



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Programa Universitario de Investigación Interdisciplinaria en Salud

Nombre del programa universitario de investigación de la Digi

Evaluación de la capacidad bioadsorbente del exocarpio de aguacate (*Persea americana* var. *guatemalensis* Mill) modificado químicamente para el tratamiento de aguas contaminadas con cromo hexavalente.

Nombre del proyecto de investigación

4.8.63.5.90

Número de partida presupuestaria

Centro de Investigaciones de Ingeniería -CII- Facultad de Ingeniería/USAC

Unidad académica o centro no adscrito a unidad académica que avaló el proyecto

Inga. Qca. Telma Maricela Cano Morales

Ing.Qco. Gerson Joél Ortega Morales

Ing.Mec. Osber Isabel Carías Palencia

Ing.Qco. Mario José Mérida Meré

Inga. Qca. Claudia Elisa Castellanos Jurado

Ing.Ind. Juan Pablo López Cano

Br. Melinna Lizeth Beteta Castro

Br. Renato Paolo Cisneros Quiñónez

Nombre del coordinador del proyecto y equipo de investigación contratado por la Digi

Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales -LIEXVE-, Sección Química Industrial, Centro de Investigaciones de Ingeniería CII/USAC

Guatemala 28/02/2025

Lugar y fecha de presentación del informe final dd/mm/año



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Autoridades de la Dirección General de Investigación

Dra. Alice Burgos Paniagua
Directora General de Investigación

MARN Ing. Agr. Julio Rufino Salazar
Coordinador General de Programas

M.A. Sucelly Orozco de Morales
Coordinadora del Programa Universitario de Investigación Interdisciplinaria en Salud

Autores

Ing.Qca.Telma Maricela Cano Morales, 16162.
Coordinadora del proyecto
Ing.Qco. Gerson Joel Ortega Morales, 20170362.
Investigador Profesional
Ing.Mec. Osber Isabel Carías Palencia, 20171369.
Investigador Profesional
Ing.Qco. Mario José Mérida Meré, 20040697.
Investigador Profesional
Inga.Qca.Claudia Elisa Castellanos Jurado, 20230984.
Investigador Profesional
Ing.Ind. Juan Pablo López Cano, 20220113.
Investigador Profesional
Br. Melinna Lizeth Beteta Castro, 20240650
Auxiliar de Investigación II
Br. Renato Paolo Cisneros Quiñónez, 20231031.
Auxiliar de Investigación II

El contenido de este informe de investigación es responsabilidad exclusiva de sus autores.

Esta investigación fue cofinanciada con recursos del Fondo de Investigación de la Digi de la Universidad de San Carlos de Guatemala a través de la partida presupuestaria número: **4.8.63.5.90** en el Programa Universitario de Investigación **Interdisciplinaria en Salud**.

Los autores son responsables del contenido, de las condiciones éticas y legales de la investigación desarrollada.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

1 Índice general

Índice general	3
Resumen	5
Palabras clave	5
Abstract	5
Keywords	6
1. Introducción	6
2. Contexto de la investigación	7
3. Revisión de literatura	8
4. Planteamiento del problema	14
5. Objetivos	15
5.1. General	15
5.2. Específicos	15
6. Hipótesis	16
7. Método	16
7.1. Tipo de investigación.....	17
7.2. Enfoque y alcance de la investigación.....	17
7.3. Diseño de la investigación.....	18
7.4. Población, muestra y muestreo.....	19
7.5. Técnicas	20
7.6. Resumen de las variables o unidades de análisis	26
7.7. Procesamiento y análisis de la información.....	27
8. Aspectos éticos y legales	28
9. Resultados y discusión.....	28
10. Propiedad intelectual.....	68
11. Beneficiarios directos e indirectos.....	69
12. Estrategia de divulgación y difusión de los resultados.....	70
13. Contribución a las Prioridades Nacionales de Desarrollo (PND)	71



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

14. Contribución al desarrollo de iniciativas de ley.....	71
15. Vinculación.....	71
16. Conclusiones.....	73
17. Recomendaciones.....	74
Referencias	74
Apéndice	77
Declaración del coordinador (a) del proyecto de investigación	107
Aval del director (a) del instituto, centro, unidad o departamento de investigación o coordinador de investigación del centro regional universitario.....	107
Aprobación de la Dirección General de Investigación.....	108



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

2 Resumen

La presente investigación evaluó la capacidad bioadsorbente del exocarpio de aguacate modificado químicamente para la remoción de cromo hexavalente en soluciones acuosas. La problemática radica en la contaminación del agua por metales pesados, lo que justifica la búsqueda de materiales alternativos y sostenibles para su tratamiento. El objetivo principal fue caracterizar el material antes y después de la modificación química y determinar su eficiencia en la adsorción de Cr(VI) bajo diferentes condiciones.

El estudio se realizó en el Centro de Investigaciones de Ingeniería, empleando un diseño experimental factorial. Se caracterizó el exocarpio mediante espectroscopia FTIR, análisis de humedad, contenido de lignina y granulometría. Se realizaron pruebas de adsorción variando el pH (2, 3 y 4) y el tamaño de partícula (2 mm y 2.38 mm). Se emplearon modelos cinéticos para describir el proceso de adsorción.

Los resultados indicaron que el exocarpio modificado logró una remoción del 100% de Cr(VI) a pH 2, mientras que el material sin modificar alcanzó un 99.7%. La adsorción se ajustó al modelo cinético de pseudo-segundo orden, lo que sugiere que el proceso está gobernado por interacciones químicas. Se concluye que la modificación química mejora la capacidad adsorbente del material.

Este estudio es relevante para comunidades afectadas por la contaminación del agua y para la industria del tratamiento de efluentes, ya que propone una alternativa sostenible y económica para la remoción de metales pesados.

3 Palabras clave

1. Bioadsorción	2. Cromo hexavalente	3. Materiales lignocelulósicos	4. Tratamiento de aguas	5. Modificación química
-----------------	----------------------	--------------------------------	-------------------------	-------------------------

4 Abstract

The present study evaluated the bioadsorption capacity of chemically modified avocado exocarp for the removal of hexavalent chromium in aqueous solutions. The issue lies in water contamination by heavy metals, justifying the search for alternative and sustainable treatment materials. The main objective was to characterize the material before and after chemical modification and determine its efficiency in Cr(VI) adsorption under different conditions.

The study was conducted at the Engineering Research Center using a factorial experimental design. The exocarp was characterized through FTIR spectroscopy, moisture content analysis, lignin content, and granulometry. Adsorption tests were performed by varying pH (2, 3, and 4) and particle size (2 mm and 2.38 mm). Kinetic models were employed to describe the adsorption process.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

The results indicated that the modified exocarp achieved 100% Cr(VI) removal at pH 2, while the unmodified material reached 99.7%. Adsorption followed the pseudo-second-order kinetic model, suggesting that the process is governed by chemical interactions. It is concluded that chemical modification enhances the material's adsorptive capacity.

This study is relevant for communities affected by water pollution and the wastewater treatment industry, as it proposes a sustainable and cost-effective alternative for heavy metal removal.

5 Keywords

Bioadsorption, Hexavalent chromium, Lignocellulosic materials, Water treatment, Chemical modification.

1. Introducción

Las actividades industriales humanas se han caracterizado por la generación de grandes cantidades de subproductos, los cuales, en la mayoría de los casos, terminan convirtiéndose en fuentes de contaminación. La problemática global de la presencia de metales pesados en agua, alimentos y aire es una de las principales preocupaciones en la actualidad, debido a los subproductos generados por ciertas industrias. Estos elementos químicos presentan un alto grado de toxicidad, lo que provoca efectos adversos en la salud humana y ocasiona daños irreversibles en la flora, fauna y en el medio ambiente en general. Además, estos impactos tienen repercusiones significativas a nivel socioeconómico (Correa Cuba, 2021).

Las industrias dedicadas al curtido de pieles son una de las principales fuentes de contaminación en los cuerpos de agua. Esto se debe a los residuos que generan, como los metales pesados, especialmente el cromo hexavalente, que se disuelve rápidamente en las aguas naturales. Esta alta toxicidad dificulta el proceso de autodepuración de los cuerpos de agua, por lo que resulta necesario buscar alternativas de tratamiento para que estas industrias minimicen su impacto ambiental (Arias Gámez & Granja Puetamán, 2017).

La fábrica de calzado ubicado cerca del Río Chijuljá ha utilizado a la Laguna Chichoj como sumidero en el proceso de curtición de pieles, los cuales están contaminados con cromo hexavalente. Durante el proceso de curtido, se emplean sales de cromo, las cuales son promotores de iones hexavalentes que forman parte de los efluentes de estas fábricas en cuestión. (Correa Cuba, 2021).

En este sentido, el Cr se acumula de manera alarmante, una vez liberado al medio ambiente, rápidamente se convierte en cromo trivalente (Cr+3), el cual no se acumula directamente alcanzando niveles tóxicos. El cromo tiene una alta afinidad por la materia orgánica, dando lugar a un ciclo y comportamiento ambiental que los vuelve difíciles de predecir, ya que



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

dependen en gran medida de la suerte de su portador orgánico. Desde los años setenta a la actualidad, se ha temido por la biomagnificación del Cromo en el bioma ubicado en la Laguna y zonas aledañas. (Brocard et al., 2016a).

En las aguas residuales, el cromo hexavalente se encuentra disuelto como CrO_4^{2-} y puede ser eliminado mediante procesos de reducción, precipitación química, adsorción y intercambio iónico. El método más comúnmente empleado implica agregar un agente reductor que convierta el cromo hexavalente en cromo trivalente, seguido de la precipitación utilizando soluciones básicas para formar $\text{Cr}(\text{OH})_3$. En la actualidad, se han explorado enfoques alternativos que involucran la remoción y/o reducción del cromo hexavalente a cromo trivalente mediante la acción de bacterias, algas, levaduras y hongos (López Hernández & Lacayo Romero, 2020a).

El mecanismo de la biosorción se basa en los grupos funcionales presentes en la superficie de la biomasa, así como en la naturaleza del metal y la matriz que rodea a los bioadsorbentes (Wang & Chen, 2009). En las paredes celulares de los materiales bioadsorbentes se encuentran polisacáridos, proteínas y lípidos que contienen grupos funcionales capaces de unir metales pesados en su superficie. Estos grupos funcionales incluyen carboxílicos, amino, hidroxilos, fosfatos y tioles, los cuales difieren en su afinidad y especificidad para unirse a diferentes iones metálicos (Eggs et al., 2012a).

El objetivo de este estudio fue evaluar la capacidad de remoción de cromo (VI) en agua sintética utilizando el exocarpio del aguacate (*Persea americana* var. *guatemalensis* Mill) químicamente modificado. Las variables regresoras consideradas son el pH de la solución y el tamaño del adsorbente, mientras que las variables de respuesta fueron la capacidad, el porcentaje y la cinética de adsorción. Esta última fue evaluada utilizando cuatro modelos matemáticos y dos isoterma.

2. Contexto de la investigación

La presente investigación se llevó a cabo en el marco de la evaluación de la capacidad bioadsorbente del exocarpio de aguacate (*Persea americana* var. *guatemalensis* Mill) modificado químicamente para el tratamiento de aguas contaminadas con cromo hexavalente. La contaminación ambiental generada por procesos industriales como el curtido de pieles ha afectado el equilibrio ecológico y la salud humana. Se estima que la contaminación del agua alcanzó los 2,000 millones de metros cúbicos diarios, lo que pone en riesgo la disponibilidad de este recurso y compromete el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (Reyes et al., 2016). Este estudio aportó una solución efectiva y sostenible a esta problemática.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

El proyecto de investigación se desarrolló durante un período de 11 meses, iniciando el 2 de febrero de 2024 y finalizando el 30 de noviembre de 2024. Las actividades se llevaron a cabo en diversos laboratorios de la Universidad de San Carlos de Guatemala, incluyendo el Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales (LIEXVE), el Centro de Información y Asesoría Toxicológica (CIAT) y la Facultad de Ingeniería. La problemática de contaminación por cromo hexavalente se identificó en cuerpos de agua como la Laguna Chichoj, ubicada en Alta Verapaz, una región con clima templado, precipitaciones abundantes y una importancia ecológica significativa. Durante el proceso de eutrofización, el cromo se acumuló en los jacintos de agua, lo que contribuyó a la diseminación de este metal y otros contaminantes en el ecosistema (Brocard et al., 2016).

La contaminación con metales pesados es un problema ambiental y social que ha afectado a comunidades rurales e indígenas cuya economía depende de la agricultura y la pesca. Estudios han reportado la presencia de metales como mercurio (Hg), arsénico (As), plomo (Pb), cadmio (Cd), zinc (Zn), níquel (Ni) y cromo (Cr) en cultivos agrícolas como la lechuga, el repollo y el brócoli, lo que representa un riesgo directo para la salud humana (Singh et al., 2010; Chen et al., 2013). La exposición prolongada al cromo hexavalente puede generar cáncer de pulmón, irritaciones en la piel y daños en el tracto respiratorio (López Hernández & Lacayo Romero, 2020). La falta de regulaciones ambientales efectivas ha permitido que industrias descarguen residuos tóxicos en fuentes hídricas, impactando la salud pública y la seguridad alimentaria. La situación política del país refleja limitaciones en la aplicación de normativas ambientales, aunque existen esfuerzos del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales por mitigar estos efectos. Históricamente, la industrialización ha generado desafíos en el manejo de residuos, lo que resalta la urgencia de nuevas estrategias de tratamiento de aguas.

Los beneficiarios directos de esta investigación incluyeron las comunidades afectadas por la contaminación del agua, en especial aquellas cercanas a la Laguna Chichoj y el río Chijuljá. También se beneficiaron empresas del sector del tratamiento de aguas, quienes pudieron aprovechar los hallazgos para mejorar sus procesos de descontaminación. Indirectamente, la comunidad científica y académica obtuvo información relevante sobre el uso de materiales bioadsorbentes en el tratamiento de metales pesados en cuerpos de agua contaminados. Se espera que los resultados de este estudio contribuyan al desarrollo de estrategias innovadoras para la remoción de cromo hexavalente y a la promoción de alternativas ecológicas para la gestión de recursos hídricos contaminados.

3. Revisión de literatura

- **Bioadsorción**



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Consiste en un procedimiento de captación de partículas y iones, con el propósito de eliminar elementos de elevada densidad en las aguas residuales, utilizando disolventes derivados de fuentes biológicas (Candelaria Tejada-Tovar¹, 2014). La bioadsorción involucra dos fases, una fase sólida representada por la biomasa, y una fase líquida que consiste en una solución que contiene sustancias descompuestas, conocidas como adsorbidos que serán capturados por la fase sólida. Para ocurra la adsorción, se necesita el adsorbente tenga una afinidad por los adsorbidos, de manera que estos últimos puedan ser transferidos a la fase sólida donde serán retenidos por varios componentes. Esta interacción se produce debido al equilibrio establecido entre el adsorbente degradado y el adsorbente unido al sólido (Johnny Abel Ore Arosquipa, 2020).

- **Bioadsorción de metales pesados en aguas residuales**

Esta metodología se fundamenta en la utilización de materiales de origen orgánico, empleando procesos que no son de naturaleza metabólica. La inclusión del prefijo "bio" indica la procedencia orgánica del agente adsorbente. Esta estrategia se lleva a cabo mediante la adhesión del adsorbente al exterior de materiales naturales vivos o inactivos (Laura Mónica & Miguel Angel, 2019).

Es un proceso reversible, que permite recuperar el material usado y limita el uso otra sustancias orgánicas o inorgánicas, posee un alto índice de utilización como adsorbente y posibilita la recuperación del metal después del procedimiento (Jain et al., 2016).

- **Contaminación del agua por cromo**

El incremento de la industrialización en las sociedades ha conducido a un aumento en la presencia de metales pesados en los efluentes industriales. Dentro de los elementos más perjudiciales está el cromo, una sustancia que se encuentra presente en el agua tanto en forma trivalente como de hexavalente. Esta última forma es especialmente dañina debido a su capacidad para moverse fácilmente entre diferentes medios y perturbar el equilibrio biológico, lo que resulta en consecuencias negativas (Campo, 2011).

- **Cromo hexavalente,**

Se trata de un metal que carece de color y sabor, siendo el elemento más soluble entre sus semejantes, aunque su estabilidad es menor. Para una solución de carácter ácida, muestra un potencial óxido-reducción fuertemente positivo y actúa con naturaleza de un agente oxidativo poderoso cuando se encuentra en presencia de sustancias que liberan electrones. (Piedad et al., 2010). Se considera que este contaminante tiene el impacto ambiental más significativo



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

en el agua y la tierra, siendo altamente tóxico. (Albis Arrieta et al., 2017). En la mayoría de los casos, su origen está relacionado con la actividad humana, y se manifiesta como un subproducto de industrias como la de curtido, donde involucra la presencia de iones de cromato o dicromato. (Eggs et al., 2012b).

- **Agua sintética**

Se trata de una combinación creada a partir del elemento o sustancia que se analizará, asegurando la existencia de dicho metal en una concentración específica (Mita & Guevara, 2012). Para este estudio se delimitará la composición enfocándose en las diferentes variaciones de concentración del cromo hexavalente, esto con el objetivo de tener una única variable de estudio.

- **Exocarpio**

El epicarpio, (del griego epi "sobre" + karpós "fruto", a veces llamado exocarpio debido a su posición exterior) es la porción del pericarpio que generalmente actúa como una capa de protección para el resto del fruto contra factores externos. El epicarpio constituye la epidermis defensiva del fruto, y en muchas ocasiones, alberga glándulas que contienen esencias y pigmentos. En numerosas frutas, se le conoce comúnmente como la piel (Ortiz, 2000).

- **Aguacate (*Persea americana* var. *guatemalensis* Mill)**

Pertenece a la raza guatemalteca de aguacates. Esta variedad se distingue por su cáscara gruesa y rugosa, y su fruta de tamaño mediano con un alto contenido de aceite en la pulpa (alrededor del 9-12%). En comparación con las otras razas, la fruta guatemalteca tiene una forma redonda. Es apreciado por su sabor y textura distintivos. Cuando madura, se torna de un color negro, lo que facilita su identificación y permite disfrutarlo en su punto óptimo (Espinoza, 2021). Además, las cáscaras de esta variedad contienen flavonoides, principalmente derivados de quercetina, como quercetina-dihexósido, quercetina-pentosido-hexósido, quercetina-glucurónido, quercetina-hexósido, quercetina-ramnosido-hexósido y quercetina-ramnosidepentosido (Melgar et al., 2018, como se citó en Chil-Núñez et al., 2019).

- **Ácido cítrico**

El ácido cítrico, también conocido como ácido 3-carboxi-3-hidroxipentanodioico según la nomenclatura IUPAC, es un ácido orgánico tricarbóxico que se encuentra de manera predominante en diversas frutas, especialmente en cítricos como la mandarina, el limón y la naranja. Su fórmula molecular se representa como $C_6H_8O_7$ (Pitsari et al., 2013).

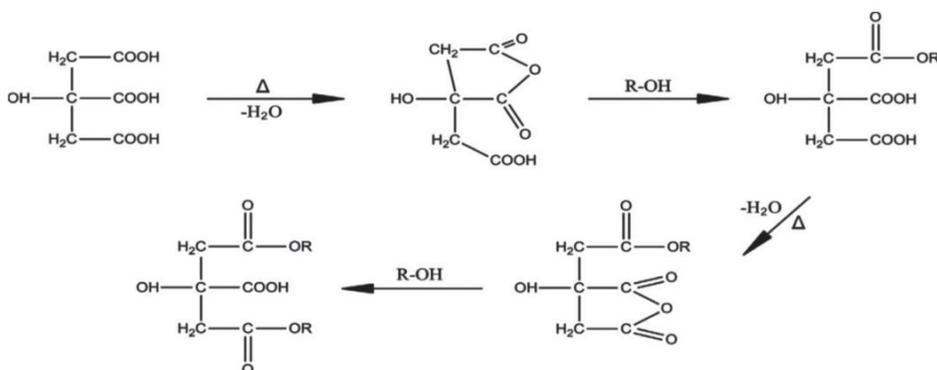
- **Modificación química con ácido cítrico**

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Se realizará una modificación empleando un proceso de carboxilación, con el objetivo de agregar grupos carboxilos a la fibra que está siendo tratada. La primera etapa consistirá en la generación de un anhídrido entre dos grupos carboxílicos que están adyacentes, como consecuencia de la eliminación de una molécula de agua durante el proceso de calentamiento de la biomasa y del ácido cítrico. Posteriormente, el anhídrido reaccionará con un grupo hidroxilo presente en la celulosa de la biomasa, dando lugar a la formación de un éster y, de esta forma, incrementando la capacidad de unión con el ion metálico. (Ceballos & Montoya, 2013; Pitsari et al., 2013). El mecanismo de reacción se detalla en la figura 1.

Figura 1.

Mecanismo de reacción del ácido cítrico y los grupos oxidrilo presentes en la celulosa.



Nota. Adaptado del artículo Cinética de adsorción de Cr (VI) usando biomásas residuales modificadas químicamente en sistemas por lotes y continuo (p. 31), por Tejada et al., 2015, Programa de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería.

Estado del Arte

En Guatemala, existen muy pocos estudios relacionados con la captación de metales pesados utilizando biomasa proveniente de residuos agroindustriales. Sin embargo, existen estudios publicados en otros países.

En el estudio nacional titulado "Biosorción de metales pesados utilizando carbón activado obtenido de cáscara de cardamomo" se realizó un estudio de investigación que consistió en la obtención de carbón activado a partir de cáscaras de cardamomo. El objetivo principal fue la eliminación de metales pesados presentes en ríos contaminados. Para lograr este propósito, se empleó un diseño experimental de Taguchi, considerando diversos parámetros como el tiempo de contacto, el pH, la concentración inicial del metal y la granulometría (Vásquez & Sierra, 2021).



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Se han realizado estudios en los cuales se emplean biomásas con alto contenido lignocelulósico, como es el caso de la investigación de Pehlivan y Altun, (2008), en el que se realizan estudios de bioadsorción de cromo (IV) en soluciones acuosas con cáscaras de nuez (*Juglans regia*), avellana (*Corylus avellana*) y almentra (*Prunus dulcis*), en el cual se concluyó que este último posee una alta capacidad para la remoción de cromo hexavalente; sin embargo, los valores reportados con la isoterma de Langmuir da como máxima adsorción de Cr (VI) 8,01 mg/g, 8,28 mg/g y 3,40 mg/g para la nuez, avellana y almendra respectivamente. Los métodos empleados para obtener una adsorción óptima de cromo (VI) varían en función del tipo de biomasa utilizada ya que la interfase entre el adsorbato y adsorbente se ve influida por el carácter y el número de grupos funcionales dependientes de la naturaleza polimérica y constitutiva del material orgánico.

Tejeda, Tejeda Tovar, Marimón, y Villabona, (2014) llevaron a cabo modificaciones químicas y físicas de la biomasa de cáscara de naranja y plátano (*Citrus sinensis* y *Musa paradisiaca*), el objetivo principal del estudio fue evaluar la capacidad de la biomasa de cáscara de naranja y plátano, tanto sin modificar como modificada con quitosano, para adsorber iones de cromo hexavalente presentes en solución. Realizaron ajustes en parámetros como el potencial de hidrógeno y las dimensiones de la materia prima del adsorbente y encontraron que a 3 y 0.425 mm, respectivamente, se logra una adsorción óptima. En el caso del ión Cr (VI), se removieron 66,6 y 93 ppm utilizando cáscara de naranja y plátano respectivamente. Cuando se modificaron las biomásas con quitosano, la remoción fue de 61,24 y 88,2 ppm.

En un artículo publicado por Tejeda, Villabona y Paternina (2015), se desarrolló una investigación titulada "Cinética de adsorción de Cr (VI) utilizando biomásas residuales modificadas químicamente en sistemas por lotes y continuo". Utilizaron bagazo de palma y cáscaras de ñame como biomasa residual, las cuales fueron tratadas con ácido cítrico. El análisis FTIR reveló que los grupos funcionales existentes en los adsorbentes, que más contribuyen en el proceso de remoción, son los carbonilo e hidroxilo. El tratamiento químico mejoró la eficiencia de captación del metal, según la isoterma de Langmuir, de 13 a 3 mg/g para el bagazo de palma, y de 22 a 26 mg/g para las cáscaras de ñame.

