de humedal construido de flujo superficial	Artículo científico	<a href="https://doi.org/10.26490/uncp.prospectivauniversitaria.2014.11.6">https://doi.org/10.26490/uncp.prospectivauniversitaria.2014.11.6</a>
Patel, H.	2019	Estudio de adsorción en columna de lecho fijo: una revisión exhaustiva	Artículo científico	<a href="https://doi.org/10.1007/s13201-019-0927-7">https://doi.org/10.1007/s13201-019-0927-7</a>
Romero-Cano, L. A.	2018	Preparación y caracterización de materiales adsorbentes a partir de cáscaras de frutas para su uso en la remoción de metales y aplicación a procesos ambientales.	Tesis	<a href="http://hdl.handle.net/10481/49626">http://hdl.handle.net/10481/49626</a>
Torres-Rodríguez, J.	2017	Extracción de ácidos nucleicos usando nanopartículas magnéticas núcleo-coraza.	Tesis	<a href="https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/2035">https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/2035</a>
Lara, José Tejada, Candelaria Villabona, Ángel Arrieta, Alfonso Granados Conde, Clemente	2017	Adsorción de plomo y cadmio en sistema continuo de lecho fijo sobre residuos de cacao	Artículo científico	<a href="http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaion/article/view/5988/6265">http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaion/article/view/5988/6265</a>
Londoño Franco, L. F., Londoño Muñoz, P. T., & Muñoz García, F. G.	2016	Los riesgos De Los metales pesados en la salud humana y animal.	Artículo científico	<a href="https://doi.org/10.18684/bsaa(14)145-153">https://doi.org/10.18684/bsaa(14)145-153</a>
Caviedes Rubio, D. I., Muñoz Calderón, R. A., Perdomo Gualtero, A., Rodríguez Acosta, D., & Sandoval Rojas, I. J.	2015	Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión.	Artículo científico	<a href="https://doi.org/10.25054/22161325.710">https://doi.org/10.25054/22161325.710</a>
Tejada-Tovar, Candelaria Villabona-Ortiz, Ángel Garcés-Jaraba, Luz	2015	Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico	Artículo científico	<a href="https://doi.org/10.22430/22565337.209">https://doi.org/10.22430/22565337.209</a>
Murgueitio, É., & Pilco, W.	2014	Remoción de cromo VI, mediante el uso de hidróxidos dobles laminares con óxidos mixtos (HDL-OM).	Artículo científico	<a href="http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1810634X2015000200008&amp;scrypt=sci_abstract">http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1810634X2015000200008&amp;scrypt=sci_abstract</a>
Pacheco Escalante, E. F., & Soria, J. G.	2014	Comparación de la magnetización de las películas de SnO <sub>2</sub> :Co sobre a zafiro, r-zafiro y SnO <sub>2</sub> puro medidas con el campo magnético aplicado en paralelo y perpendicular al plano.	Tesis	<a href="http://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/744">http://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/744</a>
Rosas, A. C. R. de C.	2013	Recuperación de cromo (III) de efluentes de curtido para control ambiental y optimización del proceso productivo	Tesis	<a href="https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/5123/REY_DE_CVA-STRO_ANA_CROMO_EFLUENTES_CURTIDO.pd">https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/5123/REY_DE_CVA-STRO_ANA_CROMO_EFLUENTES_CURTIDO.pd</a>



				<a href="#">f?sequence=1&amp;isAllowed=y</a>
Leiva-Mas, J., Martínez-Nodal, P. de la C., Esperanza-Pérez, G., Rodríguez-Rico, I. L., & Gordiz-García, C.	2012	Adsorción de hidrocarburos en columnas rellenas con bagazo: una solución sostenible	Artículo científico	<a href="http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223124988005">http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223124988005</a>
Garzón, Marco Buelna, Gerardo Moeller, Gabriela	2012	La biofiltración sobre materiales orgánicos, nueva tecnología sustentable para tratar agua residual en pequeñas comunidades e industrias	Artículo científico	<a href="http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&amp;pid=S2007-24222012000300011">http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&amp;pid=S2007-24222012000300011</a>

Realizado por: González, B., 2024.

## 2.2. Marco teórico

### 2.2.1. Metales pesados

La importancia del análisis de los metales pesados reside en sus características particulares, como su prolongada permanencia en el ambiente, su pronta acumulación en organismos vivos, efectos que a menudo pasan desapercibidos a corto plazo y su elevada toxicidad, entre otros aspectos. Generalmente, la toxicidad de los metales pesados está vinculada a su facilidad para ser captados por seres vivos, su estado de oxidación, su capacidad de enlace con otros compuestos y su interacción con ácidos nucleicos, proteínas y enzimas, que desempeñan funciones celulares y ocasionan alteraciones en tejidos y órganos de organismos vivos. Además, estos metales son empleados como indicadores de contaminación ambiental, dando señales sobre la presencia y grado de contaminación en el entorno (Cuadrado et al., 2020, pág.143).

En los seres humanos, la presencia de metales pesados en el organismo puede ser altamente perjudicial. En concentraciones elevadas, estos elementos pueden causar una serie de efectos negativos, como erupciones en la piel, malestar estomacal (úlceras), dificultades respiratorias, debilitamiento del sistema inmunológico, daño en los riñones y el hígado, hipertensión, alteración del material genético, desarrollo de cáncer, problemas neurológicos e incluso llevar al fallecimiento (Cuadrado et al., 2020, pág.143).

### 2.2.2. Cromo (III)

El cromo se caracteriza como un metal de transición que presenta una textura dura, fragilidad y una apariencia brillante en tonos grises y acerados. Su estado de oxidación más elevado es el sexto, si bien los compuestos en este estado tienden a ser altamente oxidantes. Los estados de oxidación cuarto y quinto son poco comunes, en contraste con los estados más estables, que son el segundo y el tercero (Murgueitio et al., 2014, pág.5).

El cromo (III) puede ocasionar problemas de la piel y afectar negativamente al hígado y los riñones en situaciones prolongadas de exposición. Sin embargo, no hay pruebas sólidas que sugieran que la exposición a compuestos de cromo en esta forma conduzca al desarrollo de cáncer. Las principales vías de exposición incluyen la inhalación, la ingestión y el contacto directo con la piel o las membranas mucosas (Rosas, 2013, pág.8).

La toxicidad del  $Cr^{+3}$  es significativamente menor que la del  $Cr^{+6}$  debido a su limitada capacidad de movilidad dentro del cuerpo. Se calcula que los iones de  $Cr^{+3}$ , tienen una velocidad de entrada en las células que es tres órdenes de magnitud más lenta que la de los iones de  $Cr^{+6}$ , ya que su ingreso depende únicamente de la difusión pasiva (Rosas, 2013, pág.11).

### **2.2.3. Adsorción**

Según (Patel, 2019, p.12) la "adsorción" fue propuesta inicialmente por Bois-Reymond, pero su divulgación fue llevada a cabo por Kayser. Este proceso se define como la acumulación progresiva de un compuesto específico en la interfaz de dos fases. Estos compuestos particulares son transportados desde una fase hacia la otra y posteriormente se adhieren a la superficie. Este fenómeno es considerado de naturaleza compleja y está influenciado principalmente por la química superficial o la composición del sorbente, el sorbato y las condiciones presentes entre las dos fases. La adsorción funciona como un método altamente rentable y eficaz para el tratamiento de aguas o aguas residuales. Por ende, ha sido ampliamente empleado para la eliminación de solutos y productos químicos perjudiciales del entorno. Se destaca por requerir una inversión inicial y un espacio mínimo, contar con un diseño sencillo y carecer de efectos tóxicos adicionales. Además, exhibe una notable capacidad para eliminar componentes de residuos orgánicos.

La adsorción es un fenómeno mediante el cual las moléculas o átomos de una fase se introducen en la otra, dando lugar a la formación de una solución (por ejemplo, como ocurre con la adsorción del oxígeno en el agua). El término "sorción", que abarca tanto la adsorción como la absorción, es una manera más general de describir el proceso en el que un componente se transfiere de una fase para acumularse en otra, especialmente cuando esta segunda fase es un sólido. En la actualidad, uno de los usos más significativos de la adsorción radica en la eliminación de compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en aguas potables y en las aguas residuales tanto municipales como industriales (Leiva et al., 2012, pág.36).

La adsorción implica la concentración o recolección de elementos en una superficie o zona de unión. Este fenómeno puede darse en la zona de unión entre dos fases diferentes, como en un

sistema de líquido a líquido, gas a sólido o líquido a sólido. Este último caso es crucial en la depuración de aguas residuales. La sustancia que se busca concentrar o capturar se conoce como adsorbato, mientras que la otra fase que lo recoge es el adsorbente (Leiva et al., 2012, pág.37).

#### **2.2.4. Bioadsorción**

La bioadsorción implica un procedimiento que facilita la captura pasiva o activa de iones metálicos, gracias a la capacidad de varias biomásas, tanto vivas como inactivas, para unir y acumular estos contaminantes mediante diversos mecanismos. Esta técnica se destaca como una opción que llama la atención en la eliminación de iones de metales pesados presentes en los desechos industriales. No solo logra una eliminación efectiva, sino que también proporciona un enfoque de tratamiento para los residuos agrícolas que anteriormente carecían de utilidad. Además, estos materiales biosorbentes son económicos y de fácil adquisición (Tejada et al., 2015, pág.111).

#### **2.2.5. Columnas de adsorción**

El empleo de las columnas de adsorción comienza con pruebas en un entorno de laboratorio que se asemejen lo máximo posible a las condiciones industriales anticipadas. Tanto las pruebas de la columna como el proceso de diseño se agilizan mediante el uso de un método de cálculo que se basa principalmente en la duración operativa de la columna (Leiva et al., 2012, pág.40).

Diversas características prácticas desempeñan un papel fundamental en la operación de una columna de adsorción mediante el conocimiento y la modelización de la dinámica de la adsorción. Aspectos como la capacidad de sorción, la vida útil operativa, el tiempo de regeneración y la capacidad de prever el tiempo necesario son de gran importancia. Además, estos modelos proporcionan conclusiones detalladas sobre el mecanismo del proceso. La columna de adsorción enfrenta desafíos como la dispersión axial, la resistencia de la película externa y la difusión dentro de las partículas (Patel, 2019, pág.7).

A medida que el agua fluye a través de la columna, el contaminante susceptible de ser adsorbido es progresivamente eliminado, purificando el líquido conforme atraviesa la columna. Los análisis de adsorción en situaciones estáticas se complementan habitualmente con estudios de la velocidad de adsorción para establecer la resistencia a la transferencia de masa externa y el coeficiente de difusión efectivo, además de investigaciones sobre la adsorción en columnas. A partir de estos últimos se deducen los requisitos de dimensiones del sistema, tiempo de contacto y velocidad de utilización del material adsorbente (Leiva et al., 2012, pág.39).

### **2.2.6. Modelos de adsorción**

Las ecuaciones matemáticas para la adsorción en columnas de lecho fijo se basan en consideraciones de dispersión axial, transferencia de masa en la superficie externa, difusión dentro de las partículas e isothermas no lineales (Patel, 2019, pág.10).

De tal forma se han desarrollado diversos modelos matemáticos para evaluar la eficacia y aplicabilidad de los sistemas de columna en operaciones a gran escala. Entre los más utilizados para analizar el comportamiento del sistema adsorbente-adsorbato en la columna se encuentran el tiempo de servicio de profundidad de lecho de Thomas, el modelo de Adams y Bohart, el modelo Yoon-Nelson, el modelo Clark, el modelo Wolborska y la versión modificada del modelo dosis-respuesta. El modelo más ampliamente empleado en los estudios de columna es el modelo de Thomas (TM) (Patel, 2019, pág.11).

#### **2.2.6.1. Modelo de Thomas (TM)**

El modelo de Thomas permite determinar la concentración máxima de adsorbato en la fase sólida del adsorbente y la constante de velocidad, utilizando datos obtenidos de estudios continuos en la columna. Este modelo se desarrolla asumiendo una cinética de adsorción-desorción de Langmuir, donde las fuerzas impulsoras de velocidad siguen una reacción reversible de segundo orden y no hay dispersión axial (Patel, 2019, pág.10).

#### **2.2.6.2. Modelo de tiempo de servicio de profundidad de lecho de Thomas (BDST)**

Ley de tasas en un método fundamentado en un enfoque químico propuesto por Bohart y Adams. La base de este modelo radica en que el proceso de equilibrio no ocurre de inmediato dentro del lecho, lo que significa que la velocidad de absorción está directamente vinculada con la fracción restante de capacidad de absorción presente en el medio. Este modelo se construye a partir de la relación entre la profundidad del lecho y el tiempo de servicio, expresados en términos de las concentraciones del proceso y los parámetros de adsorción. La premisa subyacente en este modelo sostiene que la velocidad de adsorción es sostenida por la reacción en la superficie entre el adsorbato y la capacidad no utilizada del adsorbente. Los valores de tiempo de penetración obtenidos en este estudio para diversas alturas de lecho se incorporaron en el modelo BDST. En consecuencia, se da preferencia a la cantidad de adsorbente en lugar de la altura del lecho (Patel, 2019, pág.10).

#### 2.2.6.3. *Modelo Bohart-Adams (ABM)*

Dos científicos, específicamente Bohart y Adams, realizaron una investigación sobre la ecuación que relaciona la fracción de concentración en el tiempo ( $C_t/C_0$ ) en un sistema en continua operación, y esta ecuación se denomina modelo Adam-Bohart (ABM). Fundamentalmente, Adam y Bohart llevaron a cabo investigaciones innovadoras empleando un sistema de adsorción de gas-carbón y, a partir de ese momento, su ecuación puede ser aplicable a otros sistemas de adsorción en operación continua. Este modelo postuló que la velocidad de adsorción está influenciada por la concentración de las especies que están siendo adsorbidas y la capacidad residual de adsorción (Patel, 2019, pág.10).

#### 2.2.6.4. *Modelo de Yoon-Nelson (YNM)*

Es una hipótesis teórica sencilla que no se enfoca en las características del adsorbato, la naturaleza del adsorbente ni las propiedades físicas del lecho de adsorción. A este modelo se le atribuye una suposición plausible, la cual establece que la disminución en la velocidad de adsorción está en relación directa con la adsorción del adsorbato y la penetración en el adsorbente (Patel, 2019, pág.10).

#### 2.2.6.5. *Modelo de Clark (CM)*

El científico conocido como Clark propuso un modelo para describir las curvas de progreso, basándose en la idea de que:

- la adsorción en una columna sigue un proceso de transferencia de masa que involucra una combinación de la isoterma de Freundlich.
- el comportamiento del flujo en la columna se asemeja a un movimiento de pistón.

Empleando las leyes de transferencia de masa y omitiendo el fenómeno de dispersión, Clark resolvió el conjunto de ecuaciones relacionadas con la transferencia de masa (Patel, 2019, pág.10).

#### 2.2.6.6. *Modelo Wolborska (WM)*

Wolborska hizo referencia a la relación que explica la dispersión de la concentración dentro de un lecho, específicamente en el intervalo de baja concentración de la curva de progreso (Patel, 2019, p.10).

### 2.2.6.7. Modelo dosis modificado (MDRM)

Un modelo numérico simplificado adicionalmente empleado para explicar los resultados de adsorción en una columna de lecho fijo es el modelo de respuesta a la dosis modificado (MDRM). En esencia, este modelo reduce el error que se obtiene al aplicar el modelo de Thomas, especialmente en intervalos de tiempo más cortos o prolongados en la curva de saturación (Patel, 2019, pág.10).

Diversos investigadores realizan cálculos y hacen referencia a la capacidad de adsorción de cada modelo en diversas configuraciones del proceso, tales como la concentración inicial del adsorbato, la altura del lecho, la tasa de flujo, entre otros factores.

En resumen, las características prácticas clave y los modelos matemáticos mencionados desempeñan un papel crucial en la operación y comprensión de las columnas de adsorción en sistemas adsorbente-adsorbato, proporcionando información valiosa sobre su comportamiento y eficacia (Patel, 2019, pág.10).

