

TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE TIANGUISTENCO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA AMBIENTAL

OPCIÓN IX
TESIS

Remoción de soluciones bicomponentes Cr(VI)–índigo carmín
en solución acuosa por carbón activado de *Typha domingensis*

Que para obtener el Título de
INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTA:
María Jazmín Romero Molina

DIRECTORA:
Dra. Miriam Jeniffer Jiménez Cedillo

ASESOR:
Dr. Julio César González Juárez

DICIEMBRE 2025

El presente trabajo se realizó en las instalaciones del Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco, en el laboratorio de Instrumental de la División de Ingeniería Ambiental, como parte del proyecto DIDT/CI2025/19 “Obtención de los parámetros operacionales para el diseño de un filtro a base de carbón activado de *Typha domingensis*”, bajo la responsabilidad de la Dra. Miriam Jeniffer Jiménez Cedillo.

Este trabajo de investigación fue registrado con el título “Remoción de soluciones bicomponentes Cr(VI)-índigo carmín en solución acuosa por carbón activado de *Typha domingensis*” con el número JD/IA/T-248/2025 ante la Academia de Ingeniería Ambiental.

El trabajo se inscribe en la línea de investigación: Ingeniería Ambiental y Energías Renovables del Programa de Ingeniería Ambiental del Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	ix
JUSTIFICACIÓN	xi
OBJETIVOS.....	xiii
OBJETIVO GENERAL	xiii
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	xiii
HIPÓTESIS.....	xiii
Capítulo 1.....	1
Generalidades	1
1.1 El agua.....	2
1.1.1 Contaminación del agua	3
1.1.2 Aguas residuales	4
1.1.2 Aguas residuales Industriales	5
1.1.3 Aguas residuales de la industria textil	6
1.1.4 Aguas residuales de la industria manufacturera	7
1.2 Metales.....	7
1.2.2 Usos del Cromo (VI)	9
1.2.3 Efectos del Cromo en el ambiente	9
1.2.4 Efectos del Cromo en el agua	10
1.2.5 Efectos del Cromo en la salud	10
1.3 Colorantes	11
1.3.1 Índigo carmín	12
1.3.2 Efectos del índigo carmín en el agua	13
1.3.3 Efectos del índigo carmín en la salud	13
1.4 Métodos de tratamiento de aguas residuales	14
1.4.1 Electrodialisis	14

1.4.3 Nanofiltración	15
1.5 Cinética de sorción	18
1.5.1 Seudo primero Orden	19
1.5.2 Modelo de Elovich	19
1.6 Materiales adsorbentes.....	20
1.6.1 Carbón activado	20
1.6.2 Carbón activado a partir de plantas	21
1.6.3 Carbón activado a partir de <i>Typha domingensis</i>	21
Capítulo 2.....	23
Desarrollo Experimental	23
Capítulo 3.....	30
Resultados y discusión	30
3.1 Obtención del precursor <i>Typha domingensis</i>	31
3.2 Obtención del carbón activado a partir de <i>Typha domingensis</i>	31
3.3 Evaluación preliminar de la remoción de Cr(VI)-índigo carmín con carbón activado de <i>Typha domingensis</i>	32
3.4 Evaluación del efecto del pH.....	34
3.5 Evaluación del tiempo de contacto	42
3.6 Efecto de la concentración de los contaminantes	45
3.7 Efecto de la temperatura.....	47
CONCLUSIONES	51
RECOMENDACIONES.....	45
Referencias.....	47

ÍNDICE FIGURAS

Figura 11. Estructura molecular del agua (Douglas & Jean, 2001)	2
Figura 1.2. Ciclo del cromo en la naturaleza (Eggs. E, 2016)	8
Figura 1.3. Molécula del índigo carmín (Hermes P, 2003)	13
Figura 1.4. Fenómeno de adsorción (Díaz et al., 2016)	17
Figura 1.5. Comportamiento de las moléculas en proceso de adsorción física y química (Molina & Vergaray, 2020)	18
Figura 2.1 Diagrama general del desarrollo experimental.....	24
Figura 2.2. Esquema del proceso de evaluación de pH.....	26
Figura 2.3. Esquema del proceso de efecto de la concentración.....	28
Figura 2.4 Esquema del proceso del efecto de temperatura.....	29
Figura 3.1 Proceso del acondicionamiento del precursor lignocelulósico.....	31
Figura 3.2 Proceso de la obtención del carbón activado a partir del precursor lignocelulósico.....	31
Figura 3.3. Solución después de la fase de adsorción a concentración diferente.....	32
Figura 3.4 Porcentaje de remoción de cromo (VI)- índigo carmín en solución bicomponente.....	33
Figura 3.5 Efecto de pH en la remoción de solución bicomponente.....	35
Figura 3.6 Cinética de adsorción Cromo (VI).....	42
Figura 3.7. Cinética de remoción IC.....	43
Figura 3.8. Cinética de remoción en solución bicomponente.....	44
Figura 3.9 Efecto de la concentración inicial de Cr(VI).....	45
Figura 3.10 Efecto de la concentración inicial de IC.....	46
Figura 3.11 Efecto de la temperatura de Cr(VI)	47
Figura 3.12 Efecto de temperatura IC.....	48
Figura 3.13 Porcentaje de remoción Cr(VI)-índigo carmín.....	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Límites máximos permisibles de colorantes en aguas residuales.....	5
Tabla 2. Límites permisibles para cromo.....	5
Tabla 3. pH en solución acuosa bicomponente.....	34
Tabla 4. Parámetros cinéticos de adsorción en solución bicomponente.....	44
Tabla 5. Parámetros de isothermas de adsorción de Cr(VI) con CA _{TD}	46

ACRÓNIMOS (SI ES EL CASO)

CA	Carbón activado
CA _{TD}	Carbón activado de Typha domingensis
Cr(VI)	Cromo hexavalente
IC	Índigo carmín
Mg/L	Miligramos sobre litro
mL	Mililitros
nm	Nanómetros
pH	Potencial de hidrogeno
qt	Concentración en el tiempo

RESUMEN

La contaminación del agua por metales y colorantes es uno de los mayores problemas ambientales, ya que representa una amenaza para los seres vivos, surgiendo así la necesidad de remover o eliminar estos contaminantes a niveles permitidos teniendo como referencia la normatividad vigente.

El objetivo principal de este trabajo fue evaluar de manera preliminar la remoción conjunta de índigo carmín y cromo hexavalente de soluciones bicomponentes con relaciones de concentraciones de 100-10, 500-50 y 1000-100 mg/L índigo carmín-Cr(VI), con carbón activado químicamente obtenido a partir del precursor lignocelulósico de *Typha domingensis* observándose que el material tiene mayor afinidad por el colorante debido a que remueve por arriba del 90% de este contaminante con cualquiera de las 3 soluciones bicomponentes estudiadas, y el cromo hexavalente al aumentar su concentración en la solución bicomponente disminuye se porcentaje de remoción de 96 a 70%, por lo tanto el material es capaz de remover ambos contaminantes de naturaleza diferente de una misma solución.

Palabras clave:

Solución bicomponente, índigo carmín, cromo hexavalente, carbón activado, adsorción.

ABSTRACT

Water contamination by metals and dyes is one of the biggest environmental problems, since it represents a threat to living beings, thus arising the need to remove or eliminate these contaminants at permitted levels with current regulations as a reference.

The main objective of this work was to preliminarily evaluate the joint removal of indigo carmine and hexavalent chromium from two-component solutions with concentration ratios of 100-10, 500-50 and 1000-100 mg/L indigo carmine-Cr(VI), with chemically activated carbon obtained from the lignocellulosic precursor of *Typha domingensis*, observing that the material has greater affinity for the dye because it removes over 90% of this contaminant with any of the 3 bicomponent solutions studied, and hexavalent chromium by increasing its concentration in the two-component solution decreases the removal percentage from 96 to 70%, therefore the material is capable of removing both contaminants of different nature from the same solution.

Keywords: Two-component solution, indigo carmine, hexavalent chromium, activated carbon, adsorption.

INTRODUCCIÓN

La contaminación de cuerpos de agua por metales pesados es un problema mayor en la actualidad, esto debido a las actividades realizadas por industrias como la metalúrgica, la manufacturera, entre otras, que en sus procesos conlleva la contaminación del agua. Los metales pesados son altamente reactivos, persistentes y tóxicos al ambiente, incluso a baja concentraciones, por ende, se considera un gran peligro para el medio ambiente y la salud de los seres humanos.

En la actualidad existen una variedad de causas a obtener aguas residuales, un caso en particular son el uso de colorantes en las fábricas textiles, en la industria de alimentos, cosméticos, e incluso de plásticos. Estos colorantes son altamente tóxicos para los seres humanos. Uno de los colorantes comúnmente presentes es el índigo carmín, este es considerado un colorante recalcitrante, es por ello por lo que existen en altas concentraciones en las descargas de aguas residuales

Ante esta problemática se han evaluado diversas técnicas para remover metales pesados y colorantes del agua residual, sin embargo, la mayoría de los procesos requieren inversiones económicas elevadas, necesitan grandes infraestructuras o no presentan una buena capacidad de remoción de los contaminantes.

Por esa razón, surgen alternativas como la adsorción, este es un proceso altamente eficiente. Se ha comprobado que el carbón obtenido por materiales abundantes en la naturaleza como cascara, olote, y plantas tienen una buena capacidad de remoción. Estudios realizados han demostrado que la adsorción por carbón activado suele ser un proceso muy rápido y eficaz para la remoción de iones metálicos y colorantes. Por lo anterior, en este trabajo se evaluó la capacidad de remoción de soluciones bicomponentes de Cr(IV)-Índigo carmín con carbón obtenido de *Typha domingensis*.

En el apartado I. Se encuentra la información teórica más importante referente al tema de estudio que es la remoción de soluciones acuosas IC-Cr(VI), donde se describe la contaminación del agua por metales pesados y colorantes, propiedades del cromo, así como su uso y efectos al medio ambiente. Así como propiedades,

contaminación del agua por medio de colorantes. Se mencionan algunas técnicas de tratamiento de aguas residuales, destacando la adsorción por carbón activado.

En el apartado II, se describe la metodología para evaluar el comportamiento del proceso de adsorción, desde la obtención del carbón activado, los resultados de la evaluación preliminar del material con cada una de las soluciones bicomponentes.

Por último, en la parte de conclusiones se encuentran los datos y la información destacada que se obtuvo en la parte experimental. Y se explican recomendaciones, y competencias aplicadas y desarrolladas de acuerdo con la retícula de un ingeniero ambiental.

Planteamiento del problema, Justificación, Hipótesis y Objetivos

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La problemática de la *Typha domingensis* es una especie que suele comportarse como invasiva estableciendo poblaciones grandes exclusivas de esta especie, lo que produce alterar la abundancia de las especies e incluso causar la extinción local de algunas que son nativas contribuyendo de esta manera a la homogeneización del paisaje.

La problemática de la contaminación del agua es uno de los problemas ambientales más importantes, ocurre cuando ingresan sustancias con propiedades radioactivas que ocasionan una mala calidad de agua, esto debido a su persistencia en el ambiente y a su potencial toxicidad, representan una amenaza significativa para la salud de los ecosistemas acuáticos y, en última instancia, para la salud humana.

Cada año se vierten a los cuerpos de agua millones de metros cúbicos de aguas residuales, descargas municipales, industriales que son tratadas de forma ineficiente o sin ser tratadas. Según datos establecidos por la Comisión del Agua del Estado de México (CAEM) en el Estado de México se genera un volumen estimado de mil 108.52 millones de m³ al año de aguas residuales, del cual se colectan 236.17 millones de m³ al año, de los cuales existe un caudal de tratamiento de aguas residuales de 6.4 m³ /s, en promedio en todo el Estado de México (CAEM 2018).

Los metales pesados son uno de los principales contaminantes que se encuentran en el agua provenientes de las actividades industriales realizadas por la humanidad, esto afecta de forma considerable no solo la vida humana si no a los animales, las plantas, las fuentes hídricas y los suelos, en otras palabras, afecta toda la cadena trófica debido a la descarga de metales pesados al ambiente y para la salud humana. El cromo (VI) es liberado hacia los ecosistemas acuáticos, así como a los suelos principalmente debido a diversas actividades antropogénicas y presenta una

sería amenaza debido a su persistencia, bioacumulación y su toxicidad incluso a bajas concentraciones, mientras que el límite máximo permisible de cromo hexavalente en aguas residuales, de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-2021 es de 0.5 mg/L en promedio mensual.

Uno de los efectos de la contaminación de los cuerpos de agua con colorantes es la afectación de los ecosistemas acuáticos causando efectos no deseables, la reducción del paso significativo de la luz provocando la decadencia del proceso de fotosíntesis, además de que estos tienen propiedades cancerígenas y mutantes en los organismos. El colorante Índigo carmín se encuentra presente en la industria textil, es un material que tiene efectos en el ser humano a la hora de estar en contacto con él, por ello es importante que se tenga precaución al momento de manipularlo ya que produce daños como el asma, problemas respiratorios, alergias, daño a los pulmones y a la vista. En los cuerpos de agua produce contaminación ocasionando la muerte de la vida acuática y obstruyendo la luz solar que atraviesa.

JUSTIFICACIÓN

El cromo es un metal tóxico que en aguas residuales se encuentra principalmente en las formas iónicas: trivalente Cr(III) y hexavalente Cr(VI), dependiendo del pH de la solución, siendo el Cr(VI) el más tóxico y el que tiene mayor movilidad en solución, mientras que el Cr(III) no es dañino a bajas concentraciones y su movilidad es baja, ya que el Cr(OH) es poco soluble (Leyva & Flores, 2008). Particularmente, el Cr(VI) tiene efectos carcinogénicos en animales y mutagénicos en humanos y bacterias. La contaminación del agua por cromo, generalmente, se debe a los efluentes industriales no tratados, generados por la minería, las industrias de curtiembre, galvanoplastia, y en la producción de acero, cemento, colorantes, material fotográfico y pinturas corrosivas (Grau, 2003).

