



FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Ambiental

“Cáscara de mamey para la remoción de
 Cr^{3+} de aguas contaminadas”

Tesis para optar el título profesional de:

INGENIERA AMBIENTAL

Autor:

Raquel Nathali Cotrina Urbina

Asesor:

Dr. Ricardo David Vejarano Mantilla

Trujillo - Perú

2019

DEDICATORIA

A Dios por darme las fuerzas para poder concluir mi carrera, por ayudarme a superar todos los obstáculos, por ser mi guía y siempre protegerme.

A mis padres, por su infinito apoyo, por siempre estar ahí en los momentos más difíciles, por su confianza depositada en mí y por sus sabios consejos para hacer de mí una mejor profesional.

A mi hermana Lizeth por ser un ejemplo para mi vida, por nunca dudar de mí, por siempre apoyarme y animarme a realizar y terminar esta tesis, que sin su presión nunca hubiera terminado, por siempre estar en los malos y buenos momentos de mi vida.

A mis mejores amigos y familiares por su inmenso apoyo en la realización de este proyecto.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por darme las fuerzas para poder culminar este proyecto.

A mis padres Ismael y Shený por su enorme sacrificio de darme una educación de calidad, por convertirme en una profesional, por nunca dudar, por su paciencia y su infinito amor.

A mi hermana Lizeth por siempre estar apoyándome en toda mi vida.

Nuevamente a mis mejores amigos y familiares por su inmenso apoyo en la realización de esta investigación.

A mi asesor al Dr. Ricardo David Vejarano Mantilla, por su apoyo, tiempo y dedicación en la realización y culminación de la presente investigación, obteniendo resultados gratificantes al esfuerzo brindado, le estoy muy agradecida.

Al Ing. Julio César Gurreonero Fernández, Ing. Carmen Seminario, Ing. Alberto Castillo Herrera y Yuliana Pairazamán por la colaboración y dedicación brindada durante el desarrollo experimental y el esfuerzo por obtener buenos resultados.

A la Ing. Natalia del Pilar Díaz Díaz y a la Ing. Jackeline Marilyn León Vargas por el apoyo al acceso de los equipos y laboratorios de Ing. Ambiental e Ing. Agroindustrial de la Universidad Privada del Norte, Trujillo.

Al Ing. Hans Portilla Rodríguez por bríndame su apoyo al acceso al Laboratorio de Química de la Universidad Privada del Norte, Trujillo.

TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTO	3
ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	7
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	9
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	31
CAPÍTULO III. RESULTADOS	40
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	48
REFERENCIAS.....	55
ANEXOS.....	62

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Contenido nutricional del mamey de Cartagena.	19
Tabla 2. Capacidad máxima de adsorción de Cr(III) usando diferentes adsorbentes.	21
Tabla 3. Estándares de Calidad Ambiental para agua.....	27
Tabla 4. Valores Máximos Admisibles para descargas al sistema de alcantarillado.	28
Tabla 5. Operacionalización de variables.....	30
Tabla 6. Modelos para el proceso de adsorción de Cr(III) mediante cáscara de mamey.....	45
Tabla 7. Modelos de cinética de adsorción de Cr(III) mediante la cáscara de mamey.	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Organigrama de remoción de cromo.	15
Figura 2. Organigrama de cáscara de mamey.	18
Figura 3. Adsorción de metales pesados mediante biomasa. Adaptado de Reyes, Cerino & Suarez (2006). .	21
Figura 4. Diagrama del procedimiento de obtención del adsorbente a base de cáscara de mamey. Adaptado de Campos et al. (2018).	33
Figura 5. Diagrama de flujo del procedimiento aplicado en la remoción de Cr(III) mediante cáscara de mamey.	39
Figura 6: Punto de carga cero (pH _{PZC}) del adsorbente a base de cáscara de mamey a distintos valores de pH.	40
Figura 7. Validación del método de digestión.	41
Figura 8. (a) Remoción de Cr(III) por la biomasa de cáscara de mamey a distintos valores de pH en soluciones de 10 y 200 ppm de Cr(III). (b) Remoción de Cr(III) en ausencia de adsorbente, a diferentes valores de pH.	43
Figura 9. Remoción de Cr(III) a distintos tamaños de partícula (µm) de biomasa de cáscara de mamey.	43
Figura 10. Remoción de Cr(III) a diferentes velocidades de agitación (rpm).	44
Figura 11. Capacidad de adsorción de Cr(III) a diferentes tiempos de contacto en soluciones de 20, 50, 100, 250 y 400 ppm de Cr(III).	45
Figura 12. Cinética de adsorción de pseudo - primer orden y de pseudo - segundo orden.	46