**Tabla 2-2:** Detalles de los modelos de adsorción en columna.

Modelos de columna de adsorción	Ecuación lineal	Trama	Parámetros del modelo
Modelo de Thomas (TM)	$\ln \left[ \left( \frac{C_o}{C_t} \right) - 1 \right] = \frac{k_{TH} q_o m}{Q} - \frac{k_{TH} C_o V_{eff}}{Q}$	$\ln \left[ \left( \frac{C_o}{C_t} \right) - 1 \right] vs tiempo$	$k_{TH}$ $q_o$
Modelo de tiempo de servicio de profundidad de lecho de Thomas (BDST)	$t = \frac{N_o}{C_o F} Z - \frac{1}{k_{BDST} C_o} \ln \left( \frac{C_o}{C_t} - 1 \right)$	Altura de la cama versus tiempo	$N_o$ $k_{BDST}$
Modelo Bohart-Adams (ABM)	$\ln \left[ \left( \frac{C_o}{C_t} \right) - 1 \right] = K_{AB} N_o \frac{Z}{u} - K_{AB} C_i t$	$\ln \left[ \left( \frac{C_o}{C_t} \right) - 1 \right] vs tiempo$	$K_{AB}$ $N_o$
Modelo de Yoon-Nelson (YNM)	$\ln \left( \frac{C_t}{C_o - C_t} \right) = K_{YN} t - \tau k_{YN}$ $q_{OYN} = \frac{q_{total}}{X} = \frac{C_o Q_t}{1000X} = \frac{1}{2} C_o \left[ \left( \frac{Q}{1000} \right) X 2r \right]$	$\ln \left( \frac{C_t}{C_o - C_t} \right) vs tiempos$	$K_{YN}$ $T$
Modelo de Clark (CM)	$\frac{C_t}{C_o} = \frac{1}{(1 + A e^{rt})^{n-1}}$	$\frac{C_t}{C_o} vs tiempo$	$A$
Modelo Wolborska (WM)	$\ln \left( \frac{C_t}{C_o} \right) = \frac{\beta C_o^i}{N_o} - \frac{\beta Z}{U}$	$\ln \left( \frac{C_t}{C_o} \right) vs tiempo$	$R$ $B$ $N_o$
Modelo dosis modificado (MDRM)	$\ln \left( \frac{C_t}{C_o - C_t} \right) = \alpha \ln(C_o Q t) - \alpha \ln(q_{m\dot{a}r} m)$	$\ln \left( \frac{C_t}{C_o - C_t} \right) vs \ln(C_o Q t)$	$A$ $B$

**Fuente:** Patel, 2019.

**Realizado por:** González, Bryan, 2024

### **2.2.7. *Totora (Schoenoplectus californicus)***

La totora es una macrófita acuática que se encuentra en aguas poco profundas; no posee hojas y sus tallos alcanzan alturas de 2 a 3 metros. En la contemporaneidad, la totora no es explotada en gran medida, ya que la mayoría de las personas opta por quemarla, lo que conlleva a la contaminación, la extinción de la vida silvestre y algunas especies vegetales (Lara et al., 2017, pág.117).

### **2.2.8. *Características morfológicas y composición química***

Reino:	Plantae
división:	Magnoliophyta
clase:	Magnoligiola
Orden:	Cyperales
Familia:	Ciperácea
Género:	Schoenoplectus
Especie:	Schoenoplectus californicus
Nombre común:	Totora
Altura de la planta:	3,20 a 4,20m.
Espesor:	0,5 a 5,0cm de diámetro
Densidad:	280 tallos aéreos/m <sup>2</sup>
Composición química:	Hemicelulosa: 30.71% x-celulosa 66.79% Lignina 27.8 %

### **2.2.9. *Técnica para el tratamiento en aguas residuales de metales pesados***

La categorización de los métodos para tratar metales pesados en aguas residuales varía según diversos elementos. En este informe, se han agrupado en dos categorías: las técnicas convencionales, que abarcan los métodos usualmente empleados para eliminar estos contaminantes, y las técnicas no convencionales, que engloban procesos innovadores destinados a eliminar metales presentes en las aguas residuales, mayormente de origen industrial (Caviedes et al., 2015, pág.80).

### 2.2.9.1. *Filtración por Membrana*

Esta tecnología presenta elevados niveles de eficacia, requiere un espacio reducido, carece de selectividad y es sencilla de operar; sin embargo, produce una significativa cantidad de lodos que contienen metales. Se aplica en procesos para purificar agua potable, así como en el tratamiento de aguas residuales industriales y, en menor grado, aguas residuales domésticas. Las membranas pueden ser categorizadas según distintos atributos, como el peso molecular de corte, el material de la membrana, el solvente, la solubilidad y permeabilidad junto con la carga de su superficie (Caviedes et al., 2015, pág.80).

### 2.2.9.2. *Nanofiltración*

La nanofiltración constituye un enfoque novedoso en el tratamiento de agua, empleando membranas con poros de dimensión ínfima, generalmente inferiores a 1 nanómetro, y demandando presiones de operación situadas entre 10 y 50 bares. Por consiguiente, las membranas empleadas en la nanofiltración tienen la capacidad de retener moléculas neutras con un peso molecular inferior a 200-300 g/mol. Además, posibilitan el rechazo de iones inorgánicos a través de un mecanismo que se basa en la exclusión por tamaño, combinado con las interacciones electrostáticas entre los iones y la membrana cargada. Se observa un rechazo mayor de iones divalentes en comparación con iones monovalentes (Caviedes et al., 2015, pág.80).

A su vez, la nanofiltración opera a presiones más moderadas, presenta un flujo superior y requiere un menor consumo energético en comparación con la técnica de ósmosis inversa. Dadas estas cualidades, la nanofiltración se erige como una tecnología innovadora y promisoría, con la capacidad de ser extensamente aplicada tanto en el tratamiento de agua potable como en el tratamiento de efluentes industriales (Caviedes et al., 2015, pág.80).

### 2.2.9.3. *Ultrafiltración*

La ultrafiltración es un método de separación selectiva que emplea presiones de hasta 145 psi (10 bares). Este procedimiento se aplica extensamente en el desglose de componentes de la leche y suero, así como en la separación de proteínas. La ultrafiltración se enfoca en concentrar partículas suspendidas y solutos con pesos moleculares superiores a 1000 unidades de masa atómica (umas). Como resultado, el permeado resultante contiene solutos orgánicos de peso molecular reducido y sales (Caviedes et al., 2015, pág.80).



### **2.2.10. Óxido de hierro**

Los compuestos denominados óxidos de hierro surgen de la combinación de hierro y oxígeno. Esta denominación abarca no solo óxidos, sino también hidróxidos y oxihidróxidos que contienen cationes de hierro en estados de valencia divalentes  $Fe^{2+}$  y/o trivalentes  $Fe^{3+}$ , además de aniones hidroxilo  $OH^-$  oxígeno  $O^{2-}$ . En la actualidad, se han identificado un total de dieciséis fases puras del óxido de hierro. En el contexto de las fases de óxido de hierro que comúnmente se obtienen a partir de la síntesis de nanomateriales, se destaca la presencia de la magnetita (Torres, 2017, pág.13).

### **2.2.11. Magnetita ( $Fe_3O_4$ )**

Uno de los materiales magnéticos de uso tecnológico más comunes es la magnetita, que posee la fórmula general  $Fe^{2+} Fe^{3+} O_4$  y se conoce como ferrita cúbica. La magnetita presenta una estructura de tipo espinela inversa, en la que los iones  $Fe^{3+}$  ocupan las posiciones tetraédricas de su disposición cristalina, mientras que los sitios octaédricos contienen una combinación equitativa de iones de  $Fe^{3+}$  y  $Fe^{2+}$ . Esto hace que la magnetita sea termodinámicamente inestable a presiones de oxígeno atmosférico. Los cristales de magnetita sintética generalmente son diminutos (con diámetros inferiores a 100 nm) y, si no están adecuadamente protegidos contra la exposición al oxígeno atmosférico, pueden experimentar oxidación durante o después del proceso de síntesis (Torres, 2017, pág.13).

Se pueden identificar dos métodos fundamentales para la generación de magnetita, los cuales comprenden:

- a) La oxidación parcial de una solución acuosa conteniendo  $Fe^{2+}$  utilizando  $KNO_3$  en un entorno alcalino a una temperatura de  $90^\circ C$ .
- b) La formación de un precipitado a partir de una solución que contiene tanto  $Fe^{2+}$  como  $Fe^{3+}$ , con una proporción  $Fe^{2+} : Fe^{3+}$  en una relación de 1:2.

### **2.2.12. Microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopia de energía dispersa (EDX).**

Esta técnica permite examinar y describir la superficie de los materiales que capturan moléculas. Con una alta precisión y un amplio rango de enfoque, las señales generadas posibilitan la creación de imágenes que muestran la textura de la superficie y cómo están distribuidas las sustancias en la muestra. A través de un detector de energía dispersiva (EDX), es viable recolectar rayos X

emitidos por la muestra y realizar diversos análisis de la composición química e imágenes que indican cómo están repartidos los elementos en la muestra (Romero, 2018, pág.20).

Se puede obtener imágenes que revelan la forma de la superficie y proporcionan datos acerca de las ubicaciones precisas donde ocurre el proceso de captura de moléculas. Se tomaron fotografías de alta resolución de la superficie de todos los materiales capturadores antes y después de llevar a cabo los experimentos de captura de moléculas (Romero, 2018, pág.20).

El procedimiento de Análisis Elemental mediante Energía Dispersa ofrece información sobre la composición química de las partículas. Cuando se expone la muestra a un haz de electrones, se generan rayos X que pueden ser detectados. El espectro de EDX se obtiene capturando los fotones emitidos por la muestra durante un período específico (minutos) y permite identificar y medir los distintos elementos presentes en el material. Esta técnica se aplica en conjunción con microscopios electrónicos de transmisión o de barrido, así como microscopios de rayos X (Pacheco et al, 2014, pág.36).

## **CAPÍTULO III**

### **3. MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1. Enfoque de investigación**

Este proyecto aborda tanto aspectos cuantitativos como cualitativos. Por un lado, se cuantifica la cantidad de cromo trivalente presente en las aguas residuales y se establece la eficiencia del composito magnético en términos de capacidad de adsorción. Por otro lado, se consideran aspectos cualitativos como la visión principal del proyecto de minimizar componentes contaminantes, el impacto positivo en el medio ambiente y la mejora de los costos operativos. Esta combinación de enfoques cuantitativos y cualitativos se convierte en un mixto el cual permite una comprensión profunda del problema y de las soluciones propuestas.

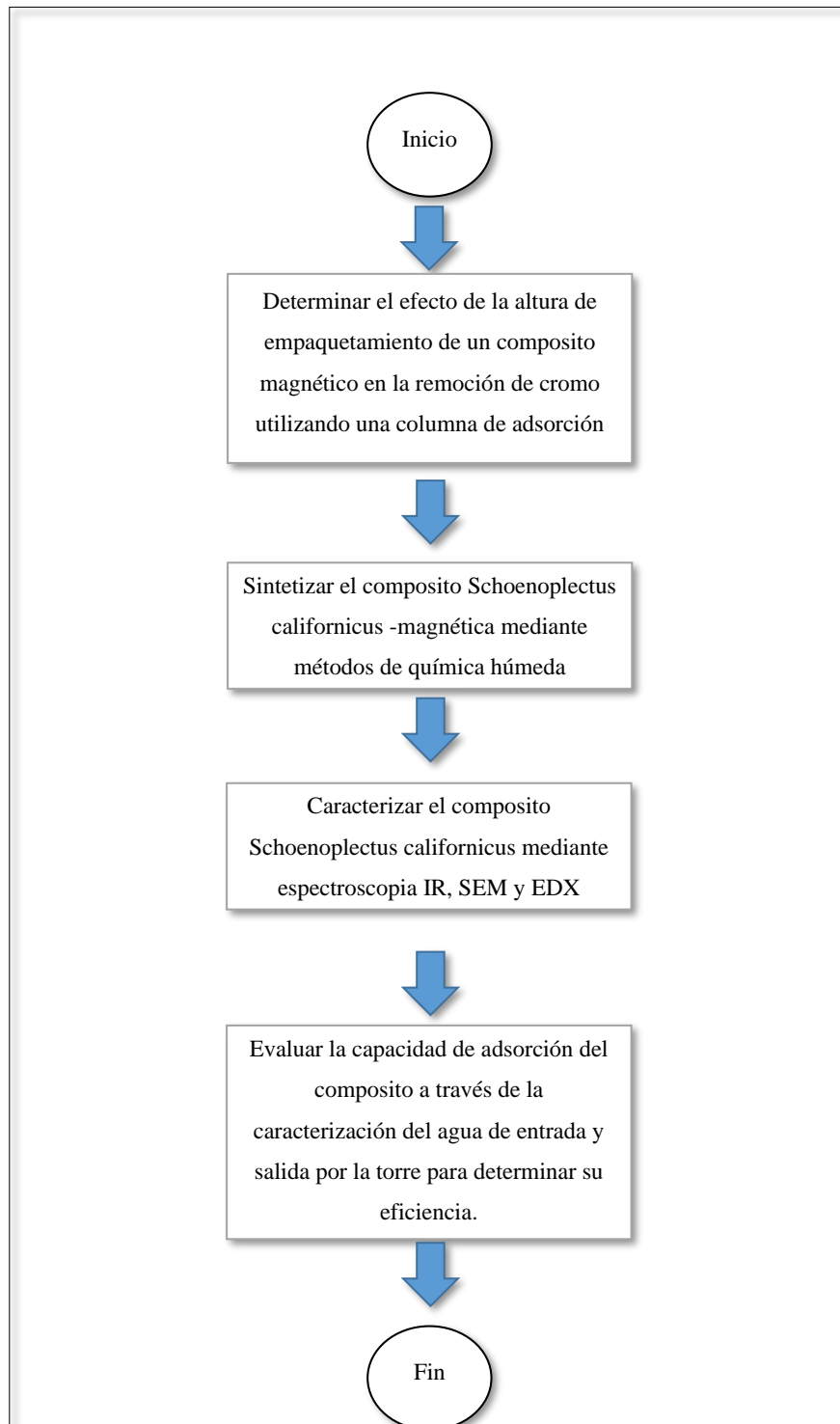
#### **3.2. Alcance de Investigación**

Se pretende alcanzar con la investigación la altura de empaquetamiento de un composito magnético en la remoción de cromo mediante una columna de adsorción, así como la utilización de un material altamente absorbente el cual es amigable con el medio ambiente además de ser un material orgánico con propiedades biodegradables y de alta resistencia. Por otro lado, también se espera obtener la eficiencia de la columna de filtración para determinar su calidad y tiempo de adsorción necesaria en la eliminación de partículas de cromo logrando beneficios de reducción de contaminantes expuestos en las fuentes hídricas.

#### **3.3. Nivel de investigación**

Esta investigación es de tipo exploratoria, ya que se centra en el análisis, investigación e interpretación de diferentes aspectos y datos que se obtienen en los laboratorios de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH, para cumplir los objetivos planteados para este trabajo de investigación.

### 3.4. Diseño de investigación



**Ilustración 3-1:** Diagrama del Diseño experimental

Realizado por: González, B.,2024

En el diagrama, se identifican claramente los objetivos específicos, siendo el principal determinar cómo la variación en la altura de empaquetamiento influye en la capacidad de adsorción del

composito magnético en la remoción de cromo. Además, se delinearán otros objetivos cruciales, tales como la optimización de condiciones experimentales, la caracterización exhaustiva del composito magnético, y la evaluación de la cinética de adsorción. Este diseño integral permitirá abordar de manera sistemática los aspectos clave de la investigación, garantizando la obtención de resultados robustos y significativos para contribuir al avance del conocimiento en el campo de la adsorción de contaminantes utilizando materiales compuestos magnéticos.

Para la obtención del efecto de la altura del composito magnético se realizará de la muestra de totora sintetizada:

**Tabla 3-1:** Porcentaje de totora sintetizada.

Muestra	Porcentaje del composito (%)
$M_T$	100

Realizado por: González, B.,2024.

**Donde:**

$M_T$ : Muestra de totora hidrolizada

**Tabla 3-2:** Porcentaje de totora sintetizada en cada altura.

Porcentajes de material en cada altura (%)	
Alturas (A)	Totora sintetizada
$A_1$	30%
$A_2$	60%
$A_3$	100%

Realizado por: González, B.,2024.

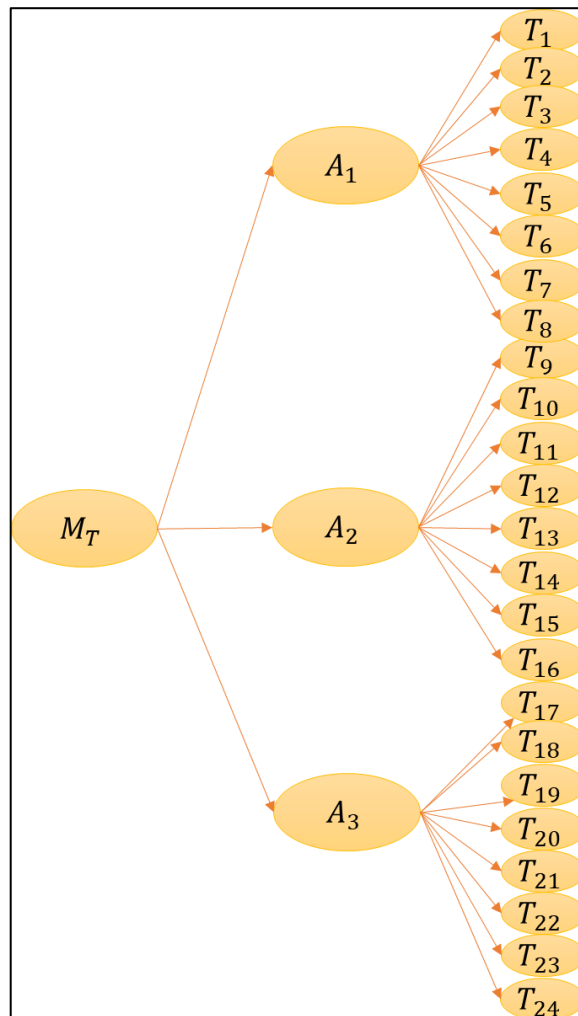
**Donde:**

$A_1$ = Altura uno

$A_2$ = Altura dos

$A_3$ = Altura tres

Para la determinación de eficiencia de composito en la columna de adsorción se determinará en primer lugar de las muestras 100% del porcentaje del composito, luego en 3 diferentes porcentajes explicados en la tabla anterior, se analizará a diferentes alturas una cantidad determinada de material para su posterior tratamiento de adsorción.