El cromo total se refiere a todas las formas de cromo presente en la naturaleza. La US EPA (United States Environmental Protection Agency) define un estándar, para el contenido de cromo total en agua de consumo, en un valor de 0.1 mg/L. Para definir los límites permisibles, esta agencia considera que todo el cromo se encuentra como cromo hexavalente para situarse en la situación más desfavorable para la salud humana. Para México, el límite máximo permisible para el cromo total en el agua para consumo humano, de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, es de 0.05 mg/L (50 µg/L). El límite máximo permisible de cromo hexavalente en aguas residuales, de acuerdo con la NOM-002-SEMARNAT-2021 es de 0.5 mg/L en promedio mensual y promedio diario es de 0.75 mg/L.

El volumen y la composición de los efluentes de aguas residuales de la industria textil son unas de las más contaminantes en todos los sectores industriales (Manu & Chaudhari, 2003). Algunos tintes y subproductos son cancerígenos y mutágenos, deterioran estéticamente los cuerpos de agua e impactan la flora y fauna. En la coloración de fibras, los tintes de índigo carmín y tintes sulfurosos representan una gran parte del mercado mundial.

El índigo carmín es uno de los colorantes ácidos más antiguos que todavía están involucrados en muchos usos industriales, especialmente en el teñido de ropa (blue

jeans), fibras de poliéster y otros teñidos azules. También, el índigo carmín es empleado en las industrias de alimentos, cosméticos y en diagnósticos médicos. En adición a la contaminación en el ambiente que los colorantes pueden generar cuando estos son descargados en cuerpos de agua, el índigo carmín, constituye por su toxicidad, un riesgo potencial para los seres humanos. El colorante índigo carmín se considera como una clase altamente tóxica. El contacto de éste puede causar irritación en piel y ojos, daño permanente en la córnea y la conjuntiva, náuseas, vómito y diarrea.

El tratamiento de agua residual textil es uno de los más complejos; sin el adecuado tratamiento de remoción de los tintes, estos permanecen estables y pueden permanecer en el ambiente por largos periodos de tiempo. La alteración de sus estructuras químicas puede resultar la formación de compuestos xenobióticos los cuales pueden ser más tóxicos que los compuestos potenciales; a esto se le suman las fluctuaciones en parámetros como la demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), pH, salinidad y las composiciones de las aguas residuales que depende de los compuestos de base orgánica y tintes usados en las etapas de la industria textil.

Existen diversos métodos para la disminución de la concentración de cromo en aguas residuales como precipitación química, precipitación electroquímica, intercambio iónico, extracción con solventes, osmosis inversa y adsorción, entre otros. Entre las mencionadas la remoción de cromo mediante el empleo de un adsorbente ha mostrado ser efectivo para realizar esa tarea (Chwastowski et al, 2017). El carbón activado es un adsorbente carbonoso que se caracteriza por poseer una alta superficie específica, porosidad desarrollada; esto le concede una gran capacidad de adsorción de contaminantes, como metales pesados (Fu et al., 2017) y compuestos orgánicos. Puede sintetizarse carbón a partir de residuos lignocelulósicos (Jiménez et al., 2017). Por lo tanto, es importante realizar estudios donde se realice la evaluación del proceso de adsorción de materiales adsorbentes con soluciones donde coexistan 2 o más contaminantes.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar los parámetros de pH, tiempo de contacto, temperatura y concentración en la remoción de Cr(VI)-Índigo carmín en soluciones bicomponentes por medio del carbón activado de *Typha domingensis*.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Producir el carbón activado a partir del precursor de *Typha domingensis*.
- b) Evaluar el efecto del pH en la remoción de Cr(VI)-índigo carmín de una mezcla acuosa
- c) Determinar el efecto del tiempo de la remoción conjunta de Cr(VI)-índigo carmín en medio acuoso.
- d) Determinar el efecto de la temperatura en la remoción de una mezcla acuosa de Cr(VI)-índigo carmín.
- e) Evaluar el efecto de la concentración inicial de los contaminantes en la remoción conjunta de Cr(VI)-índigo carmín en medio acuoso

HIPÓTESIS

El carbón de *Typha domingensis* podrá remover los dos contaminantes al mismo tiempo en una solución acuosa.

Capítulo 1. Generalidades

GENERALIDADES

1.1 El agua

El agua es una sustancia formada por dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno con la fórmula molecular H_2O . Esta composición atómica le confiere características únicas que la hace vital y esencial para la vida en el planeta, ya que es importante para el funcionamiento y mantenimiento de los ecosistemas naturales y su biodiversidad, así como las actividades humanas. (SEMARNAT, 2012)

La estructura molecular del agua hay 2 átomos de hidrógeno y el de oxígeno, estos están dispuestos en un ángulo de 105° . Es una molécula dipolar en la que el átomo de oxígeno central comparte un par de electrones con cada uno de los dos átomos de hidrógeno con un exceso de carga negativa junto al oxígeno, compensada por otra positiva repartida entre los dos átomos de hidrógeno. (Douglas & Jean 2021).

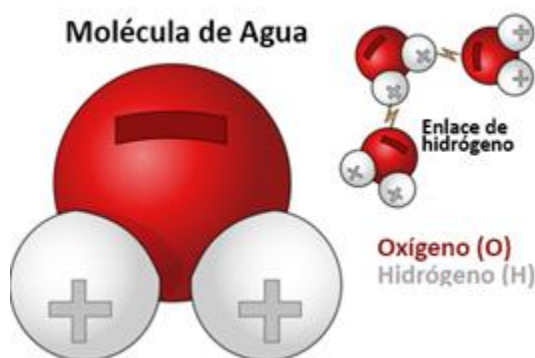


Figura 11. Estructura molecular del agua (Douglas & Jean, 2001)

El agua puede existir en tres estados: sólido, líquido y gaseoso esto va dependiendo de la temperatura y la presión a la que se encuentre. Las propiedades físicas del agua son aquellas que se pueden observar o medir sin cambiar la composición química del agua, es un líquido incoloro, inodoro e insípido. Sus características más importantes es su polaridad lo que le confiere al agua capacidad para disolver una amplia variedad de sustancias, lo que da origen a su universalidad como disolvente gracias a su desigualdad de electrones con una carga positiva en el hidrógeno, y carga positiva en su átomo de oxígeno.

Los seres humanos requerimos el agua para no solo para beber, sino también para nuestras actividades de día a día como las actividades antropogénicas, teniendo el propósito de producir más alimentos e incrementar energía utilizando el movimiento del agua, así como de ceder el servicio de agua potable a las comunidades y ciudades cada vez es más abundante, por lo que la demanda por el líquido ha ido incrementando relevantemente (Auge, 2002).

Se ha estimado que existen alrededor de 1 400 millones de kilómetros cúbicos de agua en el planeta, de los cuales sólo 2.5% corresponden a agua dulce. Este pequeño porcentaje se localiza principalmente en los ríos, lagos, glaciares, mantos de hielo y acuíferos del mundo (PNUMA, 2007).

1.1.1 Contaminación del agua

La determinación de la calidad del agua depende principalmente de los materiales y las sustancias que lleva disueltos o en suspensión y los organismos que ahí se encuentran.

Cuando se habla de calidad del agua se alude a las propiedades o características que debe tener para usos específicos. Por ejemplo, el agua tratada que se utiliza para riego o en fuentes no es apta para consumo humano, o el agua que se empleó en el lavado de ropa no es apropiada para riego de plantas, pero sí para la limpieza del hogar. Existen tres fuentes de contaminación del agua.

- a. **Biológica.** Producida por microorganismos, como bacterias, virus y protozoarios provenientes de materia orgánica viva, generalmente de tipo fecal o de residuos alimenticios.
- b. **Física.** Generada a partir de desechos sólidos (basura) arrojados en los cuerpos de agua.
- c. **Química.** Originada en general por los procesos industriales y las fábricas. (CONAGUA, 2011).

El deterioro de la calidad del agua es un problema creciente y se considera un problema ambiental importante (Salgot et al., 1999). Una de las principales causas de contaminación del agua son las descargas incontroladas de aguas residuales domésticas, agrícolas e industriales, estas a menudo no reciben tratamiento.

1.1.2 Aguas residuales

Las aguas residuales industriales se generan durante los procesos industriales y pueden contener una variedad de contaminantes, según el tipo de industria. Estos pueden incluir productos químicos, metales pesados, aceites, grasas, sólidos suspendidos y otros productos químicos tóxicos o peligrosos.

En el caso de México, la normativa que regula las aguas residuales es principalmente la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los cuerpos receptores.

Esta norma establece límites para una amplia variedad de parámetros físicos, químicos y biológicos, incluyendo materia orgánica (DBO y DQO), sólidos suspendidos, metales pesados, nutrientes como nitrógeno y fósforo, entre otros. Además, establece criterios para la operación y monitoreo de sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Es importante mencionar que existen regulaciones adicionales a nivel estatal y municipal que complementan la normativa federal y pueden establecer requisitos específicos para el tratamiento y disposición de aguas residuales dentro de un área geográfica particular.

El cumplimiento de estas normativas es fundamental para proteger la calidad del agua y el medio ambiente, así como para prevenir riesgos para la salud pública. Los organismos responsables, como la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) a nivel federal y las autoridades ambientales estatales y municipales, son los encargados de aplicar y hacer cumplir esta regulación.

Los parámetros especificados en la NOM-001-SEMARNAT-2021 para metales y colorantes.

Tabla 1. Límites máximos permisibles de colorantes en aguas residuales.

Color verdadero	Longitud de onda	Coefficiente de absorción máximo
	436 nm	7.0 m ⁻¹
	525nm	5.0 m ⁻¹

Tabla 2. Límites permisibles para cromo.

Parámetros (mg/L)	Ríos, arroyos, canales, drenes			Embalses, lagos y lagunas			Infiltración y otros riesgos		
	PM	PD	V.I	PM	PD	VI	PM	PD	VI
Cromo	1	1.25	1.5	0.5	0.75	1	0.5	0.75	1

En donde: P.M es el promedio mensual, P.D promedio diario y V.I: Valor instantáneo. (SEMARNAT, 2021).

1.1.2 Aguas residuales Industriales

Las aguas residuales industriales son el resultado inevitable de los procesos industriales. Hay varias razones por las cuales se generan estas aguas residuales:

- Procesos de producción: Muchas industrias utilizan grandes cantidades de agua en sus procesos de producción, ya sea como solvente, refrigerante, o parte de la reacción química.
- Lavado y limpieza: Las instalaciones industriales a menudo requieren limpieza regular para mantener los equipos y las áreas de trabajo en condiciones adecuadas. Esto implica el uso de agua que, al entrar en contacto con residuos o productos químicos, se convierte en aguas residuales.

- c. Descargas de efluentes: Algunas industrias generan efluentes líquidos como subproducto de su producción.
- d. Procesamiento de materias primas: La transformación de materias primas en productos terminados puede producir residuos líquidos que deben ser tratados adecuadamente antes de su liberación al medio ambiente.

Las aguas residuales industriales son de diferentes tipos porque dependiendo de la industria y el proceso productivo, sus propiedades pueden cambiar radicalmente y, por tanto, pueden contener diferentes tipos de contaminantes, y por tanto en cualquier sector sus características son importantes.

1.1.3 Aguas residuales de la industria textil

Las aguas residuales generadas por una fábrica textil pueden ser especialmente problemáticas debido a la naturaleza de los procesos de producción textil. Estas aguas residuales pueden contener una variedad de contaminantes, que incluyen:

- a. **Colorantes y tintes:** La fabricación de telas a menudo implica el uso de colorantes y tintes para teñir los tejidos. Estos productos químicos pueden filtrarse en las aguas residuales y causar contaminación del agua.
- b. **Productos químicos de acabado:** Además de los colorantes, los productos químicos utilizados para el acabado de telas, como los suavizantes, los repelentes de agua y los retardantes de llama.
- c. **Sustancias químicas:** utilizadas en el procesamiento textil: Los productos químicos empleados en los procesos de blanqueo, desengrasado, estampado y tratamiento de aguas residuales pueden ser liberados en el agua residual.
- d. **Fibras y partículas:** Durante el proceso de producción textil, pueden generarse fibras sintéticas o naturales y otras partículas sólidas que terminan en las aguas residuales.

1.1.4 Aguas residuales de la industria manufacturera

El cromo es un metal que puede encontrarse en diferentes formas y concentraciones en las aguas residuales, especialmente en aguas residuales industriales provenientes de diversas actividades, como: en la industria galvanoplastia, en la industria del cuero, incluso en la industria textil en el proceso de acabado puede contener cromo hexavalente, en el procesamiento de los metales y en la industria química.

1.2 Metales

Los metales son elementos químicos que tienen características en común como ser conductores de electricidad y calor, tienen una densidad mayor a 5 g/cm³, se acumulan en el ambiente, son altamente reactivos, persistentes y tóxicos, incluso a bajas concentraciones, por lo que se les considera un peligro para la estabilidad del medio ambiente y la salud pública (Albis Arrieta., 2017)

La toxicidad de los metales pesados depende de su persistencia y movilidad en el medio ambiente, que a su vez depende de su composición química, persistencia y tendencia a acumularse o bioacumularse. (Caviedes R., 2016)

1.2.1 Cromo

El cromo es un metal toxico inodoro e insípido, se encuentra principalmente en rocas, animales, plantas y suelo. Puede existir en sus formas iónicas: trivalente Cr(III) y hexavalente Cr(VI).

El cromo (VI) es un oxidante altamente toxico es sumamente carcinogénico, mutagénico, genotóxico y teratogénico, debido a la rápida permeabilidad a través de las membranas biológicas y a su facilidad para interaccionar con macromoléculas intracelulares (Tejada Tovar et al., 2015). Que genera en la salud de humanos y animales dependiendo de la dosis expuesta, según lo representa la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006).

El cromo se encuentra en la naturaleza en rocas, sedimentos, suelos, plantas y erupciones volcánicas, este puede encontrarse en nueve estados de valencia, así: -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5, +6, pero se manifiesta en el medio ambiente más comúnmente como compuestos de Cr (III), Cr (VI) y en la forma metálica Cr. De acuerdo con (Cardenas G., 2011)

La comprensión del ciclo de cromo es importante para determinar qué tecnología se debe utilizar para el tratamiento de las aguas subterráneas y residuales.