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Capacidad de adsorción	22
Ecuación 2. Isoterma de adsorción de Langmuir	24
Ecuación 3. Isoterma de adsorción de Freundlich.....	24
Ecuación 4. Cinética de adsorción pseudo – primer orden.....	25
Ecuación 5. Cinética de adsorción pseudo – segundo orden	26
Ecuación 6. Capacidad de adsorción de Cr(III)	37
Ecuación 7. Porcentaje de remoción de cromo	38
Ecuación 8. Curva de calibración para determinar el Cr(III) residual	40

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue determinar las condiciones óptimas de remoción de cromo III de aguas contaminadas mediante cáscara de mamey (*Mammea americana* L.) como adsorbente. Se prepararon medios modelo con diferentes concentraciones de Cr(III) y dosis de adsorbente de 10 gramos por litro, variando el pH, tamaño de partícula y velocidad de agitación, para determinar los valores óptimos de estos parámetros. Se obtuvieron los mejores resultados a pH 2.9, tamaño de partícula 300 μm y velocidad de agitación de 300 rpm. Así mismo, la adsorción de Cr(III) mediante cáscara de mamey fue descrito por el modelo cinético de pseudo-segundo orden ($R^2 \geq 0.9973$), indicando que el proceso implicado es la adsorción química. Finalmente, Se aplicaron los modelos de Langmuir y Freundlich para evaluar el comportamiento del sistema, con un mejor ajuste para el modelo de Freundlich ($R^2 = 0.9291$), logrando una capacidad de adsorción k de 0.5866, y una intensidad de adsorción n de 1.5876, con un tiempo de equilibrio de 120 minutos. Con base en los resultados se concluye que la cáscara de mamey puede remover el Cr(III) de aguas contaminadas.

Palabras clave: Curtiembre, aguas contaminadas con cromo, adsorción, cáscara de mamey.

ABSTRACT

The aim of the study was to evaluate the capacity of an adsorbent based on mamey apple (*Mammea americana* L.) peel for Cr(III) removal. Model mediums composed of distilled water and different concentrations of Cr(III), with a dose of 10 g of adsorbent per liter, were used. The residual concentrations of Cr(III) were determined by Atomic Absorption Spectro-photometry, obtaining optimum values of pH of 2.9, adsorbent particle size of 300 μm , and stirring rate of 300 rpm, for Cr(III) removal. Kinetics studies indicate a chemical adsorption process, with the best adjustment to pseudo-second order models ($R^2 \geq 0.9973$), a contact time of 120 minutes to reach the adsorbent- Cr(III) equilibrium, and a good fit to the Freundlich model ($R^2 = 0.9291$), with an adsorption intensity n of 1.5876. So, our results suggest that Cr(III) ions can be removed by using mamey apple peel-adsorbent.

Keywords: Leather tanning, chromium-contaminated waters, adsorption, mamey apple peel.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

A nivel mundial el crecimiento de las industrias ha traído consigo serios problemas de contaminación, uno de ellos son los generados por la industria de curtiembre que genera serias complicaciones en la salud humana y de contaminación ambiental, especialmente de suelo y aguas. Los efluentes de esta industria son vertidos al ambiente conteniendo metales pesados, considerados altamente contaminantes y tóxicos debido a que superan los límites máximos permisibles (Mendoza y Carranza, 2006). Uno de ellos es el cromo (Cr), usado en el proceso de curtimiento de las pieles.

Sudamérica no es ajeno a este problema. Por ejemplo, Buenos Aires, Argentina sufre problemas a causa de las descargas de agua de curtiembres en la cuenca Matanza – Riachuelo, lo que ha traído consecuencias directas al territorio metropolitano. La Secretaria Ambiental y Desarrollo Sustentable de la Nación (2006), estimaba que el 50 % del deterioro del ambiente es causado por las industrias de las curtiembres.