**Ilustración 3-2:**Diseño experimental

Realizado por: González, B.,2024.

El proyecto de investigación está enfocado en un diseño experimental, debido a que se busca determinar la eficiencia de un composito magnético de totora sintetizada en diferentes proporciones en una columna de adsorción teniendo así una variable dependiente que será la remoción de cromo III. Para llevar a cabo tendremos: 3 diferentes cantidades de composito *Schoenoplectus californicus* a diferentes alturas;  $A_1, A_2, A_3$ . Para luego de cada uno determinar ocho tiempos y verificar la cantidad de cromo adsorbido en la columna de lecho fijo luego de hacer un triplicado.

**Tabla 3-3:** Matriz de datos DCA para análisis ANOVA.

	Composito de Totora																							
	A <sub>1</sub>								A <sub>2</sub>								A <sub>3</sub>							
	9 cm								6 cm								3 cm							
	Tiempo de contacto con el adsorbente (min)																							
Concen	5	10	15	20	25	30	35	40	5	10	15	20	25	30	35	40	5	10	15	20	25	30	35	40
tración																								
romo																								
(mg/L)																								

Realizado por: González, B.,2024

### 3.4.1. Según la manipulación o no de la variable independiente

Según las variables independientes que son el tiempo de contacto y la altura de empaquetamiento de la columna, el trabajo es experimental, debido a que estas variables independientes ayudarán a determinar la eficiencia en la adsorción de cromo III en el sistema de columnas de lecho fijo.

#### 3.4.1.1. Variables independientes

- Tiempo de contacto

Establecer el mejor tiempo de contacto que será necesario para una eficiente remoción de cromo (III) de las aguas sintéticas de curtiembre empleando las nanopartículas de  $Fe_3O_4$ .

- Altura de empaquetamiento

Se especifican 3 alturas a diferentes cantidades de composito para verificar su capacidad de adsorción validando su eficiencia y la cantidad máxima de metal pesado adsorbido.

### 3.4.2. Según las intervenciones en el trabajo de campo

El trabajo es de estudio transversal ya que mediante las variables independientes ayudarán a obtener la eficiencia de la columna de adsorción para eliminar partículas de cromo III provenientes de aguas residuales de curtiembres. Al utilizar material orgánico de totora y analizada al realizar la síntesis de magnetita y obtener nanopartículas de sulfato de hierro con fibra hidrolizada.

### 3.5. Tipo de estudio

El enfoque de esta investigación implica un estudio de campo que se basa en métodos experimentales. Se llevará a cabo un análisis mediante el uso de muestras tomadas a diferentes alturas en una columna de adsorción para evaluar la eficacia y el tiempo necesario para la remoción de cromo III de las aguas residuales de las curtiembres utilizando un compuesto específico. Se realizará un análisis exhaustivo del componente primario, hidrolizado y sintetizado, así como del agua contaminada, con el fin de determinar la cantidad de metal extraído mediante el compuesto en cuestión.

Variabes y Operacionalización:

- Variables
- Independiente: tiempo de adsorción, altura
- Dependiente: Remoción de Cr (III)

Operacionalización:

- Variable independiente:
- Altura de empaquetamiento de la columna
- Variable dependiente:
- Remoción de Cr (III): Es la cantidad de Cr (III) removido, después del
- tratamiento

Experimental:

- Caracterización de materiales en Laboratorio
- composito Schoenoplectus californicus (IR, SEM, EDX)
- Estudios de adsorción con composito
- Pruebas de Tratamiento de Aguas contaminadas en Sistema de Filtración desarrollado en el Grupo de Investigación para descontaminación de aguas con cromo resultantes de la Industria Curtiembre.



### 3.6. Población y planificación. Selección y cálculo del tamaño de la muestra

#### 3.6.1. Unidad de análisis

La unidad de análisis para el presente trabajo de investigación será de un tipo de muestra, totora *Schoenoplectus californicus* siendo esta planta muy común en esteros y pantanos por lo que no tiene un tratamiento posterior para su aprovechamiento.

#### 3.6.2. Población de estudio

La población de estudio considerada para el presente trabajo es la totora *Schoenoplectus californicus* mismo que fue obtenido en lagunas cercanas en Chimborazo cuyo material se encontró en óptimas condiciones.

#### 3.6.3. Tamaño de muestra

Se llevarán a cabo tres experimentos de adición escalonada del compuesto de totora sintetizada (en concentraciones del 30%, 60% y 100%) a la columna de adsorción, con el propósito de determinar la concentración óptima a diferentes alturas. Cada ensayo se replicará en tres ocasiones para obtener un total de quince muestras, las cuales serán sometidas a un análisis posterior para evaluar su eficiencia y el tiempo de retención del cromo III.

### 3.7. Métodos, técnicas e instrumentos de investigación

#### 3.7.1. Trituración de la fibra

**Tabla 3-4:** Reducción de la materia prima para sus posteriores tratamientos.

Materiales y Equipo	Materia Prima
<ul style="list-style-type: none"><li>• Molino</li><li>• Tamiz de 850 micrones</li><li>• Balanza</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Fibra de totora</li></ul>
<b>Procedimiento</b>	
Se empleó un molino para triturar la materia prima, la cual fue previamente descascarillada y cortada en trozos pequeños para facilitar la molienda. Posteriormente, el material triturado se sometió a un tamizado con un tamiz de 850 micrones y se procedió a su pesaje utilizando una balanza.	

Realizado por: González, B.,2024.

### 3.7.2. Hidrólisis de la fibra de totora

**Tabla 3-5:** Método para la realización de la hidrólisis de la materia prima.

Materiales y Equipo	Materia Prima
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Balanza</li> <li>• Bomba al vacío</li> <li>• Embudo Büchner</li> <li>• Papel filtro</li> <li>• pH metro</li> <li>• Kitasato</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fibra de totora</li> </ul>
<b>Procedimiento</b>	
<p>Primero se preparó una solución al 0.5% de KOH en 500 ml de agua destilada ya que en 100 ml de agua al 1% de KOH no era suficiente. Como la cantidad de materia era de 31 gr de totora, se fue aumentando paulatinamente la cantidad de solución, se añadió un 0.6% de KOH en 250 ml, y por último un 1% de KOH en 100 ml. Se esperó 30 minutos. En total fueron 5 gr de KOH en 850 ml de agua destilada.</p> <p>Luego se realizó un baño ultrasónico por 20 minutos para bajar el pH hasta 7-7.5</p> <p>Se utilizó una bomba de vacío en el cual se realizaron un total de 15 lavados, en el primero se obtuvo un PH de 11.97 hasta el último que fue de 7.43</p>	

Realizado por: González, B.,2024.

### 3.7.3. Síntesis de magnetita

**Tabla 3-6:** Método para obtener fibra magnética.

Materiales y Equipo	Materia Prima
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 vaso de precipitación de 250 ml</li> <li>• 2 vasos de precipitación de 100 ml</li> <li>• Tanque de nitrógeno</li> <li>• Sonificador</li> <li>• Reverbero</li> <li>• agitador</li> <li>• pH metro</li> <li>• Kitasato</li> <li>• Bureta</li> <li>• conductímetro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fibra hidrolizada de totora</li> </ul>
<b>Procedimiento</b>	
<p>El proceso comenzó con la sonicación de agua destilada durante 5 minutos. El agua sonicada se utilizó para preparar dos soluciones; una solución reductora de 1.30 g KOH y 0.30 g <math>KNO_3</math> en 24 mL y, una solución de 120 mL con 2.30 g de <math>FeSO_4 \cdot 7H_2O</math> junto con 5 g de totora hidrolizada, la cual también se sometió a sonicación durante 5 minutos. Posteriormente, la</p>	

solución enriquecida con hierro y totora hidrolizada se calentó en baño maría hasta alcanzar el punto de ebullición de 90°C, manteniendo una agitación constante de 200 RPM y una atmósfera de nitrógeno (N). Finalmente, la solución reductora fue vertida lentamente sobre la solución mediante una bureta gota a gota por 5 minutos, manteniendo una agitación constante durante 40 minutos. Luego de este tiempo se deja por un día el material para posterior a ellos realizar los lavados respectivos para alcanzar la conductividad requerida ya que se pretende eliminar las sales residuales de la reacción, tratando de no perder el material.

Una muestra de este compositor se coloca en el vaso de reacción para obtención de la síntesis y analizamos su impregnación.

Realizado por: González, B.,2024.

#### 3.7.4. Determinación de concentración de cromo III mediante la oxidación a cromo VI

**Tabla 3-7:** Determinación de contenido de óxido de cromo en agua residual.

Materiales y Equipo	Materia
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Balanza</li> <li>• Erlenmeyer 250 ml</li> <li>• Reverbero</li> <li>• 1 bureta 50 ml</li> <li>• 2 pipetas de 10 ml</li> <li>• 1 pipeta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ácido sulfúrico</li> <li>• Ácido nítrico</li> <li>• Ácido perclórico</li> <li>• Solución de tiosulfato de sodio 1N</li> <li>• Solución de yoduro de potasio al 10%</li> <li>• Solución de almidón 1%</li> <li>• Agua destilada</li> <li>• Agua residual de curtición</li> </ul>
<b>Procedimiento</b>	
<p>Colocar en un Erlenmeyer 20 ml de muestra de agua residual, añadir la mezcla oxidante (7 ml de ácido sulfúrico, 10 ml ácido perclórico y 5 ml de ácido nítrico) y llevar a ebullición hasta viraje de verde intenso a naranja.</p> <p>Diluir con agua destilada a 100 ml y llevar a ebullición por 5 minutos.</p> <p>Colocar 10 ml de KI 10%</p> <p>Iniciar la titulación con tiosulfato de sodio para disminuir yodo (tonalidad más clara)</p> <p>Colocar 1ml de solución de almidón 1%</p> <p>Terminar la titulación y anotar el volumen consumido</p>	

Realizado por: González, B.,2024.

### Ecuación 1-1: Cálculo de contenido de óxido de cromo

$$\%Cr_2O_3 = \frac{V * 0.02533 * N}{W} * 100$$

Donde:

V= volumen de tiosulfato de sodio (ml)

W= volumen del baño residual analizado (ml)

N= Concentración de tiosulfato de sodio (N)

Gramos/litro=  $\%Cr_2O_3 * 10$

#### 3.7.5. Caracterización de aguas residuales de los procesos de curtiembre

En la tabla 3-8, se realizará la obtención de datos mediante las pruebas físicas y químicas de las aguas residuales de los tres diferentes procesos realizados en la empresa de curtiembre EL ALCE en la ciudad de guano, se pretende determinar cuál de estas aguas contiene la mayor cantidad de cromo y mediante el cual desarrollar la adsorción en las columnas de lecho fijo, se realizaron pruebas de pH, color, conductividad, TDS, TSS nitratos y sulfatos. Utilizando los equipos necesarios para determinar cada prueba requerida.

**Tabla 3-8:** Determinación de pruebas Fisicoquímico.

Pruebas	Tratamiento 1	Tratamiento 2	Tratamiento 3
	Muestra proceso de piquelado	Muestra proceso de curtido	Muestra proceso de recurtido
<b>PH</b>	--	--	--
<b>Color</b>	--	--	--
<b>Conductividad</b>	--	--	--
<b>TDS</b>	--	--	--
<b>TSS</b>	--	--	--
<b>Nitratos</b>	--	--	--
<b>Sulfatos</b>	--	--	--

Realizado por: González, B.,2024.

La finalidad de llevar a cabo la caracterización de las aguas residuales es identificar en qué etapa del proceso se concentra la mayor cantidad de cromo. Esta información es crucial para diseñar estrategias efectivas de remoción del componente mediante el uso de columnas de adsorción.

Para lograrlo es necesario recopilar datos tanto antes como después del tratamiento de las aguas residuales. Esta comparación permitirá evaluar la eficacia del proceso de adsorción en la eliminación del cromo presente en el agua.

Una vez finalizadas las pruebas de tratamiento, se procederá a realizar mediciones adicionales de la concentración de cromo en el agua tratada. Estas mediciones posteriores serán fundamentales para determinar la cantidad exacta de metal pesado adsorbido por las columnas de lecho fijo durante el proceso de tratamiento.

Este enfoque integral de monitoreo y evaluación nos proporcionará información detallada sobre la eficiencia del tratamiento y nos permitirá ajustar y optimizar el proceso según sea necesario para lograr una remoción efectiva del cromo de las aguas residuales.

### 3.7.6. Método de adsorción mediante columnas de lecho fijo

**Tabla 3-9:** Datos de material en cada columna a diferente altura.

	Determinación de alturas (A)		
	$A_1$	$A_2$	$A_3$
	9 cm	6 cm	3 cm
Cantidad de compuesto magnético (gramos)	2.6	1.8	0.9

Realizado por: González, B.,2024.

La adsorción en cada columna se llevará a cabo a diferentes alturas: 9, 6 y 3 cm, respectivamente. A una altura de 9 cm, se añadirá una cantidad de 2.6 gramos de compuesto magnético, asegurándose de que el material cubra completamente cualquier posible fuga de aire, es decir, se aplicará el mismo procedimiento en toda la superficie de la columna. Lo mismo se realizará en las alturas de 6 cm y 3 cm, con cantidades de 1.8 gramos y 0.9 gramos del compuesto, respectivamente.

En total, se utilizarán 5.3 gramos de material para llevar a cabo la evaluación en diferentes momentos, según el diseño experimental. Para realizar tres réplicas, se requerirán 15.9 gramos en total, con el fin de determinar las distintas concentraciones de cromo en el agua residual.

### 3.7.6.1. Modelos isotérmicos de adsorción

Las isothermas de Langmuir y Freundlich son los dos modelos comúnmente más utilizados para referir la adsorción de un notable componente. Los dos modelos son permitidos únicamente bajo ciertas condiciones y sus resultados no pueden ser extrapolados cuando se varían las condiciones del medio.

La capacidad de adsorción se calcula mediante la Ec. 3.1.

#### **Ecuación 3-1: Cálculo de la capacidad de adsorción**

$$q = \frac{(C_i - C_f) * V}{m}$$

Donde:

q: Capacidad de adsorción adsorbato – adsorbente (mg/g).

Ci: Concentración inicial de adsorbato en solución (mg/L).

Cf: Concentración final de adsorbato en solución (mg/L).

m: Masa de material agregada (g).

V: Volumen de la muestra (L)

Para realizar los cálculos correspondientes a los modelos isotérmicos se realizó la linealización, expresándose de la siguiente manera.

#### **Ecuación 3-2: Linealización de la ecuación de Langmuir.**

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_{max}K_L C_f} + \frac{1}{q_{max}}$$

#### **Ecuación 3-3: Linealización de la ecuación de Freundlich.**

$$\log q = \frac{1}{n} \log C_F + \log K_F$$

**Tabla 3-10:** Obtención de muestras para medir la concentración de cromo III.

<b>Materiales y Equipo</b>	<b>Materia Prima</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• 3 embudos de decantación de 250 ml</li><li>• 3 columnas de lecho fijo</li><li>• 6 pinzas de soporte</li><li>• 3 soportes universales</li><li>• 72 vasos</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Composito magnético</li><li>• Agua residual con concentrado de cromo</li></ul>
<b>Procedimiento</b>	
<p>Se añade 150 ml de agua residual en cada embudo de decantación y se coloca en los soportes con sus pinzas respectivamente. Luego se coloca en cada columna la cantidad necesaria de composito magnético a diferentes alturas: 9cm, 6cm y 3cm, luego se colocan las columnas debajo de los embudos que queden ubicados correctamente para que al momento de pasar el agua caiga directamente en las columnas gota a gota.</p> <p>Se irán recogiendo muestras por cada 5 minutos hasta completar 40 minutos para cada columna por ende serán 24 muestras recogidas ya que son 8 por cada columna. Como es por triplicado al final serán 72 muestras, de tal manera necesitamos los 72 vasos como recipientes. Por último, observar la concentración y obtener datos.</p>	

**Realizado por:** González, B.,2024.

## CAPÍTULO IV

### 4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1. Resultados de la trituración e hidrolización de la totora

Durante el desarrollo de la investigación, se llevó a cabo la trituración de la fibra de totora utilizando un molino, lo cual facilitó la reducción del tamaño de las partículas de la fibra. Posteriormente, el material triturado fue sometido a un tamizado con una malla de 850 micrones con el fin de obtener un material homogéneo, eliminando así partículas no pertinentes para el tratamiento. La etapa de trituración fue esencial para obtener un material compacto que resultara adecuado para la síntesis del compuesto magnético. Es importante resaltar que se estableció un límite máximo de tamaño de partículas de 850 micrones. Esto se debe a que partículas de mayor tamaño resultarían inadecuadas para los tratamientos posteriores, ya que el material sería demasiado grande y comprometería la eficacia de dichos tratamientos.