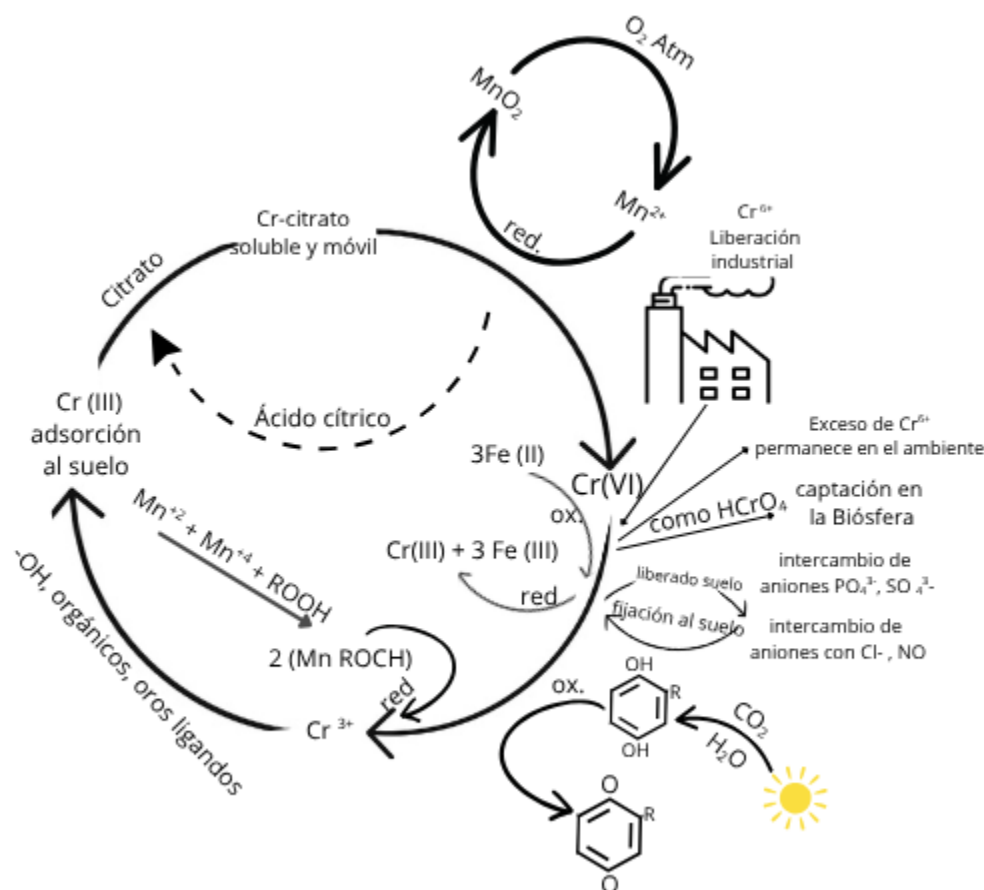


Figura 1.2. Ciclo del cromo en la naturaleza (Eggs. E, 2016).

La humedad de la tierra y de los sedimentos en equilibrio con el oxígeno atmosférico proporciona las condiciones necesarias para que la reducción y la oxidación ocurran simultáneamente. La reducción de Cr (VI) a Cr (III) en la tierra sólo se producirá como resultado de una reducción en presencia de materia orgánica.

1.2.2 Usos del Cromo (VI)

El cromo es uno de los metales más utilizados para recubrir piezas metálicas debido a su resistencia a la corrosión. También se encuentra en taninos, pigmentos y conservantes textiles, aleaciones, pinturas, inhibidores de oxidación, catalizadores, agentes anticorrosivos, lodos de perforación, baterías de alta temperatura, fungicidas, conservantes de madera, revestimientos de metales y galvanoplastia (F., 2012)

También se han usado en procesos de teñido en la industria textil, tintas de impresión, lodos de perforación, fuegos artificiales, y síntesis de sustancias químicas (Cáncer, 2011)

1.2.3 Efectos del Cromo en el ambiente

El aire y el agua están contaminados con cromo (III y VI) debido a las actividades humanas. Las concentraciones de cromo en las partículas del aire pueden aumentar mediante la quema de carbón y petróleo, la fabricación de acero, la soldadura de acero inoxidable, la fabricación de productos químicos y el uso de productos que contienen cromo.

La contaminación de las aguas ocurre por la descarga de desechos derivados de la manufactura de colorantes y pigmentos para el curtido de cueros; la mayor parte de las veces, el cromo se va al fondo y sólo una pequeña parte se diluye en el agua. El suelo también puede contaminarse, debido al depósito de residuos de las industriales, contaminación a subsuelos y cenizas de carbón provenientes de plantas centrales de electricidad. (Horsfall M., 2003)

Las aguas residuales que contienen cromo pueden infiltrarse en el suelo, lo que resulta en la contaminación del suelo y, en última instancia, la contaminación de las aguas subterráneas. Esto puede afectar la calidad del suelo y reducir la capacidad del suelo para soportar la vegetación.

1.2.4 Efectos del Cromo en el agua

El cromo es un metal pesado que, debido a su toxicidad y baja biodegradabilidad natural, provoca la contaminación de las aguas residuales, lo que supone un problema medioambiental muy grave (Molina et al., 2010).

El cromo hexavalente es considerado uno de los contaminantes de mayor impacto en el agua, este es comúnmente liberado a cuerpos de aguas procedentes de las actividades industriales (Fluence, 2020).

Surge principalmente porque la mayoría de los sistemas de tratamiento de aguas residuales no permiten la separación de las aguas residuales urbanas y las aguas residuales industriales, lo que provoca que las aguas residuales de zonas urbanas y parques industriales siempre se mezclen (Arauzo M., 2003)

El cromo, especialmente en su forma hexavalente, es altamente tóxico para la vida acuática. Puede afectar a los organismos acuáticos como peces, crustáceos, y otros organismos, causando daños en los sistemas respiratorio, nervioso, y reproductivo, e incluso la muerte.

1.2.5 Efectos del Cromo en la salud

Los efectos del cromo (VI) es un riesgo para la salud humana, como para la naturaleza, pero sobre todo para la gente que trabaja en las industrias de acero y textil.

El cromo (VI) es conocido porque causa varios efectos sobre la salud: cuando se encuentra en contacto con la piel puede causar reacciones alérgicas, por ejemplo, erupciones cutáneas; después de ser respirado el cromo (VI) puede causar irritación de la nariz y sangrado de esta.

Otros problemas causados por el cromo (VI) incluyen erupciones cutáneas, malestar estomacal y úlceras, problemas respiratorios, sistema inmunológico debilitado, daño renal y hepático y cambios en el material genético, cáncer de pulmón y muerte (Perez A., 2020)

1.3 Colorantes

El colorante es una sustancia orgánica o inorgánica coloreada que confiere o imparte su color a otras sustancias o tejidos, ya sea no modificando o alterando cambios en su estructura química, lo que permite distinguir detalles estructurales invisibles o poco visibles al microscopio, dando matices de intensidad variable.

Los colorantes tienen muchas aplicaciones a nivel industrial, por ejemplo, en el sector textil, de papel, en el curtido de cuero, la elaboración de alimentos, plásticos, cosméticos, caucho, impresión, etc. (Yagub et al., 2014).

Hay varios tipos de colorantes, que se clasifican en función de su origen, su solubilidad y su método de aplicación. Aquí hay algunos de los tipos principales:

- **Colorantes naturales:** Estos colorantes se obtienen de fuentes naturales, como plantas, animales, minerales o microorganismos. Algunos ejemplos comunes incluyen la cúrcuma (amarillo), la remolacha (rojo), la cochinilla (rojo), el índigo (azul) y la clorofila (verde).
- **Colorantes sintéticos:** Los colorantes sintéticos son producidos mediante síntesis química en laboratorio. Son ampliamente utilizados en la industria textil, de alimentos, cosméticos y de tintas. Estos colorantes pueden tener una amplia gama de colores y propiedades, y pueden ser diseñados para ser más estables y duraderos que los colorantes naturales.
- **Colorantes ácidos:** Estos colorantes son solubles en agua y se utilizan principalmente para teñir fibras naturales como la lana y la seda. Son ácidos en naturaleza y se aplican en un medio ácido. Producen colores brillantes y se utilizan comúnmente en la industria textil y de alimentos.
- **Colorantes básicos:** Estos colorantes son solubles en agua y se aplican en un medio alcalino. Son adecuados para fibras sintéticas como el poliéster y el nylon, así como para papel y cuero.

- Colorantes directos: Estos colorantes son solubles en agua y se utilizan principalmente para teñir fibras celulósicas como el algodón, el rayón y el una solidez al lavado más baja que otros tipos de colorantes.
- Colorantes reactivos: Estos colorantes se unen químicamente a las fibras textiles a través de una reacción química entre el colorante y los grupos funcionales en las fibras. Son adecuados para una amplia gama de fibras y producen colores brillantes y duraderos.
- Colorantes dispersos: Estos colorantes son insolubles en agua y se dispersan en forma de partículas finas en un medio acuoso mediante el uso de agentes dispersantes. Son adecuados para fibras sintéticas como el poliéster y el acetato de celulosa, así como para algunos tipos de plásticos y películas.

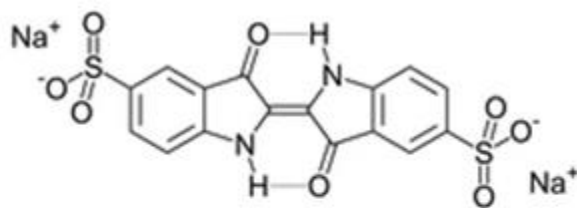
1.3.1 Índigo carmín

El índigo carmín es un polvo soluble en agua de color azul muy oscuro, su forma molecular es $C_{16}H_8O_8N_2S_2Na_2$ y su peso molecular es de 466.36 g/mol (Secuela et al., 2011), este también es conocido por azul ácido 74.

El índigo carmín es un tinte utilizado principalmente en la industria textil para teñir fibras de poliéster y mezclilla. Este colorante también se utiliza en las industrias alimentaria y cosmética como agente de diagnóstico, como indicador redox en química analítica y como colorante microscópico en biología. Sin embargo, es un tinte índigo altamente tóxico y puede causar irritación de la piel y los ojos en humanos (Secula M., 2011)

También puede causar daño permanente a la córnea y la conjuntiva. La ingestión del tinte puede ser fatal ya que es de naturaleza cancerígena y puede provocar proliferación, crecimiento y toxicidad aguda. También se descubrió que el tinte podría provocar la formación de tumores en el lugar de aplicación. En general, los

tintes tienen estructuras químicas complejas y son resistentes a la biodegradación (Gutiérrez et al., 2009).



Indigo carmine



Figura 1.3. Molécula del índigo carmín (Hermes P, 2003)

1.3.2 Efectos del índigo carmín en el agua

El colorante índigo carmín es un producto carcinógeno y mutagénico que deteriora estéticamente los cuerpos de agua e impacta la flora y la fauna (Manu B., 2003), Los colorantes pueden afectar negativamente a la vida acuática al reducir la cantidad de luz que penetra en el agua y al interferir con los procesos biológicos de los organismos acuáticos.

El índigo carmín no es uno de los colorantes más preocupantes en términos de contaminación del agua, su descarga sin control puede contribuir a la contaminación y afectar los ecosistemas acuáticos. Por lo tanto, es importante que las empresas que lo utilizan implementen medidas adecuadas para minimizar su impacto ambiental y cumplan con las regulaciones ambientales pertinentes.

1.3.3 Efectos del índigo carmín en la salud

El índigo carmín, constituye por su toxicidad, un riesgo potencial para los seres humanos. El colorante índigo carmín se considera como una clase indigoide altamente tóxica. (Sigma, 2018). El contacto de éste puede causar irritación en piel

y ojos, daño permanente en la córnea y la conjuntiva, náuseas, vómito y diarrea. Además, su consumo puede resultar fatal ya que es cancerígeno por naturaleza y puede producir toxicidad reproductiva, del desarrollo y neurológica, además de que puede conducir a tumores en el sitio de aplicación. Cuando se administra por vía intravenosa para determinar la potencia del sistema colector urinario, se ha reportado que causa hipertensión de leve a severa y efectos cardiovasculares y respiratorios en pacientes (Ahmed M., 2017)

1.4 Métodos de tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de remoción de metales pesados y/o colorantes es un proceso utilizado para eliminar contaminantes específicos del agua, el suelo o el aire. La elección de la técnica más adecuada depende de diversos factores, como la naturaleza de los contaminantes, la concentración de estos, el volumen de agua a tratar, y los requisitos específicos del sitio y del proceso de tratamiento.

1.4.1 Electrodialisis

La electrólisis también utiliza una membrana semipermeable que permite selectivamente el paso de iones positivos o negativos. Si se crea un campo eléctrico en presencia de agua salada, los cationes y aniones se moverán a los electrodos apropiados. Si encuentran estas membranas selectivas en el camino, los iones las atravesarán o quedarán atrapados, dejando regiones intermedias y alternativas entre las membranas donde se concentra el agua (rechazo) y donde se obtiene el agua dulce (producto).

Es un método de descontaminación que utiliza membranas permeables selectivas en un campo eléctrico constante para eliminar elementos iónicos de soluciones acuosas. (Guastalli, 2004)

Este método puede eliminar iones contaminantes de hasta 0,0001 micrones mediante el uso de placas de resina de intercambio iónico porosas con una permeabilidad al agua relativamente baja (Taylor J & Wiesner, 2022)

1.4.2 Osmosis inversa

La ósmosis es el proceso mediante el cual un solvente pasa a través de una membrana semipermeable desde una solución diluida a una solución concentrada de modo que ambos lados de la membrana estén en equilibrio iónico. Este fenómeno ocurre en la naturaleza en las paredes celulares, que regulan la hidratación celular y el intercambio iónico entre la célula y el espacio intersticial. La transferencia de solvente desde una disolución concentrada a una diluida a través de una membrana semipermeable se conoce como osmosis inversa. (G., 2017).