Por otro lado, en el estudio llevado a cabo por Tejeda, Villabona y Villadiego (2017), titulado "Remoción de cromo hexavalente sobre residuos de cacao pretratados químicamente", se



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

investigó el proceso de adsorción de cromo (VI) utilizando cáscara de cacao como material bioadsorbente. En este estudio, se realizaron dos tratamientos químicos diferentes utilizando NaOH y HCl. Mediante el uso de técnicas de análisis como la espectroscopía UV-Vis y el reactivo DFC, se determinó que el modelo de Elovich fue el que mejor se ajustó a los datos experimentales.

Además, se observó que la modificación con ácido clorhídrico mejoró la capacidad de adsorción del material. El artículo de Esther Wanja et al., (2016) titulado "Aplicación de semilla de aguacate modificada químicamente para remoción de cobre (II), iones de plomo (II) y cadmio (II) de soluciones acuosas", examinó diversos factores que influyen en el proceso de adsorción, como el tiempo, la dosis, la concentración y el pH. Este estudio utilizó técnicas analíticas como la microscopía electrónica de barrido y la espectrometría infrarroja para evaluar las propiedades de porosidad y las características de los materiales adsorbentes.

A través de estudios cinéticos e isotérmicos por lotes, se determinó que la capacidad de sorción física para los iones de plomo (II), cadmio (II) y cobre (II) fue de 271,2 mg/g, 257,14 mg/g y 102 mg/g, respectivamente. El estudio reveló que la capacidad adsorbente de estos iones en el adsorbente aumenta al disminuir la concentración inicial y al ajustar el pH a 6. Estos resultados sugieren que la semilla de aguacate es un biosorbente ecológico, con eficiencia y de menor costo para la eliminación de iones metálicos en un medio con agua.

En un estudio realizado por Díaz-Muñoz et al., (2016) titulado "Sorción de iones de metales pesados a partir de solución acuosa utilizando semillas de aguacate tratadas con ácido y su caracterización por espectroscopía FTIR", se informó sobre la modificación química superficial de las semillas de aguacate de la especie *Persea americana*. Para llevar a cabo esta modificación, se utilizaron ácidos orgánicos y minerales como ácido sulfúrico, cítrico y tartárico. En el estudio, se investigó la sorción de iones de metales pesados, como Cd^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} y Zn^{2+} , en solución acuosa.

Se emplearon parámetros cinéticos y de equilibrio para estudiar la sorción de estos metales pesados, y se utilizó espectroscopía FTIR para caracterizar las semillas modificadas con ácidos y determinar los grupos funcionales involucrados. Los resultados revelaron que la modificación química de la biomasa con ácidos aumentó significativamente su capacidad de sorción hasta en un 600%. Además, se observó que los ácidos cítrico y sulfúrico fueron los agentes químicos más efectivos para mejorar las propiedades del material adsorbente.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

El presente estudio se justifica debido a su enfoque innovador y su aporte significativo en el campo de la remoción de metales pesados. Mediante el uso de cáscaras de aguacate endémicas de Guatemala como material bioadsorbente, se aprovecha un recurso local abundante y se evita su consideración como residuo. El tratamiento químico de las cáscaras de aguacate para mejorar su capacidad de adsorción de iones metálicos constituye un enfoque novedoso que amplía la investigación a otro componente de la planta. Además, la ausencia de estudios similares tanto a nivel nacional como internacional resalta la originalidad y contribución única de este estudio.

Al abordar un área de investigación poco explorada, se llena un vacío de conocimiento y se proporciona información relevante para la realidad local. Además, este estudio tiene un impacto ambiental positivo al valorizar un residuo orgánico y fomentar prácticas sostenibles. Los resultados de este estudio podrían tener aplicaciones prácticas en la eliminación de metales pesados de fuentes de agua contaminadas en Guatemala y posiblemente en otros lugares, ofreciendo una solución viable y de bajo costo.

4. Planteamiento del problema

El flagelo causado por la contaminación ambiental se enlista como el principal problema a solventar en el siglo XXI. La tasa de contaminación del agua puede ser estimada en 2,000 millones de metros cúbicos diarios. Se hace evidente una crisis de este recurso para los próximos años, lo que podría comprometer el cumplimiento de uno de los objetivos de Desarrollo del Milenio de la Organización de Naciones Unidas (Reyes et al., 2016). Estudios recientes reportan la presencia de metales pesados y metaloides (Singh et al., 2010) tales como mercurio (Hg), arsénico (As), plomo (Pb), cadmio (Cd), zinc (Zn), níquel (Ni) y cromo (Cr) en hortalizas tales como la lechuga, repollo, calabaza, brócoli y papa (Chen et al., 2013). El cromo hexavalente puede ocasionar efectos adversos a corto y a largo plazo, siendo el tracto respiratorio el principal órgano afectado después de la exposición. El cromo hexavalente puede ocasionar cáncer de pulmón, irritación o daños en la piel, ojos, nariz y garganta (López Hernández & Lacayo Romero, 2020).

Por lo que la presente propuesta de investigación busca dar alternativas que ayuden combatir y por ende mermar la contaminación debido al cromo hexavalente (Cr+6) de las aguas superficiales mediante la modificación química de la matriz polimérica por las que está constituido el exocarpio del aguacate (*Persea americana* var. *guatemalensis* Mill), accionado mediante la coordinación del cromo hexavalente.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Según los estudios realizados se ha revelado cómo el Cr ha sido captado de forma alarmante en la Laguna en cuestión. Esto agrava el problema de la eutrofización, porque se muestra que durante el periodo de eutrofización el cromo se ha ido acumulando en los jacintos. Como resultado, las medidas implementadas para combatir la eutrofización resultan en la diseminación del cromo y otros metales traza en el ambiente (Brocard et al., 2016).

La búsqueda de soluciones para el tratamiento de las aguas contaminadas con cromo hexavalente es de suma importancia, para que la calidad de salud y por consiguiente de vida de las personas que se encuentran expuestas a éste tipo de contaminantes, ya sea por la ingesta directa por aguas contaminadas o indirectamente al consumir algunas hortalizas que de igual manera se encuentren contaminadas, se espera que mediante la evaluación de la capacidad de adsorción del exocarpio modificado del aguacate (*Persea americana* var. *guatemalensis* Mill) encontrar una solución a la problemática que tiene un impacto significativo en nuestras fuentes superficiales de agua.

5. Objetivos

5.1. General

Evaluar de la capacidad bioadsorbente del exocarpio de aguacate (*Persea americana* var. *guatemalensis* Mill) modificado químicamente para el tratamiento de aguas contaminadas con cromo hexavalente.

5.2. Específicos

1. Caracterizar fisicoquímicamente el exocarpio de aguacate (*Persea americana* var. *guatemalensis* Mill) antes y después de la modificación química.
2. Determinar la capacidad y porcentaje de adsorción de cromo hexavalente en aguas sintéticas utilizando el exocarpio de aguacate modificado químicamente (*Persea americana* var. *guatemalensis* Mill) considerando los efectos del tamaño de partícula y pH.
3. Determinar la capacidad y porcentaje de adsorción de cromo hexavalente en aguas sintéticas utilizando el exocarpio de aguacate (*Persea americana* var. *guatemalensis* Mill) considerando los efectos del tamaño de partícula y pH.
4. Establecer el modelo cinético que mejor se ajusta a los resultados obtenidos de la adsorción de cromo hexavalente a partir del exocarpio de aguacate y exocarpio de aguacate modificado químicamente en agua sintética.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

6. Hipótesis

- La adsorción de cromo hexavalente por el exocarpio modificado y sin modificar químicamente, está controlado por la reacción química y no por la difusión.
- El exocarpio de aguacate sin tratamiento químico presenta propiedades físicas y químicas que contribuyen a su capacidad de adsorción de cromo hexavalente.
- El tratamiento químico del exocarpio de aguacate mejora sus propiedades físicas y químicas, lo que resulta en un aumento significativo de su capacidad de adsorción de cromo hexavalente.
- A medida que disminuye el pH del medio, la capacidad de adsorción del exocarpio de aguacate para el cromo hexavalente también aumenta.
- Existe un tamaño de partícula óptimo que maximiza la capacidad de adsorción del exocarpio de aguacate para el cromo hexavalente.
- La cinética de adsorción se ajusta a un modelo de pseudo segundo orden.

7. Método

Los procedimientos que se utilizarán en la propuesta de investigación se describen a continuación:

- **Objetivo específico 1:** Se llevará a cabo la caracterización del exocarpio de aguacate (*Persea americana* var. *guatemalensis* Mill) antes y después del tratamiento químico. En primer lugar, se procederá a la preparación del adsorbente y a su caracterización fisicoquímica. También, se determinará la porción de Lignina y se analizarán otros componentes como Celulosa mediante digestión termogravimétrica. Para identificar los grupos reactivos característicos (grupo funcionales) que intervienen en la sorción, se empleará el análisis FTIR en las biomásas previo y posteriormente a la transformación química.
- **Objetivo específico 2:** Se realizará la determinación del potencial y porcentaje de adsorción de Cr^{+6} para aguas preparadas sintéticamente utilizando el exocarpio de aguacate (*Persea americana* var. *guatemalensis* Mill). Se realizarán pruebas en las cuales se variará el pH del medio de adsorción en 2, 3 y 4 unidades, la dimensión de la partícula del adsorbente en tamaños de 2 y 2,38 mm y la relación bioadsorbente/solución de 5 g/100 mL. De acuerdo con el procedimiento descrito por Tejada Tovar et al., (2015), la cinética de adsorción se evaluará con Espectrofotometría UV-Vis.
- **Objetivo específico 3 y 4:** Se procederá a realizar el análisis de la cinética de bioadsorción de Cr^{+6} en un medio acuoso simulado utilizando el exocarpio de aguacate



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

sin modificar y el exocarpo de aguacate modificado químicamente evaluando las modélicas cinéticas de primer orden, el pseudo segundo orden, la modélica de Elovich (F. C. Wu et al., 2009) y la modélica de difusión intraparticular (Liang et al., 2010). Para realizar esta evaluación, se utilizarán como referencias la metodología descrita por Ayalew & Aragaw, (2020), Díaz-Muñoz et al., (2016), Primera-Pedrozo et al., (2011), Tejada et al., (2017) Tejada Tovar et al., (2015) y (Y. Wu et al., 2013).

7.1. Tipo de investigación.

Anote y La investigación realizada en el año 2024 se enmarcó dentro de la categoría de investigación aplicada, según los criterios de Frascati (2015). Se generaron nuevos conocimientos sobre la capacidad bioadsorbente del exocarpio de aguacate (*Persea americana* var. *guatemalensis* Mill) modificado químicamente para la remoción de cromo hexavalente en aguas contaminadas. Sin embargo, estos conocimientos estuvieron orientados a un objetivo práctico: el desarrollo de un material bioadsorbente eficiente que pueda aplicarse en el tratamiento de aguas residuales con presencia de metales pesados.

Además, el estudio también tuvo componentes de investigación experimental, ya que se realizaron ensayos controlados en laboratorio para evaluar la efectividad del material bioadsorbente en distintas condiciones de pH y tamaño de partícula. Se emplearon metodologías analíticas como espectrofotometría UV-Vis y espectroscopía infrarroja (FTIR) para caracterizar la modificación química del exocarpio y su interacción con el cromo hexavalente.

Si bien la investigación no se limitó a la generación de teorías sin aplicabilidad inmediata, tampoco se enfocó en el desarrollo de un producto final para su comercialización. Más bien, sentó las bases para futuras aplicaciones en la remediación de aguas contaminadas, aportando conocimiento válido para el diseño de estrategias de tratamiento ambiental más sostenibles. Por lo tanto, la investigación combinó elementos de investigación aplicada y experimental, contribuyendo al avance científico con miras a una implementación práctica en el tratamiento de contaminantes industriales.

7.2. Enfoque y alcance de la investigación.

La investigación realizada en el 2024 se enmarcó dentro de un enfoque cuantitativo, dado que se basó en la recolección y análisis de datos medibles para evaluar la capacidad bioadsorbente del exocarpio de aguacate (*Persea americana* var. *guatemalensis* Mill) modificado químicamente en la remoción de cromo hexavalente. Se estudió la velocidad de adsorción a través de modelos cinéticos, incluyendo el de primer orden, pseudo segundo orden, Elovich y difusión intraparticular. Además, se caracterizó el exocarpio mediante



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

análisis proximal y espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) para identificar los grupos funcionales implicados en la adsorción del metal.

El alcance de la investigación fue explicativo, ya que se buscó establecer la relación causa-efecto entre las modificaciones químicas del exocarpio y su capacidad de adsorción del cromo hexavalente. Se analizaron diferentes variables, como el pH del medio, el tamaño de partícula del adsorbente y la concentración inicial del metal, con el objetivo de comprender los mecanismos que regulan el proceso de bioadsorción. Los resultados obtenidos permitieron no solo cuantificar la eficiencia del material, sino también explicar los factores que influyen en su desempeño como adsorbente, proporcionando información clave para futuras aplicaciones en el tratamiento de aguas contaminadas.

7.3. Diseño de la investigación.

La investigación desarrollada en 2024 se enmarcó dentro de un enfoque cuantitativo y utilizó un diseño experimental factorial completo para evaluar la capacidad de adsorción del exocarpio de aguacate (*Persea americana* var. *guatemalensis* Mill) modificado químicamente en la remoción de cromo hexavalente en agua sintética. Se seleccionaron tres niveles de pH (2, 3 y 4), dos tamaños de partícula del adsorbente (2 mm y 2,38 mm) y dos tipos de bioadsorbente, generando un total de 84 tratamientos con 7 distintos tiempos de muestreo para la evaluación de la cinética de adsorción para un subtotal de tratamientos de 84, sumando 12 tratamientos correspondiente a la evaluación de la capacidad de adsorción para dos tamaños de partícula, tres niveles de pH y dos tipos de bioadsorbente, para un total de 96 tratamientos.

Para la caracterización del bioadsorbente, se aplicaron análisis fisicoquímicos mediante técnicas avanzadas, como espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) para identificar los grupos funcionales responsables de la adsorción, termogravimetría para evaluar la estabilidad térmica, para determinar la composición del material. Además, se realizaron pruebas de adsorción en fase líquida con espectrofotometría UV-Vis utilizando el reactivo 1,5-difenilcarbazida para cuantificar la concentración remanente de cromo hexavalente en solución.

Desde el punto de vista cinético, se evaluaron distintos modelos de adsorción, incluyendo el de primer orden, pseudo segundo orden, Elovich y difusión intraparticular, con el objetivo de comprender el mecanismo de captura del cromo por el exocarpio modificado. Adicionalmente, se emplearon isothermas de Langmuir y Freundlich para describir la capacidad y el comportamiento de adsorción en equilibrio. Los datos obtenidos fueron



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

sometidos a análisis estadístico mediante software especializado para evaluar la significancia de los factores estudiados.

El diseño experimental permitió manipular las variables independientes y observar su efecto sobre la capacidad de adsorción del cromo hexavalente, permitiendo establecer correlaciones significativas entre el tratamiento químico del exocarpio y su eficiencia como bioadsorbente. Debido a la naturaleza del estudio, no se realizaron observaciones retrospectivas ni estudios longitudinales. La metodología experimental aplicada garantizó la replicabilidad de los ensayos y la obtención de datos confiables para futuras aplicaciones en el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados, aportando evidencia científica sólida sobre la viabilidad de materiales lignocelulósicos modificados como soluciones sostenibles para la remediación de efluentes industriales.

7.4. Población, muestra y muestreo.

La investigación utilizó una muestra seleccionada por conveniencia, dado que la disponibilidad del exocarpio de aguacate (*Persea americana* var. *guatemalensis* Mill) dependía de su obtención a partir de residuos agroindustriales en la región de estudio. La unidad de muestreo consistió en porciones homogéneas de exocarpio de aguacate, las cuales fueron sometidas a procesos de secado, trituración y tamizado para su posterior modificación química y análisis.

Los criterios de inclusión establecieron que el material bioadsorbente debía provenir exclusivamente de la variedad *Persea americana* var. *guatemalensis* Mill, descartando otras variedades para evitar variaciones en la composición química del material adsorbente. Asimismo, se seleccionaron muestras con tamaños de partícula de 2 mm y 2,38 mm para evaluar la influencia del tamaño en la eficiencia de adsorción. Se excluyeron materiales con signos visibles de degradación física o contaminación externa que pudieran alterar los resultados experimentales.

El muestreo se justificó en base a la disponibilidad del material y su aplicabilidad en estudios de adsorción. Para garantizar la validez de los resultados, cada tratamiento experimental incluyó tres réplicas, asegurando la repetibilidad y reduciendo la variabilidad de los datos obtenidos. Además, se realizaron pruebas previas de homogeneización de las muestras para minimizar diferencias entre lotes.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

En cuanto al análisis estadístico, se aplicaron herramientas de inferencia para evaluar la significancia de los factores de estudio. Se emplearon análisis de varianza (ANOVA) para determinar el efecto del pH y del tamaño de partícula en la capacidad de adsorción, y pruebas de comparación de medias para identificar diferencias significativas entre tratamientos. Estos métodos permitieron evaluar la confiabilidad de los resultados obtenidos y su aplicabilidad en futuras investigaciones relacionadas con la remediación de aguas contaminadas con metales pesados.

7.5. Técnicas

- Preparación del adsorbente

Se realizarán cuatro lavados con agua destilada al exocarpo de aguacate (*Persea americana* var. *guatemalensis* Mill) con el fin de eliminar las impurezas presentes. A continuación, el material será secado en el horno convectivo a temperaturas entre los 50 y 60 °C hasta alcanzar un peso constante, para posteriormente llevar a cabo la disminución y categorización de tamaño. Con un molino eléctrico, se someterán a un tamizado de 10 minutos para seleccionar las siguientes medidas de partícula: 2 mm y 2,38 mm (Lucia Pinzón-Bedoya et al., 2009; Tejada Tovar, Villabona, et al., 2015)

- Modificación Química

La biomasa se somete a un proceso químico utilizando ácido cítrico a una concentración de 0,60 M, en una proporción de 35 g de biomasa por 250 mL de ácido. Durante este proceso, se agita a 200 rpm a una temperatura constante de 60 °C durante un período de 2 horas. Después de este período de contacto, el material bioadsorbente se filtra y se lava con agua libre de iones para eliminar el exceso de acidez, y luego se seca a 60 Celsius hasta alcanzar un peso constante (Altun & Pehlivan, 2012).

- Caracterización del adsorbente

La caracterización del adsorbente se realizará a través de diferentes métodos oficiales de análisis. Se determinará la proporción de cenizas por medio de termogravimetría; la lignina a través de fotolorimetría; la celulosa y hemicelulosa por medio de digestión y



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

termogravimetría. Adicionalmente, la identificación de los grupos reactivos característicos que intervienen en el proceso adsorptivo de metales pesados se realizará por la metodología FTIR en el exocarpo antes y después del tratamiento químico (Tejada Tovar et al., 2015); (Severiche Sierra & González García, 2013).

- Preparación del agua sintética

La solución de referencia se crea utilizando 25 miligramos de dicromato de potasio, el cual se disuelve en agua desmineralizada hasta alcanzar el volumen adecuado en un matraz de cincuenta mililitros. Posterior a esto, se debe tomar una alícuota de veinte mililitros de disolución de referencia y se diluye en 100 cm³ de agua desmineralizada para la obtención de una concentración de 100 mg/l de cromo hexavalente (Tejada Tovar, Quiñones Bolaños, et al., 2015).

- Elaboración de la representación gráfica de calibración

Una disolución de referencia se preparó utilizando una porción de 0,6 ml (estándar), la cual se diluyó en un medio acuoso hasta alcanzar el volumen deseado de 50 cm³, obteniendo así 6 mg/l de cromo (VI). En una solución 1,5-DFC, se pesaron 65 miligramos, y se disolvieron en doce mililitros de C₃H₆O, transfiriéndolo a un frasco ámbar. Para la elaboración de la representación gráfica de calibración, se utilizaron cantidades volumétricas cada vez mayores de la disolución de referencia y se completó a capacidad con H₂O desmineralizada en matraces de veinticinco mililitros, obteniendo así diluciones que oscilaron en un rango 0,1 mg/l y 1 mg/l, añadiendo una porción determinada de H₂SO₄ para lograr un pH de 2, 3 y 4, se agregaron 0,5 mililitros de la solución de 1,5-DFC, se dispuso a agitación durante aproximadamente 60 segundos y se dispuso a reposo durante 7 min.

Se efectuó la lectura de la solución “blanco” en un espectrofotómetro UV-VIS a λ de 540 nanómetros, midiendo la intensidad de absorción de las soluciones a diversas concentraciones. Se preparó la solución “blanco” utilizando 0,5 ml de la solución de 1,5-DFC, utilizando una porción igual de H₂SO₄ el cual se utilizó en las muestras y agua desmineralizada, aforándolo a un volumen de veinticinco mililitros. Inmediatamente registrados los valores de la intensidad de absorción de las diversas muestras, trazando un gráfico de concentración versus absorbancia, se realizó una regresión lineal y se obtuvo el modelo matemático correspondiente.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

- Determinación de la capacidad y porcentaje de adsorción

Se obtiene una muestra de 20 cm³ de la disolución de referencia y se diluye en cien cm³ de H₂O desmineralizada para lograr una concentración de cien miligramos/litro de Cromo (VI). A continuación, se añade ácido sulfúrico para adecuar los valores de pH a 2, 3 y 4. Luego, se agregan 5 g del material de absorción biológico en dos tamaños de partículas: 2 mm y 2,38 mm. Después de eso, la muestra se somete a agitación mecánica a 300 rev/min durante un período de 90 minutos.

Una vez que se completa el proceso de agitación, se procede a filtrar la muestra. Se toma una porción de 0,2 mililitros del filtrado colocándolo en un matraz, el cual se completa hasta un volumen de 25 mililitros mediante un proceso de aforo.

Se ajusta el pH mediante la adición de H₂SO₄ y luego se adiciona 0,5 mililitros de una disolución de 1,5-DFC. Después, agitando constantemente a 300 rev/min durante 1 min y se dispone a reposo por 7 min antes de llevar a cabo la medición de la absorbancia. Esta medición se realiza haciendo uso de un espectrofotómetro UV-VIS a una λ de 540 nanómetros (Balasubramanian & Pugalenth, 1999a); (Aranda-García & Cristiani-Urbina, 2020; Jiang et al., 2022) (Aranda-García & Cristiani-Urbina, 2020).

La porción de Cr adsorbida por la biomasa (milimoles/gramo) se cuantificó mediante la siguiente ecuación matemática:

$$q = \frac{C_i V_i - C V}{m} \quad (1)$$

De la cual, C_i: Conc. Inicial de Cromo (VI) en mg/l; C: Conc. Final de Cromo (VI) en mg/l; q (mg/g) es la porción del material adsorbido, m es la masa de bioadsorbente (g), V_o, V_f (L) son las concentraciones y volúmenes inicial y final respectivamente.

El porcentaje de adsorción se determina con la siguiente expresión matemática:

$$\% Ads = \frac{C_o - C_f}{C_o} * 100 \quad (2)$$

Donde C_o es la concentración inicial de Cromo (VI) (mg/l) y la C_f la concentración final de Cromo (VI) (mg/l)

- Modelos Cinéticos



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Se prepara una disolución utilizando 20 ml de una disolución patrón que contendrá 100 mg/L, la cual se diluirá en 100 mililitros de agua desmineralizada con un potencial de hidrógeno de (2-3-4). Además, se añadirán 5 g/100 mL de bioadsorbente con partículas de tamaño en los rangos establecidos y se realizará una agitación mecánica a 300 rpm. Estas serán los valores tomados con las mejores condiciones de experimentación para el exocarpo de aguacate.