Después de este procedimiento, se llevó a cabo la hidrólisis de la fibra con el propósito de potenciar su capacidad de adsorción en la eliminación de contaminantes en las aguas residuales, mediante la modificación de su superficie y el incremento de la disponibilidad de sitios activos para la adsorción. Como resultado de este proceso, se obtuvo una fibra hidrolizada con un pH de 11.97, superando el rango óptimo deseado de 7 a 7.5. En consecuencia, se realizaron aproximadamente quince enjuagues utilizando una bomba de vacío para acelerar el proceso sin incurrir en pérdidas significativas de material. Como resultado de estos enjuagues, se logró reducir el pH a 7.43, cumpliendo así con el rango de pH requerido.

#### 4.2. Resultados de la síntesis del compuesto *Schoenoplectus californicus* magnética



**Ilustración 4-1:** Inicio Síntesis compuesto-FA.B Composito finalizado

Realizado por: González B.,2024.



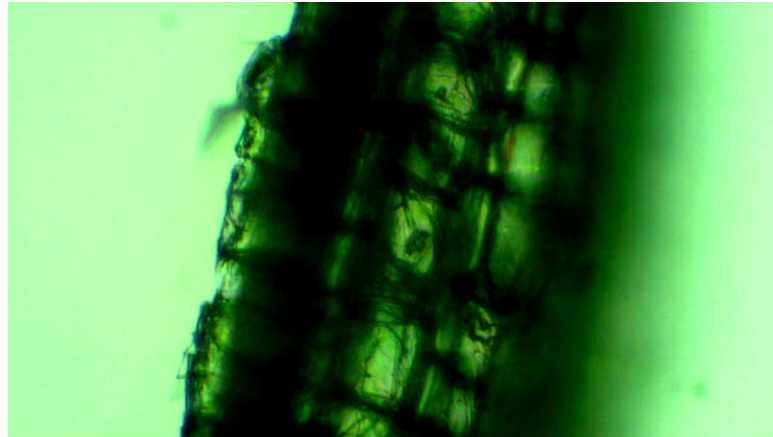
Se logró obtener un compuesto sintetizado de magnetita junto con la fibra de totora. A simple vista, los resultados obtenidos tras la síntesis destacan por su apariencia, color y textura. Como se observa en la ilustración 4-1, en el inicio de la síntesis del composito se notó que el compuesto presentaba una coloración inicial de tonalidad azul verdosa, la cual progresivamente se tornaba más oscura. Por precaución, se extrajo el recipiente tras un breve lapso, dado que prolongar el tiempo de reacción podría ocasionar la desintegración del precipitado. Luego al composito finalizado, se realizó un lavado exhaustivo para eliminar sales residuales y preservar la magnetita. Posteriormente, el material se dejó secar y reposar durante un día. Finalmente, se llevó a cabo una prueba con un imán para verificar la presencia de material magnético presente en la ilustración 4-2 observándose el composito seco.



**Ilustración 4-2:** Composito seco

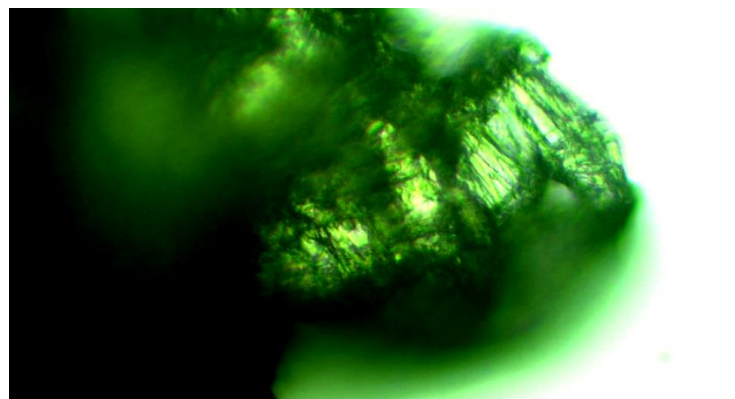
**Realizado por:** González B.,2024.

**4.2.1. Resultados de microscopía óptica de la fibra de totora, fibra hidrolizada y composito magnético**



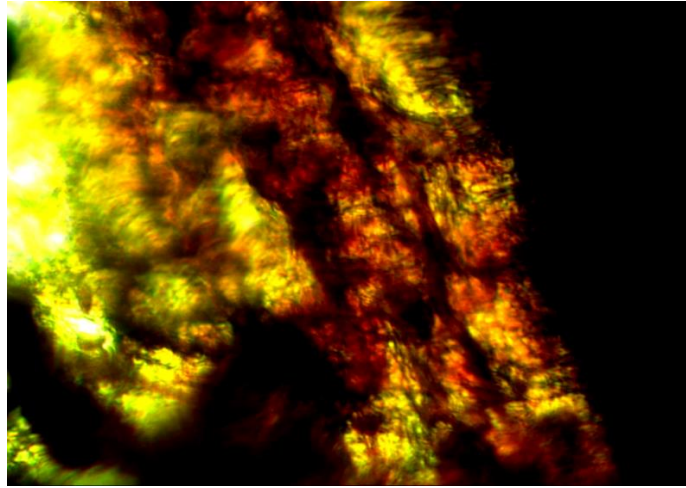
**Ilustración 4-3:** Estructura de la fibra de totora bajo el microscopio óptico

Realizado por: González B.,2024.



**Ilustración 4-4:** Estructura de la fibra de totora hidrolizada bajo el microscopio óptico.

Realizado por: González B.,2024.



**Ilustración 4-5:** Estructura del compuesto magnético bajo el microscopio óptico

**Realizado por:** González B.,2024.

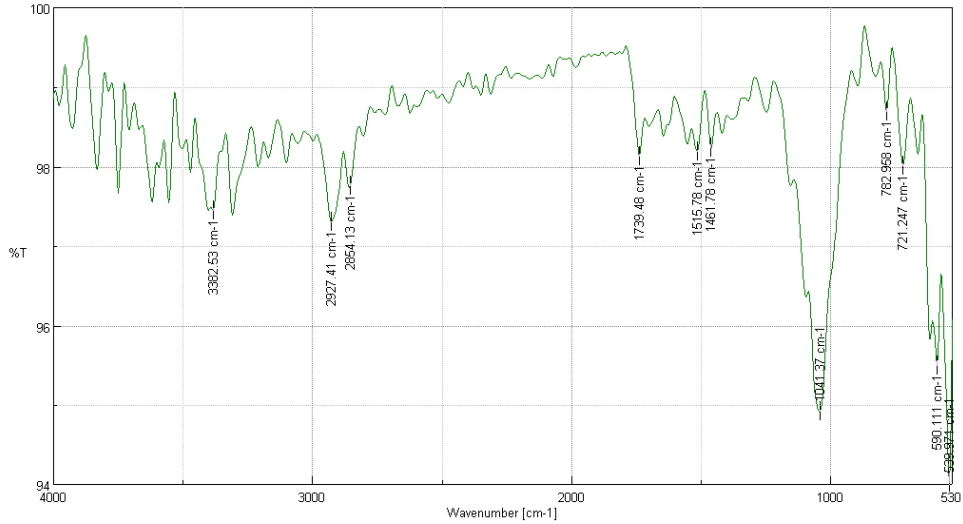
Para los análisis subsiguientes, se han dispuesto tres muestras distintas para su evaluación. La primera ilustración 4-3, representa la fibra de totora en su estado natural. Esta muestra se caracteriza por su disposición fibrosa entrelazada y texturizada, que da lugar a canales alargados con paredes celulares bien definidas y porosidades visibles. Además, se aprecia la presencia de contenido intracelular, como almidón, lípidos y pigmentos.

En la segunda ilustración 4-4, se muestra la fibra de totora hidrolizada, evidenciando notables cambios estructurales en comparación con la fibra de totora sin tratar. La hidrólisis ocasiona una descomposición parcial de los componentes celulares, lo que modifica la morfología y las propiedades físicas de las fibras. Se observa una disminución en la longitud de las fibras y una mayor separación entre las células individuales, así como rupturas en las paredes celulares como resultado del proceso de hidrólisis.

La tercera muestra, presentada en la ilustración 4-5, corresponde al compuesto magnético. En esta muestra, se pueden distinguir partículas de magnetita con forma poliédrica y color oscuro, contrastando con el color claro de la matriz circundante. Además, se identifican secciones de tonalidad rojo intenso, derivadas del proceso de síntesis química empleado en su preparación, lo que indica cambios en la composición del material. La tonalidad sugiere la presencia de óxido de hierro como componente en la composición del compuesto.

### 4.3. Resultados de caracterización de la fibra de totora, hidrolizada y magnética.

#### 4.3.1. Resultados de análisis FT-IR de la fibra de Totora



**Ilustración 4-6:** Picos de la fibra de totora en (FT-IR).

Realizado por: González, B.,2024

**Tabla 4-1:** Datos de las frecuencias de adsorción de la fibra de Totora.

Wavenumber [cm-1]	%T
3382.53	97.4492
2927.41	97.3016
2854.13	97.7574
1739.48	98.1331
1515.78	98.1962
1461.78	98.2371
1041.37	94.9195
782.958	98.6964
721.247	98.0163
590.111	95.4931
539.971	94.0277

Realizado por: González, B.,2024.

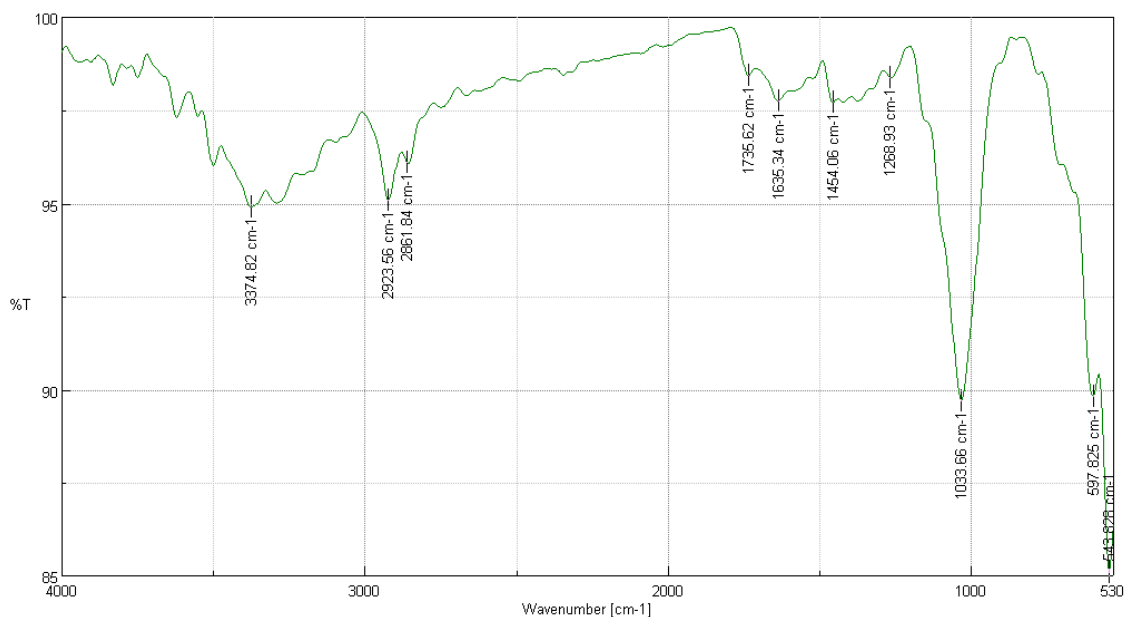
Se observó en la ilustración 4-6, como la luz infrarroja incide en el efecto de las vibraciones de los enlaces de las moléculas permitiendo tener una lectura al analizar sus picos. Se interpreta al eje de las X como el número de onda  $cm^{-1}$  indicando la intensidad de la radiación infrarroja y al eje de las Y como él %T indica la intensidad de adsorción. Los picos en la gráfica de IR se interpretan como la fibra al pasar por un haz de luz se identifica la estructura molecular resultando ser más simple que otras fibras.

El Pico de  $3382,53\text{ cm}^{-1}$  señala el estiramiento del grupo O-H, del agua, esto se debe a que al ser una planta acuática la muestra tiene residuos en esta zona se presenta una banda alrededor de  $3500\text{-}3200\text{ cm}^{-1}$  representando vibraciones de estiramiento del mismo grupo. El pico de  $2927,41\text{ cm}^{-1}$  se refiere a un estiramiento del grupo C-H ya que aparece en la región de  $3000\text{-}2800\text{ cm}^{-1}$ , esto se debe a que tiene una apariencia menos implica que el enlace de O-H del agua. El pico de  $2854,13\text{ cm}^{-1}$  aparece en el mismo grupo anterior recalando como una asimetría en la estructura del grupo funcional C-H<sub>2</sub> debido a su estiramiento. El pico de  $1739,48\text{ cm}^{-1}$  se debe al estiramiento del grupo C=O llamado grupos de dobles enlaces porque parecen vibraciones más intensas. El pico de  $1515,78\text{ cm}^{-1}$  se refiere a la aparición del grupo de C=C siendo fuerzas de estiramientos más fuertes al igual que el anterior grupo.

Los picos de  $721,247\text{ cm}^{-1}$ ,  $782,958\text{ cm}^{-1}$ ,  $1041,37\text{ cm}^{-1}$ ,  $1461,78\text{ cm}^{-1}$  representan a los grupos de CH<sub>3</sub>, CH<sub>2</sub>, C-O y C-O respectivamente, a estas regiones se les conoce como huella digital y van de  $1500\text{-}600\text{ cm}^{-1}$  y son productos de varios tipos de vibraciones por lo que es algo difícil asignarles un origen de banda en particular, además son vibraciones que original una fuerte interacción entre enlaces cercanos.

Por ultimo tenemos a los picos de  $539,974\text{ cm}^{-1}$  y  $590,111\text{ cm}^{-1}$  que representan la deformación de los grupos C-O y C-H respectivamente, ocasionados por la presencia de residuos en el material.

#### 4.3.2. Resultados de análisis FT-IR de la fibra de Totorá Hidrolizada



**Ilustración 4-7:** Pico de la fibra de Totorá hidrolizada en (FT-IR).

Realizado por: González, B., 2024.

**Tabla 4-2:** Datos de las frecuencias de adsorción de la fibra de totora hidrolizada.

Wavenumber [cm-1]	%T
3374.82	94.9068
2923.56	95.098
2861.84	96.1123
1735.62	98.4313
1635.34	97.7666
1454.06	97.7132
1268.93	98.3897
1033.66	89.7154
597.825	89.8268
543.828	85.0809

Realizado por: González, B.,2024.

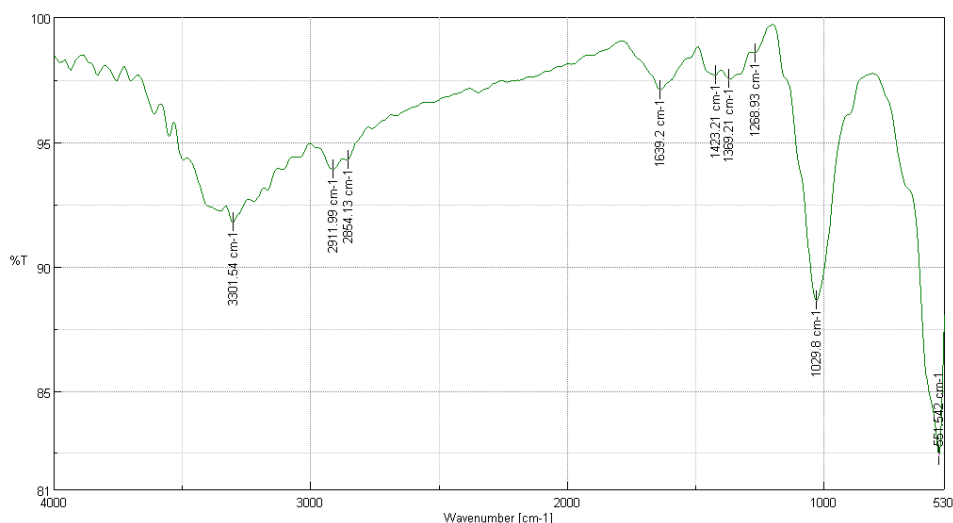
Se ha analizado el espectro infrarrojo (IR) de la fibra de totora hidrolizada, observando la ilustración 4-7 se evidencia varios cambios significativos en su estructura química. Se registró una reducción en la intensidad del pico a  $3382,53\text{ cm}^{-1}$ , atribuido al estiramiento del grupo O-H, lo cual indica que la hidrólisis ha causado la ruptura de enlaces O-H en la fibra de totora.