La mayor parte de la energía en un sistema de ósmosis inversa es usada para la bomba de agua que hace fluir el agua por las membranas y vence la presión osmótica necesaria para hacer fluir el agua a través de la membrana semipermeable.

Los factores más influyentes que pueden cambiar la operación de un equipo de ósmosis inversa y por consecuencia su eficiencia son el pH, la viscosidad y la temperatura.

1.4.3 Nanofiltración

Es una técnica de tratamiento de agua relativamente reciente que utiliza membranas con poros muy pequeños (<1 nm) y requiere presiones de funcionamiento en el rango de 10-50 bar. Por lo tanto, las membranas empleadas para la nanofiltración son capaces de retener especies neutras con peso molecular <200 - 300 g/mol, y también para rechazar iones inorgánicos por un mecanismo de exclusión por tamaño en combinación con las interacciones electrostáticas entre los iones y la membrana cargada, presentan mayor rechazo de iones divalentes y menor rechazo de iones monovalentes. (González, 2006).

1.4.4 Precipitación química

A nivel industrial es el método más utilizado y común debido a su relativa facilidad para operarse, es una técnica económica y selectiva en cuanto a su proceso, sin embargo, a nivel de mantenimiento esta técnica sí resulta costosa debido a la alta

generación de lodos por parte de esta. La precipitación química tiene mayor efecto en la eliminación de iones metálicos como Cu (II), Cd (II), Mn (II) y Zn (II) (Pabón, 2020)

1.4.5 Adsorción

La adsorción es un método que asegura la eliminación de muchos tipos de contaminantes y se caracteriza por su alta eficiencia, cinética rápida y dependiendo del tipo de adsorbente utilizado, además de su estructura física, también tiene la característica de selectividad, que también afecta sus propiedades. Este es un método de transferencia de masa en el que los residuos se transfieren mediante interacciones químicas o físicas a los sitios activos presentes en el adsorbente utilizado. (Pabón, 2020)

Por lo tanto, el método de adsorción es un método de descontaminación fácil de usar, caracterizado por bajos costos operativos, flexibilidad, diseño simple y no produce contaminantes tóxicos, al mismo tiempo que permite el uso del método de recuperación de adsorbente para muchos propósitos diferentes. Pretende transformar esta técnica en un método ambientalmente aceptable. (Pabón, 2020).

La adsorción es un fenómeno en el cual un material sólido o líquido, llamado adsorbente, tiene la capacidad de atraer y retener en su superficie gases, vapores, líquidos o cuerpos disueltos, los cuales son conocidos como adsorbatos, como se muestra en la figura 4.

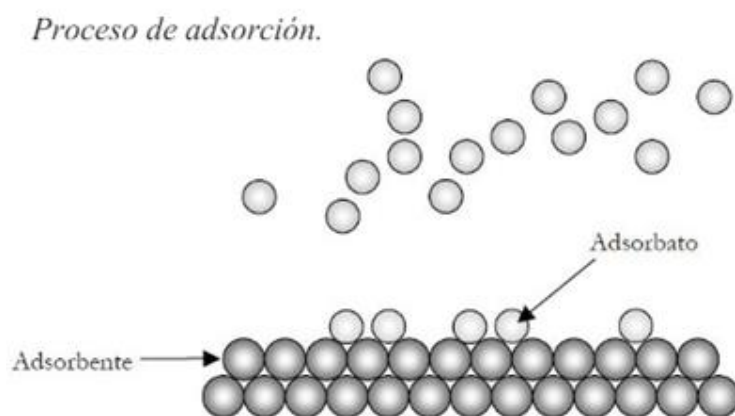


Figura 1.4. Fenómeno de adsorción (Díaz et al., 2016).

Hay 2 tipos de adsorción, la física y la química.

- a) **Adsorción física:** En este tipo de adsorción, las moléculas adsorbidas son retenidas en la superficie del adsorbente por fuerzas físicas, como fuerzas de Van der Waals o fuerzas de dispersión. No hay una interacción química específica entre el adsorbente y las moléculas adsorbidas.
- b) **Adsorción química:** En la adsorción química, las moléculas adsorbidas se unen a la superficie del adsorbente mediante enlaces químicos covalentes o iónicos. Esto implica una interacción más fuerte y específica entre el adsorbente y las moléculas adsorbidas.

En la Figura 5, se muestra la adsorción física donde por medio de fuerzas de Van der Waals se caracterizan por sus interacciones dipolares; y la adsorción química las moléculas de gas mantienen su unión a la superficie del adsorbente formando así un enlace químico de interacciones fuertes (Molina & Vergaray, 2020).

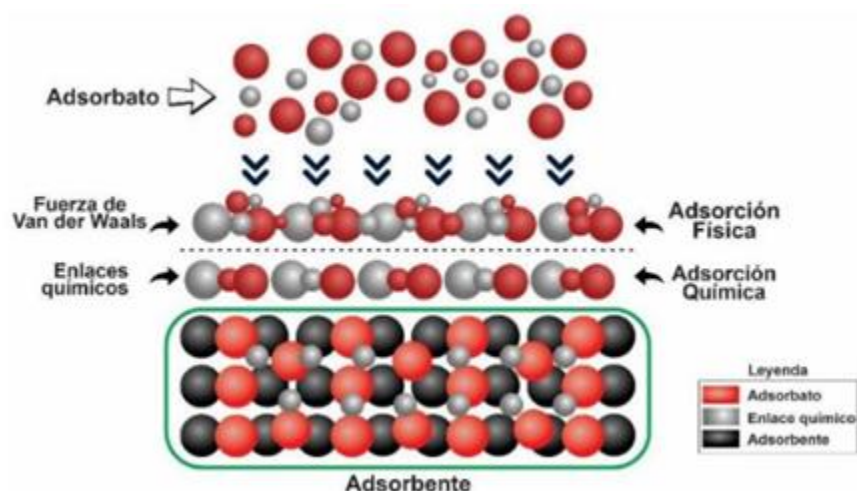


Figura 1.5. Comportamiento de las moléculas en proceso de adsorción física y química (Molina & Vergaray, 2020).

El fenómeno de adsorción puede verse afectado positiva o negativamente por determinadas variables como la temperatura, el pH, el tamaño de las partículas o simplemente la presencia de otros iones. Estos parámetros pueden aumentar o disminuir la absorción de iones metálicos.

- Efecto de la temperatura

Un aumento elevado de la temperatura puede provocar un cambio en la textura del sorbente y un deterioro del material que desembocan en una pérdida de capacidad de sorción.

- Efecto del pH

El pH de la solución acuosa es un importante parámetro que controla los procesos de adsorción de metales en diferentes adsorbentes, debido al hecho, de que los iones hidrógeno se constituyen en un adsorbato fuertemente competitivo. La adsorción de iones metálicos depende tanto de la naturaleza de la superficie adsorbente como de la distribución de las especies químicas del metal en la solución acuosa. El valor del pH de la fase acuosa es el factor más importante tanto en la adsorción de cationes como de aniones, siendo el efecto distinto en ambos casos.

- Efecto del tamaño de partícula

La adsorción ocurre principalmente dentro de las partículas, en puntos específicos de las paredes de los poros. La cantidad de soluto que se puede adsorber es proporcional al volumen, y se sabe que el volumen es proporcional al área de la superficie exterior, y una partícula pequeña también tiene una superficie grande, es decir, la superficie exterior en grande, área de superficie, veces el número de poros por unidad de volumen.

- Presencia de otros iones

La presencia de iones en la disolución a tratar hace que estos puedan competir con el metal en el interés de las zonas de sorción lo que provoca una deficiencia en el uso de este método. (Tejada-Tovar, 2015)

1.5 Cinética de sorción

Son herramientas teóricas utilizadas para describir y predecir el proceso de adsorción de solutos en superficies sólidas (adsorbentes). Estos modelos se basan en principios fisicoquímicos y se utilizan principalmente en ingeniería química y

ambiental, así como en el diseño y optimización de procesos industriales, donde la capacidad de adsorción juega un papel importante.

1.5.1 Seudo primero Orden

El modelo cinético de adsorción de pseudo primer orden es una aproximación matemática utilizada para describir la tasa de adsorción de un soluto sobre un adsorbente. Este modelo supone que la adsorción sigue una cinética de primer orden, en la que la velocidad de adsorción depende sólo de la concentración del soluto en la superficie del adsorbente y no de la concentración en la solución.

Su modelo matemático es:

$$\frac{dq}{dt} t = k_1 * (q_e - q_t)$$

Donde:

K_1 : es la constante de Lagergren

q_t : cantidad del sorbato

q_e : Es la concentración inicial del sorbato

t : tiempo

1.5.2 Modelo de Elovich

El modelo de Elovich es otro modelo cinético utilizado para describir la cinética de adsorción o adsorción de solutos en un adsorbente. Y se utiliza principalmente para describir las primeras etapas del proceso de adsorción, cuando la superficie adsorbente es más activa y hay más centros de adsorción disponibles.

$$q_t = \frac{1}{b} \log (1 + abt)$$

Donde:

q_t = es la cantidad de soluto absorbido en el tiempo (mg/g)

b = es la constante de desorción (mg/g)

t = es el tiempo (h)

1.6 Materiales adsorbentes

Un material adsorbente es una sustancia sólida capaz de retener en su superficie un componente presente en una corriente líquida o gaseosa. Se caracteriza por una gran superficie específica y una inercia química respecto del entorno en el que se utiliza. Los adsorbentes se clasifican en función de su naturaleza, existiendo los adsorbentes de carácter inorgánico entre lo que destacan las Zeolitas y los adsorbentes de carácter orgánico. Estos últimos vienen representados por materiales adsorbentes carbonosos, que son aquellos que presentan un alto contenido en carbono en su composición química (Tejada-Tovar., 2015)

Dentro de las características fundamentales que distinguen a un buen adsorbente están su alta porosidad, su gran superficie de contacto y que presente sitios específicos de adsorción. La mayoría de los adsorbentes que se han utilizado en el control de la contaminación tienen estructura porosa, lo que aumenta el área superficial y, en consecuencia, la velocidad de adsorción. Un buen adsorbente será aquel que presente área superficial suficientemente grande y que requiera menor tiempo para alcanzar el equilibrio de adsorción, por lo que generalmente se prefieren para la eliminación de contaminantes adsorbentes con gran área superficial y alta velocidad de adsorción (Valladores Cisneros., 2016)

1.6.1 Carbón activado

El carbón activado es uno de los adsorbentes técnicamente más importantes y utilizados debido a su alta capacidad de adsorción y su bajo coste. Las propiedades del CA condicionan su comportamiento como adsorbente y determinan en gran medida sus aplicaciones. Para la adsorción de solutos en disolución acuosa conviene que el adsorbente contenga microporos y también un volumen relativamente elevado de mesoporos (Cachola M., 2022)

1.6.2 Carbón activado a partir de plantas

La producción de carbón activado a partir de lignocelulosa es ampliamente utilizada en la industria química debido a su bajo costo y abundantes recursos naturales. Además, este tipo de precursor es importante porque permite producir carbón activado con diferentes porosidades dependiendo de las condiciones de preparación, como temperatura y tiempo de activación (Carriazo J., 2010)

1.6.3 Carbón activado a partir de *Typha domingensis*

El proceso de activación se realiza químicamente, para la preparación de carbones activados el material es calcinado y luego sometido al proceso de activación, lo cual constituye a aumenta la porosidad y la capacidad de adsorción del material carbonizado (Carriazo J., 2010)

Las propiedades finales del carbón activado están determinadas en gran medida por el material precursor, ya que es este material el que determina fundamentalmente las propiedades estructurales del carbón resultante; Vale la pena recordar que el proceso de activación esencialmente abre poros que de otro modo estarían cerrados, preservando al mismo tiempo la estructura de carbono original del material de origen (Vargas J., 2008)

Capítulo 2.