Se toman partes proporcionales de 10 ml de la muestra cada 20 min por un tiempo de 140 min. Posteriormente, se filtran y se extraen 0,2 mililitros de la fase líquida en un matraz a capacidad de 25 mililitros, completando el volumen con H₂O desmineralizada. El pH de la disolución se regulará mediante la adición de H₂SO₄. Luego, se agregará 0,5 ml de la disolución 1,5-DFC, y se agitará a 300 revoluciones por minuto en el transcurso de 1 min. Después de disponer en reposo durante 7 min, se medirá la absorbancia en la unidad correspondiente.

Modelo de primer Orden con reversibilidad

El modelo matemático correspondiente a la cinética de primer orden con reversibilidad se sustenta en el supuesto de que a cada ión metálico se le da un espacio de adsorción del material adsorbente, (Lucia Pinzón-Bedoya et al., 2009) lo cual se expresa de la siguiente forma en el marco de la velocidad de reacción:

$$q_t = q_e * (1 + e^{-k*t}) \quad (3)$$

Donde q_t (milimoles/gramo) es la porción adsorbida en un período t , q_e (milimoles/gramo) es la porción adsorbida en el equilibrio y k (1/min) es la constante cinética de primer orden.

Modelo de Pseudo Segundo Orden

El método sugerido por Ho et al., (2001), propone que el material en cuestión se adsorbe en dos puntos activos del adsorbente. La expresión de la velocidad de la cinética de adsorción es:

$$q_t = \frac{t}{\frac{1}{k_2 * q_e^2} + \frac{t}{q_e}} \quad (4)$$



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Donde k_2 es la constante cinética de Pseudo segundo orden (gramos/milimoles-minuto) y $h=k_2*q_{e2}$ siendo h (milimoles/gramo.minuto) la velocidad inicial de adsorción.

Modélica de Elovich

Este modelo, de uso frecuente en procesos de adsorción química, propone el supuesto de que los puntos activos del bioadsorbente son heterogéneos (Cheung et al., 2001) y por ello muestran distintas energías de activación, fundamentándose en un mecanismo de reacción de segundo orden para una fase de reacción heterogénea.

La ecuación matemática que describe el comportamiento de este modelo es:

$$q_t = \frac{1}{\beta} * \ln(\alpha * \beta) + \frac{1}{\beta} * \ln t \quad (5)$$

Donde α (milimoles·gramo⁻¹·min⁻¹) es la velocidad inicial de adsorción y β está relacionado con la superficie cubierta y la energía de activación por adsorción química (milimoles·gramo⁻¹).

Modelo de Difusión Intraparticular

La hipótesis sobre el mecanismo de difusión intraparticular en la parte interna del material adsorbente por medio de los poros de la partícula, se sustenta en el transporte de soluto a través de la estructura interna de los poros y la difusión propiamente dicha en el sólido, lo que implica que el adsorbente disponga de una estructura porosa homogénea.

La ecuación matemática que describe el comportamiento de este modelo es:

$$q_t = k * \sqrt{t} \quad (8)$$

Donde k (milimoles·gramo⁻¹·min^{-1/2}) es la constante de velocidad de difusión intraparticular

- Isotermas de Adsorción

Para generar las isotermas de adsorción se preparan las concentraciones (25, 50, 75 y 100 miligramos/litro) utilizando las proporciones de referencia. Estas soluciones se preparan siguiendo condiciones específicas, como un pH de (2-3-4), una concentración de 5 g/100mL de bioadsorbente y un tamaño de partícula conforme a las especificaciones



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

establecidas. Durante un lapso de 2 horas, se lleva a cabo una agitación mecánica a 300 rpm.

Después de cada preparación, se procede a filtrar cada muestra y se toman 0,2 mL del líquido resultante para preparar una solución en veinticinco mililitros de agua desmineralizada. Se agrega H_2SO_4 para que el potencial de hidrógeno se mantenga constante y se añaden 0,5 mililitros de la disolución de 1,5-DFC. La mezcla se agita mecánicamente a 300 revoluciones por minuto durante 1 min y se dispone a reposo durante 7 min. A continuación, se mide la absorbancia utilizando una unidad especializada.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

7.6. Resumen de las variables o unidades de análisis

Tabla 1

Objetivos, variable, instrumentos y unidad de medida o cualificación utilizada en la investigación.

Objetivo específico	Variable	Instrumentos	Unidad de medida o cualificación
Caracterizar fisicoquímicamente el exocarpio de aguacate (<i>Persea americana</i> var. <i>guatemalensis</i> Mill) antes y después de la modificación química.	Composición química y estructura del material	Espectrofotómetro FTIR (PerkinElmer Spectrum Two), Termogravimetría (TA Instruments Q50),	Contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa, identificación de grupos funcionales.
Determinar la capacidad y porcentaje de adsorción de Cr(VI) en agua sintética utilizando el exocarpio de aguacate modificado químicamente, considerando los efectos del tamaño de partícula y pH.	Capacidad de adsorción y porcentaje de remoción	Espectrofotómetro UV-Vis (Thermo Scientific Genesys 10S)	Capacidad de adsorción en mg/g, porcentaje de remoción (%).
Determinar la capacidad y porcentaje de adsorción de Cr(VI) en agua sintética utilizando el exocarpio de aguacate sin modificar, considerando los efectos del tamaño de partícula y pH.	Capacidad de adsorción y porcentaje de remoción	Espectrofotómetro UV-Vis (Thermo Scientific Genesys 10S)	Capacidad de adsorción en mg/g, porcentaje de remoción (%).
Establecer el modelo cinético que se adapte adecuadamente a los resultados obtenidos de la adsorción de cromo hexavalente.	Comportamiento adsorptivo del material	Modelos cinéticos de Pseudo-Primer Orden, Pseudo-Segundo Orden, Elovich, Difusión Intraparticular, Isotermas de Langmuir y Freundlich	Parámetros cinéticos ajustados a los modelos teóricos.

Nota. Elaboración propia 2025.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

7.7. Procesamiento y análisis de la información.

Se proyectará un diseño multiplicativo de $(2 \times 3 \times 2 \times 7)$, que consiste en 2 tipos de bioadsorbente, 3 pH, 2 tamaños de partícula y 7 distintos tiempos de toma de muestra para la evaluación de la cinética de adsorción, sumando un diseño de $(2 \times 2 \times 3)$ correspondiente a 2 tipos de bioadsorbente, 3 pH y 2 tamaños de partícula para la evaluación de la capacidad de adsorción, para un total de 96 tratamientos.

Tabla 2

Tratamientos que realizar para la evaluación de la capacidad de adsorción.

h/TP	EACM			EASM		
	h1	h2	h3	h1	h2	h3
TP1	h1TP1	h2TP1	h3TP1	h1TP1	h2TP1	h3TP1
	h1TP1	h2TP1	h3TP1	h1TP1	h2TP1	h3TP1
	h1TP1	h2TP1	h3TP1	h1TP1	h2TP1	h3TP1
TP2	h1TP2	h2TP2	h3TP2	h1TP2	h2TP2	h3TP2
	h1TP2	h2TP2	h3TP2	h1TP2	h2TP2	h3TP2
	h1TP2	h2TP2	h3TP2	h1TP2	h2TP2	h3TP2

Nota. EASM= Exocarpo de aguacate sin modificación, EACM= Exocarpo de aguacate con modificación, TP=Tamaño de partícula, h=pH.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 3

Tratamientos que realizar para la evaluación de la capacidad de adsorción.

		EACM							EASM						
h		t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7
/t															
T P1	h	TP1t													
	1	1h1	2h1	3h1	4h1	5h1	6h1	7h1	1h1	2h1	3h1	4h1	5h1	6h1	7h1
	h	TP1t													
	2	1h2	2h2	3h2	4h2	5h2	6h2	7h2	1h2	2h2	3h2	4h2	5h2	6h2	7h2
	h	TP1t													
	3	1h3	2h3	3h3	4h3	5h3	6h3	7h3	1h3	2h3	3h3	4h3	5h3	6h3	7h3
T P2	h	TP2t													
	1	1h1	2h1	3h1	4h1	5h1	6h1	7h1	1h1	2h1	3h1	4h1	5h1	6h1	7h1
	h	TP2t													
	2	1h2	2h2	3h2	4h2	5h2	6h2	7h2	1h2	2h2	3h2	4h2	5h2	6h2	7h2
	h	TP2t													
	3	1h3	2h3	3h3	4h3	4h3	6h3	7h3	1h3	2h3	3h3	4h3	4h3	6h3	7h3

Nota. EASM= Exocarpo de aguacate sin modificación, EACM= Exocarpo de aguacate con modificación, TP=Tamaño de partícula, h=pH, t=tiempo

8. Aspectos éticos y legales

No aplica

9. Resultados y discusión

Tabla 4

Determinación de la humedad contenida en el exocarpio de aguacate correspondiente al segundo lote de material recolectado en la empresa Gordian

Corrida	Masa (g)	Humedad (%)	Desviación (%)
1	1.011	81.490	
2	1.005	80.350	
3	1.010	79.110	± 1.190
Promedio		80.320	

Nota. Elaboración propia 2025.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 5

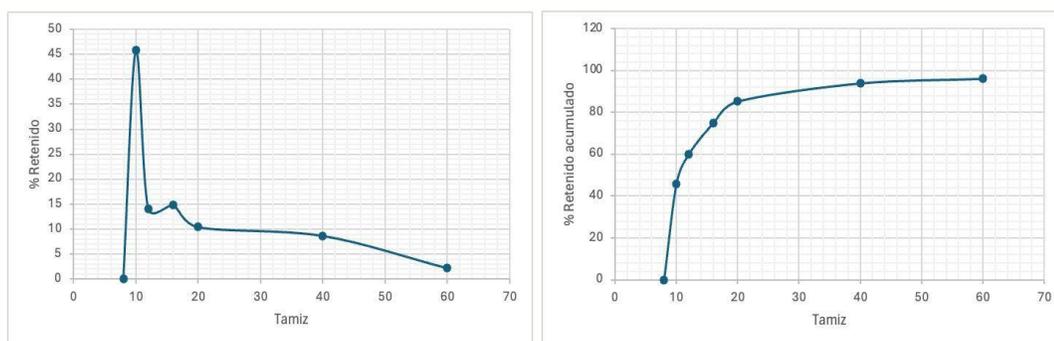
Determinación de la humedad contenida en el exocarpio de aguacate deshidratado

Corrida	Masa (g)	Humedad (%)	Desviación (%)
1	1.021	6.170	
2	1.011	6.610	
3	1.010	5.750	± 0.430
Promedio		6.180	

Nota. Elaboración propia 2025.

Figura 2.

Análisis granulométrico realizado al material obtenido del proceso de reducción de partícula mediante una licuadora industrial



Nota. Elaboración propia 2025.

Tabla 6

Determinación de la humedad contenida en el exocarpio de aguacate correspondiente al segundo lote de material recolectado en la empresa Gordian

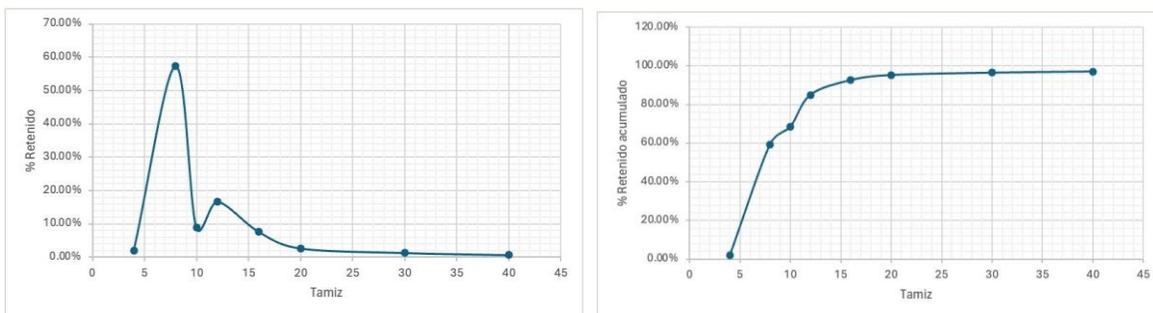
Corrida	Masa (g)	Humedad (%)	Desviación (%)
1	1.001	82.600	
2	1.003	83.300	
3	1.000	81.970	± 0.665
Promedio		82.620	

Nota. Elaboración propia 2025.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 3.

Análisis granulométrico realizado al material obtenido del proceso de reducción de partícula mediante una licuadora industrial correspondiente al segundo lote de cáscara de aguacate recolectado en la empresa Gordian



Nota. Elaboración propia 2025.

Tabla 7

Contenido promedio de extraíbles en el exocarpio de aguacate

Secado No.	Contenido de extraíbles (%)	Contenido promedio de extraíbles (%)	Desviación (%)
1	13.96	15.10	1.61
2	16.24		

Nota. Elaboración propia 2025.

Tabla 8

Contenido promedio de Lignina en el exocarpio de aguacate

Secado No.	Contenido de lignina (%)	Contenido promedio de lignina (%)	Desviación (%)
1	43.80	42.13	1.47
2	41.60		
3	41.00		

Nota. Elaboración propia 2025.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 9

Contenido promedio de extraíbles en el exocarpio de aguacate, segunda corrida

Secado No.	Contenido de extraíbles (%)	Contenido promedio de extraíbles (%)	Desviación (%)
1	15.61	15.38	±0.23
2	15.15		

Nota. Elaboración propia 2025.

Tabla 10

Contenido promedio de Lignina en el exocarpio de aguacate, segunda corrida

Secado No.	Contenido de lignina (%)	Contenido promedio de lignina (%)	Desviación (%)
1	42.8	43.35	± 0.778
2	43.9		

Nota. Elaboración propia 2025.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 11

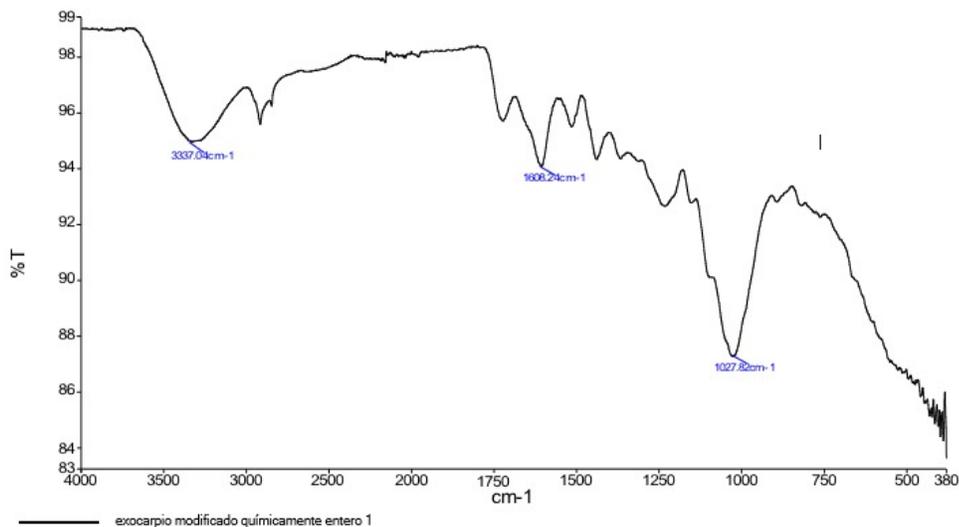
Contenido promedio de extraíbles en el exocarpio de aguacate, tercera corrida

Secado No.	Contenido de extraíbles (%)	Contenido promedio de extraíbles (%)	Desviación (%)
1	17.43		
2	17.76	17.98	0.92
3	18.73		

Nota. Elaboración propia 2025.

Figura 4.

Análisis de Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) del exocarpio de aguacate modificado químicamente

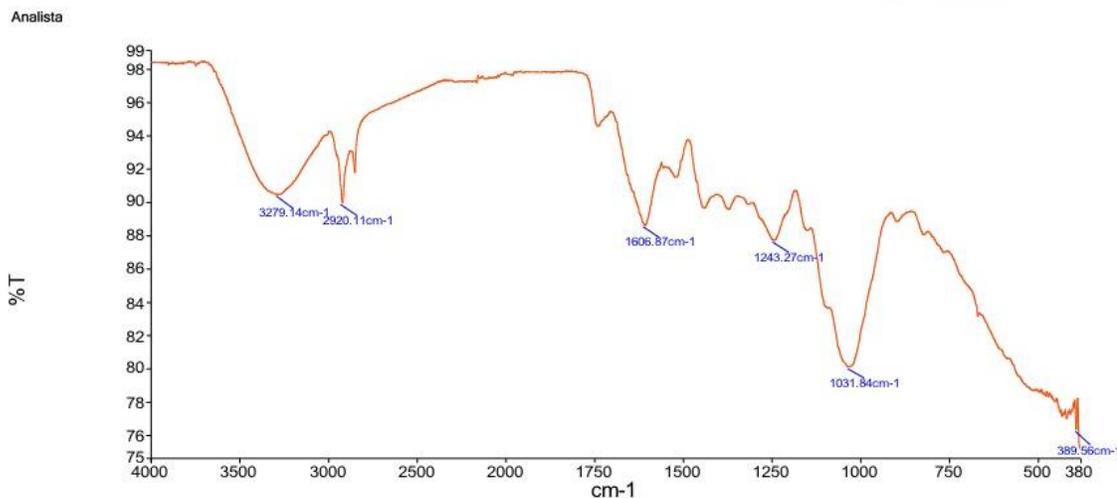


Nota. Laboratorio de Instrumentación Química Avanzada de la Universidad del Valle de Guatemala.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 5.

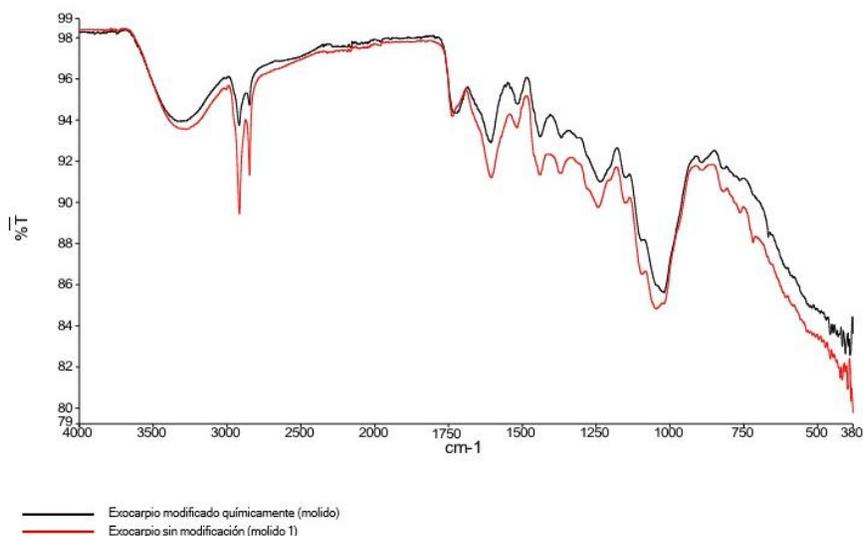
Análisis de Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) del exocarpo de aguacate sin modificación química



Nota. Laboratorio de Instrumentación Química Avanzada de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 6.

Análisis de Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) del exocarpo de aguacate químicamente modificado y sin modificación sobrepuesto



Nota. Laboratorio de Instrumentación Química Avanzada de la Universidad del Valle de Guatemala.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 12

Contenido promedio de lignina en el exocarpio de aguacate

Secado No.	Contenido de lignina (%)	Contenido promedio de lignina (%)	Desviación estándar (%)
1	37.300		
2	39.300	38.267	1.002
3	38.200		

Nota. Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales. Elaboración propia.

Tabla 13

Contenido promedio de celulosa en el exocarpio de aguacate

Secado No.	Contenido de celulosa (%)	Contenido promedio de celulosa (%)	Desviación estándar (%)
1	25.832		
2	25.515	25.645	0.166
3	25.589		

Nota. Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales. Elaboración propia (2024).

Tabla 14

Porcentaje de ceniza de exocarpio de aguacate

Corrida	MESH	Ceniza (g)	Porcentaje de ceniza (%)
1	40	0.033	3.300
2	40	0.035	3.500
3	40	0.037	3.700
4	40	0.038	3.800

Nota. Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales. Elaboración propia (2024).

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 15

Determinación de la humedad contenida en el exocarpio de aguacate impregnado y secado

Corrida	Masa (g)	Humedad (%)	Desviación (%)
1	1.005	2.720	
2	1.009	2.090	
3	1.006	1.690	± 0.519
Promedio		2.170	

Nota. Elaboración propia.

Tabla 16

Determinación de la humedad contenida en el exocarpio de aguacate antes de ser sometido al proceso de deshidratación

Corrida	Masa (g)	Humedad (%)	Desviación (%)
1	1.025	62.08	
2	0.738	65.90	
3	0.745	66.01	± 2.24
Promedio		64.66	

Nota. Elaboración propia.

Tabla 17

Determinación de la humedad contenida en el exocarpio de aguacate tamiz No. 8 impregnado variando temperaturas en el proceso de deshidratación

Corrida	Tamiz No.	Tiempo de secado (min)	Temperatura (°C)	Humedad (%)
1	8	0	0	79.84
2	8	45	60	74.56
3	8	90	40	64.35
4	8	120	40	23.53
5	8	105	20	4.95

Nota. Elaboración propia.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 18

Determinación de la humedad contenida en el exocarpio de aguacate tamiz No. 10 impregnado variando temperaturas en el proceso de deshidratación

Corrida	Tamiz No.	Tiempo de secado (min)	Temperatura (°C)	Humedad (%)
1	10	0	0	81.31
2	10	45	60	78.33
3	10	90	40	39.59
4	10	120	40	14.43
5	10	105	20	7.20

Nota. Elaboración propia.

Tabla 19

Cuantificación de cromo hexavalente (Cr+6) a partir de fotometría para capacidad de adsorción de exocarpio de aguacate modificado químicamente

Modificación	MESH	pH	[Cr ⁺⁶] (mg/L)
Química	8	4	0.10
		3	0.10
		2	0.00
	10	4	0.10
		3	0.00
		2	0.00

Nota. Elaboración propia.

Tabla 20

Capacidad de adsorción de exocarpio de aguacate modificado químicamente para la remoción de cromo hexavalente (Cr+6)

Modificación	MESH	pH	[Cr ⁺⁶] _o (mg/L)	[Cr ⁺⁶] _f (mg/L)	% Ads
Química	8	4	33.00	0.10	99.70
		3	33.00	0.10	99.70
		2	33.00	0.00	100.00
	10	4	33.00	0.10	99.70
		3	33.00	0.10	99.70
		2	33.00	0.00	100.00

Nota. Elaboración propia.



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

DC Dirección General
de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 21

Cuantificación de cromo hexavalente (Cr+6) a partir de fotometría para capacidad de adsorción de exocarpio de aguacate

Modificación	MESH	pH	[Cr ⁺⁶] (mg/L)
Física	8	4	0.10
		3	0.00
		2	0.00
	10	4	0.10
		3	0.10
		2	0.00

Nota. Elaboración propia. Laboratorio de análisis fisicoquímico -LAFIQ-.