El pico a  $1635,34\text{ cm}^{-1}$  corresponde a la deformación del grupo C=C, comprobando que la hidrólisis ha inducido la formación de dobles enlaces C=C en el material. Además, se observó una disminución en la intensidad del pico a  $1739,48\text{ cm}^{-1}$ , asociado al estiramiento del grupo C=O, lo que sugiere la ruptura de algunos grupos C=O en la fibra.

El pico a  $1268,93\text{ cm}^{-1}$  está relacionado con el estiramiento del grupo C-O, mientras que los picos a  $1041,37\text{ cm}^{-1}$ ,  $895,76\text{ cm}^{-1}$  y  $539,974\text{ cm}^{-1}$  muestran disminuciones en su intensidad, indicando deformaciones en los grupos C-H y C-O, debido a los cambios inducidos por la hidrólisis. Asimismo, se observa la aparición de un pico a  $454,545\text{ cm}^{-1}$ , asociado a la deformación del grupo C-C, lo que señala la formación de grupos C-C como resultado del proceso de hidrólisis.

El análisis del espectro IR de la fibra de totora hidrolizada revela una serie de alteraciones en su estructura química, incluyendo la ruptura de enlaces O-H y C=O, la formación de dobles enlaces C=C, así como la aparición de grupos C-O-C y C-H, y la ruptura de algunos grupos C-O. Estos cambios pueden tener repercusiones significativas en las propiedades físicas y químicas de la fibra de totora, como su resistencia al agua, flexibilidad y susceptibilidad a la degradación térmica.

### 4.3.3. Resultados de análisis FT-IR del compuesto magnético



**Ilustración 4-8:** Picos del compuesto magnético en (FT-IR).

Realizado por: González, B.,2024.

**Tabla 4-3:** Datos de las frecuencias de adsorción del compuesto magnético.

Wavenumber [cm-1]	%T
3301.54	91.7609
2911.99	93.8846
2854.13	94.2843
1639.2	97.0909
1423.21	97.6716
1369.21	97.5349
1268.93	98.5664
1029.8	88.6075
551.542	82.3829

Realizado por: González, B.,2024.

Se observó en el IR del compuesto magnético de la ilustración 4-8, una serie de picos que se interpretan de la siguiente manera:

El pico de  $3440\text{ cm}^{-1}$  se debe al estiramiento del grupo O-H indicando la presencia de grupos hidroxilo en el compuesto, así mismo los picos de  $2922\text{ cm}^{-1}$  y  $1630\text{ cm}^{-1}$  muestran estiramiento de grupos O-H y C-H respectivamente, indicando la presencia de grupos alquilo y dobles enlaces.

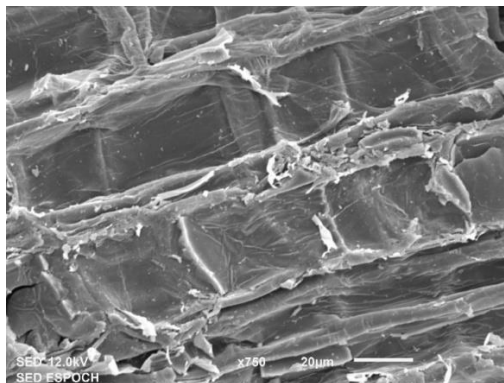
El pico de  $1540\text{ cm}^{-1}$  se debe al estiramiento del grupo C=N indicando la presencia de grupos nitro en el compuesto, también se observó que en el pico  $1450\text{ cm}^{-1}$  existe la deformación del grupo CH<sub>3</sub> referente a grupos metilo. El pico de  $1260\text{ cm}^{-1}$  se debe al estiramiento del grupo C-O lo que indica la presencia de grupo éster.

Los picos de  $1030\text{ cm}^{-1}$  y  $470\text{ cm}^{-1}$  se deben al estiramiento del grupo Si-O y la deformación de este, indicando la presencia de grupos silicio-oxígeno debido a la composición de la totora misma.

Los picos de  $870\text{ cm}^{-1}$  y  $690\text{ cm}^{-1}$  indican la deformación del grupo C-H y C-C respectivamente identificados como grupos alquilo y dobles enlaces carbono-carbono. Se destaca el pico de  $530\text{ cm}^{-1}$  debido a la deformación del grupo Fe-O indicando la presencia de óxido de hierro en el compuesto magnético de totora.

Se obtuvo que este material está compuesto por una variedad de grupos funcionales, incluyendo grupos hidroxilo, alquilo, nitro, metilo, éster, silicio-oxígeno y óxido de hierro. La presencia de estos grupos funcionales sugiere que el compuesto magnético de totora es un material complejo con una estructura química rica.

#### 4.3.4. *Resultados de análisis SEM de la fibra de totora*



**Ilustración 4-9:** Fibra de totora en (SEM)

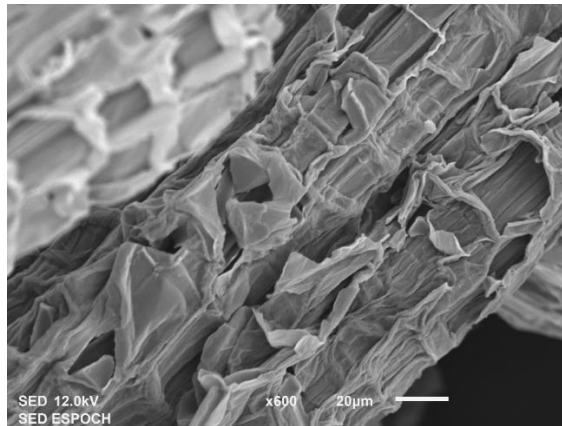
**Realizado por:** González, B.,2024

En la ilustración 4-9, se observó una superficie rugosa con una estructura fibrosa. Las fibras son largas y delgadas, con un diámetro promedio de aproximadamente 10 micrómetros. Algunas de las fibras están agrupadas, mientras que otras están separadas.

La superficie rugosa de la fibra de totora es causada por la presencia de microfibrillas. Las microfibrillas son células largas y delgadas que forman la estructura de la fibra. La longitud y el diámetro de las fibras de totora son importantes para sus propiedades mecánicas. Las fibras largas y delgadas son más fuertes y flexibles que las fibras cortas y gruesas.



#### 4.3.5. Resultados de análisis SEM de la fibra de totora hidrolizada



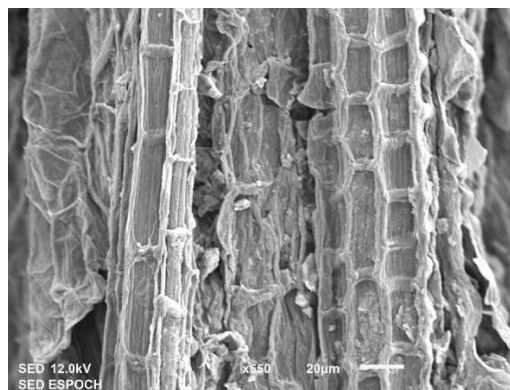
**Ilustración 4-10:** Fibra de totora hidrolizada en (SEM).

**Realizado por:** González, B.,2024.

En la ilustración 4-10 se observó la similitud que existe a la imagen de SEM de la fibra de totora sin hidrolizar. Sin embargo, hay algunas diferencias:

La superficie de la fibra de totora hidrolizada parece ser más rugosa que la superficie de la fibra de totora sin hidrolizar. Además, la superficie de la fibra de totora hidrolizada y la fibra de totora sin hidrolizar pueden ser causadas por la hidrólisis. La hidrólisis es una reacción química que descompone los compuestos orgánicos en moléculas más pequeñas. En el caso de la fibra de totora, la hidrólisis puede descomponer la celulosa, que es el principal componente de la fibra. La descomposición de la celulosa puede hacer que la superficie de la fibra sea más rugosa y que las hendiduras y protuberancias sean más pronunciadas.

#### 4.3.6. Resultados de análisis SEM de composito magnético



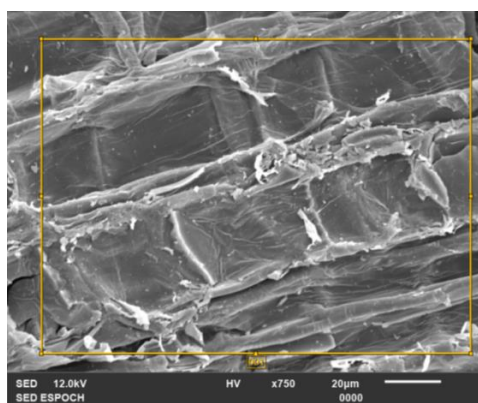
**Ilustración 4-11:** Composito magnético en (SEM)

**Realizado por:** González, B.,2024.

La ilustración 4-11, muestra una matriz de partículas de diferentes tamaños y formas. Las partículas están aglomeradas y forman una red porosa. Se observan algunas partículas más grandes que parecen estar incrustadas en la matriz.

Las partículas de diferentes tamaños y formas en la imagen de SEM del compuesto magnético de totora son probablemente las partículas de totora y las partículas magnéticas. Las partículas de totora son generalmente más grandes que las partículas magnéticas. Las partículas magnéticas se aglomeran debido a las fuerzas magnéticas entre ellas. La red porosa en la imagen es causada por los espacios entre las partículas aglomeradas. Las partículas más grandes que parecen estar incrustadas en la matriz son probablemente partículas de totora que están recubiertas con partículas magnéticas.

#### 4.3.7. Resultados de análisis EDX de la fibra de totora



**Ilustración 4-12:** Fibra de totora en (EDX)

**Realizado por:** González, B., 2024.

**Tabla 4-4:** Datos de la composición de la fibra triturada mediante la prueba EDX

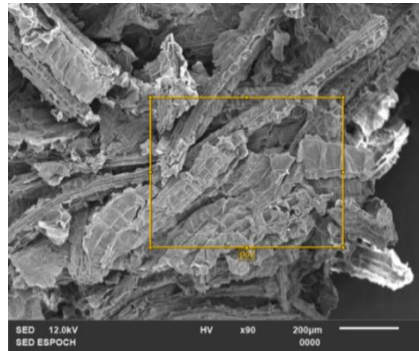
Formula	mass%	Atom%	Sigma	Net	K ratio	Line
C	1.03	38.74	0.03	635	0.0048017	K
O	1.54	43.54	0.03	1290	0.0103483	K
Si	0.49	7.88	0.01	1236	0.0035226	K
Total	7.35	100.00				

**Realizado por:** González, B., 2024.

En la tabla 4-4, se observa la presencia de carbono, oxígeno lo que indica que la fibra de totora está compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. La celulosa es un polímero de glucosa que es el principal componente estructural de las plantas. La hemicelulosa es un polímero de azúcares que se encuentra junto a la celulosa en la pared celular de las plantas. La lignina es un polímero aromático que proporciona rigidez a la pared celular de las plantas.

Además, muestra la presencia de silicio indica que la fibra de totora puede contener fitolitos, que son pequeñas estructuras de sílice que se encuentran en las células vegetales. Los fitolitos pueden mejorar la resistencia mecánica de la fibra.

#### 4.3.8. Resultados de análisis EDX de la fibra hidrolizada



**Ilustración 4-13:** Fibra de totora hidrolizada en (EDX)

Realizado por: González, B.,2024.

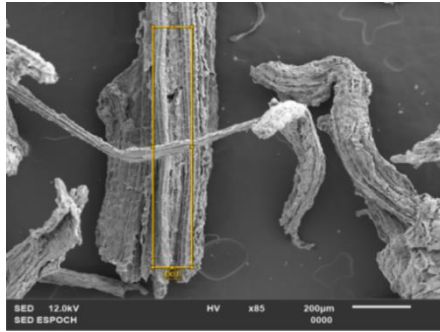
**Tabla 4-5:** Datos de la composición de la fibra hidrolizada mediante la prueba EDX

Formula	mass%	Atom%	Sigma	Net	K ratio	Line
C	1.50	52.67	0.03	1389	0.0083456	K
O	1.39	36.56	0.03	1387	0.0088431	K
Si	0.06	0.94	0.01	202	0.0004568	K
Total	7.56	100.00				

Realizado por: González, Bryan, 2024

El análisis de la prueba de Espectroscopia de energía dispersiva (EDX) de la fibra de totora hidrolizada se puede encontrar parámetros diferentes a la realizada con la fibra de totora sin tratar, esto se debe al proceso de la hidrólisis por ende existen cambios no tan significativos pero que se interpreta por la ruptura de paredes por la compresión del tratamiento, en la tabla 4-5 se identifica un pequeño aumento en el carbono pasando de 1.03 a 1.50 pero una reducción en el oxígeno pasando de 1.54 a 1.39 por el proceso realizado, al igual existe una reducción de silicio pasando de 0.49 a 0.06.

#### 4.3.9. Resultados de análisis EDX de composito magnético



**Ilustración 4-14:** Composito magnético en (EDX)

Realizado por: González, B., 2024.

**Tabla 4-6:** Datos de la composición del composito magnético mediante la prueba EDX

Formula	mass%	Atom%	Sigma	Net	K ratio	Line
C	1.30	35.52	0.05	343	0.0070740	K
O	1.89	38.89	0.05	686	0.0150026	K
Fe	2.88	16.95	0.09	332	0.0137849	K
Total	11.23	100.00				

Realizado por: González, B., 2024.

En la tabla 4-6, se confirmó la presencia de hierro, lo que evidencia su naturaleza magnética. El porcentaje de hierro detectado fue del 2.88%, lo cual respalda la presencia de magnetita en el compuesto. Este análisis cuantitativo también reveló la presencia de carbono (1.30%) y oxígeno (1.89%), valores que superan los encontrados en la fibra de totora y la hidrolizada. Esta alta concentración de hierro y oxígeno es fundamental para validar la exitosa síntesis del material.

#### 4.4. Resultados de la concentración de cromo III mediante la oxidación a cromo VI

##### 4.4.1. Cálculo de contenido de óxido de cromo

$$\%Cr_2O_3 = \frac{V * 0.02533 * N}{W} * 100$$

Donde:

V= volumen de tiosulfato de sodio (ml)

W= Volumen del baño residual analizado (ml)

N= Concentración de tiosulfato de sodio (N)

Gramos/litro=  $\%Cr_2O_3 * 10$

#### 4.4.2. Cálculo de concentración de piquelado

$$V = 8.8 \text{ ml}$$

$$W = 5 \text{ ml}$$

$$N = 50.66 \text{ N}$$

$$\text{Gramos/litro} = \%Cr_2O_3 * 10$$

$$\%Cr_2O_3 (\text{muestra 1}) = \frac{V * 0.02533 * N}{W} * 100$$

$$\%Cr_2O_3 (\text{muestra 1}) = \frac{8.8 * 0.02533 * 50.66}{5} * 100$$

$$\%Cr_2O_3 (\text{muestra 1}) = 225.84 * 10 = 2258.46 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

#### 4.4.3. Cálculo de concentración de curtido

$$V = 7 \text{ ml}$$

$$W = 5 \text{ ml}$$

$$N = 50.66 \text{ N}$$

$$\text{Gramos/litro} = \%Cr_2O_3 * 10$$

$$\%Cr_2O_3 (\text{muestra 2}) = \frac{V * 0.02533 * N}{W} * 100$$

$$\%Cr_2O_3 (\text{muestra 2}) = \frac{7 * 0.02533 * 50.66}{5} * 100$$

$$\%Cr_2O_3 (\text{muestra 2}) = 179.65 * 10 = 1796.50 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

#### 4.4.4. Cálculo de concentración de recurtido

$$V = 6 \text{ ml}$$

$$W = 5 \text{ ml}$$

$$N = 50.66 \text{ N}$$

$$\text{Gramos/litro} = \%Cr_2O_3 * 10$$

$$\%Cr_2O_3 (\text{muestra 3}) = \frac{V * 0.02533 * N}{W} * 100$$

$$\%Cr_2O_3 (muestra 3) = \frac{6 * 0.02533 * 50.66}{5} * 100$$

$$\%Cr_2O_3 (muestra 3) = 153.998 * 10 = 1539.86 \frac{mg}{L}$$

**Tabla 4-7:** Concentraciones de cromo en cada proceso.

	Procesos del tratamiento de cueros		
	Muestra proceso de piquelado	Muestra proceso de curtido	Muestra proceso de recurtido
<b>Concentración de cromo (mg/L)</b>	2258.46	1796.50	1539.86

Realizado por: González, B., 2024.