Desarrollo Experimental

2.1 DESARROLLO EXPERIMENTAL

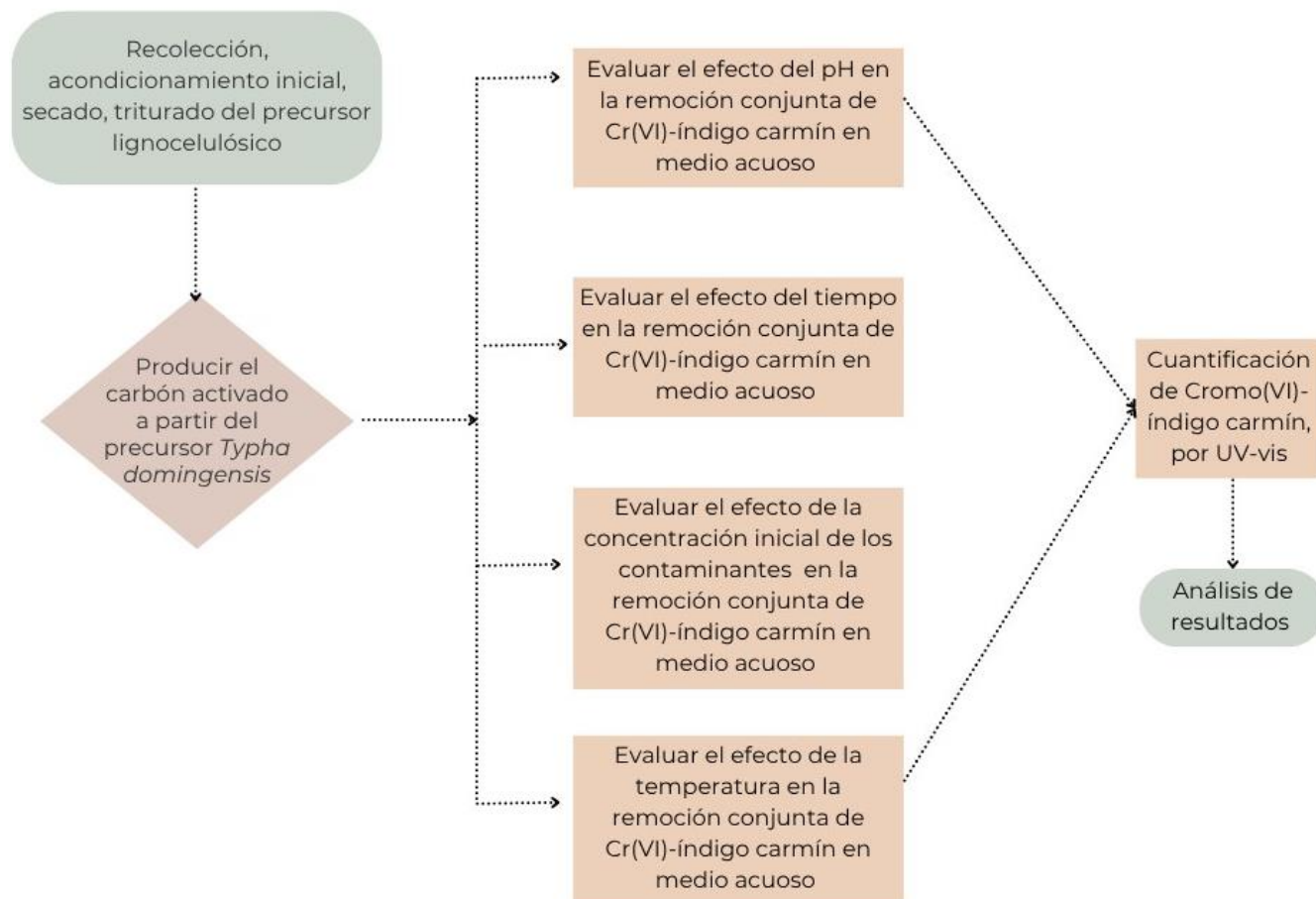


Figura 2.1 Diagrama general del desarrollo experimental

2.1 Recolección, acondicionamiento inicial, secado, triturado del precursor lignocelulósico.

La recolección y acondicionamiento inicial del precursor *Typha domingensis* que se utilizó en este proyecto se recolectó en las lagunas de Zempoala cercanas al municipio de Ocuilan.

2.2 Preparación del carbón activado de *Typha domingensis*

Para la activación química del precursor *Typha domingensis* se pesaron 20 gramos del material previamente triturado en una balanza analítica y se agregaron 52 ml de

ácido fosfórico (H_3PO_4) al 100%, se mezcló hasta lograr una mezcla uniforme en una cápsula de porcelana. El material se introdujo en una mufla durante 56 minutos a 619°C para la obtención del carbón activado.

Una vez terminado el tiempo de activación se dejó enfriar durante 24 horas, seguido el carbón activado se filtró para posteriormente dejarlo en agitación constante a 800 rpm con agua destilada donde cada 24 horas el agua fue cambiada para retirar los residuos del agente activante, esto se hizo durante 72 horas hasta lograr un pH neutro estable. Posteriormente el material se secó y se colocó en una charola de aluminio durante 72 horas para obtener el secado adecuado.

Una vez secado el carbón activado, se sometió a un proceso de trituración con ayuda del mortero, se pesó el material obtenido y se colocó en un recipiente para las pruebas posteriores.

Este procedimiento se repitió 4 veces para obtener el material suficiente para el desarrollo experimental.

2.3 Evaluación preliminar de remoción bicomponente Cr(VI)-índigo carmín

2.3.1 Solución madre de índigo carmín

Se preparó la solución madre de índigo carmín $\text{C}_{16}\text{H}_8\text{N}_3\text{Na}_2\text{O}_8\text{S}$ de 1000 mg/L, diluyendo 0.11094 g del colorante en un matraz aforado de 100 mL.

2.3.2 Solución madre de Cromo inicial

Se preparó la solución madre de cromo hexavalente de 1000 mg/L, pesando 0.2828 g de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, los cuales se diluyeron en 100 mL de agua destilada.

2.3.3 Evaluación preliminar de remoción

En tubos cónicos de 15 ml se pesaron 0.05 g de carbón activado con 10 mL de la solución bicomponente índigo carmín-Cr(IV) y se pusieron en contacto por un tiempo de 24 horas en un rotor mecánico a 40 rpm.

Después del tiempo de contacto se separaron las fases por filtración y posteriormente las soluciones acuosas se centrifugaron a 30000 rpm por un tiempo

de 30 minutos, esto para terminar de separar el carbón activado de la solución que quedó después de la filtración.

2.4 Evaluación del efecto de pH en la remoción conjunta de Cr (VI)-índigo carmín.

La evaluación del efecto de pH en el proceso de sorción de Cr (VI)-índigo carmín permitió determinar el valor de pH en el cual el absorbente tiene la mayor capacidad de remoción ante estos contaminantes.

Se realizaron pruebas preliminares haciendo una solución bicomponente a una concentración de 500/100 mg/l IC/Cr(VI) y se ajustó el pH (2, 4, 6, 8 y 10) con soluciones de HCl y NaOH 0.01 N.

En tubos cónicos se pesaron de 0.0495–0.0505 gramos de carbón activado de *Typha domingensis* por triplicado, a los cuales se les adicionó 10 ml de las soluciones anteriores, para posteriormente ser colocadas a una agitación por medio de un rotor mecánico a 40 rpm durante 24 horas.

Terminado el tiempo de agitación se realizó una centrifugación a 30 rpm durante 30 minutos, esto con el fin de separar el material sólido y la fase líquida, después paso por un proceso de filtrado. Una vez obtenido la fase líquida se midió el pH con un potenciómetro y se determinó la concentración de Cr(VI)-índigo carmín por medio de la técnica de UV-vis en un espectrofotómetro.

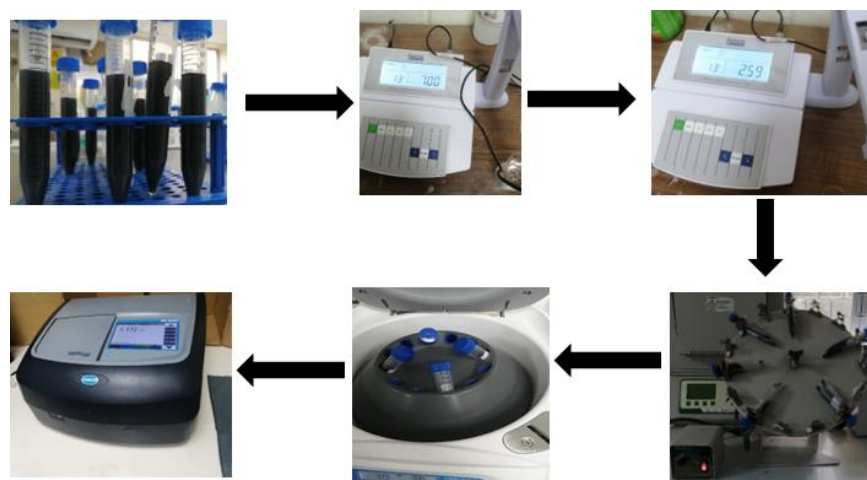


Figura 2.2. Esquema del proceso de evaluación de pH

2.5 Evaluación del efecto del tiempo en la remoción conjunta de Cr (VI)-índigo carmín.

Se realizaron pruebas para determinar el tiempo en donde alcanza un equilibrio de sorción. Se preparo una solución bicomponente Cr(VI)-índigo carmín con una concentración de 500/50 mg/l de IC-Cr(VI). Se pesaron tubos por triplicado con 0.0495 – 0.0505 gramos de carbón activado de *Typha domingensis* en donde se adicionaron 10 ml de la solución anterior y se pusieron en agitación por medio de un rotor mecánico a diferentes tiempos de contacto (2, 5, 10, 15, 20, 30 minutos y 1, 3, 8, 12, 24 horas).

Terminado el tiempo de agitación se realizó una centrifugación a 30000 rpm durante 30 minutos, esto con el fin de separar el material sólido y la fase líquida, después paso por un proceso de filtrado. Una vez obtenido la fase líquida se determinó la concentración de Cr(VI)-índigo carmín por medio de la técnica de UV-vis en un espectrofotómetro.

2.6 Evaluación del efecto de la concentración en la remoción conjunta de Cr (VI)-índigo carmín.

Se realizaron pruebas para determinar la concentración de Cr(VI) e índigo carmín para conocer la cantidad máxima que remueve el carbón activado de *Typha domingensis*.

Se realizaron soluciones con diferentes concentraciones de Cr(VI)- índigo carmín 500/5 mg/l IC-Cr(VI), 500/10 mg/l IC-Cr(VI), 500/25 mg/l IC-Cr(VI), 500/50 mg/l IC-Cr(VI), 500/100 mg/l IC-Cr(VI), Se pesaron tubos por triplicado con 0.0495 – 0.0505 gramos de carbón activado de *Typha domingensis* en donde se adicionaron 10 ml de las soluciones con las diferentes concentraciones.

Terminado el tiempo de agitación se realizó una centrifugación a 30000 rpm durante 30 minutos, esto con el fin de separar el material sólido y la fase líquida, después pasó por un proceso de filtrado. Una vez obtenida la fase líquida se determinó la concentración de Cr(VI)-índigo carmín por medio de la técnica de UV-vis en un espectrofotómetro.

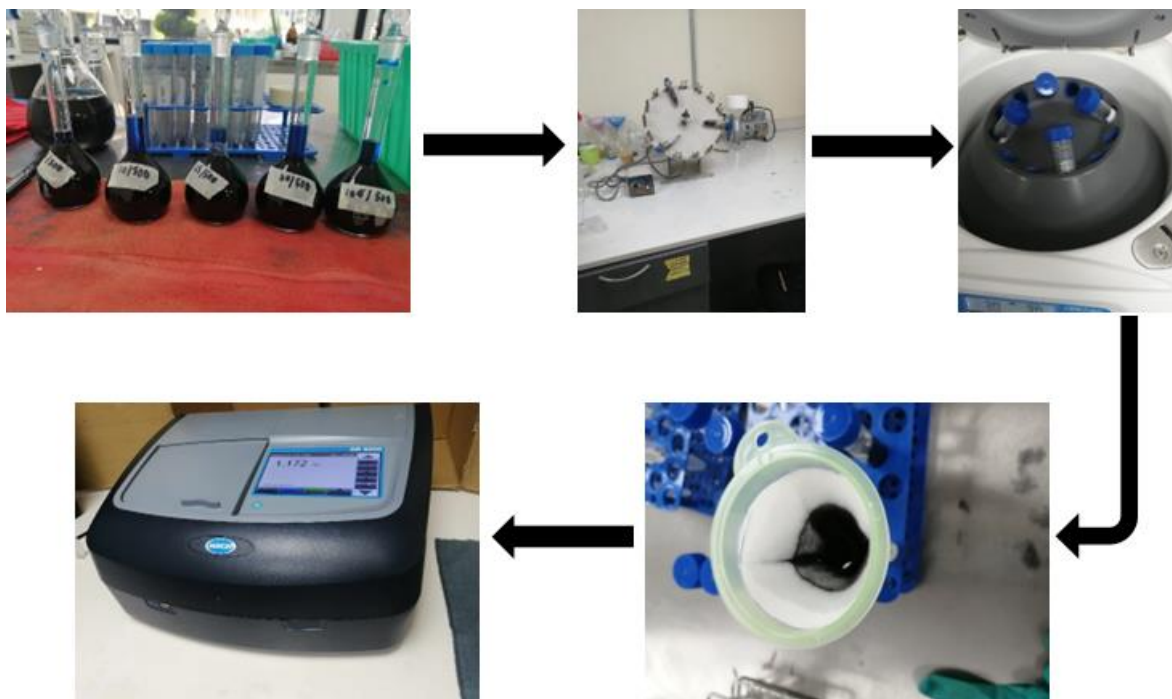


Figura 2.3. Esquema del proceso de efecto de la concentración

2.7 Evaluación del efecto de la temperatura en la remoción conjunta de Cr (VI)-índigo carmín.

Se realizaron pruebas para determinar a qué temperatura tiene mayor remoción de Cr(VI) e índigo carmín para conocer la cantidad máxima que remueve el carbón activado de *Typha domingensis*.

Se realizó una solución de Cr(VI)-índigo carmín de 500/100 mg/l. Se pesaron tubos por triplicado con 0.0495–0.0505 gramos de carbón activado de *Typha domingensis* en donde se adicionaron 10 ml de la solución preparada y se metieron a diferentes temperaturas (20°, 40°, 50°, 80° C)

Terminado el tiempo de agitación se realizó una centrifugación a 30000 rpm durante 30 minutos, esto con el fin de separar el material sólido y la fase líquida, después pasó por un proceso de filtrado. Una vez obtenida la fase líquida se determinó la concentración de Cr(VI)-índigo carmín por medio de la técnica de UV-vis en un espectrofotómetro.

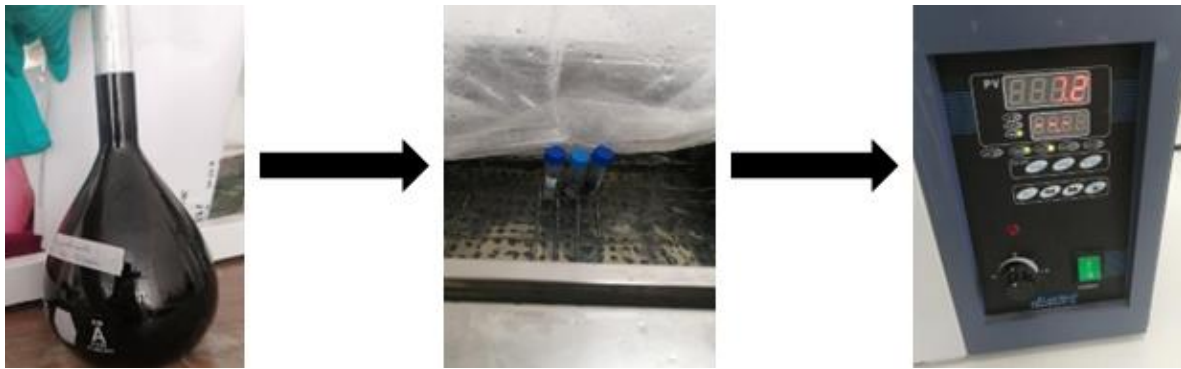


Figura 2.4 Esquema del proceso del efecto de temperatura.