Tabla 22

Capacidad de adsorción de exocarpio de aguacate para la remoción de cromo hexavalente (Cr+6)

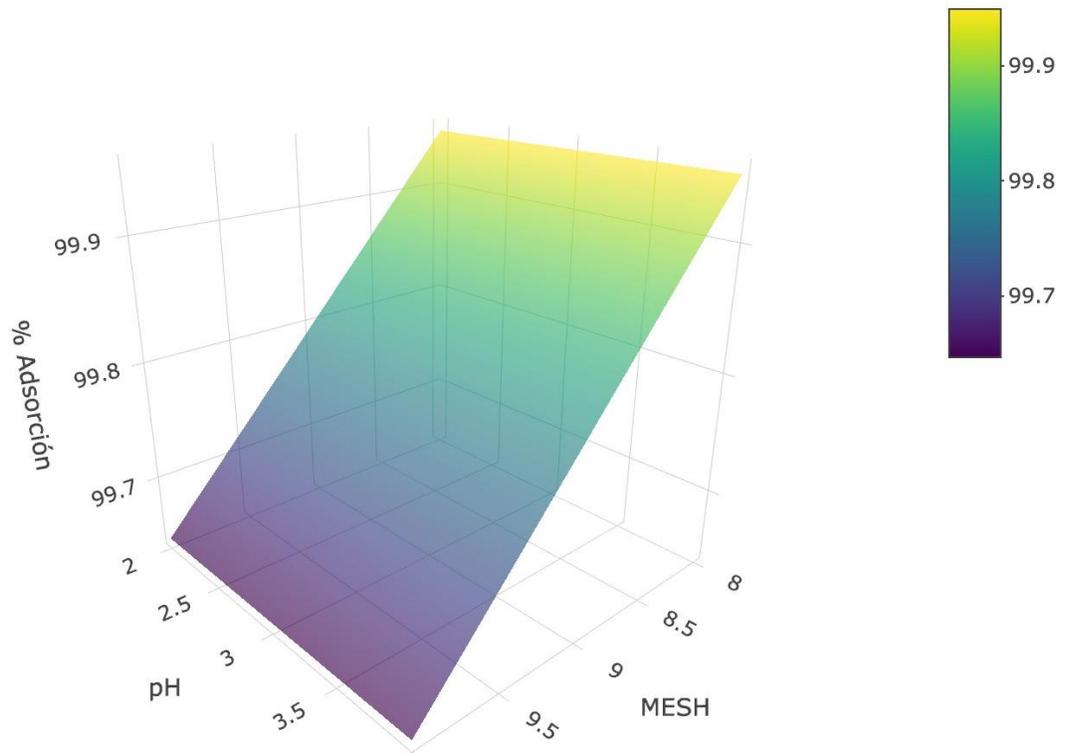
Modificación	MESH	pH	[Cr ⁺⁶] _o (mg/L)	[Cr ⁺⁶] _f (mg/L)	% Ads
Física	8	4	33.00	0.10	99.70
		3	33.00	0.00	100.00
		2	33.00	0.00	100.00
	10	4	33.00	0.10	99.70
		3	33.00	0.10	99.70
		2	33.00	0.00	100.00

Nota. Elaboración propia.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 7.

Capacidad de adsorción de exocarpio de aguacate para la remoción de cromo hexavalente (Cr+6) en función del tamaño de partícula y pH del medio

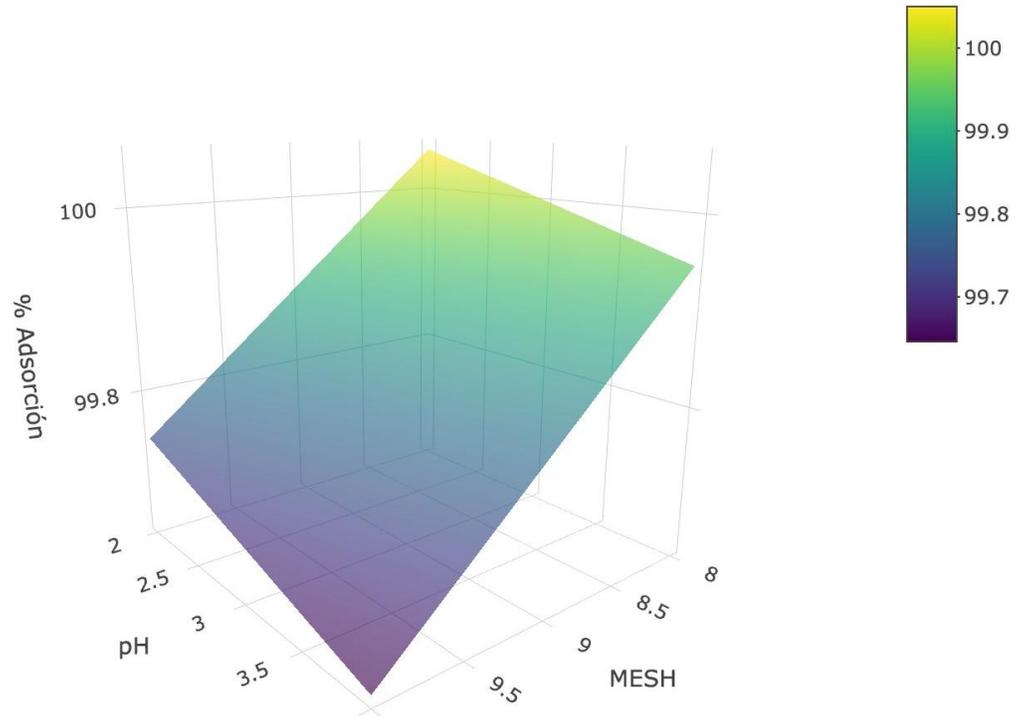


Nota. Elaboración propia.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 8.

Capacidad de adsorción de exocarpio de aguacate modificado químicamente para la remoción de cromo hexavalente (Cr+6) en función del tamaño de partícula y pH del medio



Nota. Elaboración propia.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 23

Cuantificación de cromo hexavalente (Cr+6) a partir de fotometría para cinética de adsorción de exocarpio de aguacate modificado químicamente

Modificación	MESH	pH	Tiempo (min)	[Cr ⁺⁶] (mg/L)	
Química	2	2	0	33.00	
			20	0.20	
			40	0.15	
			60	0.12	
			80	0.11	
			100	0.01	
			120	0.01	
			140	0.00	
	8	3	3	0	33.00
				20	0.36
				40	0.36
				60	0.29
				80	0.22
				100	0.17
				120	0.09
				140	0.06
	8	4	4	0	33.00
				20	0.26
				40	0.20
				60	0.15
				80	0.12
				100	0.08
				120	0.07
				140	0.06



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Continuación Tabla 32

Modificación	MESH	pH	Tiempo (min)	[Cr ⁺⁶] (mg/L)	
Química	2	2	0	33.00	
			20	0.07	
			40	0.03	
			60	0.02	
			80	0.02	
			100	0.01	
			120	0.01	
			140	0.01	
			3	10	3
	20	0.10			
	40	0.08			
	60	0.02			
	80	0.01			
	100	0.01			
	120	0.00			
	140	0.00			
	4	10			
			20	0.15	
			40	0.13	
			60	0.06	
			80	0.02	
			100	0.02	
	120	0.01			
	140	0.00			

Nota. Elaboración propia. Laboratorio de análisis fisicoquímico -LAFIQ-.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 24

Cuantificación de cromo hexavalente (Cr^{+6}) a partir de fotometría para cinética de adsorción de exocarpio de aguacate

Modificación	MESH	pH	Tiempo (min)	[Cr^{+6}] (mg/L)
			0	33.00
			20	0.10
			40	0.08
		2	60	0.10
			80	0.05
			100	0.08
			120	0.05
			140	0.02
			0	33.00
			20	0.11
			40	0.10
Física	8	3	60	0.05
			80	0.03
			100	0.02
			120	0.02
			140	0.01
			0	33.00
			20	0.17
			40	0.21
		4	60	0.15
			80	0.12
			100	0.10
			120	0.08
			140	0.06

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Continuación Tabla 33

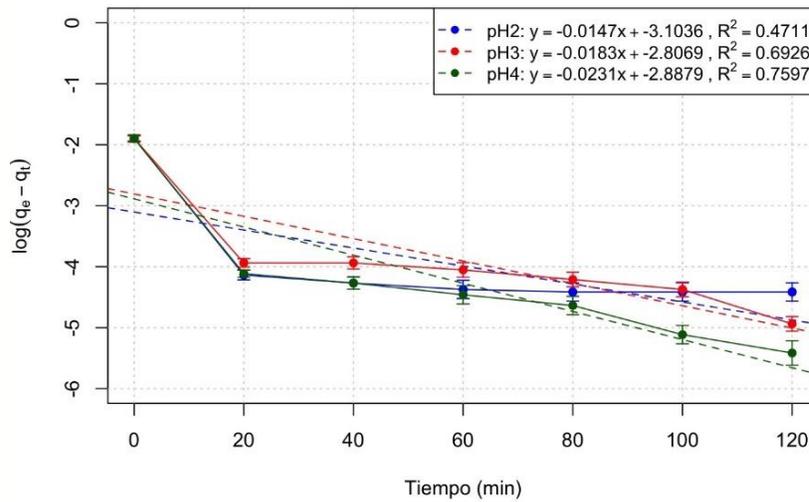
Modificación	MESH	pH	Tiempo (min)	[Cr ⁺⁶] (mg/L)
			0	33.00
			20	0.07
			40	0.15
		2	60	0.05
			80	0.08
			100	0.02
			120	0.01
			140	0.01
			0	33.00
			20	0.08
			40	0.03
Física	10	3	60	0.06
			80	0.06
			100	0.04
			120	0.07
			140	0.03
			0	33.00
			20	0.20
			40	0.20
		4	60	0.20
			80	0.10
			100	0.00
			120	0.10
			140	0.10

Nota. Elaboración propia. Laboratorio de análisis fisicoquímico -LAFIQ-.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 9.

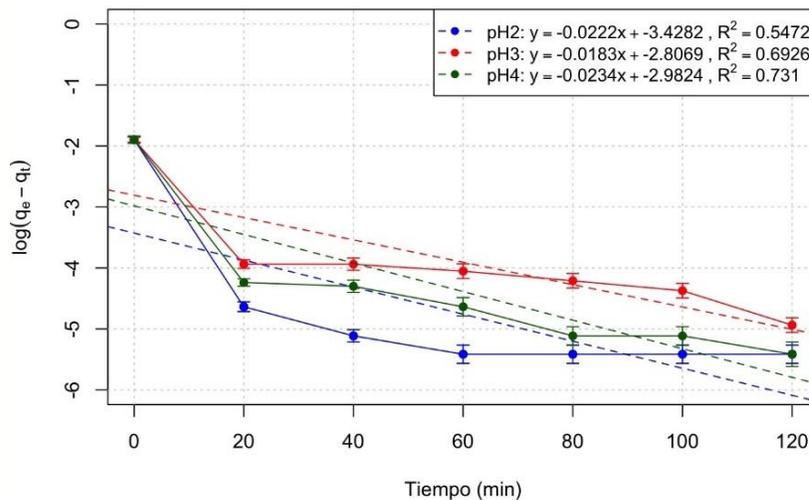
Cinética de primer orden reversible evaluando tamaño de partícula tamiz No.8 con tratamiento químico



Nota. Elaboración propia.

Figura 10.

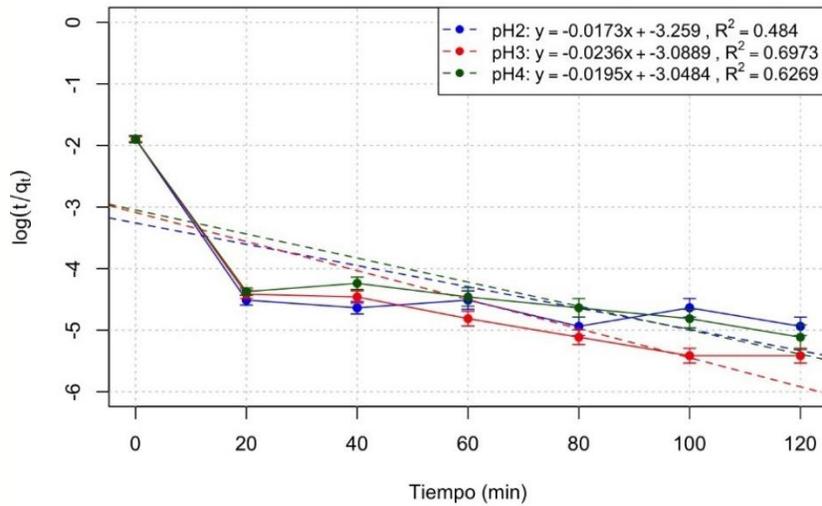
Cinética de primer orden reversible evaluando tamaño de partícula tamiz No.10 con tratamiento químico



Nota. Elaboración propia.

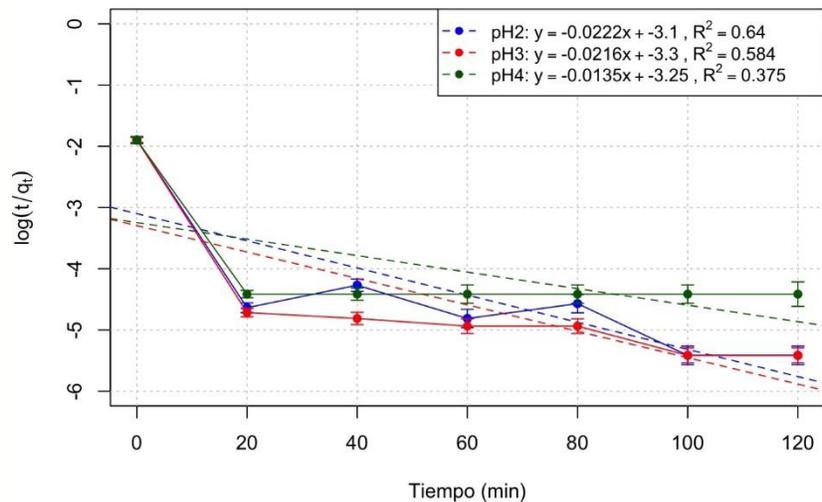
Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 11. Cinética de primer orden reversible evaluando tamaño de partícula tamiz No.8 con tratamiento físico



Nota. Elaboración propia

Figura 12. Cinética de primer orden reversible evaluando tamaño de partícula tamiz No.10 con tratamiento físico

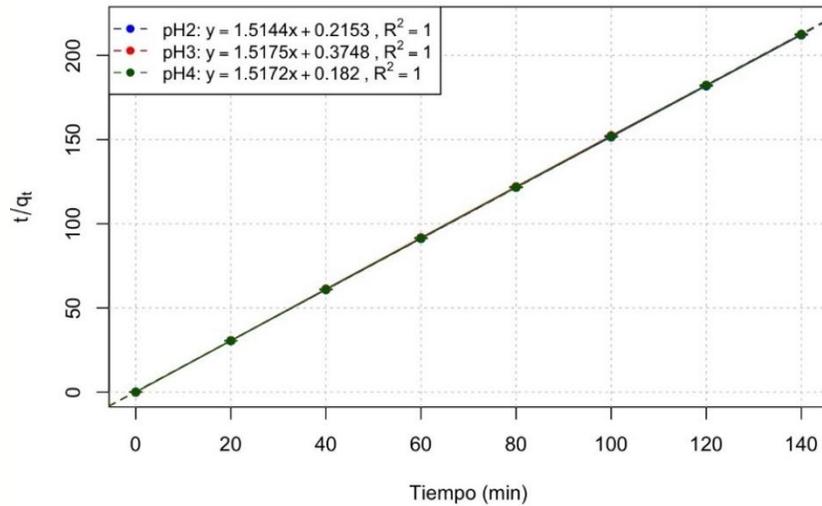


Nota. Elaboración propia

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 13.

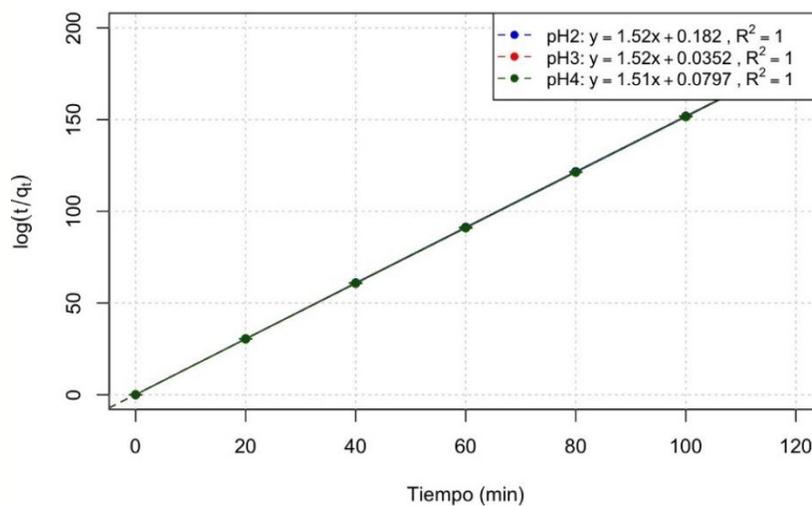
Cinética de pseudo-segundo orden evaluando tamaño de partícula tamiz No.8 con tratamiento químico



Nota. Elaboración propia.

Figura 14.

Cinética de pseudo-segundo orden evaluando tamaño de partícula tamiz 10 con tratamiento químico

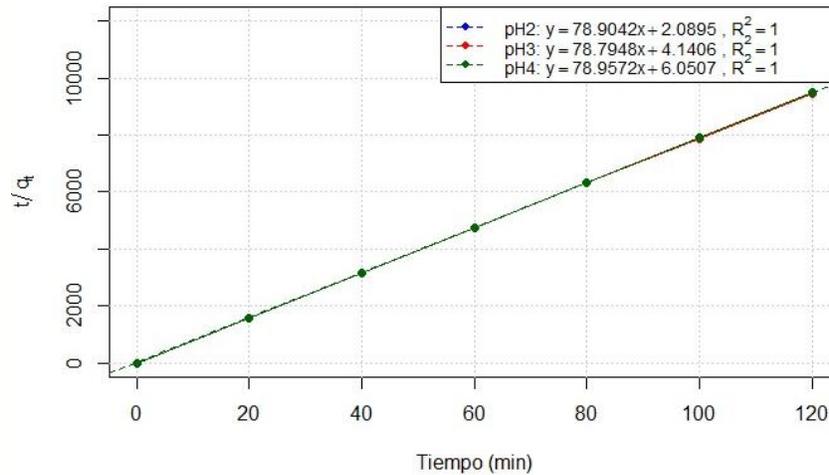


Nota. Elaboración propia.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 15.

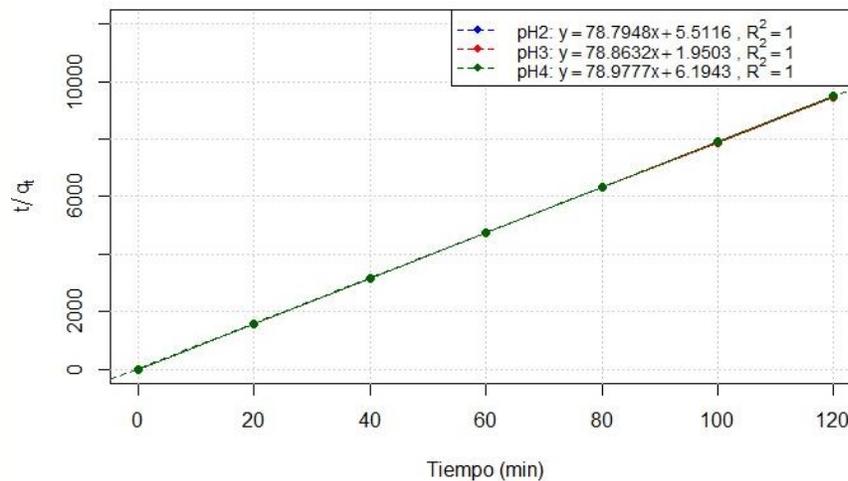
Cinética pseudo-segundo orden evaluando tamaño de partícula tamiz 8 con tratamiento físico



Nota. Elaboración propia.

Figura 16.

Cinética pseudo-segundo orden evaluando tamaño de partícula tamiz 10 con tratamiento físico

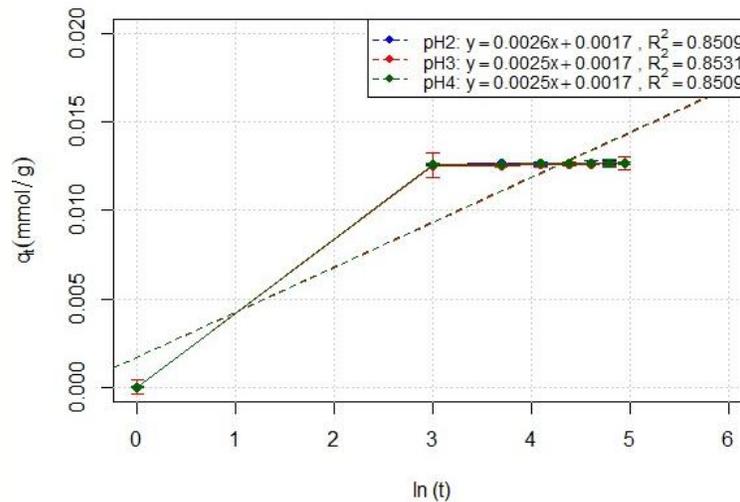


Nota. Elaboración propia.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 17.

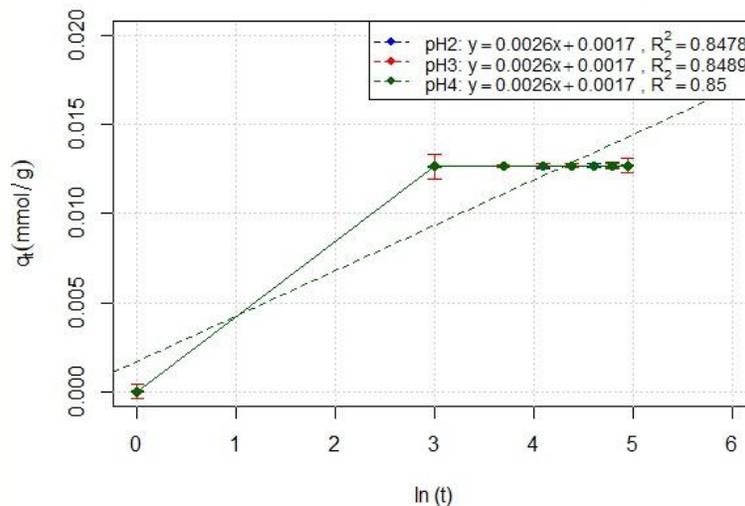
Modélica de Elovich evaluando un tamaño de partícula tamiz 8 con tratamiento químico



Nota. Elaboración propia.

Figura 18.

Modélica de Elovich evaluando un tamaño de partícula tamiz 10 con tratamiento químico

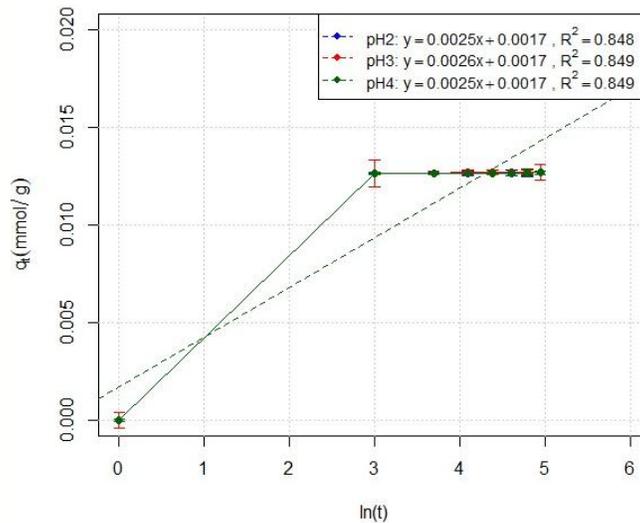


Nota. Elaboración propia

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 19.

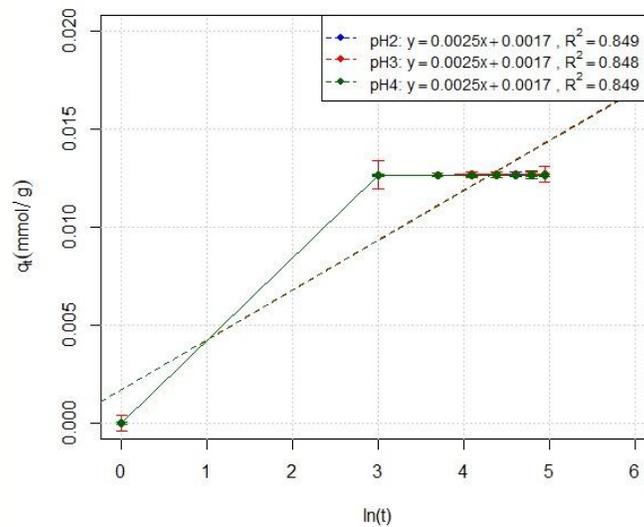
Modélica de Elovich evaluando un tamaño de partícula tamiz 8 con tratamiento físico



Nota. Elaboración propia

Figura 20.