En la tabla 4-7, revela concentraciones significativamente altas de las muestras obtenidas de los procesos de curtiembre. Estas concentraciones se determinan al finalizar cada proceso sin someterse previamente a tratamiento de efluentes. Se ha priorizado el proceso que exhibe la concentración más elevada, identificado como el proceso de piquelado, donde se añadió un 6% de sulfato de cromo (III), resultando en una concentración de 1038.53 mg/L. Esta etapa es crítica en el tratamiento inicial de las pieles, durante la cual se añaden soluciones ácidas para prepararlas para el curtido. Este procedimiento condiciona las pieles para el curtido propiamente dicho, facilitando la apertura de las fibras de colágeno y permitiendo una ejecución efectiva del proceso.

Por otro lado, se observa una concentración más baja durante las etapas de curtido y recurtido, dado que la adición de sulfato de cromo (III) se reduce a la mitad, con solo un 3% de contenido. Este ajuste en la concentración se realiza para mantener un equilibrio adecuado en el proceso, garantizando la calidad del producto final sin comprometer la efectividad del tratamiento de las pieles.

**Tabla 4-8:** Análisis fisicoquímico de los procesos de la curtiembre.

	Unidad	Muestra proceso de piquelado	Muestra proceso de curtido	Muestra proceso de recurtido
<b>PH</b>	Uph	3,85	6,76	4,29
<b>Color</b>	Pt-Co	4600	780	1850
<b>Conductividad</b>	S/m	10,17	7,69	6,822

<b>TDS</b>	Ppt	5,77	4,24	3,79
<b>TSS</b>	mg/L	244	100	123
<b>Nitratos</b>	mg/L	8	11	34
<b>Sulfatos</b>	mg/L	370	2500	400

Realizado por: González, B., 2024.

En la tabla 4-8, se realiza una caracterización de las muestras de aguas obtenidas de los distintos procesos para el tratamiento del cuero. En particular, se han considerado los valores iniciales del proceso de piquelado, dado que en esta etapa se ha detectado la mayor concentración de cromo. Estos datos corroboran que el tratamiento inicial exhibe una proporción más elevada en las pruebas realizadas, enfatizando su importancia crítica en el manejo y control de los niveles de cromo en el proceso de producción de cuero.

#### 4.5. Resultados de la adsorción para determinación de la concentración de cromo



**Ilustración 4-15:** Esquema de filtros de lecho fijo

Realizado por: González, B., 2024.

En la ilustración 4-15, se presenta el diseño del esquema concebido para operar simultáneamente en tres alturas distintas: 9 cm, 6 cm y 3 cm. En cada nivel, se añadieron cantidades específicas de adsorbente: 2.6 gramos, 1.8 gramos y 0.9 gramos respectivamente. A través de un diseño experimental meticuloso, se procedió a la recopilación de muestras en intervalos de tiempo predeterminados.

Posteriormente, cada muestra obtenida fue sometida a un proceso de oxidación de cromo para determinar su concentración, siguiendo el protocolo establecido a continuación:

#### 4.5.1. Resultados de la adsorción a la primera altura

**Tabla 4-9:** Volumen de tiosulfato de sodio (ml)

		Tiempo (min)							
		5	10	15	20	25	30	35	40
Titulaciones (ml)		1.95	1.97	2.02	2.02	2.03	2.05	2.06	2.2
		1.95	1.97	2	2.02	2.03	2.04	2.07	2.4
		1.96	1.97	1.99	2.02	2.02	2.05	2.07	2.3

Realizado por: González, B., 2024.

La tabla 4-9, muestra el volumen obtenido de tiosulfato de sodio necesario para calcular la concentración del cromo aplicando el método de titulación indirecta conocida como yodometría la cual es un método de oxidación-reducción, que valora sustancias reductoras mediante soluciones de yodo, y a estas por medio de disolución patrón de tiosulfato de sódico.

**Tabla 4-10:** Datos obtenidos a la altura de 9cm.

		Tiempo (min)							
		5	10	15	20	25	30	35	40
Concentración cromo (mg/L)		501.32	505.99	517.31	519.97	520.97	525.96	530.95	564.61
		501.66	506.65	512.65	519.30	520.30	524.30	531.29	615.94
		501.99	506.32	509.98	518.64	519.63	525.62	530.62	590.28

Realizado por: González, B., 2024

La tabla 4-10, muestra las concentraciones de cromo (III) mediante la utilización de la columna a la altura de 9cm. Las concentraciones varían según las repeticiones realizadas.

#### 4.5.2. Resultados de la adsorción a la Segunda Altura

**Tabla 4-11:** Volumen de tiosulfato de sodio (ml)

		Tiempo (min)							
		5	10	15	20	25	30	35	40
Titulaciones (ml)		1.91	1.95	1.99	2.00	2.01	2.03	2.06	2.26
		1.92	1.95	1.99	2.00	2.01	2.03	2.05	2.26
		1.92	1.95	1.99	2.00	2.01	2.03	2.06	2.26

Realizado por: González, B., 2024.



La tabla 4-11, muestra la diferencia de los resultados obtenidos en la anterior tabla de los valores del volumen de tiosulfato, a la altura de 6cm el volumen resulta mayor.

**Tabla 4-12:** Datos obtenidos a la Altura de 6cm.

Tiempo (min)								
	5	10	15	20	25	30	35	40
<b>Concentración cromo (mg/L)</b>	490.13	500.99	511.31	512.97	516.97	520.96	528.95	580.61
	491.66	501.65	510.65	513.3	515.3	521.3	527.29	580.94
	492.99	501.32	511.98	513.64	514.63	521.62	527.62	581.28

Realizado por: González, B., 2024.

La tabla 4-12, señala que a menor altura el porcentaje de material adsorbido es menor, con la utilización del mecanismo de oxidación los resultados han sido favorecidos para la altura de 9cm, demostrando que a mayor altura proporciona una mejor retención de cromo.

#### 4.5.3. Resultados de la adsorción a la tercera altura

**Tabla 4-13:** Volumen de tiosulfato de sodio (ml).

Tiempo (min)								
	5	10	15	20	25	30	35	40
<b>Titulaciones (ml)</b>	1.91	1.94	1.98	1.99	1.99	2.01	2.03	2.22
	1.91	1.95	1.97	1.98	1.99	2.01	2.03	2.23
	1.91	1.94	1.97	1.98	2.00	2.01	2.02	2.23

Realizado por: González, B., 2024.

Los valores obtenidos en la tabla 4-13, muestran un porcentaje menor utilizado para titular y obtener el valor del volumen de tiosulfato de sodio, por medio de estos valores podemos obtener el faltante para aplicar la fórmula de la ecuación 1.1.

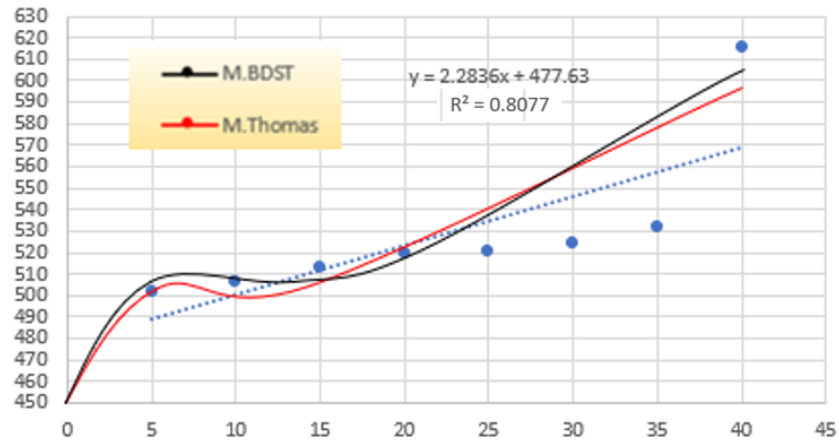
**Tabla 4-14:** Datos obtenidos a la altura de 3cm.

Tiempo (min)								
	5	10	15	20	25	30	35	40
<b>Concentración cromo (mg/L)</b>	490.32	498.99	507.31	509.97	510.97	515.96	520.95	570.61
	489.66	499.65	506.65	508.3	511.3	516.3	520.29	571.94
	488.99	498.32	505.98	508.64	512.63	515.62	519.62	572.28

Realizado por: González, B., 2024.

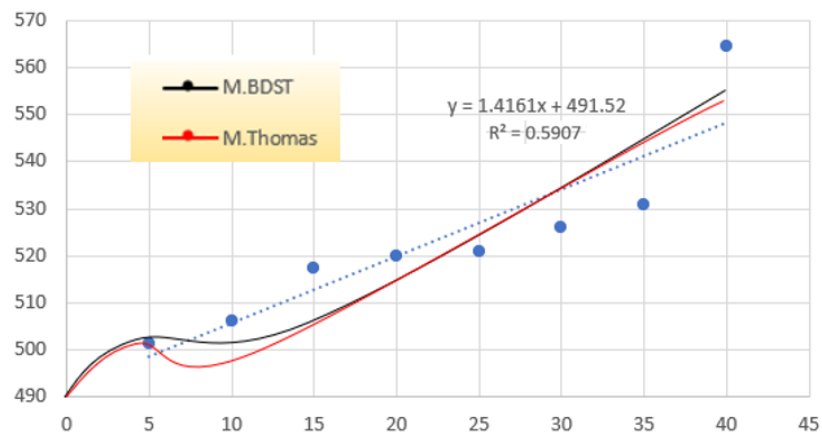
La tabla 4-14, presenta valores con un menor índice de adsorción, con este resultado se demuestra que la mayor la mayor eficiencia para reducir el cromo III es a la mayor altura empaquetado de 9 cm con el composito magnético que ayudó para remover la sustancia tóxica

#### 4.6. Modelado de las curvas de ruptura del lecho



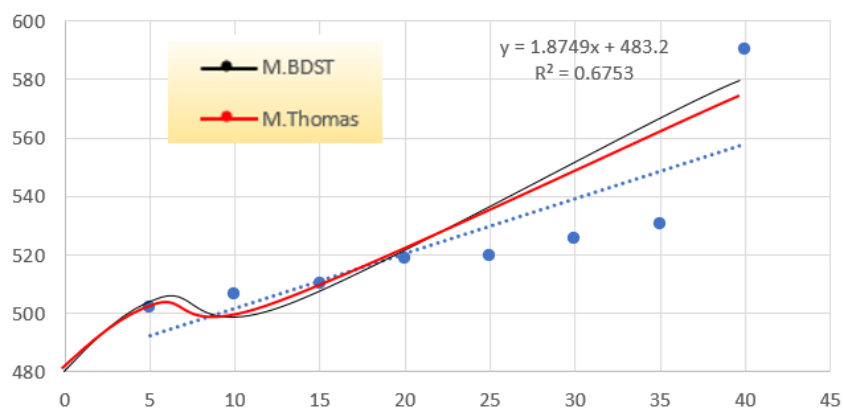
**Ilustración 4-16:** Curva de ruptura utilizando Thomas y BDST altura de 9cm

Realizado por: González, B.,2024.



**Ilustración 4-17:** Curva de ruptura utilizando Thomas y BDST altura de 6 cm

Realizado por: González, B.,2024



**Ilustración 4-18:** Curva de ruptura utilizando Thomas y BDST altura de 3 cm

Realizado por: González, B.,2024

Las ilustraciones 4-16, 4-17 y 4-18 muestran la aplicación de dos modelos de adsorción los cuales fueron el de Thomas y el modelo de tiempo de servicio de profundidad de lecho de Thomas (BDST) donde aparecen las curvas de ruptura de lecho al variar la altura de 9cm, 6cm y 3cm respectivamente con una velocidad de flujo de 7.5 ml/min a diferentes concentraciones de cromo III.

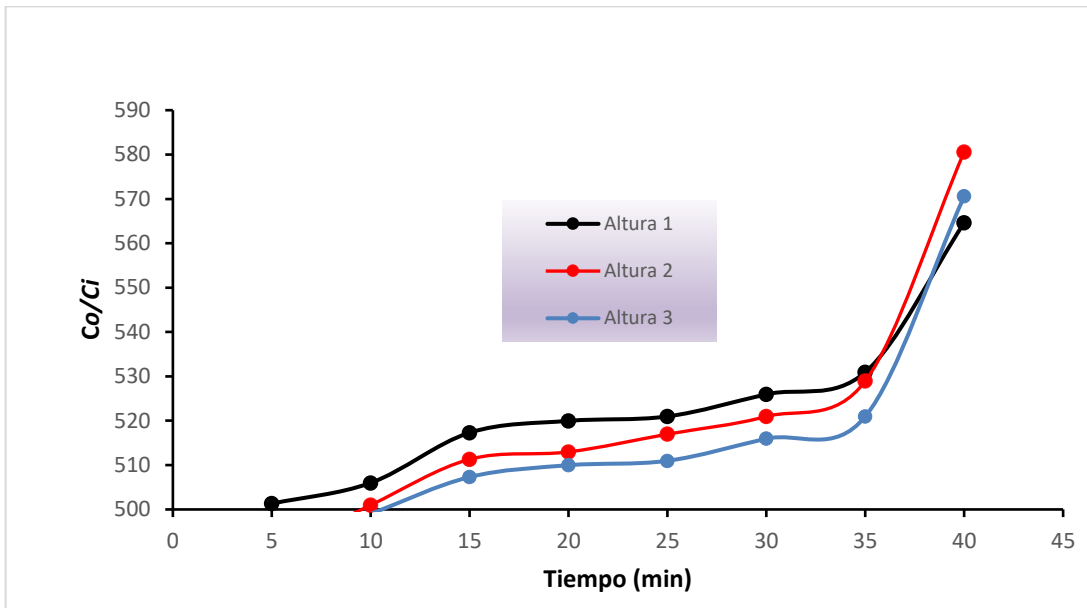
A continuación, se muestra la tabla 4-15 que representa los parámetros calculados para las curvas de ruptura de lecho para los modelos de Thomas y BDST.

**Tabla 4-15:** Parámetros de los modelos usando regresión no lineal

Modelos de adsorción	Unidad	Z(cm)	$R^2$
Modelo de Thomas (Th)	$K_{Tb}(mLmg^{-1}min^{-1})$	9 cm	0.8077
	$q_0(mgg^{-1})$	6 cm	0.5907
Modelo (BDST)	$K_a(Lmg^{-1}min^{-1})$ $N_a(mgg^{-1})$	3cm	0.6753

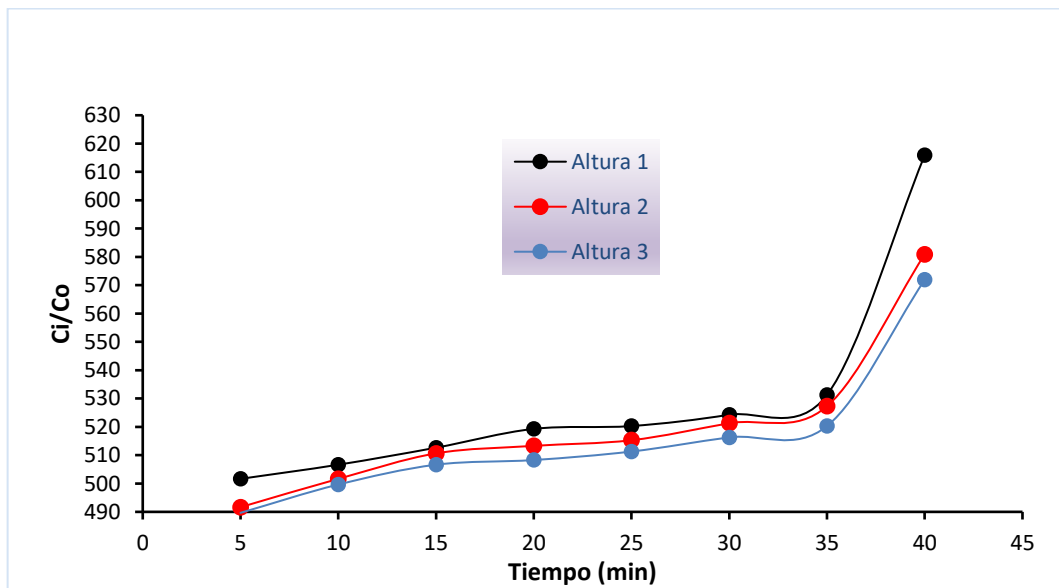
Realizado por: González, B.,2024

#### 4.7. Curvas de rupturas a diferentes alturas



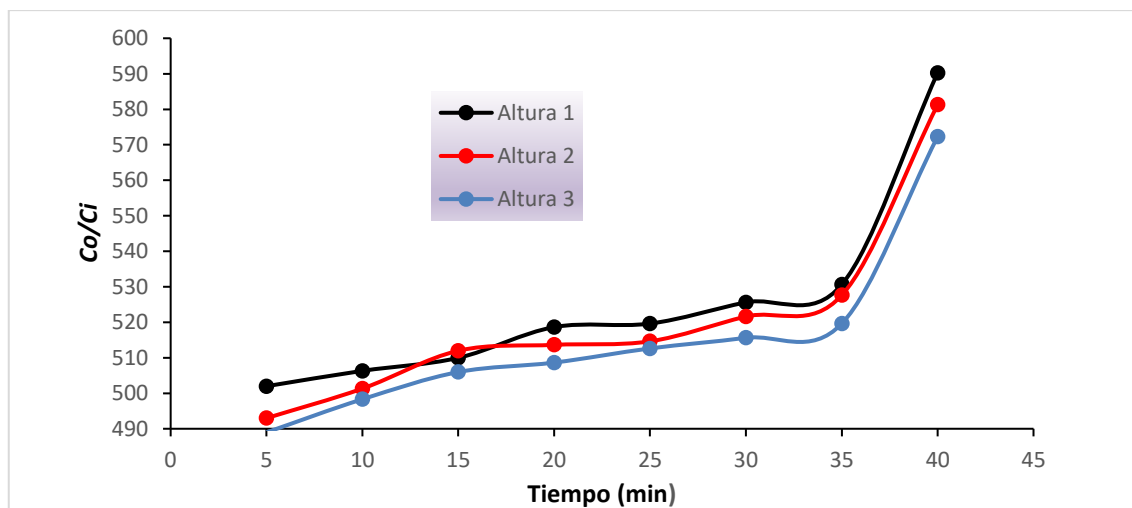
**Ilustración 4-19:** Curvas de ruptura empacquetadas a diferentes alturas. Primera repetición.