2.8 Cuantificación de Cr(VI)-índigo carmín

A las soluciones acuosas obtenidas en cada ensayo experimental se les cuantificó la cantidad final tanto de índigo carmín como de Cr(VI). Mediante espectroscopia UV-vis a una longitud de onda de 610 nm para determinar el % de remoción de índigo carmín con el material y para el Cr(VI) se utilizó una longitud de onda de 540 nm utilizando el método descrito en la norma NMX-AA-044-SCFI-2014.

Capítulo 3.

Resultados y discusión

3.1 Obtención del precursor *Typha domingensis*

En la Figura 3.1 se observa el proceso que se llevó a cabo para acondicionar el precursor lignocelulósico *Typha domingensis*, físicamente tuvo un cambio de su forma inicial de tallo con estructura cilíndrica, fibrosa y esponjosa (Figura 3.1a) a su forma triturada (Figura 3.1c), en la cual, se observan tanto partículas finas como fibras.



Figura 3.1 Proceso del acondicionamiento del precursor lignocelulósico

3.2 Obtención del carbón activado a partir de *Typha domingensis*

En la Figura 3.2 se observa el proceso que se llevó a cabo para la activación química del precursor lignocelulósico *Typha domingensis*, en el cual se vio un cambio físico en su color inicial beige (Figura 3.2a), a un color negro después de la activación con el ácido fosfórico (Figura 3.2b), y cambiando de partículas finas a tener partículas aglomeradas de gran tamaño y además de una pérdida de masa de 20 g iniciales del precursor natural a aproximadamente 7 g del carbón activado.

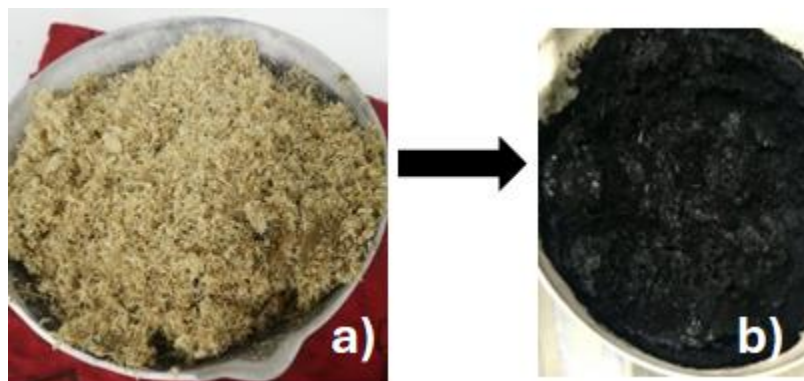


Figura 3.2 Proceso de la obtención del carbón activado a partir del precursor lignocelulósico

3.3 Evaluación preliminar de la remoción de Cr(VI)-índigo carmín con carbón activado de *Typha domingensis*.

En la figura 3.3 se observan las muestras a concentraciones diferentes después del proceso de filtración y centrifugación, para después realizar la determinación de ambos contaminantes por separado. Figura (3.3a) solución después de la fase de adsorción a concentración de 100 mg/l de IC-10 mg/L Cr(VI). Figura (3.3b) a una concentración de 500-50 IC-Cr(VI)/L y Figura (3.3c) a una concentración de 1000-100 mg IC-Cr(VI)/L.

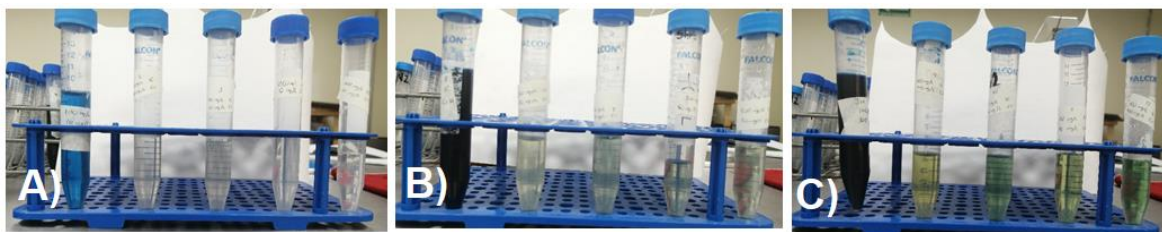


Figura 3.3. Solución después de la fase de adsorción a concentración diferente.

Para cuantificar la concentración de Cr(VI) después del proceso de adsorción, se realizó una curva de calibración de acuerdo con el método de la norma NMX-AA-044-SCFI-2014 y se midió a 540 nm en un espectrofotómetro de UV-Vis. Con los datos obtenidos de este experimento se calculó el % de remoción de Cr(VI) de las soluciones bicomponentes el cual se observa en la figura 3.6.

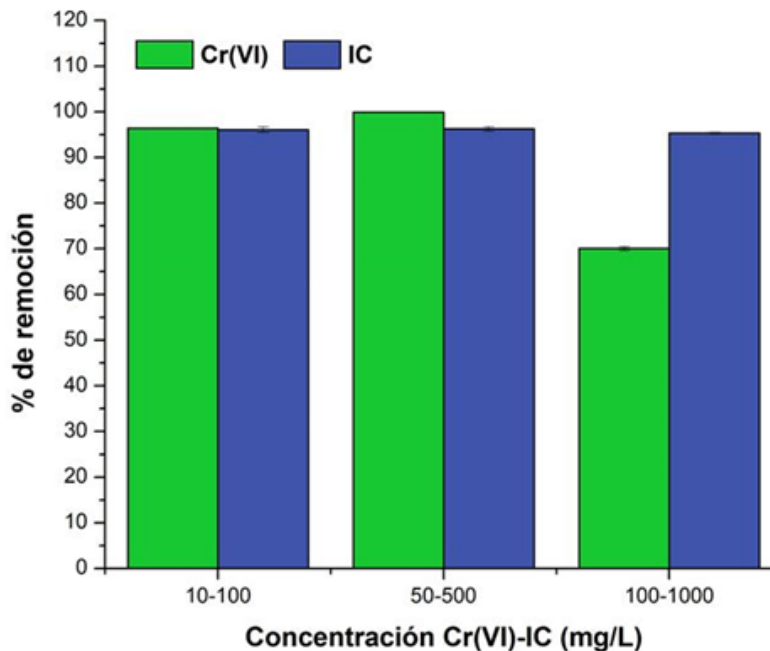


Figura 3.4 Porcentaje de remoción de cromo (VI)- índigo carmín en solución bicomponente.

La figura 3.4 muestra el porcentaje de remoción de IC en soluciones bicomponentes de 10-100, 50-500 y 100-1000 mg IC-Cr(VI)/L respectivamente. Se observa que a concentraciones bajas 10-100 mg IC/Cr(VI) se alcanza la mayor eficiencia de remoción (96%), conforme la concentración de índigo carmín aumenta a 500-50 mg IC-Cr(VI), la eficiencia disminuye ligeramente a un 95% y en la concentración más alta de 1000 mg la remoción desciende a 92%, lo que evidencia un efecto de saturación en la superficie del adsorbente.

Como se observa en la figura 3.4, la eficiencia de remoción de índigo carmín es de 96% y 95% en soluciones bicomponentes 10-100 y 50-500 mg IC-Cr(VI)/L respectivamente, pero en cuanto se aumenta la concentración de colorante en la solución bicomponente (100-1000 mg Cr(VI)-IC/L) solo remueve el 92 %, por lo tanto, al aumentar la concentración de colorante en las soluciones bicomponentes disminuye su eficiencia de remoción, sin embargo, sigue siendo una eficiencia alta. Se observa que el porcentaje de remoción es más eficiente o de mayor capacidad máxima en comparación con la solución Cr(VI).

3.4 Evaluación del efecto del pH

Al término del tiempo de contacto de las soluciones bicomponentes a diferentes pH iniciales (2-10), se midió el pH final de estas, en donde se observó que, aunque el pH inicial sea básico al final del contacto con el CA_{TD} con el medio acuoso este terminara siendo ácido como se muestra en la tabla siguiente.

Tabla 3. pH en solución acuosa bicomponente

pH	pH inicial	pH final
2	2.06	2.16 ± 2.25
4	4.47	3.13 ± 3.62
6	5.89	5.77
8	7.92	4.97 ± 6.49
10	10.02	5.43 ± 6.60

El pH en una solución permite determinar si a diferentes pH cambia la efectividad de remoción. En la figura 3.7 se observa que el pH tiene un efecto significativo en la remoción de Cr(VI). En condiciones ácidas (pH 2) el punto óptimo se alcanza, lo que indica prácticamente tiene un efecto de remoción casi del 98%. Al incrementar el pH hacia valores intermedios (4-6) la concentración disminuye de forma moderada, reflejando una remoción del 70-60%. La concentración de Cr(V) en condiciones básicas (pH 8) tuvo una nula remoción. Por lo tanto, el pH ácido representa la condición más favorable para la remoción de Cr(VI) con carbón activado.

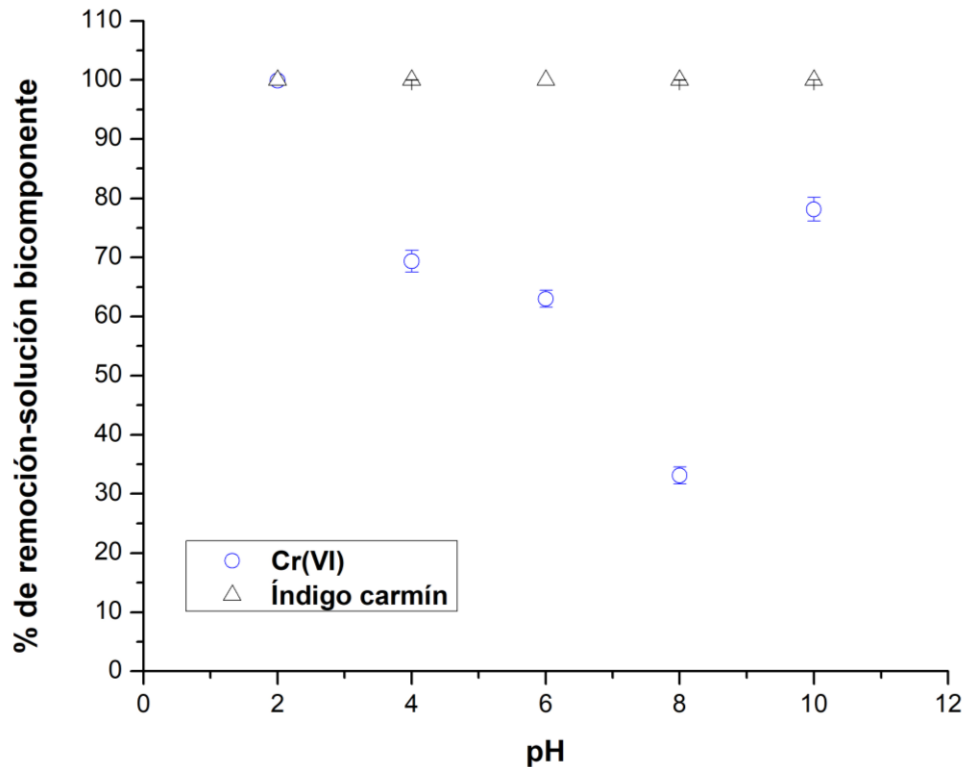


Figura 3.5 Efecto de pH en la remoción de solución bicomponente.

En la figura anterior 3.5 se observa que la remoción de IC se mantiene prácticamente constante y cercana al 100% en todo el intervalo de pH estudiado (2-10). Este comportamiento indica que el adsorbente presenta una alta afinidad por el colorante, aun en presencia simultánea de Cr(VI). La reducción en el porcentaje de eliminación de IC en el rango de pH 2 es similar al comportamiento observado en el estudio de la adsorción del colorante índigo carmín con cáscara de granada activada donde se reportó una capacidad máxima de remoción de colorante en pH 2 (Moussa Abbas., 2022).

La comparación del comportamiento de ambos contaminantes permite identificar un claro fenómeno de competencia mientras el IC mantiene su remoción prácticamente inalterada, el Cr(VI) experimenta una disminución significativa en medios neutros y básicos, (Acosta A., 2017) determinaron que el proceso remoción de Cr(VI) presenta una mayor remoción a pH ácido, en donde existe la posibilidad de que la adsorción sea química. Los resultados indican que el pH ácido es el más favorable para lograr una remoción conjunta eficiente para ambos contaminantes.

3.5 Evaluación del tiempo de contacto

En la figura 3.6 se muestra la cinética de remoción de Cr(VI) utilizando carbón activado de *Typha domingensis* mostró una rápida fase inicial durante los primeros minutos de contacto, (0-5 minutos). Se observa una alta velocidad de remoción, alcanzando valores cercanos al 8-9 mg/g en poco tiempo, esto indica que el agente adsorbente favoreció la adsorción rápida de iones de Cr(VI) en la superficie. Después de los 10-15 minutos, la remoción tiende a estabilizarse, lo que sugiere que el agente adsorbente se satura y el sistema se acerca al equilibrio. De igual manera, Babel y Kurniawan (2003) señalan que la mayor fracción de remoción de Cr(VI) ocurre en los primeros minutos, debido a la difusión superficial, antes de que el sistema alcance el equilibrio.