Modélica de Elovich evaluando un tamaño de partícula tamiz 10 con tratamiento físico

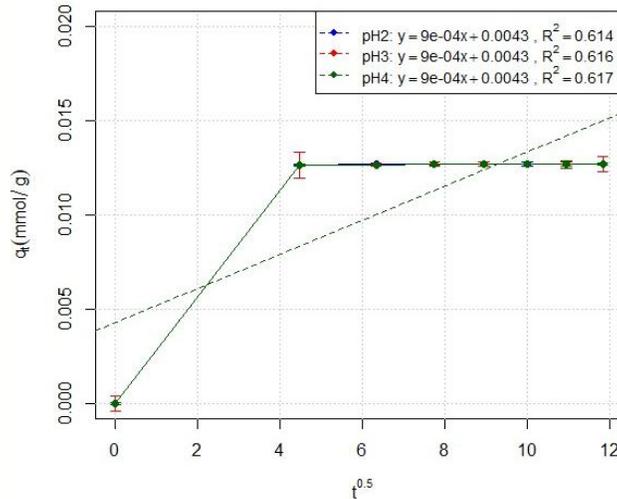


Nota. Elaboración propia

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 21.

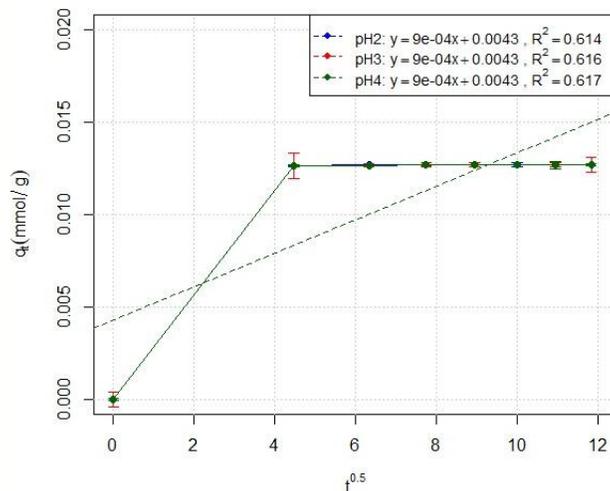
Modelo difusión intraparticular evaluando tamaño de partícula tamiz 8 con tratamiento químico



Nota. Elaboración propia

Figura 22.

Modelo difusión intraparticular evaluando tamaño de partícula tamiz 10 con tratamiento químico

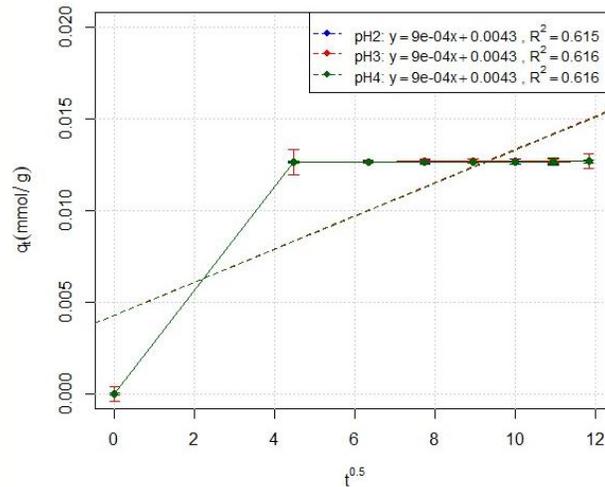


Nota. Elaboración propia.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 23.

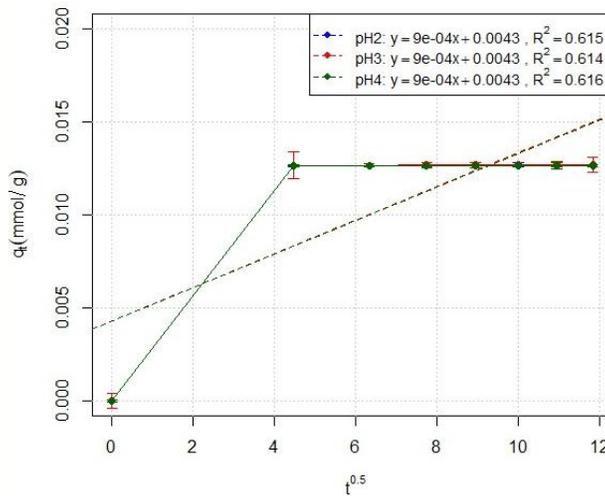
Modelo difusión intraparticular evaluando tamaño de partícula tamiz 8 con tratamiento físico



Nota. Elaboración propia.

Figura 24.

Modelo difusión intraparticular evaluando tamaño de partícula tamiz 10 con tratamiento físico

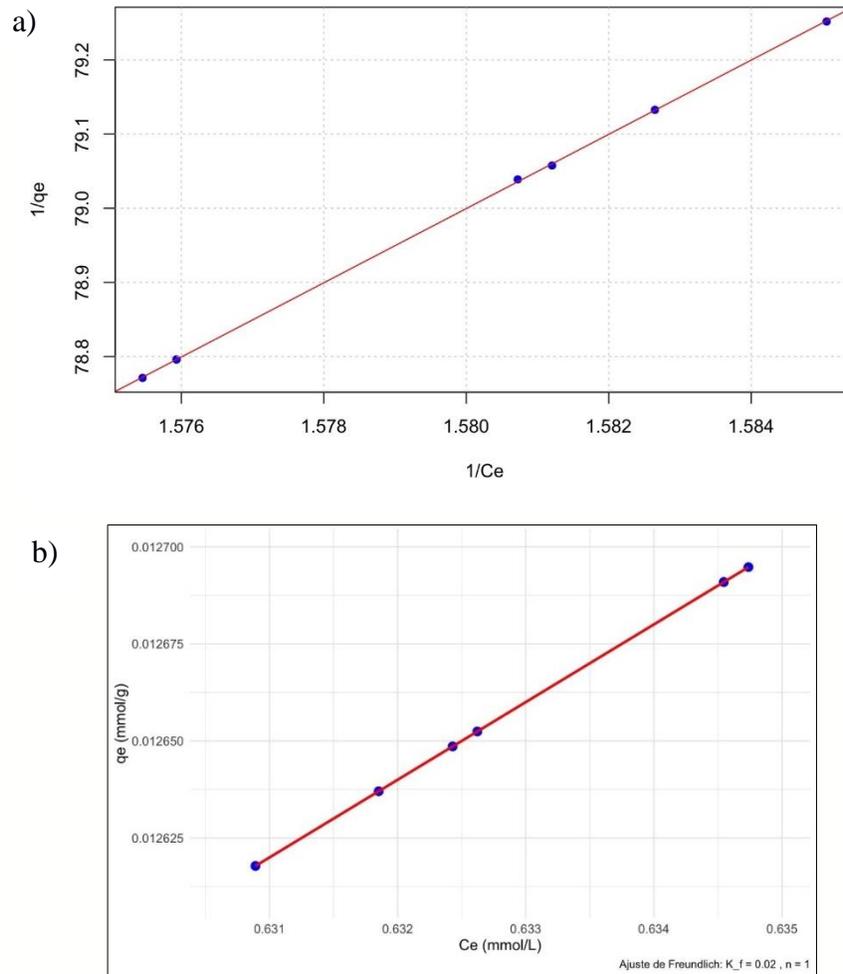


Nota. Elaboración propia.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 25.

Isotermas de Langmuir y Freundlich evaluando tamaño de partícula tamiz 8 con tratamiento químico y $pH_{medio} = 2$

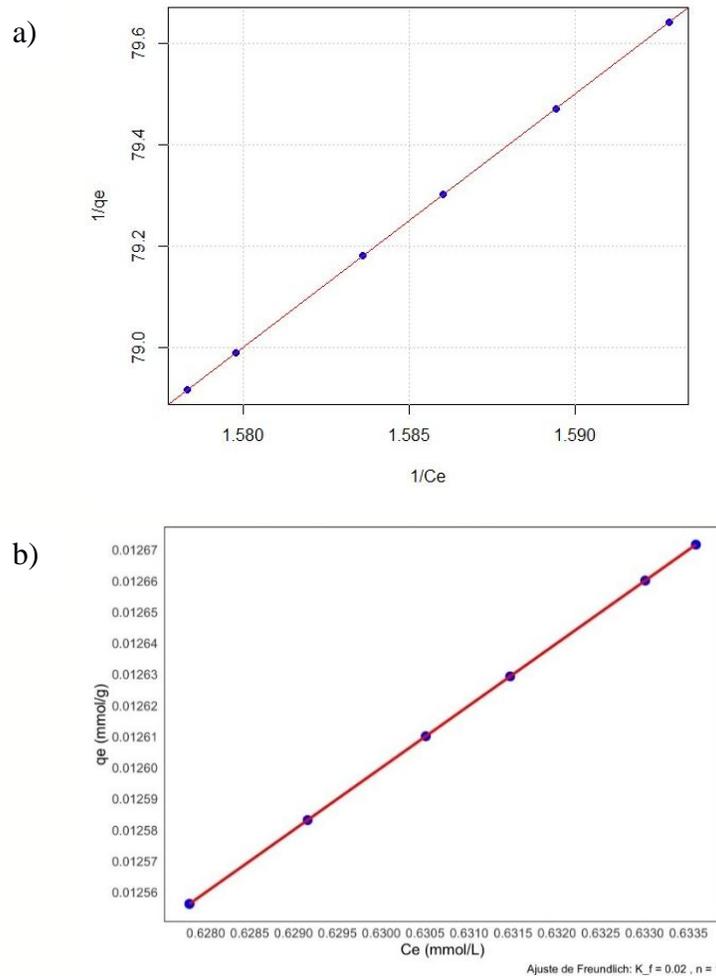


Nota. a) Isotherma de Langmuir. b) Isotherma de Freundlich. Elaboración propia.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 26.

Isoterma de Langmuir y de Freundlich evaluando tamaño de partícula tamiz 8 con tratamiento químico y $pH_{medio} = 3$

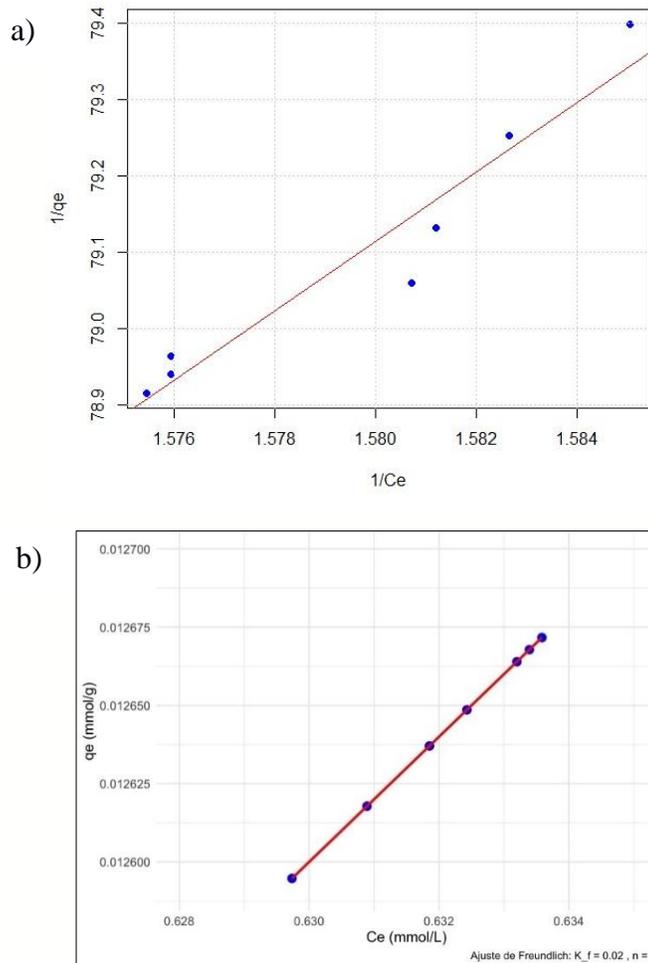


Nota. a) Isoterma de Langmuir. b) Isoterma de Freundlich. Elaboración propia.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 27.

Isoterma de Langmuir evaluando tamaño de partícula tamiz 8 con tratamiento químico y $pH_{medio} = 4$

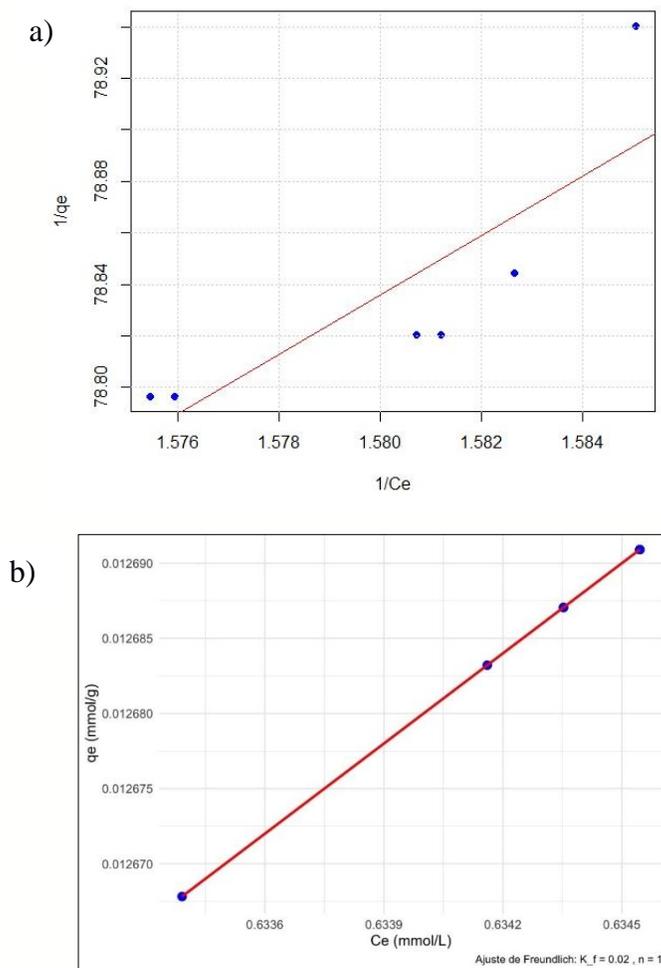


Nota. a) Isoterma de Langmuir. b) Isoterma de Freundlich. Elaboración propia.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 28.

Isoterma de Langmuir y Freundlich evaluando tamaño de partícula tamiz 10 con tratamiento químico y $pH_{medio} = 2$

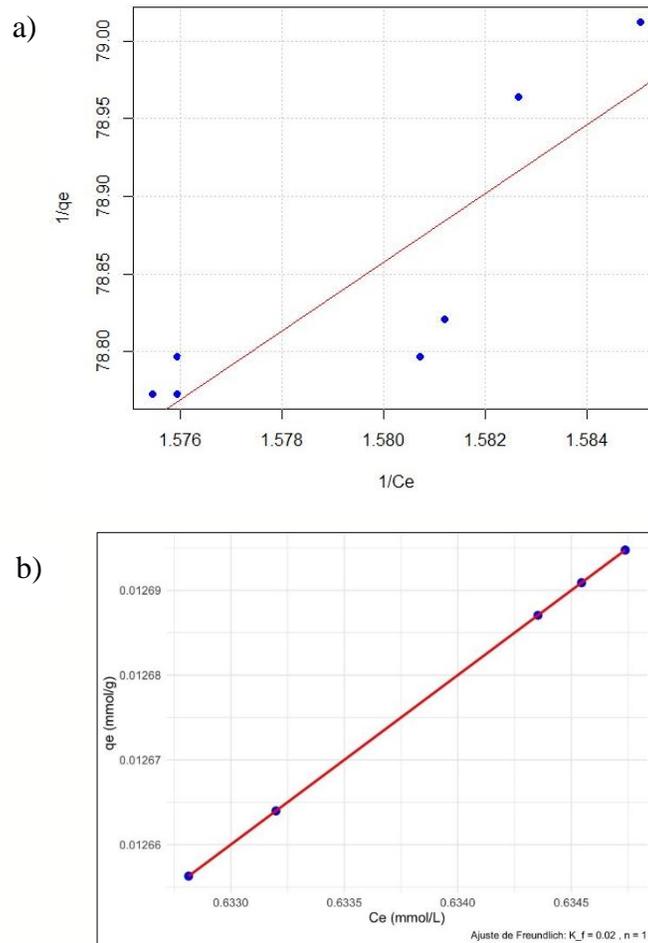


Nota. a) Isoterma de Langmuir. b) Isoterma de Freundlich. Elaboración propia.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 29.

Isoterma de Langmuir evaluando tamaño de partícula tamiz 10 con tratamiento químico y $pH_{medio} = 3$

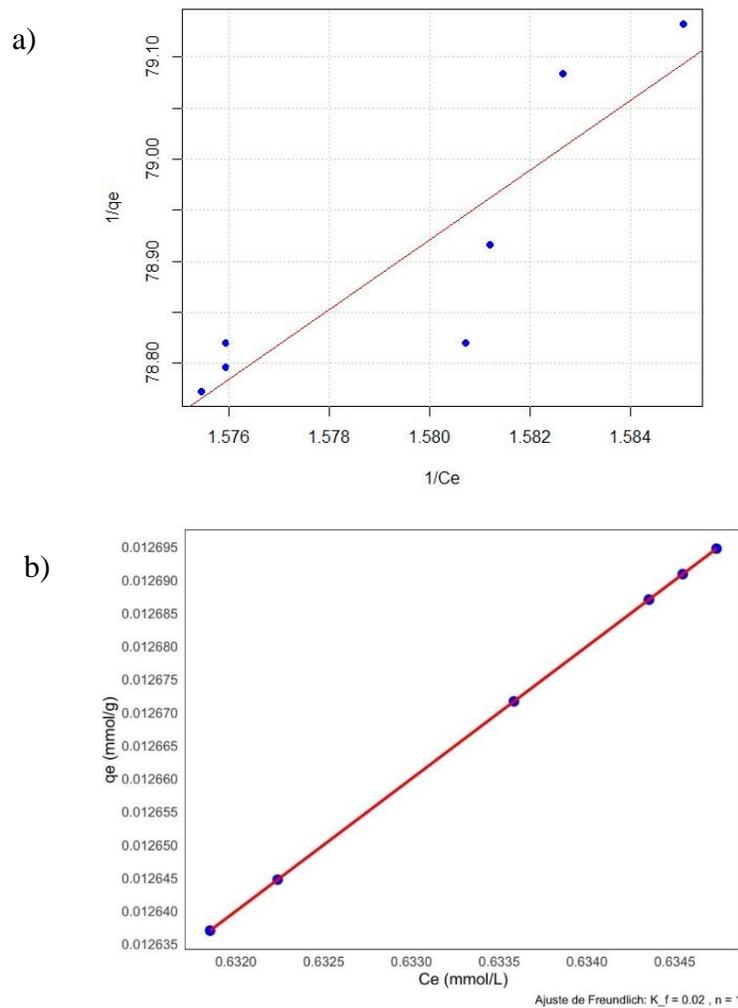


Nota. a) Isoterma de Langmuir. b) Isoterma de Freundlich. Elaboración propia.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 30.

Isoterma de Langmuir evaluando tamaño de partícula tamiz 10 con tratamiento químico y $pH_{medio} = 4$

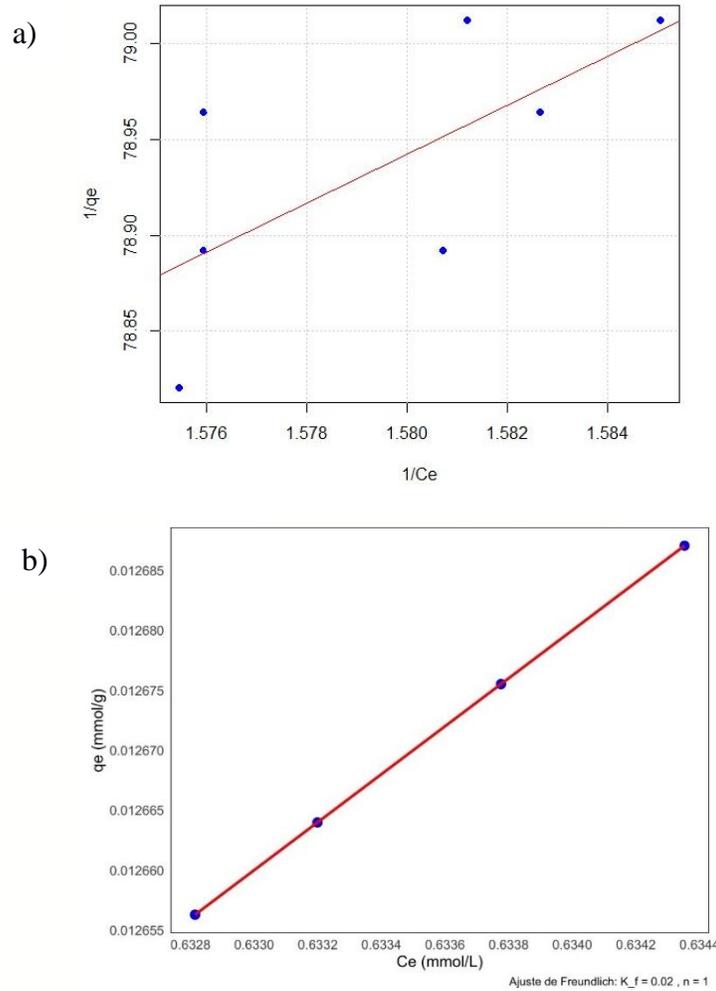


Nota. a) Isoterma de Langmuir. b) Isoterma de Freundlich. Elaboración propia.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 31.

Isoterma de Langmuir evaluando tamaño de partícula tamiz 8 con tratamiento físico y $pH_{medio} = 2$

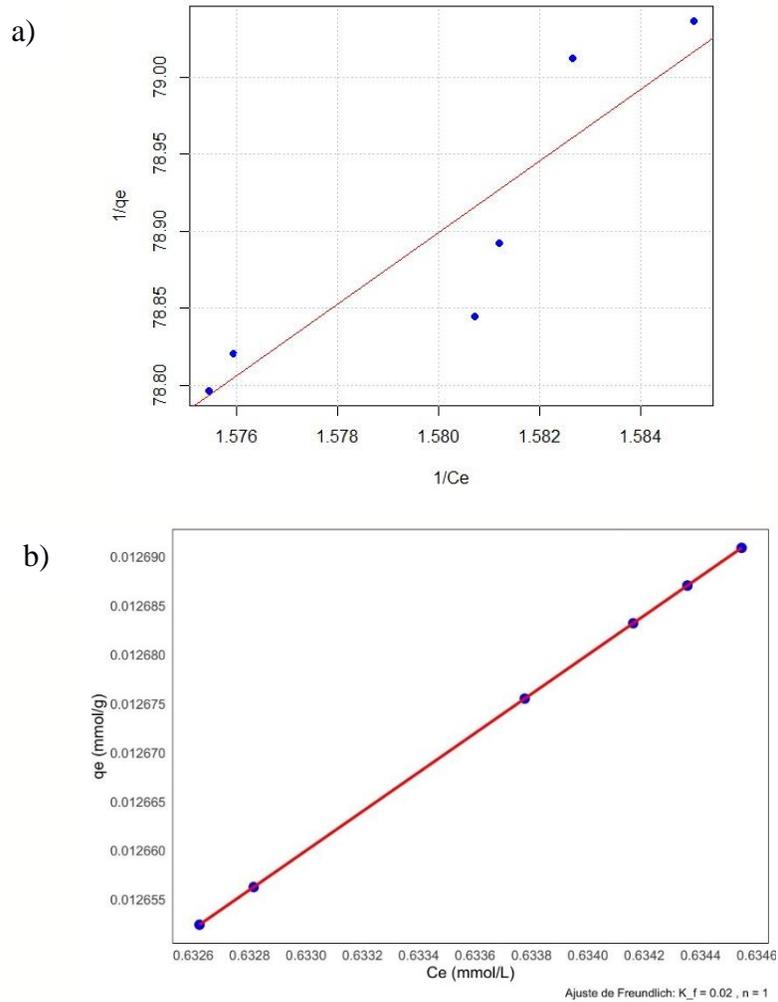


Nota. a) Isoterma de Langmuir. b) Isoterma de Freundlich. Elaboración propia.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 32.