Realizado por: González, B.,2024.



**Ilustración 4-20:** Curvas de ruptura empacquetadas a diferentes alturas. Segunda repetición.

Realizado por: González, B.,2024.



**Ilustración 4-21:** Curvas de ruptura empaquetadas a diferentes alturas. Tercera repetición.

Realizado por: González, B., 2024.

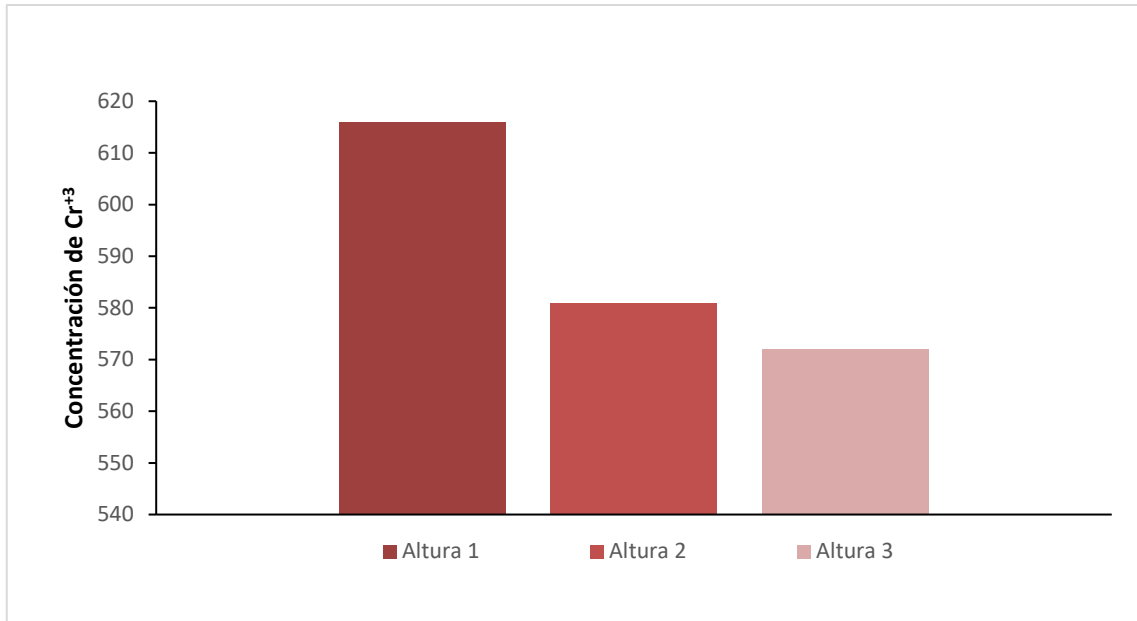
La remoción de metales en una columna de adsorción depende, entre otros factores, de la cantidad de adsorbente utilizado, o lo que es lo mismo, de la altura de empaquetamiento con que se trabaja. Por ello se analizó el efecto que la cantidad de compuesto magnético tiene en el proceso de adsorción de óxido de cromo, para lo cual se realizaron experimentos con tres cantidades de material equivalentes a tres alturas, 9cm, 6cm y 3 cm. Los resultados a diferentes condiciones de operación de la columna se muestran en la ilustración 4-19.

La ilustración 4-20, muestra la segunda repetición de concentración de cromo trivalente a diferentes alturas de lecho con una concentración de entrada de 2258,46 mg/l y un caudal de 7.5 ml/min. A medida que la altura del lecho aumentó de 3 a 9 cm, aumentó la capacidad de adsorción y se incrementó el porcentaje de eliminación de óxido de cromo, en esta sección se determinó el punto más alto de adsorción que fue de 614,94 ml/L, el tiempo de ruptura para una columna de 9 cm fue de 40 minutos.

Los resultados mostraron que el modelo BDST se ajusta como un modelo adecuado para la descripción de curva de ruptura a la condición experimental mediante el coeficiente de correlación a la altura de 9 cm, obteniendo un valor de  $R^2$  de 0,81 al observar la ilustración 4-16 donde se muestra la curva de ruptura predicha y los puntos experimentales.

En la ilustración 4-21, se observan las relaciones de las columnas en diferentes alturas aplicando una tercera repetición, Las curvas de ruptura son difusas y se muestran en forma de S, ya que las tasas de transferencia de masa suelen ser limitantes. Al aumentar la altura del lecho, el tiempo de penetración suele aumentar. La profundidad real del lecho es normalmente mayor que este

mínimo al diseñar una columna, de modo que el adsorbente tiene un tiempo de funcionamiento suficiente.



**Ilustración 4-22:** Comparación de Concentración final de cromo III

Realizado por: González, B.,2024.

La ilustración 4-22, muestra la comparación del mayor potencial adsorbido en las tres diferentes alturas, siendo la primera altura de 9 cm con una concentración de 614,94 mg/L que se pudo retener.

#### 4.8. Eficiencia de la remoción de cromo

Para calcular la eficiencia del proceso de adsorción en la reducción del cromo III en el agua residual, se utilizó la siguiente fórmula.

$$Eficiencia \% = \frac{\text{concentración inicial} - \text{concentración final}}{\text{concentración inicial}} * 100$$

Dado que la concentración inicial de cromo III fue de 2258,46 mg/L y la concentración final después del proceso de adsorción fue de 615,94 mg/L, la eficiencia es:

$$Eficiencia \% = \frac{2258,46 \text{ mg/L} - 615,94 \text{ mg/L}}{2258,46 \text{ mg/L}} * 100$$

$$Eficiencia \% = 72,68\%$$

Por lo tanto, la eficiencia del proceso de adsorción en la reducción del cromo III en el agua residual es aproximadamente del 72,68%. Esto indica que el proceso fue efectivo en la remoción del cromo III, logrando una reducción significativa en su concentración en la muestra tratada.

#### 4.9. Validación del experimento para disminuir las cantidades de cromo III de aguas residuales

Para validar el experimento como un procedimiento efectivo para reducir los niveles de  $Cr^{+3}$  se utilizó el análisis de varianza ANOVA. Este análisis se llevó a cabo para determinar si hay una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los resultados obtenidos, dependiendo de la concentración final de  $Cr^{+3}$  en las diferentes muestras.

**Tabla 4-16:** Concentraciones de cromo III.

	Tiempo de contacto (min)								
	5	10	15	20	25	30	35	40	
Concentración cromo (mg/L)	A1	501.32	505.99	517.31	519.97	520.97	525.96	530.95	564.61
		501.66	506.65	512.65	519.30	520.30	524.30	531.29	615.94
		501.99	506.32	509.98	518.64	519.63	525.62	530.62	590.28
	A2	490.13	500.99	511.31	512.97	516.97	520.96	528.95	580.61
		491.66	501.65	510.65	513.3	515.3	521.3	527.29	580.94
		492.99	501.32	511.98	513.64	514.63	521.62	527.62	581.28
	A3	490.32	498.99	507.31	509.97	510.97	515.96	520.95	570.61
		489.66	499.65	506.65	508.3	511.3	516.3	520.29	571.94
		488.99	498.32	505.98	508.64	512.63	515.62	519.62	572.28

Realizado por: González, B., 2024.

Los resultados del análisis químico para la determinación de  $Cr^{+3}$  se presentan en la Tabla 4-15. Basándonos en estos resultados, es evidente que la adsorción del metal alcanza aproximadamente el 78%.

**Tabla 4-17:** Obtención de valores para análisis de varianza.

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Muestra	1313.76	2.00	656.88	23.00	0.00	3.19
Columnas	43886.65	7.00	6269.50	220.00	0.00	2.21
Interacción	199.92	14.00	14.28	0.50	0.92	1.90
Dentro del grupo	1367.64	48.00	28.49			
Total	46767.98	71.00				

Realizado por: González, B., 2024.

### **Hipótesis:**

**Hipótesis nula ( $H_o$ ):** A mayor altura de empaquetamiento en la columna de adsorción con composito magnético, se espera un incremento en la eficiencia de remoción de cromo, debido a una mayor superficie de contacto que facilita la interacción entre el composito y los iones de cromo en solución.

**Hipótesis alterna ( $H_a$ ):** A menor altura de empaquetamiento en la columna de adsorción con composito magnético, se espera una disminución en la eficiencia de remoción de cromo, debido a una menor superficie de contacto que dificulta la interacción entre el composito y los iones de cromo en solución.

Según los resultados presentados en la tabla 4-28, se observa un valor de p igual a 0.92, superando el nivel de significancia establecido de 0.05. Por consiguiente, se acepta la hipótesis nula ( $H_o$ ), indicando que a medida que aumenta la altura de empaquetamiento del compuesto magnético en la columna de adsorción, se incrementa la eficiencia en la remoción del cromo (III). Este resultado sugiere que una mayor superficie de contacto facilita la interacción del material. Se rechaza la hipótesis alternativa ( $H_a$ ), que sugiere que otras alturas de empaquetamiento reducen la eficiencia del compuesto en la remoción del metal pesado.

#### **4.10. Comparación de análisis fisicoquímico de agua residual del proceso de piquelado antes y después del tratamiento.**

**Tabla 4-18:** Datos antes y después de la adsorción

	<b>Antes</b>	<b>Después</b>
	<b>Muestra proceso de piquelado</b>	<b>Muestra proceso de piquelado</b>
<b>PH</b>	3,85	8.36
<b>Color</b>	4600	8500
<b>Conductividad</b>	10,17	6.36
<b>TDS</b>	5,77	3,10
<b>TSS</b>	244	145
<b>Nitratos</b>	8	8.7
<b>Sulfatos</b>	370	385

Realizado por: González, B.,2024.



La Tabla 4-17 presenta una comparación detallada entre los datos recopilados al analizar la muestra de entrada al proceso de piquelado y los resultados obtenidos después de aplicar un tratamiento de adsorción para reducir la concentración de cromo III. Este proceso se llevó a cabo utilizando el agua procedente de una columna de 9 cm, que demostró tener la capacidad de absorber la mayor concentración del óxido de cromo.

Los datos revelan una diferencia significativa entre ambos conjuntos de muestras. En la muestra inicial, correspondiente al agua sin tratar, se observa una concentración relativamente alta de cromo III, lo que sugiere una contaminación presente en el agua residual proveniente del proceso de piquelado. Sin embargo, tras la aplicación del proceso de adsorción, se registra una disminución notable en la concentración.

Este resultado indica que el proceso de adsorción ha sido efectivo en la remoción del cromo III de la solución. Además, destaca que la columna de 9 cm utilizada para la adsorción ha demostrado ser particularmente eficiente en este proceso, ya que logró absorber una cantidad significativa del contaminante.

#### **4.11. Discusión de resultados**

Tras la investigación realizada se afirma que la aplicación del composito magnético como material adsorbente para reducir el contenido de  $Cr^{+3}$  en aguas residuales provenientes de curtiembres mediante la utilización de columnas de lecho fijo a diferentes alturas que permitió constatar resultados favorecidos cumpliendo con el objetivo planteado como tema de estudio.

Para desarrollar el presente trabajo se utilizó tres alturas diferentes en las 3 diferentes columnas, donde se añadieron diferentes cantidades de composito para determinar cuál de ellas presenta la mayor eficiencia para remover el metal pesado, pudiendo establecer que al utilizar el filtro con material filtrante cuya altura es de 6 cm y con una cantidad de 2.7 gramos, presenta mayor capacidad de adsorción respecto de las columnas en las que las alturas eran de 3cm con 0.9 gramos y 6 cm con 1.8 gramos respectivamente, aunque la diferencia en cada una de las columnas no es grande si existe un cambio que permite determinar que a mayor altura y con mayor cantidad de material los resultados serán más favorecidos.

Según (Córdova et al., 2018, p.110) realizaron una investigación para evaluar la tecnología de columna de adsorción de lecho fijo, a escala de laboratorio, para neutralizar y reducir la concentración de

iones cromato del residual industrial alcalino de la Empresa de fibrocemento “Armando Mestre” de Santiago de Cuba, utilizando como adsorbente una zeolita natural tipo mordenita (ZN).

Mediante pruebas coloidequímicas se determinó que el punto de carga cero de esta zeolita es de 7,3; desplazándose hasta 7,7 cuando entra en contacto con una disolución de cromato. Este resultado, con las curvas de ruptura que describen los procesos de neutralización del pH y de adsorción del cromo en el lecho de zeolita, así como con las posiciones determinadas de los puntos de ruptura, corroboraron que los iones cromatos son adsorbidos por la superficie externa del mineral zeolítico mediante un proceso de adsorción específica polar. De la misma forma en las curvas de ruptura se confirmó mediante la utilización de composito magnético se adsorben satisfactoriamente partículas de cromo III, permitiendo el correcto funcionamiento de las columnas a diferentes alturas.

Según (Buñay, 2022, p.32) en su investigación sobre “Adsorción de cromo (III) de aguas residuales de la curtiembre el AL-CE” del cantón Guano mediante filtración con polvo de vicia faba para reducir el nivel de contaminación”, determina que en el primer análisis se obtuvo una concentración inicial de 133 mg/L de  $Cr^{+3}$ , en el segundo análisis se obtuvo 130 mg/L y en la tercera muestra se tuvo una concentración de 120,1 mg/L de  $Cr^{+3}$ . Detallando que dichas muestras fueron recogidas al final del proceso de tratamiento en la empresa a diferencia de la investigación realizada la cual obtuvo las muestras de los tres diferentes procesos de la empresa misma, las cuales fueron del proceso de piquelado, curtido y recurtido, siendo el primer proceso el que contenía la mayor concentración la cual fue de 2258.46 mg/L a diferencia de los otros procesos que se obtuvieron concentraciones de 1796.50 mg/L y 1539.86 mg/L respectivamente.

(Yan et al, 2018, p.15) sintetizaron exitosamente mediante el método de reticulación, las nanopartículas de  $Fe_3O_4$  funcionalizadas alcohol polivinílico/quitosán hidrogel compuesto magnético ( $Fe_3O_4$  HCM). Determinaron que el  $Fe_3O_4$ -MCH se usaba como un adsorbente para eliminar el  $CrO_2$  y  $Cr^{+6}$  de la solución acuosa y muestra un rendimiento de adsorción alentador para el  $Cr^{+6}$ , tanto en condiciones neutras como ácidas. En condición neutra, compartir electrones puede ser una de las posibles razones de adsorción, mientras que, en condición ácida, la atracción electrostática puede ser un posible mecanismo de adsorción

(Padmavathy et al., 2016, p.586) Realizaron la síntesis de nanopartículas de magnetita en el laboratorio con el fin de eliminar el cromo hexavalente  $Cr^{+6}$  de aguas residuales preparadas sintéticamente. Caracterizaron las partículas sintetizadas por microscopía electrónico de barrido equipada con espectroscopia de rayos X de disgregación de energía, difracción de rayos X y analizador

termogravimétrico. Realizaron estudios de adsorción por lotes para estudiar los efectos del pH, la dosis de magnetita, el tiempo y la concentración inicial en la eliminación de Cr (VI). También realizaron el estudio de isoterma de adsorción. El pH óptimo para el presente trabajo fue de 3,0. La adsorción siguió el modelo de isoterma de Freundlich. Usaron el espectrofotómetro UV VIS para medir la concentración de cromo hexavalente en agua.