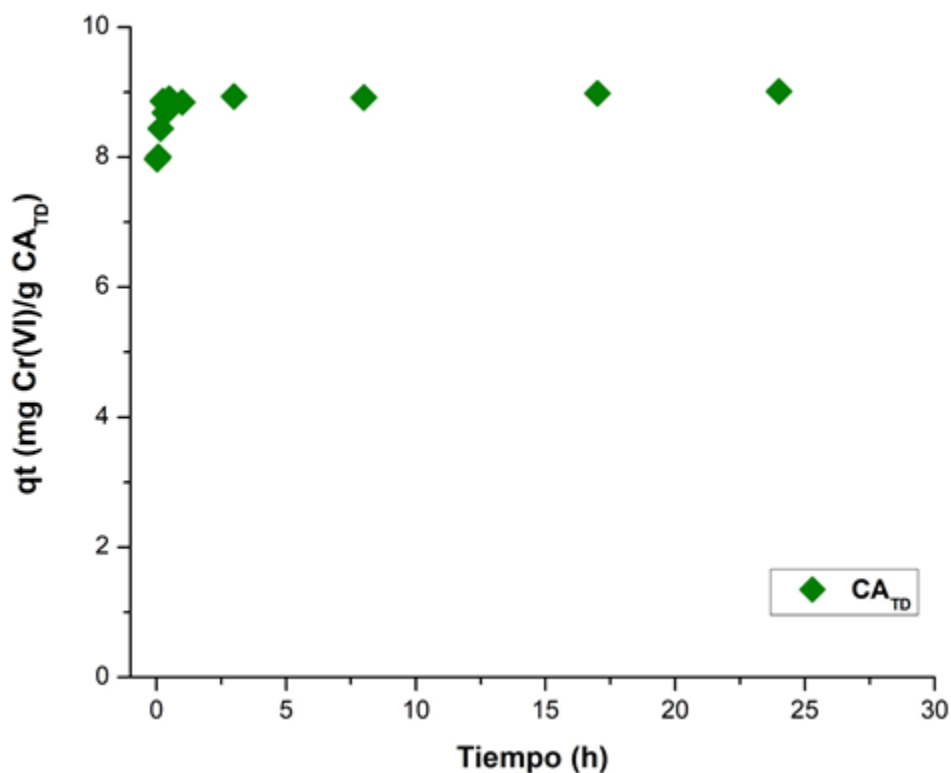


Figura 3.6 Cinética de adsorción Cromo (VI)

La cinética de remoción de IC utilizando carbón activado de *Typha Domingensis* determinó un incremento muy rápido en la cantidad absorbida (q_t , mg/g), pasando de aproximadamente 20 a 70-80 mg/g en poco tiempo. Esto indica que en las primeras horas ocurre la fase de adsorción más intensa, atribuida a la gran disponibilidad de sitios activos en la superficie del CA_{TD} . A partir de las 10 horas, la adsorción se mantiene prácticamente constante (≈ 90 mg/g), lo que indica que el sistema alcanza el equilibrio de adsorción. Esto confirma que el carbón activado de *Typha Domingensis* tiene una buena afinidad por el colorante. Este comportamiento coincide con Moussavi (2020) quien destaca que el equilibrio de adsorción de IC en carbón activado puede alcanzarse entre 6 y 12 horas, con tendencias similares observadas en la figura 3.7

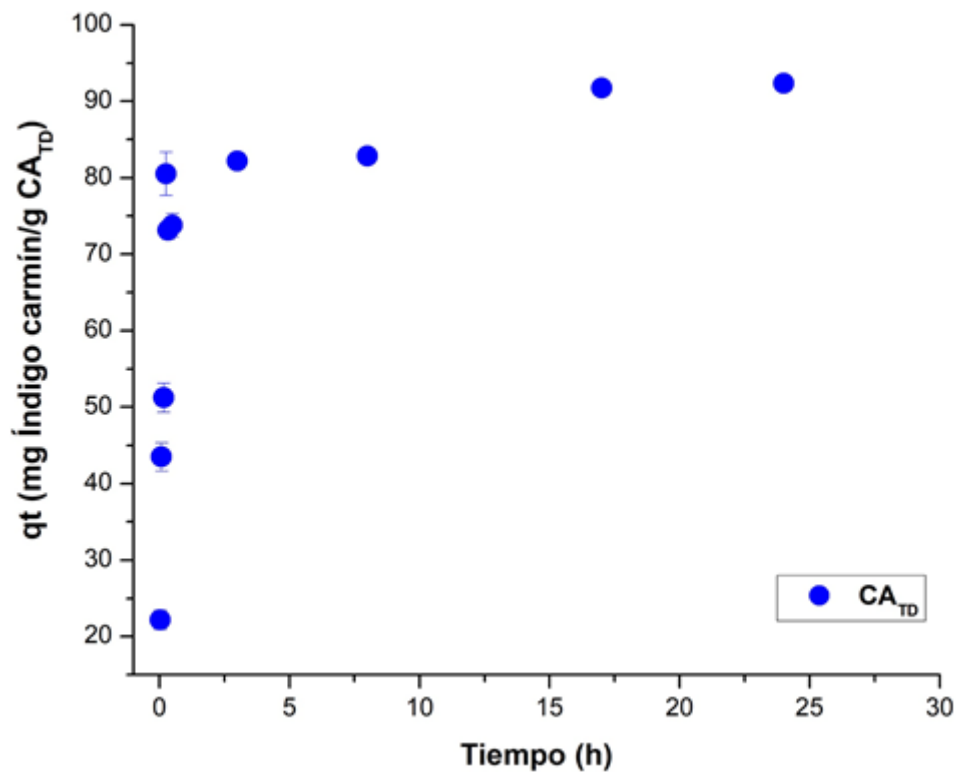


Figura 3.7. Cinética de remoción IC.

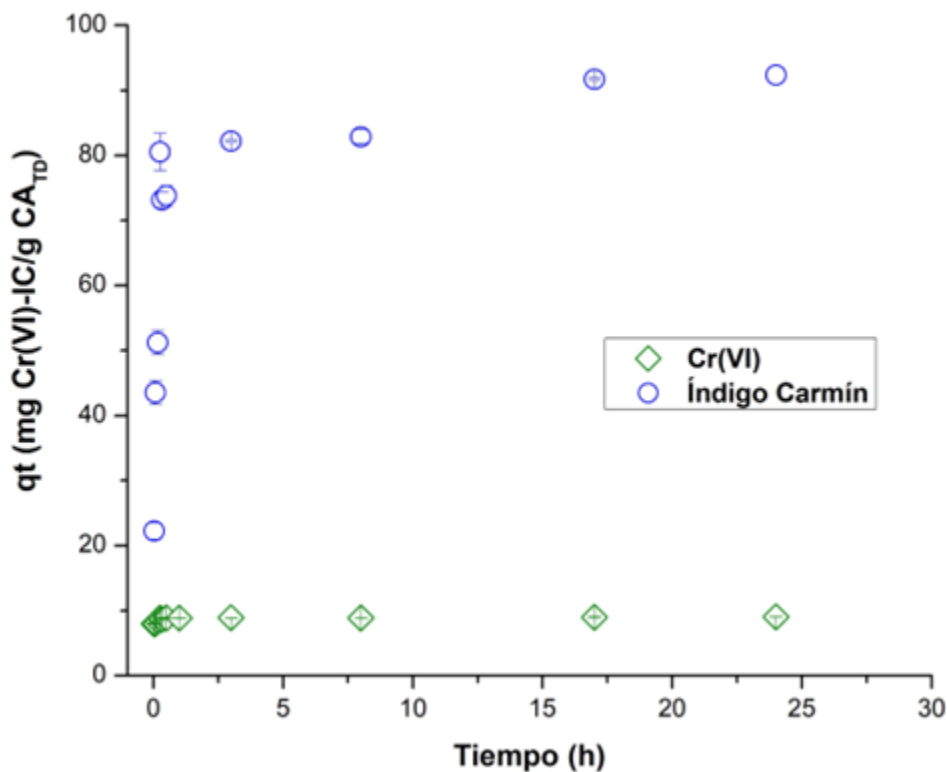


Figura 3.8. Cinética de remoción en solución bicomponente.

Los resultados de la cinética muestran que el adsorbente muestra una alta y rápida capacidad de remoción para el índigo carmín, alcanzando valores cercanos al equilibrio en la primera hora, mientras que la adsorción de Cr(VI) es baja y prácticamente constante a lo largo del tiempo. Esto indica una preferencia significativa hacia el colorante, evidenciando que los sitios activos favorecen a la adsorción del IC y muestra una limitada afinidad por el Cr(VI), aun bajo las mismas condiciones experimentales. El metal y el colorante pueden ser removidos en una misma superficie, pero al aumentar la concentración de un contaminante este puede inhibir la remoción del otro (Figura 3.8).

Tabla 4. Parámetros cinéticos de adsorción en solución bicomponente

Modelo de Cinética	Parámetros
Pseudo primer orden	

Pseudo segundo orden

Elovich

3.6 Efecto de la concentración de los contaminantes

La figura 3.10 representa la relación entre la concentración del equilibrio (C_e) del Cr(VI) y la capacidad de adsorción (q_e) del adsorbente CA_{TD} , en donde se observa que en valores bajos de C_e se observa una amplia dispersión de q_e , que van desde aproximadamente 0.8 hasta 14 mg/g, lo que indica que el adsorbente logra remover el Cr(VI), a medida que el C_e aumenta este alcanza la cantidad máxima de adsorción. (Lavado Meza C., 2012) menciona que este comportamiento indica que a las moléculas adsorbentes les resulta más difícil encontrar sitios de adsorción activos.

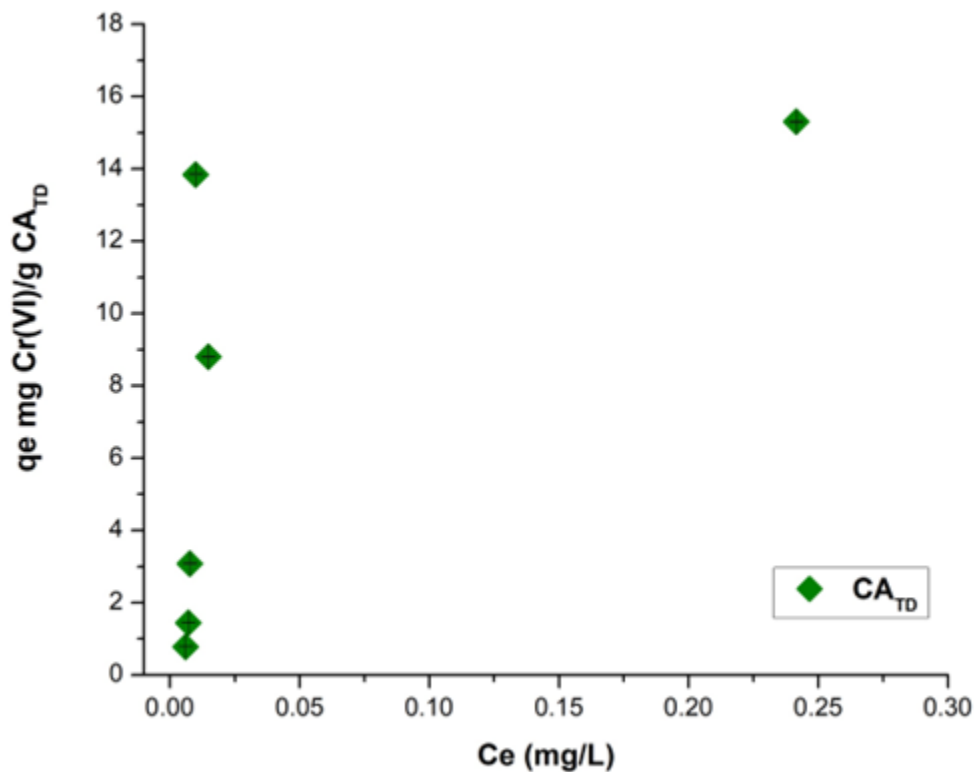


Figura 3.9 Efecto de la concentración inicial de Cr(VI)

Para conocer la cantidad de IC que es removida por el CA_{TD} se evaluaron experimentos a diferentes concentraciones iniciales, obteniendo los datos de la siguiente figura 3.11. A medida que aumenta la concentración del soluto en equilibrio (C_e), la cantidad adsorbida por el adsorbente (q_e) también aumenta. Esto indica una relación positiva entre ambas variables, por ende, el material CA_{TD} resulta ser muy eficiente en la remoción de IC, en donde se muestra que el adsorbente tiene la capacidad de remover más allá de concentraciones de 1000 mg/L porque aún no se encuentra el equilibrio en el proceso.

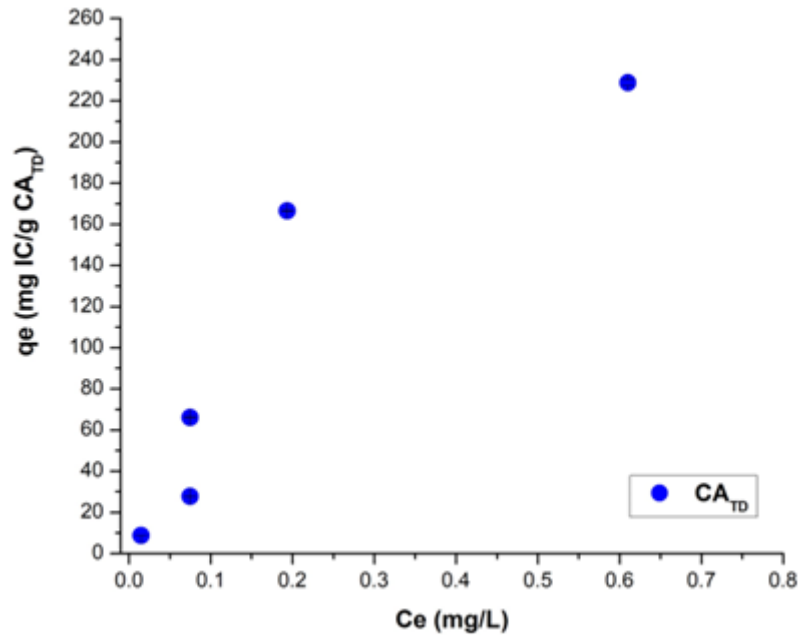


Figura 3.10 Efecto de la concentración inicial de IC

Tabla 5. Parámetros de isotermas de adsorción de Cr(VI) con CA_{TD}

Modelo de Isoterma	Parámetros
Langmuir	

Freundlich

Langmuir-Freundlich

3.7 Efecto de la temperatura

La figura 3.11 muestra el comportamiento de la remoción de Cr(VI) por el adsorbente CA_{TD}, los valores indican que a 20°C la remoción es relativamente alta (~85%), cuando se aumenta la temperatura a 30°C ocurre una disminución a un 63% de remoción lo que sugiere que en este punto el CA_{TD} presenta una menor afinidad por el Cr(VI), por lo tanto, en un rango de temperaturas de 20° y 50° C se observa una mejor eficiencia de remoción.