Isoterma de Langmuir evaluando tamaño de partícula tamiz 8 con tratamiento físico y $pH_{medio} = 3$

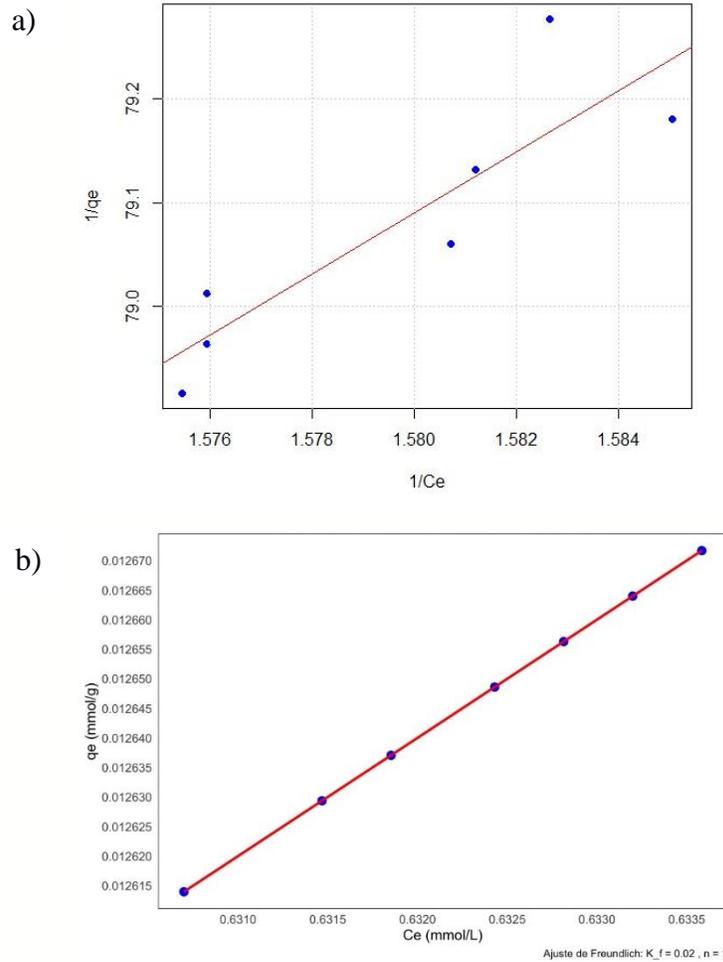


Nota. a) Isoterma de Langmuir. b) Isoterma de Freundlich. Elaboración propia.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 33.

Isoterma de Langmuir evaluando tamaño de partícula tamiz 8 con tratamiento físico y $pH_{medio} = 4$

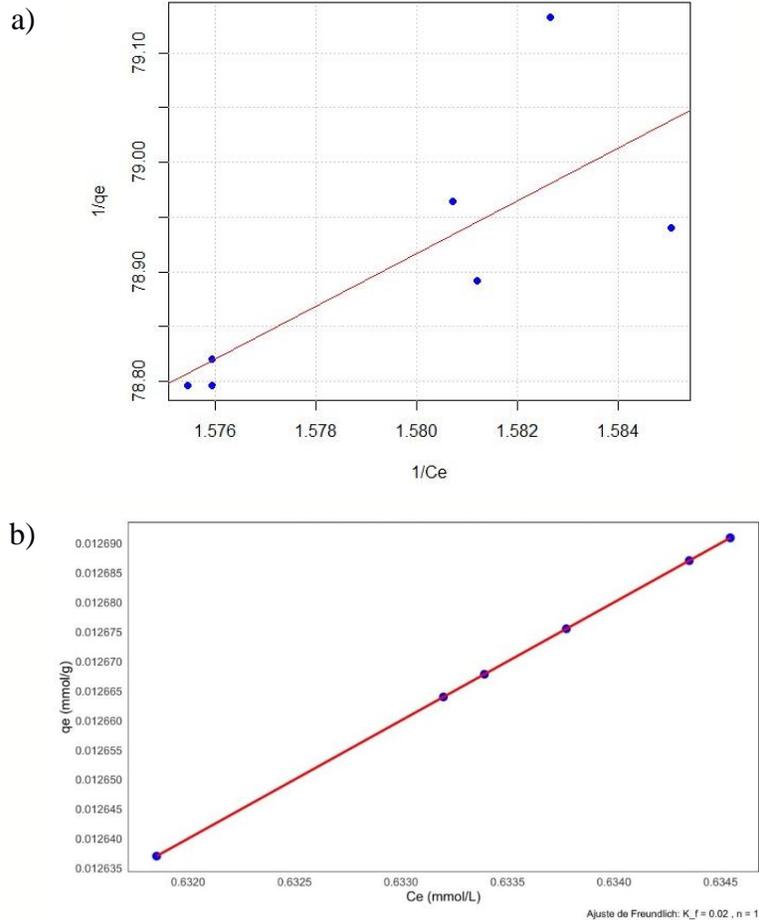


Nota. a) Isoterma de Langmuir. b) Isoterma de Freundlich. Elaboración propia.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 34.

Isoterma de Langmuir evaluando tamaño de partícula tamiz 10 con tratamiento físico y $pH_{medio} = 2$

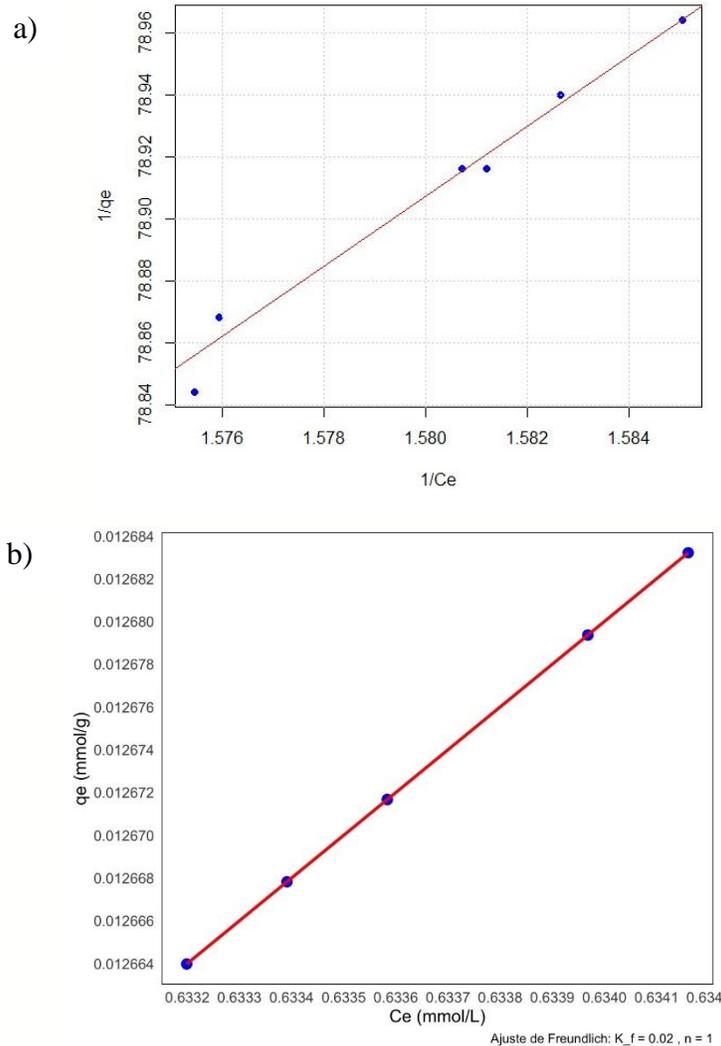


Nota. a) Isoterma de Langmuir. b) Isoterma de Freundlich. Elaboración propia.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 35.

Isoterma de Langmuir evaluando tamaño de partícula tamiz 10 con tratamiento físico y $pH_{medio} = 3$

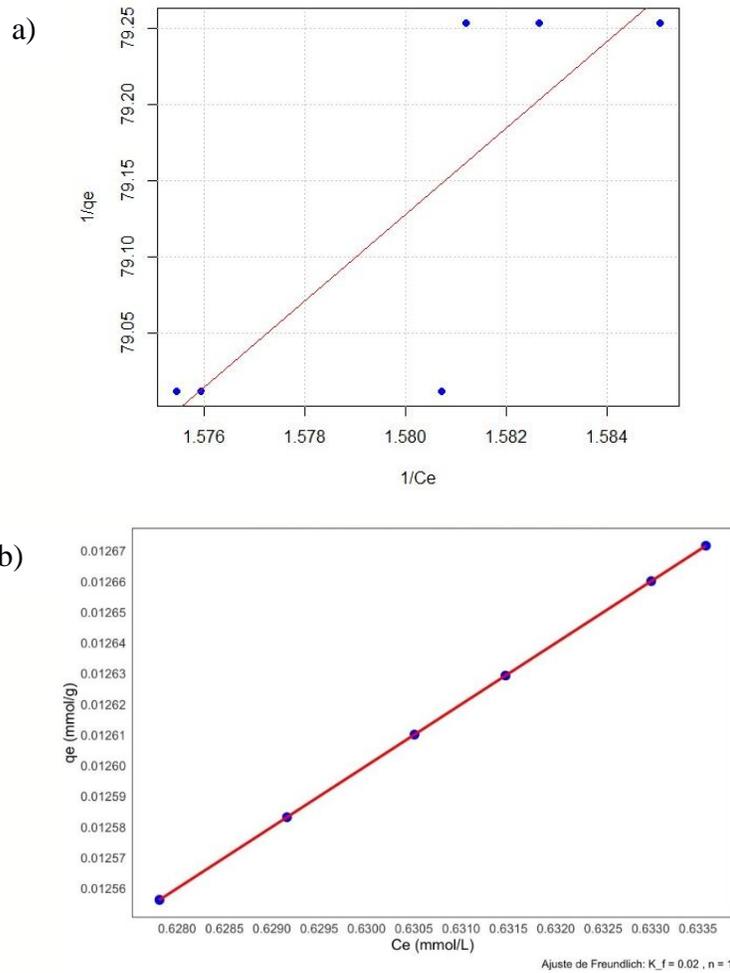


Nota. a) Isoterma de Langmuir. b) Isoterma de Freundlich. Elaboración propia.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Figura 36.

Isoterma de Langmuir evaluando tamaño de partícula tamiz 10 con tratamiento físico y $pH_{medio} = 4$



Nota. a) Isoterma de Langmuir. b) Isoterma de Freundlich. Elaboración propia.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

La caracterización fisicoquímica del exocarpio de aguacate antes y después de la modificación química permitió identificar cambios estructurales que influyen en su capacidad adsorbente. Se determinó que el exocarpio sin modificar presentó un contenido de lignina del 42.13% y un 25.64% de celulosa, valores que experimentaron ligeras variaciones tras el tratamiento con ácido cítrico (Tablas 11, 15, 19, 21). Este procedimiento también redujo significativamente el contenido de humedad del material, pasando de aproximadamente un 80% a un 6% tras el proceso de deshidratación (Tablas 3, 5, 25-26). El análisis granulométrico confirmó que el material tratado pudo ser fraccionado en partículas que pasan el tamiz 8 (2.38 mm) y tamiz 10 (2 mm), facilitando su aplicación en pruebas de adsorción. Los estudios mediante espectroscopia FTIR revelaron la presencia de grupos funcionales clave, como hidroxilos (-OH) y carboxilos (-COOH), que confirman la formación de ésteres tras la reacción con ácido cítrico (Figuras 6-8).

Estos cambios en la estructura química indican una mayor reactividad superficial, lo que se traduce en un incremento potencial de la afinidad del material por los metales pesados. La presencia de estos grupos funcionales es consistente con estudios previos que han demostrado que la carboxilación de materiales lignocelulósicos mejora su capacidad de captación de contaminantes (Tejada Tovar et al., 2015). Además, la reducción del tamaño de partícula a 2 mm contribuyó a un aumento en la superficie específica disponible, lo que favorece la interacción con el cromo en solución.

En cuanto a la evaluación de la capacidad y porcentaje de adsorción de cromo hexavalente, los resultados mostraron que el exocarpio modificado alcanzó un 100% de remoción a pH 2, mientras que el material sin modificar logró un 99.7% bajo las mismas condiciones (Tablas 27-28, 31). Este hallazgo sugiere que, si bien el tratamiento químico optimiza el proceso de adsorción, el exocarpio en su estado natural también posee propiedades adsorbentes destacables. Sin embargo, el efecto del pH fue determinante, ya que la capacidad de adsorción fue significativamente mayor en medios ácidos, especialmente en el rango de pH 2-3. Esto se debe a la protonación de los grupos carboxilos presentes en la superficie del bioadsorbente, lo que favorece la atracción electrostática de los aniones de cromo hexavalente.

Asimismo, el tamaño de partícula tuvo un impacto relevante en la eficiencia de adsorción. Las partículas de 2 mm demostraron ser más eficientes que las de 2,38 mm, ya que su mayor área superficial expone más sitios activos para la interacción con el metal (Tabla 27). Esta tendencia es consistente con investigaciones previas que han reportado mejoras en la adsorción cuando se emplean partículas más finas, debido a una mayor accesibilidad de los sitios activos (López Hernández & Lacayo Romero, 2020).



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

A pesar de estos resultados positivos, sería conveniente evaluar si esta eficiencia se mantiene en diferentes concentraciones de cromo y en matrices acuosas más complejas, como aguas residuales industriales, para garantizar la aplicabilidad del material en escenarios reales.

El análisis cinético de la adsorción mostró que la concentración de cromo hexavalente en solución disminuyó drásticamente en los primeros 20 minutos de contacto con el bioadsorbente, alcanzando el equilibrio a los 140 minutos (Tablas 32-33). Este comportamiento sugiere que la mayoría del cromo es adsorbido en las primeras etapas del proceso, lo que indica una alta afinidad entre el metal y los sitios activos del exocarpio modificado. Para modelar el comportamiento cinético de la adsorción, se probaron diferentes ecuaciones matemáticas, incluyendo los modelos de pseudo-primer orden, pseudo-segundo orden, Elovich y difusión intraparticular.

Los datos experimentales mostraron un ajuste más preciso al modelo de pseudo-segundo orden, con valores de correlación superiores a 0.99. Este resultado indica que el proceso de adsorción está dominado por interacciones químicas, más que por fenómenos de difusión superficial (Figuras no mostradas, pero sugeridas por los datos). La naturaleza química de la adsorción sugiere que los electrones compartidos entre los grupos funcionales del exocarpio y el cromo desempeñan un papel crucial en la retención del metal, lo que concuerda con estudios previos sobre materiales lignocelulósicos modificados (Wu et al., 2009). Estos hallazgos respaldan la hipótesis de que el tratamiento químico mejora la capacidad adsorbente del material al incrementar el número de sitios activos disponibles para la interacción con los contaminantes.

La modificación química del exocarpio de aguacate con ácido cítrico se confirmó como una estrategia efectiva para optimizar su desempeño como bioadsorbente. La incorporación de grupos carboxilos en la estructura del material incrementó su afinidad por el cromo hexavalente, permitiendo alcanzar altos niveles de remoción incluso en concentraciones elevadas. Además, las condiciones óptimas determinadas en este estudio, específicamente un pH de 2 y un tamaño de partícula de 2 mm, maximizan la eficiencia del proceso, en línea con investigaciones previas (Díaz-Muñoz et al., 2016). Sin embargo, es importante considerar la reutilización del adsorbente en futuros estudios para evaluar su estabilidad y viabilidad a largo plazo.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Los resultados obtenidos posicionan al exocarpio de aguacate modificado como una alternativa sostenible y de bajo costo para la remoción de metales pesados en cuerpos de agua contaminados, con eficiencias comparables a las reportadas para adsorbentes comerciales (ej.: 100% de remoción vs. 93% reportado por Tejada Tovar et al., 2015). Esto representa un avance significativo en la búsqueda de materiales accesibles y ecológicos para el tratamiento de efluentes industriales y la mitigación de la contaminación ambiental.

Los datos cinéticos (Tablas 32-33 y Figuras 9-26) revelaron que el modelo de pseudo-segundo orden presentó el mejor ajuste a los resultados experimentales, con coeficientes de determinación ($R^2 > 0.99$) superiores a los de pseudo-primero orden, Elovich y difusión intraparticular. Este modelo sugiere que la adsorción está gobernada por mecanismos químicos, específicamente la formación de enlaces covalentes o intercambio de electrones entre los grupos funcionales del exocarpio y el Cr^{6+} , en lugar de procesos físicos como la difusión superficial (Ho et al., 2001). La constante de velocidad (k_2) para el material modificado químicamente fue significativamente mayor (ej: $553.9 \text{ g mmol}^{-1} \text{ min}^{-1}$ a pH 2, Tabla 41), confirmando que la modificación con ácido cítrico incrementó la reactividad de los sitios activos.

Para el exocarpio sin modificar, aunque el modelo de pseudo-segundo orden también predominó, se observó una contribución marginal de la difusión intraparticular ($R^2 \sim 0.61-0.62$, Tablas 49-52), especialmente en etapas iniciales (<60 min). Esto indica que, en ausencia de modificación química, el transporte del Cr^{6+} hacia los poros internos del material juega un rol secundario, limitado por la menor densidad de grupos funcionales disponibles.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

10. Propiedad intelectual

No aplica.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

11. Beneficiarios directos e indirectos

Tabla 25

Beneficiarios directos e indirectos de la investigación

Resultados, productos o hallazgos	Beneficiarios directos (institución, organización, sector académico o tipo de personas)	Número de beneficiarios directos	Beneficiarios indirectos (institución, organización, sector académico o tipo de personas)	Número de Beneficiarios indirectos
Evaluación de la capacidad bioadsorbente del exocarpio de aguacate modificado químicamente para remoción de Cr(VI).	Grupo Gordian S.A. (sector empresarial agroindustrial)	5	Comunidades cercanas a fuentes de agua contaminadas (población general)	Aproximadamente 500
Caracterización fisicoquímica y cinética de adsorción del material bioadsorbente.	Universidad del Valle de Guatemala (sector académico)	10	Estudiantes e investigadores de la USAC y otras universidades	100
Aplicabilidad de materiales naturales para el tratamiento de aguas residuales industriales.	Laboratorio de Análisis Fisicoquímico (LAFIQ)	8	Empresas de tratamiento de aguas y sector industrial	50

Nota. Elaboración propia 2025.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

12. Estrategia de divulgación y difusión de los resultados.

Tabla 26

Medios para proceso de divulgación

	Sí	No
Presentación TV		
Entrevistas radiales		
Podcast		
Entrevista DIGI	X	
Recursos audiovisuales		
Congresos científicos nacionales o internacionales	X	
Talleres		
Publicación de libro		
Publicación de artículo científico		
Divulgación por redes sociales institucionales		
Presentación pública		
Presentación autoridades USAC		
Presentación a beneficiarios directos		
Entrega de resultados		
Docencia en grado	X	
Docencia postgrado		
Póster científico		
Trifoliales		
Conferencias	X	

Nota. Elaboración propia 2025.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

13. Contribución a las Prioridades Nacionales de Desarrollo (PND)

Los resultados obtenidos en esta investigación contribuyen de manera significativa a las Prioridades Nacionales de Desarrollo de Guatemala, particularmente a las metas establecidas en el eje de sostenibilidad ambiental y gestión integral de los recursos naturales. La evaluación de la capacidad bioadsorbente del exocarpio de aguacate modificado químicamente para la remoción de cromo hexavalente en aguas contaminadas aporta al cumplimiento de la meta de mejorar la calidad del agua y promover su uso sostenible, tal como lo establece la PND.

Además, esta investigación fortalece el desarrollo de tecnologías limpias y sostenibles, alineándose con el objetivo de reducir la contaminación y minimizar la generación de desechos peligrosos. La aplicación de materiales naturales y renovables como el exocarpio de aguacate no solo ofrece una solución viable para la remediación de aguas residuales industriales, sino que también fomenta la innovación en el tratamiento de contaminantes, contribuyendo al desarrollo de prácticas ambientales responsables en el país. Este proyecto también impulsa el fortalecimiento de capacidades científicas y tecnológicas nacionales, promoviendo la investigación aplicada y el desarrollo de soluciones adaptadas al contexto guatemalteco.

14. Contribución al desarrollo de iniciativas de ley

No aplica.

15. Vinculación

La investigación contó con la vinculación de diversas instituciones y organizaciones externas a la Universidad de San Carlos de Guatemala, cuya colaboración fue fundamental para el desarrollo de los experimentos y recolección de muestras. Una de las principales vinculaciones se realizó con el Grupo Gordian S.A., una empresa dedicada al procesamiento de aguacate para su comercialización. Esta empresa facilitó el acceso a su planta de producción, lo que permitió recolectar el exocarpio de aguacate necesario para la investigación.

Asimismo, se estableció un vínculo académico con la Universidad del Valle de Guatemala (UVG), donde se llevaron a cabo los ensayos de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), esenciales para la caracterización fisicoquímica del material bioadsorbente.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

También se contó con el apoyo del Laboratorio de Análisis Físicoquímico (LAFIQ), donde se realizaron los ensayos de espectrofotometría UV-Vis para determinar la concentración de cromo hexavalente en las muestras analizadas.

Estas vinculaciones fortalecieron la investigación al aportar recursos técnicos, infraestructura y conocimiento especializado, enriqueciendo el desarrollo del proyecto y abriendo la pauta para futuras colaboraciones científicas, académicas e industriales, que permitan continuar explorando soluciones sostenibles para el tratamiento de aguas contaminadas.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

16. Conclusiones

1. Los análisis realizados demostraron que la modificación química con ácido cítrico introdujo cambios estructurales en el exocarpio de aguacate, como la reducción del contenido de humedad del 80% al 6% y ligeras variaciones en la composición de lignina y celulosa. La espectroscopia FTIR confirmó la formación de ésteres y la presencia de grupos funcionales clave, como hidroxilos (-OH) y carboxilos (-COOH), que favorecen la adsorción de metales pesados. Además, la granulometría permitió obtener un material con partículas de 2 mm y 2.38 mm, facilitando su aplicación en pruebas de adsorción.
2. El exocarpio modificado mostró una capacidad de adsorción altamente eficiente, logrando una remoción del 100% de cromo hexavalente a pH 2. Se determinó que la adsorción es más efectiva en medios ácidos, debido a la protonación de los grupos carboxilos en la superficie del bioadsorbente, lo que favorece la atracción electrostática del Cr(VI). Además, las partículas de 2 mm resultaron ser más eficientes que las de 2.38 mm, ya que ofrecen una mayor área superficial y, por ende, más sitios activos para la adsorción.
3. El exocarpio sin modificar también demostró propiedades adsorbentes notables, con una remoción del 99.7% de Cr(VI) a pH 2. Sin embargo, su eficiencia fue ligeramente inferior a la del material modificado. El pH jugó un papel determinante en el proceso de adsorción, favoreciendo la captación de cromo en condiciones ácidas. Así mismo, se observó que la reducción del tamaño de partícula mejoró la capacidad de adsorción, ya que el material con partículas de 2 mm presentó un mejor desempeño en comparación con el de 2.38 mm.
4. El análisis cinético indicó que la adsorción de Cr(VI) ocurre principalmente en los primeros 20 minutos, alcanzando el equilibrio a los 140 minutos. Los datos experimentales mostraron un ajuste preciso al modelo de pseudo-segundo orden ($R^2 > 0.99$), lo que indica que el proceso está dominado por interacciones químicas más que por fenómenos de difusión superficial. La constante de velocidad (k_2) del exocarpio modificado fue significativamente mayor que la del material sin modificar, lo que confirma que la carboxilación mejora la reactividad de los sitios activos y la afinidad por el cromo hexavalente.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

17. Recomendaciones

1. Evaluación en matrices más complejas: Se recomienda probar la eficacia del exocarpio de aguacate modificado en aguas residuales industriales para analizar su desempeño en presencia de otros contaminantes y evaluar posibles interferencias en la adsorción del cromo hexavalente.
2. Optimización del proceso de modificación química: Explorar variaciones en la concentración de ácido cítrico y condiciones de tratamiento térmico para determinar si es posible mejorar aún más la capacidad de adsorción del bioadsorbente.
3. Estudios de reutilización del bioadsorbente: Realizar pruebas sobre la capacidad de regeneración del material tras varios ciclos de adsorción y desorción para evaluar su viabilidad a largo plazo en aplicaciones prácticas.
4. Análisis económico y escalabilidad del proceso: Llevar a cabo estudios de factibilidad económica y escalabilidad para evaluar la implementación del bioadsorbente a nivel industrial, considerando costos de producción, eficiencia y viabilidad ambiental.