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

Se determinó que la altura de empaquetamiento de un compuesto magnético influye significativamente en la remoción de cromo mediante una columna de adsorción. Los resultados mostraron una remoción efectiva del cromo III del agua residual, destacando la eficacia del compuesto en este proceso de tratamiento. Además, a mayor altura de empaquetamiento resultó en una remoción más efectiva del contaminante, lo que sugiere una mayor interacción entre el cromo y el compuesto magnético adsorbente a lo largo de la columna. Estos hallazgos son prometedores para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con óxido de cromo, beneficiando la mitigación de la contaminación del agua y resaltando el potencial de esta tecnología con material orgánico.

Se logró sintetizar el composito *Schoenoplectus californicus* - magnético mediante un proceso de química húmeda. Este proceso incluyó la trituración del material a un tamaño de partícula de 850 micrones y la hidrolización de la fibra para mejorar su capacidad de adsorción en la remoción de contaminantes presentes en aguas residuales. La hidrolización modificó la superficie del material y aumentó la disponibilidad de sitios activos para la adsorción. Este composito ofrece una solución eficiente para la depuración de aguas residuales, contribuyendo a la protección del medio ambiente.

Se evaluó la capacidad de adsorción del compuesto mediante un sistema de columnas de lecho fijo, proporcionando resultados significativos sobre su eficacia en el tratamiento de aguas residuales provenientes de diferentes procesos en una planta de curtido. La caracterización del agua de entrada y salida permitió determinar la eficiencia del compuesto en la adsorción del cromo III, presente en concentraciones variables en los diversos procesos de la planta.

Los resultados indicaron que el proceso de piquelado presentaba la mayor concentración de cromo III, con un valor de 2258.46 mg/L, lo cual se utilizó como referencia para los análisis realizados en las columnas de tratamiento. Se observó que la columna de 9 cm demostró una mayor eficiencia en la retención del cromo III en comparación con las columnas de 6 cm y 3 cm, las cuales mostraron una menor remoción del contaminante con el mismo tiempo de contacto. Estos

hallazgos sugieren que el tamaño y la configuración de la columna son factores críticos para maximizar la capacidad de adsorción del compuesto.

Se desarrolló el análisis estadístico de tipo DCA para el ANOVA, utilizando las diferentes alturas de las variables de concentración y tiempo de contacto, demostrando que la mayor eficiencia se logró a mayor altura con un porcentaje mayor de composito empaquetado en la columna de adsorción lo que permitió que se consiga una mayor eficiencia.

## 5.2. Recomendaciones

Se sugiere emplear el composito magnético de totora como un material bioadsorbente para eliminar partículas de  $Cr^{+3}$  presentes en los tratamientos de las curtiembres. Para conseguir mejores resultados se recomienda utilizar el material a mayor tiempo ya que cuanto mayor sea el tiempo de contacto, mayor será la eficacia en la remoción del contaminante. Mediante la síntesis del composito magnético se sugiere experimentar con más concentraciones de reactivos para poder obtener un composito con mayores porcentajes de magnetita, de tal manera se pretende que con estos estudios mejore la capacidad de retención en el material y prolongue el tiempo de contacto en la superficie.

Se recomienda para estudios posteriores trabajar a mayor altura de los 9cm en las columnas de adsorción y con un porcentaje de composito más alto de 2.6gr para poder corroborar que a mayor altura la capacidad de adsorción es más eficiente y permite una mejor retención de las partículas de cromo, siendo comprobado que a esta altura y la cantidad de material son óptimos para mejorar la eficiencia en la remoción del metal pesado.

Conforme a la investigación bibliográfica realizada se evidencia la utilización de otros residuos orgánicos para la remoción de cromo, se sugiere experimentar con la totora *Schoenoplectus californicus* para remover otros metales pesados que se encuentran presentes en aguas residuales e identificar en cuál de los otros metales existe una mayor eficiencia para removerlos mediante pruebas en columnas de adsorción.

## BIBLIOGRAFÍA

1. **BENÍTEZ CAMPO, N., & PERAFÁN CABRERA, A.** Las curtiembres de El Cerrito (Valle del Cauca): una mirada en torno a su realidad socioeconómica y ambiental. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 19(2), págs. 457–466. 2016 Disponible en: <https://doi.org/10.31910/rudca.v19.n2.2016.100>
2. **BERNAL MORALES, D. M., & AGUIRRE DOMELIN, N. A.** Escalamiento columna de adsorción para la remoción de cromo en las aguas residuales de la industria de curtiembre por medio de la cáscara de banano. In *Fundación Universidad de América* (Issue 8.5.2017). 2022. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8848/4/6162002-2022-1-IQ.pdf>
3. **BUÑAY CANDO, N. J.** *Adsorción de cromo (III) de aguas residuales de la curtiembre “el al-ce” del cantón Guano mediante filtración con polvo de vicia faba para reducir el nivel de contaminación* (Issue Iii). 2022. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/14986>
4. **CAVIEDES RUBIO, D. I., et. al.** *Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión.* Ingeniería y Región, 13(1), 73. Disponible en: <https://doi.org/10.25054/22161325.710>
5. **CÓRDOVA, V., RODRÍGUEZ, I., & GARCELL, L.** Remoción del cromo de residuales alcalinos con zeolita. *Tecnología Química*, 38(2), págs. 210–222. 2018. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/4455/445558422001/html/>
6. **CUADRADO CAMPO, W. J., VICUÑA ORIHUELA, C. E., & TORRES GUTIÉRREZ, E. R.** Evaluación de la planta *Scirpus californicus* (Totora) en la eficiencia de remoción de fierro en un prototipo de humedal construido de flujo superficial. *Prospectiva Universitaria*, 11(1), págs. 42–48. 2020. Disponible en: <https://doi.org/10.26490/uncp.prospectivauniversitaria.2014.11.6>
7. **DÍAZ, Y., MENDIOLA, L., GONZÁLEZ, A., RIVAS, L., & ROMERO, R.** Capacidad de adsorción de materiales naturales para el tratamiento de aguas de proceso de la actividad petrolera. *Revista Centro Azúcar*, 48(3), pág. 41. 2021. Disponible en: [http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro\\_azucar/article/view/665](http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/665)
8. **GARZÓN, M., BUELNA, G., & MOELLER, G.** La biofiltración sobre materiales orgánicos, nueva tecnología sustentable para tratar agua residual en pequeñas comunidades e industrias. *Tratamiento RRSs, III*, pág. 153. 2012. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222012000300011](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222012000300011)

9. LARA, J., TEJADA, C., VILLABONA, A., & ARRIETA, A. Adsorción de plomo y cadmio en sistema continuo de lecho fijo sobre residuos de cacao. *Revista ION*, 29(2), págs. 111–122. 2017. Disponible en: <https://doi.org/10.18273/revion.v29n2-2016009>
10. LEIVA-MAS, J., et. al. Adsorción de hidrocarburos en columnas rellenas con bagazo: una solución sostenible. *ICIDCA*, 46(2), págs. 36–44. 2012. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223124988005>
11. MURGUEITIO, É., & PILCO, W. Remoción de cromo VI, mediante el uso de hidróxidos dobles laminares con óxidos mixtos (HDL-OM). *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., 2(Mi), 5. 2014.
12. PACHECO ESCALANTE, E. F., & SORIA, J. G. Comparación de la magnetización de las películas de SnO<sub>2</sub>:Co sobre a zafiro, r-zafiro y SnO<sub>2</sub> puro medidas con el campo magnético aplicado en paralelo y perpendicular al plano. (Trabajo de Titulación) (Pregrado). 2014. Disponible en: <http://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/744>
13. PADMAVATHY, K. S., MADHU, G., & HASEENA, P. V. Un estudio sobre los efectos del pH, la dosis de adsorbente, el tiempo, la concentración inicial y el estudio de isoterma de adsorción para la eliminación de cromo hexavalente (Cr (VI)) de aguas residuales mediante nanopartículas de magnetita. *Procedia Technology*, 24, pág. 586. 2016. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.05.127>
14. PATEL, H. Estudio de adsorción en columna de lecho fijo: una revisión exhaustiva. *Applied Water Science*, 9(3), pág. 12. 2019. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0927-7>
15. ROMERO-CANO, L. A. Preparación y caracterización de materiales adsorbentes a partir de cáscaras de frutas para su uso en la remoción de metales y aplicación a procesos ambientales (Trabajo de titulación) (Maestría). Universidad de Granada. 2018. Disponible en: <https://doi.org/http://hdl.handle.net/10481/49626>
16. ROSAS, A. C. R. Recuperación de cromo (III) de efluentes de curtido para control ambiental y optimización del proceso productivo. (Trabajo de titulación) (Pregrado). In (Issue Iii). 2013.
17. TEJADA-TOVAR, C., VILLABONA-ORTIZ, Á., & GARCÉS-JARABA, L. Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *TecnoLógicas*, 18(34), pág. 109. 2015. Disponible en: <https://doi.org/10.22430/22565337.209>
18. TORRES-RODRÍGUEZ, J. *Extracción de ácidos nucleicos usando nanopartículas magnéticas núcleo-coraza*. 2017. Disponible en: <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/2035>
19. VALLADARES-CISNEROS, M. G., et. al. Adsorbentes no-convencionales, alternativas sustentables para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 16(31), pág. 58. 2017. Disponible en: <https://doi.org/10.22395/rium.v16n31a3>



## ANEXOS

### ANEXO A: TRITURACIÓN Y TAMIZADO DE LA MATERIA PRIMA



#### NOTAS:

- a. Totora seca
- b. Totora triturada
- c. Tamizado de la totora a 850  $\mu\text{m}$

#### CATEGORÍA DEL DIAGRAMA:

- Aprobado
- Certificado
- Información
- Preliminar
- Por aprobar
- Por calificar

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA  
DE CHIMBORAZO  
FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

ELABORADO POR:  
González Zambrano Bryan Alejandro

Trituración y tamizado de la materia prima

LÁMINA	ESCALA	FECHA
1	1:1	2024/03/18

## ANEXO B: HIDRÓLISIS DE LA FIBRA DE TOTORA



<b>NOTAS:</b>	<b>CATEGORÍA DEL DIAGRAMA:</b>	<b>ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA</b>  <b>ELABORADO POR:</b> González Zambrano Bryan Alejandro	Hidrólisis de la fibra de totora		
d. Fibra de totora para hidrolizar e. Fibra en el sonificador para mejorar el proceso f. Fibra hidrolizada	<input type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Preliminar <input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Por aprobar <input type="checkbox"/> Información <input type="checkbox"/> Por calificar				

**ANEXO C: LAVADO DE LA FIBRA**



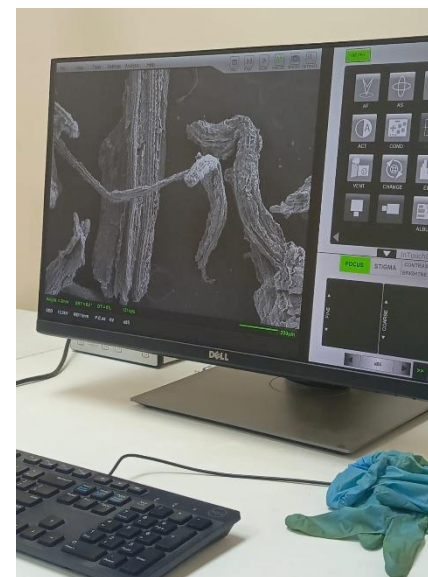
<b>NOTAS:</b>	<b>CATEGORÍA DEL DIAGRAMA:</b>	<b>ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA</b>	<b>Lavado de la fibra</b>		
g. Lavado de la fibra para mejorar la hidrolisis h. Fibra conseguida el pH de 7.4 i. Fibra secando al ambiente	<input type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Preliminar <input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Por aprobar <input type="checkbox"/> Información <input type="checkbox"/> Por calificar				
			1	1:1	2024/03/18

**ANEXO D: SÍNTESIS DEL COMPOSITO SCHOENOPLECTUS CALIFORNICUS -MAGNÉTICA**



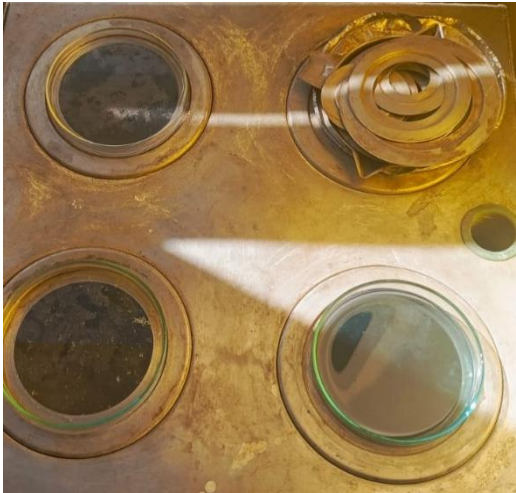
<b>NOTAS:</b>	<b>CATEGORÍA DEL DIAGRAMA:</b>	<b>ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA</b>	<b>TRITURACIÓN DE LA TOTORA</b>		
j. Síntesis del composito k. Finalización del proceso de síntesis l. Composito magnético	<input type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Preliminar <input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Por aprobar <input type="checkbox"/> Información <input type="checkbox"/> Por calificar				
			1	1:1	2024/03/18

**ANEXO E: CARACTERIZACIÓN DEL COMPOSITO DE: IR, EDX, SEM**



<b>NOTAS:</b>	<b>CATEGORÍA DEL DIAGRAMA:</b>	<p><b>ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO</b>  <b>FACULTAD DE CIENCIAS</b>  <b>ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA</b></p> <p>ELABORADO POR:                  González Zambrano Bryan Alejandro</p>	<p>Caracterización del composito de: IR,                  EDX, SEM</p>		
<p>m. Caracterización de IR                  n. Caracterización de EDX                  o. Caracterización de SEM</p>	<p><input type="checkbox"/> Aprobado                      <input type="checkbox"/> Preliminar  <input type="checkbox"/> Certificado                      <input type="checkbox"/> Por aprobar  <input type="checkbox"/> Información                      <input type="checkbox"/> Por calificar</p>				
		<p>1</p>	<p>1:1</p>	<p>2024/03/18</p>	

**ANEXO F: CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL DE LA EMPRESA DE CURTIEMBRE**



<b>NOTAS:</b>	<b>CATEGORÍA DEL DIAGRAMA:</b>	<b>ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO</b> <b>FACULTAD DE CIENCIAS</b> <b>ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA</b>	<b>TRITURACIÓN DE LA TOTORA</b>		
p. Filtración de aguas residuales de los tres procesos de curtiembre q. Análisis físico (pH) r. Análisis TDS de las muestras de agua residual	<input type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Preliminar <input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Por aprobar <input type="checkbox"/> Información <input type="checkbox"/> Por calificar				
			1	1:1	2024/03/18

**ANEXO G: DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE CROMO III**



<b>NOTAS:</b>	<b>CATEGORÍA DEL DIAGRAMA:</b>	<p><b>ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO</b>  <b>FACULTAD DE CIENCIAS</b>  <b>ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA</b></p> <p>ELABORADO POR:                  González Zambrano Bryan Alejandro</p>	Determinación de contenido de Cromo III		
s. Muestras de los procesos de curtido con ácidos para determinación de cromo t. Utilización de la sorbona para ebulir las muestras. u. Titulación con Tiosulfato de Sodio en las tres muestras.	<input type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Preliminar <input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Por aprobar <input type="checkbox"/> Información <input type="checkbox"/> Por calificar		<b>LÁMINA</b>	<b>ESCALA</b>	<b>FECHA</b>
			1	1:1	2024/03/18

## ANEXO H: ADSORCIÓN DEL AGUA RESIDUAL EN LA COLUMNA DE ADSORCIÓN



<b>NOTAS:</b>	<b>CATEGORÍA DEL DIAGRAMA:</b>	<b>ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA</b>  <b>ELABORADO POR:</b> González Zambrano Bryan Alejandro	Determinación de contenido de Cromo III		
v. Medición de las columnas de adsorción. w. Tres columnas empaquetadas a diferentes alturas x. Implementación de las columnas de adsorción para eliminar el cromo del agua residual.	<input type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Preliminar <input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Por aprobar <input type="checkbox"/> Información <input type="checkbox"/> Por calificar		<b>LÁMINA</b>	<b>ESCALA</b>	<b>FECHA</b>
		1	1:1	2024/03/18	





**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**CERTIFICADO DE CUMPLIMIENTO DE LA GUÍA PARA**  
**NORMALIZACIÓN DE TRABAJOS DE FIN DE GRADO**

**Fecha de entrega:** 01/08/2024

<b>INFORMACIÓN DEL AUTOR</b>
<b>Nombres – Apellidos:</b> Bryan Alejandro González Zambrano
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>
<b>Facultad:</b> Ciencias
<b>Carrera:</b> Ingeniería Química
<b>Título a optar:</b> Ingeniero Químico.
<p style="text-align: center;"> Dr. Jorge Efrén Silva Yumi <b>Director del Trabajo de Integración Curricular</b></p> <p style="text-align: center;"> Ing. Mabel Mariela Parada Rivera <b>Asesora del Trabajo de Integración Curricular</b></p>