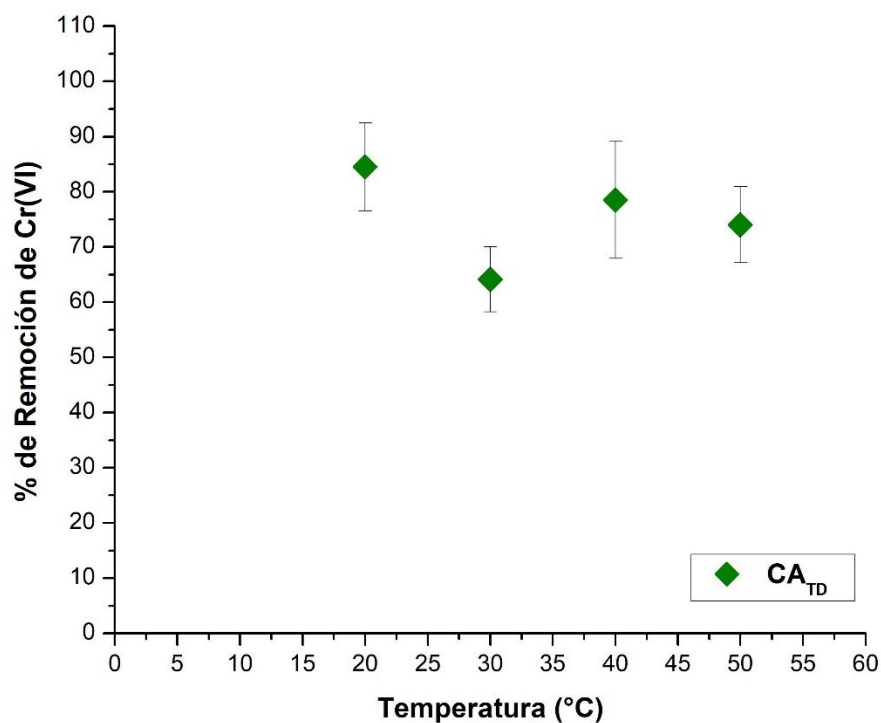


Figura 3.11 Efecto de la temperatura de Cr(VI)

En el caso de índigo carmín a temperaturas de 20, 30 y 50° C la remoción permanece prácticamente constante de un (~99-100%), mientras que a una

temperatura de 40°C ocurre una ligera disminución del ~90% pero sin representar una caída significativa de rendimiento como se muestra en la figura 3.12. Esto indica que la adsorción no depende fuertemente de la temperatura.

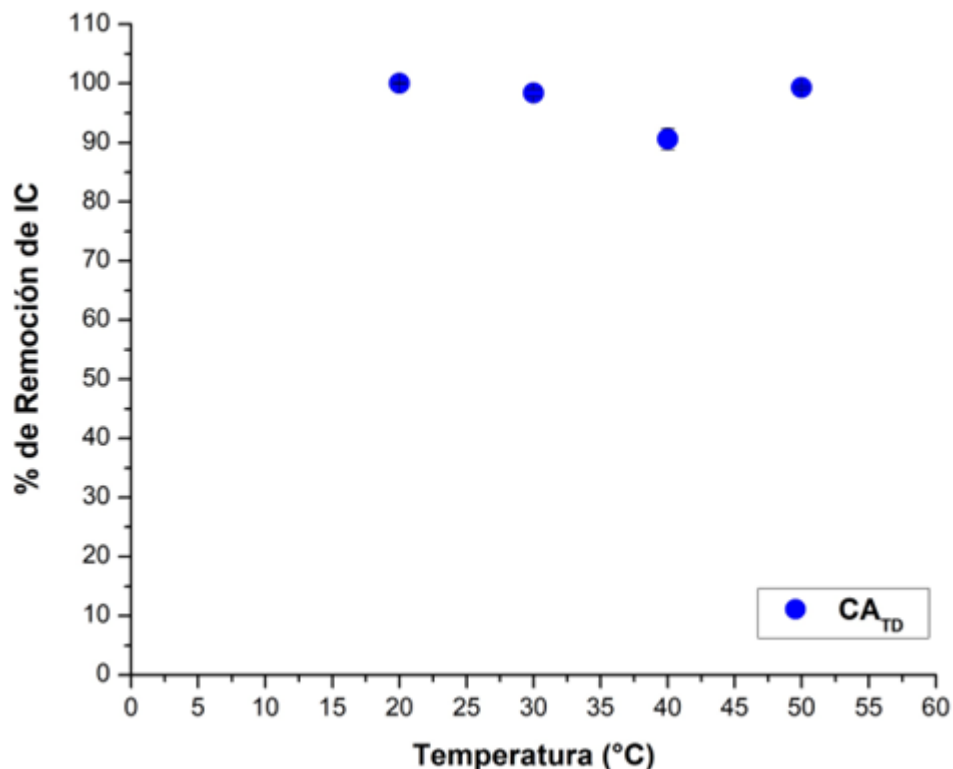


Figura 3.12 Efecto de temperatura IC

En conjunto los resultados muestran que el adsorbente CA_{TD} presenta un comportamiento diferenciado frente a los dos contaminantes. La remoción del colorante IC se mantuvo prácticamente constante y cercana al 100% en todo el intervalo de temperaturas estudiado, lo que indica una alta afinidad y estabilidad del material. En contraste, la remoción de $Cr(VI)$ mostro variaciones moderadas con la temperatura, con eficiencias entre al 63% y el 85 como se muestra en la figura 3.14. Estos resultados indican que el CA_{TD} posee una alta afinidad por el colorante y que el proceso de adsorción no depende significativamente de la temperatura.

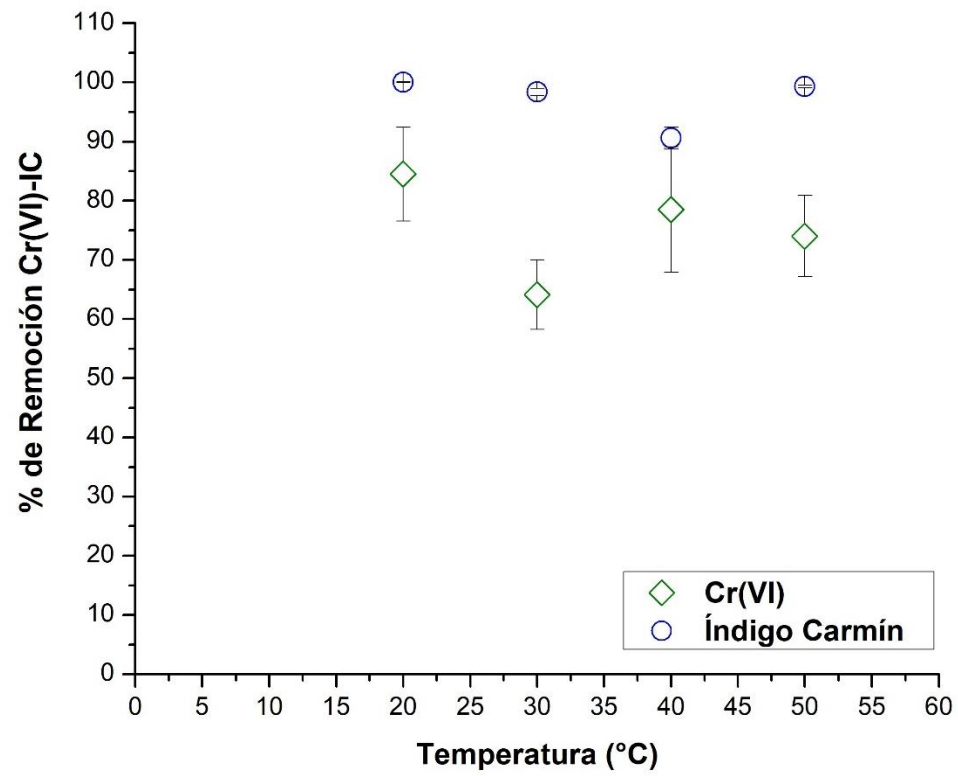


Figura 3.14 Porcentaje de remoción Cr(VI)-índigo carmín

Conclusiones

CONCLUSIONES

El proceso de adsorción del colorante índigo carmín se ve favorecida en valores de pH básicos y ácidos, en donde se logró una remoción del 98%, en contacto de 24 horas. Mientras que el del Cr(VI) se vio favorecida en pH 2.

El equilibrio de adsorción se alcanzo en 15 minutos, teniendo un 90% de remoción tanto en colorante y el Cr(VI).

Se comprobó que CA_{TD} para la remoción de Cr(VI)-índigo carmín en solución acuosa tiene una gran capacidad de adsorbente aun en concentración de 1000mg/l.

Recomendaciones

RECOMENDACIONES

- Realizar los ensayos disminuyendo del tiempo de contacto para verificar si el tiempo tiene algún efecto en el porcentaje de remoción de concentración final de Cr (VI)- índigo carmín.
- Estudiar la capacidad de adsorción del carbón activado de *Typha dominguensis*.
- Se propone realizar experimentos variando el tiempo de contacto y la temperatura para determinar la capacidad de remoción.
- Realizar un diseño de experimentos para estudiar todas las variables propuestas.

Referencias

Referencias

- Acosta A., B. Y. (2017). Adsorción de cromo (VI) utilizando cáscara de yuca (*Manihot esculenta*) como biosorbente: Estudio cinético. *SCielo*, 58-76.
- Ahmed M., B. A. (2017). Adsorción eficiente del colorante índigo carmín a partir de una solución acuosa sobre nanopartículas de hidróxido doble en capas mesoporosas de Mg/Fe preparadas mediante la ruta sol-gel controlada. *ELSEVIER*. doi:10.1016/j.chemosphere.2017.01.147.
- Albis Arrieta., A. R. (2017). *Remoción de cromo hexavalente de soluciones acuosas usando cáscara de Yuca*. Colombia : SCielo .
- Arauzo M., R. M. (2003). Contaminación por cromo en el agua intersticial, en el agua de cause y en los sedimentos del río Jarama.
- Cachola M., L. (2022). *Preparación y caracterización de carbón activado de cáscara de coco*. España.
- Cáncer, I. N. (2011). *Compuestos del Cromo hexavalente*. Obtenido de <https://www.cancer.gov/espanol/cancer/causasyprevencion/riesgos/sustancias/cromo>
- Cardenas G., A. R. (2011). Hexavalent Chromium Removal by a *Paecilomyces* sp Fungal Strain Isolated from Environment. *Scielo*, 9-16.
- Carriazo J., S. M. (2010). Adsorption properties of an activated carbon and determination of Langmuir's equation using low cost materials. *Scielo*.
- Caviedes R., D. R. (2016). Removal of heavy metals commonly generated by industrial activities, by means of neotropical macrophytes. *Scielo*.
- CONAGUA. (2011). *Estadística del agua en México* . México.
- F., P. Y. (2012). REMOVAL OF HEXAVALENT CHROMIUM FROM CONTAMINATED WATER USING CHITOSAN OBTAINED FROM SHRIMP EXOSKELETON. *Scielo* .
- G., V. (2017). Eficiencia de dos sistemas de tratamiento por osmosis inversa en la calidad de agua potable. *Facultad de Ciencias Biológicas Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo*.
- González, M. N. (2006). Effect of phosphoric and hydrofluoric acid on the charge density of a nanofiltration membrane.

- Guastalli, A. e. (2004). Aplicación de la electrodiálisis en la recuperación de ácido fosfórico de aguas de enjuague industriales: tendencias en electroquímica y corrosión a principios del siglo XXI . *Ediciones Universitat de Barcelona*.
- Horsfall M., A. A. (2003). Full Length Research Paper - Removal of Cu (II) and Zn (II) ions from wastewater by cassava (*Manihot esculenta* Cranz) waste biomass. *Revista Africana de Biotecnología*, 360-364. doi:<https://doi.org/10.5897/AJB2003.000-1074>
- Lavado Meza C., S. K. (2012). Remoción de cromo (VI) empleando carbones preparados por activación química a partir de las astillas de eucalipto. *Scielo Perú*, 14-26.
- Manu B., C. S. (2003). Decoloración de colorantes índigo y azoicos en reactores semicontinuos con largo tiempo de retención hidráulica. *ELSEVIER*, 1212-1221. doi:[https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(02\)00291-1](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(02)00291-1)
- Moussa Abbas., Z. H. (2022). Removal of indigo carmine (IC) in aqueous solution onto activated pomegranate peel (APP) by adsorption process: Kinetic and thermodynamic studies. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*.
- Pabón, S. B. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. *Entre ciencia e ingeniería* , 9-18.
- Perez A., L. L. (2020). Uso de cáscara de cacao (*theobroma cacao*) para la remoción de cromo en solución acuosa. *Redalyc.org*, 34. doi: <https://doi.org/10.24050/reia.v17i34.1393>
- Secula M., C. I. (2011). Un estudio experimental de la eliminación de índigo carmín de una solución acuosa mediante electrocoagulación. *elsevier.com*.
- Taylor J & Wiesner, M. (2022). Membranas. Capítulo 11. Calidad y tratamiento del agua . *Manual de suministros de agua comunitaria Madrid*, 707-779.
- Tejada-Tovar, C. V. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. doi:<http://doi.org/10.22430/22565337.209>
- Tejada-Tovar., V.-o. G.-J. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico . *Scielo* .
- Valladores Cisneros., M.-G. (2016).
- Vargas J., G. L. (2008). OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE CARBONES ACTIVADOS A PARTIR DE SEMILLAS DE. *Revista colombiana que química* .