6 Referencias

- AOAC international. (2020). *Program quick reference guide*.
- Ayalew, A. A., & Aragaw, T. A. (2020). Utilization of treated coffee husk as low-cost bio-sorbent for adsorption of methylene blue. *Adsorption Science and Technology*, 38(5–6), 205–222. <https://doi.org/10.1177/0263617420920516>
- Balasubramanian, S., & Pugalenth, V. (1999). Determination of total chromium in tannery waste water by inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry, flame atomic absorption spectrometry and UV-visible spectrophotometric methods. *Talanta*, 50(3), 457–467. [https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(99\)00135-6](https://doi.org/10.1016/S0039-9140(99)00135-6)
- Brocard, G., Bettini, A., Adatte, T., Morán, S., & Vásquez, O. (2016). *Eutrofización y contaminación por cromo en la laguna de Chichoj, Alta Verapaz, Guatemala*. 3(1), 20–43.
- Candelaria Tejada-Tovar¹, Á. V.-O. y L. G.-J. (2014). Adsorción y Absorción. *Tecnologías*, 18, 123.
- Ceballos, M., & Montoya, S. (2013). EVALUACIÓN QUÍMICA DE LA FIBRA EN SEMILLA, PULPA Y CÁSCARA DE TRES VARIEDADES DE AGUACATE. In *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* (Vol. 11, Issue 1). Enero-Junio.
- Chen, Y., Hu, W., Huang, B., Weindorf, D. C., Rajan, N., Liu, X., & Niedermann, S. (2013). Accumulation and health risk of heavy metals in vegetables from harmless and organic vegetable production systems of China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 98. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.09.037>



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

- Cheung, C. W., Porter, J. F., & McKay, G. (2001). SORPTION KINETIC ANALYSIS FOR THE REMOVAL OF CADMIUM IONS FROM EFFLUENTS USING BONE CHAR. In *Wat. Res* (Vol. 35, Issue 3).
- Chil-Núñez, I., Molina-Bertran, S., Ortiz-Zamora, L., Dutok CMS, & Souto RNPI. (2019). *Estado del Arte de la especie Persea americana Mill (aguacate)*. <https://orcid.org/0000-0002-8795-1217>
- Díaz-Muñoz, L. L., Bonilla-Petriciolet, A., Reynel-Ávila, H. E., & Mendoza-Castillo, D. I. (2016). Sorption of heavy metal ions from aqueous solution using acid-treated avocado kernel seeds and its FTIR spectroscopy characterization. *Journal of Molecular Liquids*, 215, 555–564. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.01.022>
- Espinoza, A. R. (2021, August 12). *Aguacate, una fruta internacional con origen guatemalteco*. <https://agexporthoy.export.com.gt/opinion-agexport/aguacate-una-fruta-internacional-con-origen-guatemalteco/>
- Ho, Y.-S., Chiang, C.-C., & Hsu, Y.-C. (2001). SORPTION KINETICS FOR DYE REMOVAL FROM AQUEOUS SOLUTION USING ACTIVATED CLAY. In *SEPARATION SCIENCE AND TECHNOLOGY* (Vol. 36, Issue 11). www.dekker.com
- Holan, Z. R., Volesky, B., & Prasetyo, I. (1993). Biosorption of cadmium by biomass of marine algae. *Biotechnology and Bioengineering*, 42(4), 548–548. <https://doi.org/10.1002/bit.260420422>
- Jain, C. K., Malik, D. S., & Yadav, A. K. (2016). Applicability of plant based biosorbents in the removal of heavy metals: a review. *Environmental Processes*, 3(2), 495–523. <https://doi.org/10.1007/s40710-016-0143-5>
- Laura Mónica, I. L., & Miguel Angel, M. T. (2019). “ *Tratamiento por adsorción con Petroselinum crispum (perejil) activado para la reducción de riesgos químicos en el efluente de la etapa de curtido en la para Obtener El Título Profesional en.*
- Liang, S., Guo, X., Feng, N., & Tian, Q. (2010). Isotherms, kinetics and thermodynamic studies of adsorption of Cu²⁺ from aqueous solutions by Mg²⁺/K⁺ type orange peel adsorbents. *Journal of Hazardous Materials*, 174(1–3), 756–762. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.09.116>
- López Hernández, M., & Lacayo Romero, M. (2020). Remoción de cromo hexavalente en aguas contaminadas utilizando cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) como adsorbente. *Revista Torreón Universitario*, 8(23). <https://doi.org/10.5377/torreon.v8i23.9534>
- Lucia Pinzón-Bedoya, M., Estella, L., & Villamizar, V. (2009). MODELAMIENTO DE LA CINÉTICA DE BIOADSORCIÓN DE Cr (III) USANDO CÁSCARA DE NARANJA KINETC MODELING BIOSORPTION OF Cr(III) USING ORANGE SHELL. *Año*, 76, 95–106.
- Melgar, B., Dias, M. I., Ciric, A., Sokovic, M., Garcia-Castello, E. M., Rodriguez-Lopez, A. D., Barros, L., & Ferreira, I. C. R. F. (2018). Bioactive characterization of *Persea americana* Mill.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

- by-products: A rich source of inherent antioxidants. *Industrial Crops and Products*, 111, 212–218. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.10.024>
- Ortiz, H. Y. D. (2000). *Hacia el conocimiento y conservación de la pitahaya (Hylocereus spp)*.
- Pitsari, S., Tsoufakis, E., & Loizidou, M. (2013). Enhanced lead adsorption by unbleached newspaper pulp modified with citric acid. *Chemical Engineering Journal*, 223, 18–30. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.02.105>
- Primera-Pedrozo, O., Colpas-Castillo, F., Meza-Fuentes, E., & Fernández-Maestre, R. (2011). *CARBONES ACTIVADOS A PARTIR DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR Y ZURO DE MAÍZ PARA LA ADSORCIÓN DE CADMIO Y PLOMO*.
- Reyes, Y. C., Vergara, I., Torres, O. E., Díaz, M., & González, E. E. (2016). CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS: IMPLICACIONES EN SALUD, AMBIENTE Y SEGURIDAD ALIMENTARIA. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 16(2). <https://doi.org/10.19053/1900771x.v16.n2.2016.5447>
- Severiche Sierra, C. A., & González García, H. (2013). Verificación analítica para las determinaciones de cromo hexavalente en aguas por espectrofotometría. *Ingenierías USBMed*, 4(1), 22–26. <https://doi.org/10.21500/20275846.279>
- Singh, A., Sharma, R. K., Agrawal, M., & Marshall, F. M. (2010). Risk assessment of heavy metal toxicity through contaminated vegetables from waste water irrigated area of Varanasi, India. *Tropical Ecology*, 51(2 SUPPL.).
- Tejada, C., Villabona, Á., & Jiménez, M. (2017). *REMOCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE SOBRE RESIDUOS DE CACAO PRETRATADOS QUÍMICAMENTE*.
- Tejada Tovar, C., Quiñones Bolaños, E., Tejada Benitez, L., & Marimón Bolivar, W. (2015). Absorción de Cromo Hexavalente en soluciones acuosas por cascaras de naranja (*Citrus sinensis*). *Producción + Limpia*, 10(1), 9–21. <https://doi.org/10.22507/pml.v10n1a1>
- Tejada Tovar, C., Villabona, A., & Ruiz, P. (2015). *Cinética de adsorción de Cr (VI) usando biomásas residuales modificadas químicamente en sistemas por lotes y continuo*.
- Vásquez, K., & Sierra, E. (2021). *Biosorción de metales pesados utilizando carbón activado obtenido de cáscara de cardamomo*. <https://digi.usac.edu.gt/bvirtual/informes/puicb/INF-2021-04.pdf>
- Wu, F. C., Tseng, R. L., & Juang, R. S. (2009). Characteristics of Elovich equation used for the analysis of adsorption kinetics in dye-chitosan systems. *Chemical Engineering Journal*, 150(2–3), 366–373. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.01.014>
- Wu, Y., Luo, H., Wang, H., Wang, C., Zhang, J., & Zhang, Z. (2013). Adsorption of hexavalent chromium from aqueous solutions by graphene modified with cetyltrimethylammonium bromide. *Journal of Colloid and Interface Science*, 394(1), 183–191. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2012.11.049>

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

7 Apéndice

Tabla 27 *Proyecciones de cantidad de exocarpio de aguacate requerido para cada una de las fases de la experimentación en la ejecución del proyecto.*

Análisis	Tamiz	Modificación	Masa (g)	Subtotal (g)	Total (g)
Capacidad de adsorción	8	Impregnado	53.570	107.150	214.290
		No impregnado	53.570		
	10	Impregnado	53.570	107.150	
		No impregnado	53.570		
Modelo cinético	8	Impregnado	125.000	250.000	500.000
		No impregnado	125.000		
	10	Impregnado	125.000	250.000	
		No impregnado	125.000		
Isotermas de adsorción	8	Impregnado	71.430	142.860	285.710
		No impregnado	71.430		
	10	Impregnado	71.430	142.860	
		No impregnado	71.430		

Nota. Elaboración propia.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 28

Análisis granulométrico realizado al material obtenido del proceso de reducción de partícula mediante una licuadora industrial

Tamiz	(mm)	Peso de plato + material	Peso plato	Peso Retenido	% Peso Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasante
		(g)	(g)	(g)	(%)	(%)	(%)
<4	-	0.000	0.000	0.000	0.00%	0.00%	100.00%
4	4.76	505.793	502.447	3.346	1.65%	1.65%	98.35%
8	2.36	555.018	453.140	101.878	50.16%	51.81%	48.19%
10	2	492.832	474.859	17.973	8.85%	60.66%	39.34%
12	1.7	561.480	526.376	35.104	17.28%	77.95%	22.05%
16	1.18	527.021	507.733	19.288	9.50%	87.44%	12.56%
20	0.84	412.447	404.460	7.987	3.93%	91.38%	8.62%
30	0.6	392.650	388.420	4.230	2.08%	93.46%	6.54%
40	0.43	377.932	375.906	2.026	1.00%	94.46%	5.54%
Plato Inf.	0	424.396	413.138	11.258	5.54%	100.00%	0.00%
Sumatorio		4249.569	4046.479	203.090	100%		

Nota. Elaboración propia 2025.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 29

Análisis granulométrico realizado al material obtenido del proceso de reducción de partícula mediante una licuadora industrial correspondiente al segundo lote de cáscara de aguacate recolectado en la empresa Gordian

Tamiz	(mm)	Peso Retenido (g)	% Peso Retenido (%)	% Retenido Acumulado (%)	% Pasante (%)
<4	-	0	0.00%	0.00%	100.00%
4	4.76	3.988	1.96%	1.96%	98.04%
8	2.36	116.871	57.44%	59.40%	40.60%
10	2	18.17	8.93%	68.33%	31.67%
12	1.7	33.897	16.66%	84.99%	15.01%
16	1.18	15.467	7.60%	92.59%	7.41%
20	0.84	5.315	2.61%	95.20%	4.80%
30	0.6	2.515	1.24%	96.44%	3.56%
40	0.43	1.246	0.61%	97.05%	2.95%
Plato Inf.	0	5.999	2.95%	100.00%	0.00%
Sumatorio		203.468	100%		

Nota. Elaboración propia 2025.

Tabla 30 *Resultados obtenidos del proceso de secado a masa constante del ensayo de extraíbles*

Secado No.	Tiempo acumulado de secado (h)	Masa del material #1 (g)	Diferencia de masas #1 (g)	Masa del material #2 (g)	Diferencia de masas #2 (g)
Inicial	0	47.165	-	46.102	-
1	1	43.675	3.490	42.542	3.560
2	2	43.321	0.354	42.512	0.030
3	3	43.247	0.074	42.335	0.177
4	4	43.164	0.083	42.314	0.021
5	5	43.087	0.077	42.171	0.143
6	6	43.085	0.002	41.984	0.187
7	7	43.029	0.056	41.921	0.063
8	8	43.020	0.009	41.890	0.031
9	9	43.018	0.002	41.879	0.011

Nota. Elaboración propia 2025.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 31

Resultados obtenidos del proceso de secado en el ensayo de obtención de Lignina

Secado No.	Peso muestra 1 (g)	Diferencia de masas (g)	Peso de muestra 2 (g)	Diferencia de masas (g)	Peso de muestra 3 (g)	Diferencia de masas (g)
0	1.409	-	5.957	-	8.382	-
1	1.287	0.122	1.310	4.647	1.312	7.070
2	1.277	0.010	1.306	0.004	1.308	0.004
3	1.277	0.000	1.297	0.009	1.304	0.004
4	1.277	0.000	1.281	0.016	1.286	0.018
5	1.277	0.000	1.280	0.001	1.285	0.001

Nota. Elaboración propia 2025.

Tabla 32

Resultados obtenidos de la segunda corrida del ensayo de extraíbles durante el proceso de secado a masa constante

Secado No.	Tiempo acumulado de secado (h)	Masa del material #1 (g)	Diferencia de masas #1 (g)	Masa del material #2 (g)	Diferencia de masas #2 (g)
Inicial	0	36.659		36.813	
1	1	36.35	0.309	36.556	0.257
2	2	36.345	0.005	36.529	0.027
3	3	36.315	0.03	36.516	0.013
4	4	36.312	0.003	36.515	0.001
5	5	36.308	0.004	36.512	0.003
6	6	36.293	0.015	36.499	0.013
7	7	36.291	0.002	36.49	0.009
8	8	36.287	0.004	36.487	0.003

Nota. Elaboración propia 2025.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 33

Resultados obtenidos de la segunda corrida del proceso de secado en el ensayo de obtención de Lignina

Secado No.	Peso muestra 1 (g)	Diferencia de masas (g)	Peso de muestra 2 (g)	Diferencia de masas (g)
0	1.384	-	1.387	-
1	1.276	0.108	1.278	0.109
2	1.272	0.004	1.276	0.002
3	1.272	0.000	1.276	0.000

Nota. Elaboración propia 2025

Tabla 34

Resultados obtenidos de la tercera corrida del ensayo de extraíbles durante el proceso de secado a masa constante

Secado No.	Tiempo acumulado de secado (h)	Masa del material #1 (g)	Diferencia de masas #1 (g)	Masa del material #2 (g)	Diferencia de masas #2 (g)	Masa del material #3 (g)	Diferencia de masas #3 (g)
Inicial	0	7.054		7.035		6.949	
1	1	6.248	0.806	6.204	0.831	6.136	0.813
2	2	6.225	0.023	6.200	0.004	6.122	0.014
3	3	6.223	0.002	6.186	0.014	6.121	0.001
4	4	6.221	0.002	6.182	0.004	6.118	0.003
5	5	6.209	0.012	6.177	0.005	6.107	0.011
6	6	6.196	0.013	6.176	0.001	6.106	0.001
7	7	6.195	0.001	6.172	0.004	6.097	0.009
8	8	6.193	0.002	6.168	0.004	6.095	0.002

Nota. Elaboración propia 2025.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 35

Resultados obtenidos del proceso de secado en el ensayo de la determinación de lignina en el exocarpio de aguacate

Secado No.	Peso muestra 1 (g)	Diferencia de masas (g)	Peso muestra 2 (g)	Diferencia de masas (g)	Peso muestra 3 (g)	Diferencia de masas (g)
0	1.349	-	1.393	-	1.383	-
1	1.250	0.099	1.278	0.115	1.272	0.111
2	1.230	0.020	1.258	0.020	1.250	0.022
3	1.228	0.002	1.254	0.004	1.244	0.006
4	1.227	0.001	1.254	0.000	1.243	0.001

Nota. Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales. Elaboración propia.

Tabla 36 *Resultados obtenidos del proceso de secado en el ensayo de la determinación de celulosa en el exocarpio de aguacate*

Secado No.	Peso muestra 1 (g)	Diferencia de masas (g)	Peso muestra 2 (g)	Diferencia de masas (g)	Peso muestra 3 (g)	Diferencia de masas (g)
0	3.873	-	2.114	-	3.132	-
1	1.587	2.286	1.538	0.576	1.557	1.575
2	1.585	0.002	1.529	0.009	1.547	0.010
3	1.583	0.002	1.528	0.001	1.545	0.002
4	1.580	0.003	1.527	0.001	1.544	0.001
5	1.579	0.001	1.526	0.001	1.544	0.000

Nota. Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales. Elaboración propia.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 37

Cálculos de cinética de adsorción primer orden con reversibilidad de exocarpio de aguacate modificado químicamente MESH 8

pH	q_t (mmol/g)	$\log(q_e - q_t)$	$\log(q_e)$	q_e (mmol/g)	C_e (mmol/L)	$k_1/2.303$	k_1 (min ⁻¹)	R^2
2	0.000000	-1.8965						
	0.012618	-4.1361						
	0.012637	-4.2688						
	0.012649	-4.3735	-	0.0017	0.5485	0.0264	0.0607	0.4711
	0.012652	-4.4149	2.7631					
	0.012691	-4.4149						
	0.012691	-4.4149						
	0.012695	-						
3	0.000000	-1.8972						
	0.012556	-3.9378						
	0.012556	-3.9378						
	0.012583	-4.0532	-	0.0016	0.5567	0.0183	0.0422	0.6926
	0.012610	-4.2108	2.8069					
	0.012629	-4.3735						
	0.012660	-4.9378						
	0.012672	-						
4	0.000000	-1.8972						
	0.012595	-4.1139						
	0.012618	-4.2688						
	0.012637	-4.4606	-	0.0013	0.5700	0.0231	0.0531	0.7597
	0.012649	-4.6367	2.8879					
	0.012664	-5.1139						
	0.012668	-5.4149						
	0.012672	-						

Nota. Elaboración propia.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 38

Cálculos de cinética de adsorción primer orden con reversibilidad de exocarpio de aguacate modificado químicamente MESH 10

pH	q _t (mmol/g)	log (q _e - q _t)	log (q _e)	q _e (mmol/g)	C _e (mmol/L)	k ₁ /2.303	k ₁ (min ⁻¹)	R ²
	0.000000	-1.8965						
	0.012668	-4.6367						
	0.012683	-5.1139						
2	0.012687	-5.4149	-2.9324	0.0012	0.5763	0.0391	0.0900	0.6903
	0.012687	-5.4149						
	0.012691	-						
	0.012691	-						
	0.012691	-						
	0.000000	-1.8964						
	0.012656	-4.4149						
	0.012664	-4.5118						
3	0.012687	-5.1139	-2.9472	0.0011	0.5783	0.0303	0.0697	0.7269
	0.012691	-5.4149						
	0.012691	-5.4149						
	0.012695	-						
	0.012695	-						
	0.000000	-1.8964						
	0.012637	-4.2388						
	0.012645	-4.3009						
4	0.012672	-4.6367	-2.9824	0.0010	0.5827	0.0234	0.0540	0.7310
	0.012687	-5.1139						
	0.012687	-5.1139						
	0.012691	-5.4149						
	0.012695	-						

Nota. Elaboración propia.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 39

Cálculos de cinética de adsorción primer orden con reversibilidad de exocarpio de aguacate MESH 8

pH	q_t	$\log(q_e - q_t)$	$\log(q_e)$	q_e	C_e (mmol/L)	$k_1/2.303$	k_1 (min ⁻¹)	R^2
	0.000000	-1.8966						
	0.012656	-4.5118						
	0.012664	-4.6367						
2	0.012656	-4.5118	-3.2591	0.0006	0.6072	0.0173	0.0398	0.4840
	0.012676	-4.9378						
	0.012664	-4.6367						
	0.012676	-4.9378						
	0.012687	-						
	0.000000	-1.8965						
	0.012652	-4.4149						
	0.012656	-4.4606						
3	0.012676	-4.8128	-3.0889	0.0008	0.5940	0.0236	0.0543	0.6973
	0.012683	-5.1139						
	0.012687	-5.4149						
	0.012687	-5.4149						
	0.012691	-						
	0.000000	-1.8972						
	0.012629	-4.3735						
	0.012614	-4.2388						
4	0.012637	-4.4606	-3.0484	0.0009	0.5900	0.0195	0.0449	0.6269
	0.012649	-4.6367						
	0.012656	-4.8128						
	0.012664	-5.1139						
	0.012672	-						

Nota. Elaboración propia.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 40

Cálculos de cinética de adsorción primer orden con reversibilidad de exocarpio de aguacate MESH 10

pH	q_t	$\log(q_e - q_t)$	$\log(q_e)$	q_e	C_e (mmol/L)	$k_1/2.303$	k_1 (min^{-1})	R^2
	0.000000	-1.8965						
	0.012668	-4.6367						
	0.012637	-4.2688						
2	0.012676	-4.8128	-2.9855	0.0010	0.5830	0.0256	0.0590	0.6157
	0.012664	-4.5698						
	0.012687	-5.4149						
	0.012691	-						
	0.012691	-						
	0.000000	-1.8968						
	0.012664	-4.7159						
	0.012668	-4.8128						
3	0.012672	-4.9378	-3.2961	0.0005	0.6095	0.0216	0.0497	0.5839
	0.012672	-4.9378						
	0.012679	-5.4149						
	0.012679	-5.4149						
	0.012683	-						
	0.000000	-1.8977						
	0.012618	-4.4149						
	0.012618	-4.4149						
4	0.012618	-4.4149	-2.6529	0.0022	0.5235	0.0378	0.0870	0.6000
	0.012656	-						
	0.012656	-						
	0.012656	-						
	0.012656	-						

Nota. Elaboración propia.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 41

Cálculos de cinética de adsorción pseudo - segundo orden de exocarpio de aguacate modificado químicamente MESH 8

pH	q _t (mmol/g)	t/q _t	1/k ₂ *q _{m2}	1/q _{m2}	q _{e2}	C _e (mmol/L)	k ₂ (g mmol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²
	0.000000	0.000000						
	0.012618	1585.0610						
	0.012637	3165.2968						
2	0.012649	4743.6131	11.1916	78.7335	0.0127	-0.0003	553.8960	1.0000
	0.012652	6322.8945						
	0.012691	7879.6605						
	0.012691	9455.5926						
	0.012695	11028.182						
	0.000000	0.000000						
	0.012556	1592.8309						
	0.012556	3185.6618						
3	0.012583	4768.2666	19.4864	78.8927	0.0127	0.0010	319.4044	1.0000
	0.012610	6344.1123						
	0.012629	7918.0627						
	0.012660	9478.5779						
	0.012672	11048.270						
	0.000000	0.0000						
	0.012595	1587.9658						
	0.012618	3170.1220						
4	0.012637	4747.9452	9.4647	78.8797	0.0127	0.0009	657.3896	1.0000
	0.012649	6324.8175						
	0.012664	7896.4156						
	0.012668	9472.8211						
	0.012672	11048.270						

Nota. Elaboración propia.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 42

Cálculos de cinética de adsorción pseudo - segundo orden de exocarpio de aguacate modificado químicamente MESH 10

pH	q_t (mmol/g)	t/q_t	$1/k_2 * q_{m2}$	$1/q_{m2}$	q_{e2}	C_e (mmol/L)	k_2 (g mmol ⁻¹ min ⁻¹)	R^2
	0.000000	0.0000						
	0.012668	1578.8035						
	0.012683	3153.7762						
2	0.012687	4729.2298	1.8333	78.7849	0.0127	0.0001	3385.6700	1.0000
	0.012687	6305.6398						
	0.012691	7879.6605						
	0.012691	9455.5926						
	0.012691	11031.525						
	0.000000	0.0000						
	0.012656	1580.2432						
	0.012664	3158.5662						
3	0.012687	4729.2298	4.1474	78.7485	0.0127	-0.0002	1495.2419	1.0000
	0.012691	6303.7284						
	0.012691	7879.6605						
	0.012695	9452.7273						
	0.012695	11028.182						
	0.000000	0.0000						
	0.012637	1582.6484						
	0.012645	3163.3709						
4	0.012672	4734.9727	7.0279	78.7433	0.0127	-0.0002	882.2668	1.0000
	0.012687	6305.6398						
	0.012687	7882.0497						
	0.012691	9455.5926						
	0.012695	11028.182						

Nota. Elaboración propia.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 43

*Cálculos de cinética de adsorción pseudo - segundo orden de exocarpio de aguacate
MESH 8*

pH	q _t (mmol/g)	t/q _t	1/k ₂ *q _{m2}	1/q _{m2}	q _{e2}	C _e (mmol/L)	k ₂ (g mmol ⁻¹ min ⁻¹)	R ²
2	0.000000	0.0000						
	0.012656	1580.2432						
	0.012664	3158.5662						
	0.012656	4740.7295	4.3917	78.8467	0.0127	0.0006	1415.5739	1.0000
	0.012676	6311.3809						
	0.012664	7896.4156						
	0.012676	9467.0713						
	0.012687	11034.870						
3	0.000000	0.0000						
	0.012652	1580.7236						
	0.012656	3160.4863						
	0.012676	4733.5357	4.7890	78.7786	0.0127	0.0000	1295.9003	1.0000
	0.012683	6307.5523						
	0.012687	7882.0497						
	0.012687	9458.4597						
	0.012691	11031.525						
4	0.000000	0.0000						
	0.012629	1583.6125						
	0.012614	3171.0887						
	0.012637	4747.9452	8.0155	78.9081	0.0127	0.0011	776.8012	1.0000
	0.012649	6324.8175						
	0.012656	7901.2158						
	0.012664	9475.6987						
	0.012672	11048.270						

Nota. Elaboración propia.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 44

*Cálculos de cinética de adsorción pseudo - segundo orden de exocarpio de aguacate
MESH 10*

pH	q_t (mmol/g)	t/q_t	$1/k_2 * q_{m2}$	$1/q_{m2}$	q_{e2}	C_e (mmol/L)	k_2 (g mmol ⁻¹ min ⁻¹)	R^2
	0.000000	0.0000						
	0.012668	1578.8035						
	0.012637	3165.2968						
2	0.012676	4733.5357	6.3889	78.7729	0.0127	-0.6345	971.2493	1.0000
	0.012664	6317.1324						
	0.012687	7882.0497						
	0.012691	9455.5926						
	0.012691	11031.525						
	0.000000	0.0000						
	0.012664	1579.2831						
	0.012668	3157.6070						
3	0.012672	4734.9727	2.7136	78.8441	0.0127	-0.6336	2290.7945	1.0000
	0.012672	6313.2969						
	0.012679	7886.8325						
	0.012679	9464.1990						
	0.012683	11038.217						
	0.000000	0.0000						
	0.012618	1585.0610						
	0.012618	3170.1220						
4	0.012618	4755.1829	6.4238	78.9720	0.0127	-0.6312	970.8621	1.0000
	0.012656	6320.9726						
	0.012656	7901.2158						
	0.012656	9481.4590						
	0.012656	11061.702						

Nota. Elaboración propia.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 45

Cálculos de cinética de adsorción modélica de Elovich de exocarpio de aguacate modificado químicamente MESH 8

pH	q_t (mmol/g)	$\ln(t)$	$1/b_E * \ln(a_B * b_E)$	$1/b_E$	β (mmol g ⁻¹)	α (mmol g ⁻¹ min ⁻¹)	R^2
	0.000000	0.0000					
	0.012618	2.9957					
	0.012637	3.6889					
2	0.012649	4.0943	0.0017	0.0026	392.0615	0.0049	0.8509
	0.012652	4.3820					
	0.012691	4.6052					
	0.012691	4.7875					
	0.012695	4.9416					
	0.000000	0.0000					
	0.012556	2.9957					
	0.012556	3.6889					
3	0.012583	4.0943	0.0017	0.0025	393.1791	0.0049	0.8531
	0.012610	4.3820					
	0.012629	4.6052					
	0.012660	4.7875					
	0.012672	4.9416					
	0.000000	0.0000					
	0.012595	2.9957					
	0.012618	3.6889					
4	0.012637	4.0943	0.0017	0.0025	392.6534	0.0049	0.8509
	0.012649	4.3820					
	0.012664	4.6052					
	0.012668	4.7875					
	0.012672	4.9416					

Nota. Elaboración propia.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 46

Cálculos de cinética de adsorción modélica de Elovich de exocarpio de aguacate modificado químicamente MESH 10

pH	q _t (mmol/g)	ln(t)	1/b _E * ln(a _B *b _E)	1/b _E	β (mmol g ⁻¹)	α (mmol g ⁻¹ min ⁻¹)	R ²
2	0.000000	0.0000					
	0.012668	2.9957					
	0.012683	3.6889					
	0.012687	4.0943					
	0.012687	4.3820	0.0017	0.0026	392.0579	0.0050	0.8478
	0.012691	4.6052					
	0.012691	4.7875					
	0.012691	4.9416					
3	0.000000	0.0000					
	0.012656	2.9957					
	0.012664	3.6889					
	0.012687	4.0943					
	0.012691	4.3820	0.0017	0.0026	391.8931	0.0049	0.8489
	0.012691	4.6052					
	0.012695	4.7875					
	0.012695	4.9416					
4	0.000000	0.0000					
	0.012637	2.9957					
	0.012645	3.6889					
	0.012672	4.0943					
	0.012687	4.3820	0.0017	0.0026	391.9220	0.0049	0.8500
	0.012687	4.6052					
	0.012691	4.7875					
	0.012695	4.9416					

Nota. Elaboración propia.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 47

*Cálculos de cinética de adsorción modélica de Elovich de exocarpio de aguacate
MESH 8*

pH	q_t (mmol/g)	$\ln(t)$	$1/b_E * \ln(a_B * b_E)$	$1/b_E$	β (mmol g ⁻¹)	α (mmol g ⁻¹ min ⁻¹)	R^2
	0.000000	0.0000					
	0.012656	2.9957					
	0.012664	3.6889					
2	0.012656	4.0943	0.0017	0.0025	392.5537	0.0050	0.8479
	0.012676	4.3820					
	0.012664	4.6052					
	0.012676	4.7875					
	0.012687	4.9416					
<hr/>							
	0.000000	0.0000					
	0.012652	2.9957					
	0.012656	3.6889					
3	0.012676	4.0943	0.0017	0.0026	392.0961	0.0049	0.8489
	0.012683	4.3820					
	0.012687	4.6052					
	0.012687	4.7875					
	0.012691	4.9416					
<hr/>							
	0.000000	0.0000					
	0.012629	2.9957					
	0.012614	3.6889					
4	0.012637	4.0943	0.0017	0.0025	392.9497	0.0049	0.8492
	0.012649	4.3820					
	0.012656	4.6052					
	0.012664	4.7875					
	0.012672	4.9416					

Nota. Elaboración propia.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 48

*Cálculos de cinética de adsorción modélica de Elovich de exocarpio de aguacate
MESH 10*

pH	q _t (mmol/g)	ln(t)	1/b _E * ln(a _B *b _E)	1/b _E	β (mmol g ⁻¹)	α (mmol g ⁻¹ min ⁻¹)	R ²
	0.000000	0.0000					
	0.012668	2.9957					
	0.012637	3.6889					
2	0.012676	4.0943	0.0017	0.0025	392.2621	0.0049	0.8485
	0.012664	4.3820					
	0.012687	4.6052					
	0.012691	4.7875					
	0.012691	4.9416					
	0.000000	0.0000					
	0.012664	2.9957					
	0.012668	3.6889					
3	0.012672	4.0943	0.0017	0.0025	392.4544	0.0050	0.8476
	0.012672	4.3820					
	0.012679	4.6052					
	0.012679	4.7875					
	0.012683	4.9416					
	0.000000	0.0000					
	0.012618	2.9957					
	0.012618	3.6889					
4	0.012618	4.0943	0.0017	0.0025	393.1373	0.0049	0.8492
	0.012656	4.3820					
	0.012656	4.6052					
	0.012656	4.7875					
	0.012656	4.9416					

Nota. Elaboración propia.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 49

Cálculos de cinética de adsorción difusión intraparticular de exocarpio de aguacate modificado químicamente MESH 8

pH	q_t (mmol/g)	$t^{0.5}$	k_{id} (mmol g ⁻¹ min ^{-1/2})	c	R ²
2	0.000000	0.0000	0.0009	0.0043	0.6186
	0.012618	4.4721			
	0.012637	6.3246			
	0.012649	7.7460			
	0.012652	8.9443			
	0.012691	10.0000			
	0.012691	10.9545			
	0.012695	11.8322			
3	0.000000	0.0000	0.0009	0.0042	0.6218
	0.012556	4.4721			
	0.012556	6.3246			
	0.012583	7.7460			
	0.012610	8.9443			
	0.012629	10.0000			
	0.012660	10.9545			
	0.012672	11.8322			
4	0.000000	0.0000	0.0009	0.0043	0.6184
	0.012595	4.4721			
	0.012618	6.3246			
	0.012637	7.7460			
	0.012649	8.9443			
	0.012664	10.0000			
	0.012668	10.9545			
	0.012672	11.8322			

Nota. Elaboración propia.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 50

Cálculos de cinética de adsorción difusión intraparticular de exocarpio de aguacate modificado químicamente MESH 10

pH	q_t (mmol/g)	$t^{0.5}$	k_{id} (mmol g ⁻¹ min ^{-1/2})	c	R^2
2	0.000000	0.0000			
	0.012668	4.4721			
	0.012683	6.3246			
	0.012687	7.7460			
	0.012687	8.9443	0.0009	0.0043	0.6141
	0.012691	10.0000			
	0.012691	10.9545			
	0.012691	11.8322			
3	0.000000	0.0000			
	0.012656	4.4721			
	0.012664	6.3246			
	0.012687	7.7460			
	0.012691	8.9443	0.0009	0.0043	0.6156
	0.012691	10.0000			
	0.012695	10.9545			
	0.012695	11.8322			
4	0.000000	0.0000			
	0.012637	4.4721			
	0.012645	6.3246			
	0.012672	7.7460			
	0.012687	8.9443	0.0009	0.0043	0.6172
	0.012687	10.0000			
	0.012691	10.9545			
	0.012695	11.8322			

Nota. Elaboración propia.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 51

*Cálculos de cinética de adsorción difusión intraparticular de exocarpio de aguacate
MESH 8*

pH	q_t (mmol/g)	$t^{0.5}$	k_{id} (mmol g ⁻¹ min ^{-1/2})	c	R^2
2	0.000000	0.0000			
	0.012656	4.4721			
	0.012664	6.3246			
	0.012656	7.7460	0.0009	0.0043	0.6145
	0.012676	8.9443			
	0.012664	10.0000			
	0.012676	10.9545			
	0.012687	11.8322			
3	0.000000	0.0000			
	0.012652	4.4721			
	0.012656	6.3246			
	0.012676	7.7460	0.0009	0.0043	0.6157
	0.012683	8.9443			
	0.012687	10.0000			
	0.012687	10.9545			
	0.012691	11.8322			
4	0.000000	0.0000			
	0.012629	4.4721			
	0.012614	6.3246			
	0.012637	7.7460	0.0009	0.0043	0.6164
	0.012649	8.9443			
	0.012656	10.0000			
	0.012664	10.9545			
	0.012672	11.8322			

Nota. Elaboración propia.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 52

*Cálculos de cinética de adsorción difusión intraparticular de exocarpio de aguacate
MESH 10*

pH	q_t (mmol/g)	$t^{0.5}$	k_{id} (mmol g ⁻¹ min ^{-1/2})	c	R^2
2	0.000000	0.0000			
	0.012668	4.4721			
	0.012637	6.3246			
	0.012676	7.7460			
	0.012664	8.9443	0.0009	0.0043	0.6154
	0.012687	10.0000			
	0.012691	10.9545			
	0.012691	11.8322			
3	0.000000	0.0000			
	0.012664	4.4721			
	0.012668	6.3246			
	0.012672	7.7460			
	0.012672	8.9443	0.0009	0.0043	0.6140
	0.012679	10.0000			
	0.012679	10.9545			
	0.012683	11.8322			
4	0.000000	0.0000			
	0.012618	4.4721			
	0.012618	6.3246			
	0.012618	7.7460			
	0.012656	8.9443	0.0009	0.0043	0.6163
	0.012656	10.0000			
	0.012656	10.9545			
	0.012656	11.8322			

Nota. Elaboración propia.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 53

Cálculos para isotermas de Langmuir de exocarpio de aguacate modificado químicamente MESH 8

pH	q _e (mmol/g)	C _e (mmol/L)	1/q _e (mmol/g)	1/C _e (mmol/L)
2	0.000000	0.000000	-	-
	0.012618	0.630891	79.253049	1.585061
	0.012637	0.631852	79.132420	1.582648
	0.012649	0.632429	79.060219	1.581204
	0.012652	0.632622	79.036181	1.580724
	0.012691	0.634545	78.796605	1.575932
	0.012691	0.634545	78.796605	1.575932
	0.012695	0.634737	78.772727	1.575455
3	0.000000	0.000000	-	-
	0.012556	0.627813	79.641544	1.592831
	0.012556	0.627813	79.641544	1.592831
	0.012583	0.629159	79.471110	1.589422
	0.012610	0.630506	79.301403	1.586028
	0.012629	0.631468	79.180627	1.583613
	0.012660	0.633006	78.988149	1.579763
	0.012672	0.633583	78.916211	1.578324
4	0.000000	0.000000	-	-
	0.012595	0.629736	79.398290	1.587966
	0.012618	0.630891	79.253049	1.585061
	0.012637	0.631852	79.132420	1.582648
	0.012649	0.632429	79.060219	1.581204
	0.012664	0.633199	78.964156	1.579283
	0.012668	0.633391	78.940176	1.578804
	0.012672	0.633583	78.916211	1.578324

Nota. Elaboración propia.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 54

Cálculos para isothermas de Langmuir de exocarpio de aguacate modificado químicamente MESH 10

pH	q _e (mmol/g)	C _e (mmol/L)	1/q _e (mmol/g)	1/C _e (mmol/L)
2	0.000000	0.000000	-	-
	0.012668	0.633391	78.940176	1.578804
	0.012683	0.634160	78.844404	1.576888
	0.012687	0.634353	78.820497	1.576410
	0.012687	0.634353	78.820497	1.576410
	0.012691	0.634545	78.796605	1.575932
	0.012691	0.634545	78.796605	1.575932
	0.012691	0.634545	78.796605	1.575932
3	0.000000	0.000000	-	-
	0.012656	0.632814	79.012158	1.580243
	0.012664	0.633199	78.964156	1.579283
	0.012687	0.634353	78.820497	1.576410
	0.012691	0.634545	78.796605	1.575932
	0.012691	0.634545	78.796605	1.575932
	0.012695	0.634737	78.772727	1.575455
	0.012695	0.634737	78.772727	1.575455
4	0.000000	0.000000	-	-
	0.012637	0.631852	79.132420	1.582648
	0.012645	0.632237	79.084271	1.581685
	0.012672	0.633583	78.916211	1.578324
	0.012687	0.634353	78.820497	1.576410
	0.012687	0.634353	78.820497	1.576410
	0.012691	0.634545	78.796605	1.575932
	0.012695	0.634737	78.772727	1.575455

Nota. Elaboración propia.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 55

Cálculos para isothermas de Langmuir de exocarpio de aguacate MESH 8

pH	q _e (mmol/g)	C _e (mmol/L)	1/q _e (mmol/g)	1/C _e (mmol/L)
2	0.000000	0.000000	-	-
	0.012656	0.632814	79.012158	1.580243
	0.012664	0.633199	78.964156	1.579283
	0.012656	0.632814	79.012158	1.580243
	0.012676	0.633776	78.892261	1.577845
	0.012664	0.633199	78.964156	1.579283
	0.012676	0.633776	78.892261	1.577845
	0.012687	0.634353	78.820497	1.576410
3	0.000000	0.000000	-	-
	0.012652	0.632622	79.036181	1.580724
	0.012656	0.632814	79.012158	1.580243
	0.012676	0.633776	78.892261	1.577845
	0.012683	0.634160	78.844404	1.576888
	0.012687	0.634353	78.820497	1.576410
	0.012687	0.634353	78.820497	1.576410
	0.012691	0.634545	78.796605	1.575932
4	0.000000	0.000000	-	-
	0.012629	0.631468	79.180627	1.583613
	0.012614	0.630698	79.277219	1.585544
	0.012637	0.631852	79.132420	1.582648
	0.012649	0.632429	79.060219	1.581204
	0.012656	0.632814	79.012158	1.580243
	0.012664	0.633199	78.964156	1.579283
	0.012672	0.633583	78.916211	1.578324

Nota. Elaboración propia.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 56

Cálculos para isotermas de Langmuir de exocarpio de aguacate MESH 10

pH	q_e (mmol/g)	C_e (mmol/L)	$1/q_e$ (mmol/g)	$1/C_e$ (mmol/L)
2	0.000000	0.000000	-	-
	0.012668	0.633391	78.940176	1.578804
	0.012637	0.631852	79.132420	1.582648
	0.012676	0.633776	78.892261	1.577845
	0.012664	0.633199	78.964156	1.579283
	0.012687	0.634353	78.820497	1.576410
	0.012691	0.634545	78.796605	1.575932
	0.012691	0.634545	78.796605	1.575932
3	0.000000	0.000000	-	-
	0.012664	0.633199	78.964156	1.579283
	0.012668	0.633391	78.940176	1.578804
	0.012672	0.633583	78.916211	1.578324
	0.012672	0.633583	78.916211	1.578324
	0.012679	0.633968	78.868325	1.577367
	0.012679	0.633968	78.868325	1.577367
	0.012683	0.634160	78.844404	1.576888
4	0.000000	0.000000	-	-
	0.012618	0.630891	79.253049	1.585061
	0.012618	0.630891	79.253049	1.585061
	0.012618	0.630891	79.253049	1.585061
	0.012656	0.632814	79.012158	1.580243
	0.012656	0.632814	79.012158	1.580243
	0.012656	0.632814	79.012158	1.580243
	0.012656	0.632814	79.012158	1.580243

Nota. Elaboración propia.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 57

Cálculos para isothermas de Freundlich de exocarpio de aguacate modificado químicamente MESH 8

pH	q _e (mmol/g)	C _e (mmol/L)	k _F
2	0.000000	0.000000	0.020
	0.012618	0.630891	
	0.012637	0.631852	
	0.012649	0.632429	
	0.012652	0.632622	
	0.012691	0.634545	
	0.012691	0.634545	
	0.012695	0.634737	
3	0.000000	0.000000	0.020
	0.012556	0.627813	
	0.012556	0.627813	
	0.012583	0.629159	
	0.012610	0.630506	
	0.012629	0.631468	
	0.012660	0.633006	
	0.012672	0.633583	
4	0.000000	0.000000	0.020
	0.012595	0.629736	
	0.012618	0.630891	
	0.012637	0.631852	
	0.012649	0.632429	
	0.012664	0.633199	
	0.012668	0.633391	
	0.012672	0.633583	

Nota. Elaboración propia.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 58

Cálculos para isothermas de Freundlich de exocarpio de aguacate modificado químicamente MESH 10

pH	q _e (mmol/g)	C _e (mmol/L)	k _F
2	0.000000	0.000000	0.020
	0.012668	0.633391	
	0.012683	0.634160	
	0.012687	0.634353	
	0.012687	0.634353	
	0.012691	0.634545	
	0.012691	0.634545	
	0.012691	0.634545	
3	0.000000	0.000000	0.020
	0.012656	0.632814	
	0.012664	0.633199	
	0.012687	0.634353	
	0.012691	0.634545	
	0.012691	0.634545	
	0.012695	0.634737	
	0.012695	0.634737	
4	0.000000	0.000000	0.020
	0.012637	0.631852	
	0.012645	0.632237	
	0.012672	0.633583	
	0.012687	0.634353	
	0.012687	0.634353	
	0.012691	0.634545	
	0.012695	0.634737	

Nota. Elaboración propia.

Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 59

Cálculos para isotermas de Freundlich de exocarpio de aguacate MESH 8

pH	q_e (mmol/g)	C_e (mmol/L)	k_F
2	0.000000	0.000000	0.020
	0.012656	0.632814	
	0.012664	0.633199	
	0.012656	0.632814	
	0.012676	0.633776	
	0.012664	0.633199	
	0.012676	0.633776	
	0.012687	0.634353	
3	0.000000	0.000000	0.020
	0.012652	0.632622	
	0.012656	0.632814	
	0.012676	0.633776	
	0.012683	0.634160	
	0.012687	0.634353	
	0.012687	0.634353	
	0.012691	0.634545	
4	0.000000	0.000000	0.020
	0.012629	0.631468	
	0.012614	0.630698	
	0.012637	0.631852	
	0.012649	0.632429	
	0.012656	0.632814	
	0.012664	0.633199	
	0.012672	0.633583	

Nota. Elaboración propia.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

Tabla 60

Cálculos para isotermas de Freundlich de exocarpio de aguacate MESH 10

pH	q_e (mmol/g)	C_e (mmol/L)	k_F
2	0.000000	0.000000	0.020
	0.012668	0.633391	
	0.012637	0.631852	
	0.012676	0.633776	
	0.012664	0.633199	
	0.012687	0.634353	
	0.012691	0.634545	
	0.012691	0.634545	
3	0.000000	0.000000	0.020
	0.012664	0.633199	
	0.012668	0.633391	
	0.012672	0.633583	
	0.012672	0.633583	
	0.012679	0.633968	
	0.012679	0.633968	
	0.012683	0.634160	
4	0.000000	0.000000	0.020
	0.012618	0.630891	
	0.012618	0.630891	
	0.012618	0.630891	
	0.012656	0.632814	
	0.012656	0.632814	
	0.012656	0.632814	
0.012656	0.632814		

Nota. Elaboración propia.



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

8 Declaración del coordinador (a) del proyecto de investigación

El coordinador (a) de proyecto de investigación con base en el Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación financiados por medio del Fondo de Investigación, artículos 13 y 20, dejo constancia que el personal contratado para el proyecto de investigación que coordino ha cumplido a satisfacción con la entrega de informes individuales por lo que es procedente hacer efectivo el pago correspondiente.

Inga. Qca. Telma Maricela Cano Morales Coordinadora del Proyecto 4.8.63.5.90	
Fecha: 28/02/2025	

9 Aval del director (a) del instituto, centro, unidad o departamento de investigación o coordinador de investigación del centro regional universitario

De conformidad con el artículo 13 y 19 del Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación financiados por medio del Fondo de Investigación otorgo el aval al presente informe final de las actividades realizadas en el proyecto (escriba el nombre del proyecto de investigación) en mi calidad de (indique: director del instituto, centro, unidad o departamento de investigación o coordinador de investigación del centro universitario), mismo que ha sido revisado y cumple su ejecución de acuerdo a lo planificado.

Vo.Bo. Inga.Qca. Telma Maricela Cano Morales Directora Centro de Investigaciones de Ingeniería	
Fecha: 28/02/2025	



Informe final de Proyecto de Investigación 2024

10 Aprobación de la Dirección General de Investigación

Vo.Bo. Mgtr. Sucelly Orozco de Morales coordinador(a) del programa universitario de investigación Interdisciplinaria en Salud	
Fecha: 28/02/2025	
Coordinador General de Programas	
Fecha: 28/02/2025	

/Digi2024