En Perú, las industrias están atravesando por un estado difícil ya que las curtiembres formales están cerrando y aparecen como informales (Vásquez, 2015). Así mismo, las curtiembres formales alquilan sus locales a curtidores informales como un medio para generar ingresos, y para agravar el problema, hoy en día se encuentran ubicadas en medio de la zona urbana, debido al crecimiento de las ciudades, generando una preocupación en los residentes, debido al mal manejo de los desechos sólidos, del agua sin tratar y de los malos olores (Vásquez, 2015).

A nivel regional, el distrito de Trujillo es uno de los principales productores de calzado. Según la Gerencia Regional de la Producción, en el año 2012, en la

provincia de Trujillo existían 140 curtiembres registradas, distribuidas en los distritos de El Porvenir, La Esperanza, Florencia de Mora, Moche, Trujillo, Huanchaco, Laredo y Víctor Larco, con la mayor concentración de curtiembres ubicadas en La Esperanza y El Porvenir.

Las curtiembres cuentan con etapas para la transformación de la piel en cuero. En ese transcurso, la piel pasa por el proceso de curtido mediante sales de cromo, lo cual genera efluentes que salen del proceso de curtido con concentraciones superiores a 20 ppm de cromo total (Mendoza et al., 2006).

En la actualidad, existen varios estudios para disminuir la contaminación y limpiar los efluentes industriales con diferentes mecanismos, como coagulación y floculación, osmosis inversa, nanotecnología, adsorción y los sistemas de tratamiento natural (Lavado, Sun Kou y Recuay, 2012). Una tecnología emergente es la utilización de biomasa de cáscaras de frutas u otras estructuras vegetales para el tratamiento de metales pesados por medio de la adsorción en soluciones acuosas, debido a la afinidad entre los grupos funcionales de la biomasa y el metal (Tejada, Villabona y Garcés, 2015). Además, la biomasa es fácil de conseguir en grandes cantidades, fácil de transportar, de bajo costo y considerado material de desecho.

1.2. Antecedentes

Jayson, Sangster, Thompson & Wilkinson (1993), utilizaron tela de carbón activado para remover Cr(III) de un medio acuoso contaminado. A partir de una concentración inicial de Cr(III) de 100 mg/L, pH de 3.0 y un tiempo de contacto de 40 minutos, lograron un 95 % de adsorción, concluyendo que la tela de carbón activado es eficiente para remoción Cr(III) .

Cano, Pérez, Gutiérrez y Gardea (2002), utilizaron biomasa de sorgo para remover Cr(III) de un medio acuoso contaminado. A partir de una concentración inicial de Cr(III) de 6,3 mg/L, pH de 5.0, concentración de adsorbente de 5 mg/ml y un tiempo de contacto de 15 minutos, lograron un 90 % de adsorción, concluyendo que la biomasa de sorgo es eficiente para la remoción de Cr(III) .

Tenorio (2006), utilizó hueso de aceituna para remover Cr(III) . A partir de una concentración inicial de Cr(III) de 10 mg/L, pH de 4.0, concentración de adsorbente de 10 g/L y un tiempo de contacto de 60 minutos, lograron un 85 % de adsorción, concluyendo que el hueso de aceituna es eficiente para la remoción Cr(III) .

Anwar et al. (2009), utilizaron carbón como adsorbente para remover Cr(III) . A partir de una concentración inicial de Cr(III) de 50 mg/L, pH de 5.0, concentración de adsorbente de 45 g/L y un tiempo de contacto de 50 minutos, lograron un 92.40 % de adsorción, concluyendo que el carbón es eficiente para la remoción de Cr(III) .

Pinzón y Vera (2009), utilizaron cáscara de naranja para remover Cr(III) de un medio acuoso contaminado. A partir de una concentración inicial de Cr(III) de 100 mg/L, pH de 5.0, concentración de adsorbente de 4 g/L y un tiempo de contacto de 60 minutos, lograron un 61.52 % de adsorción, concluyendo que la cáscara de naranja es eficiente para la remoción de Cr(III) .

Duarte, Olivero y Jaramillo (2009), utilizaron quitosano de camarón modificado químicamente para remover Cr(III) de un medio acuoso contaminado. A partir de una concentración inicial de Cr(III) de 250 mg/L, a pH de 4.0, concentración de adsorbente de 0.2 g/L y un tiempo de contacto de 45 minutos, lograron un 85 % de

adsorción, concluyendo que el quitosano de camarón es eficiente para la remoción de Cr(III) .

Netzahuatl, Pineda, Barragán y Cristiani (2010), utilizaron cáscara de aguacate para remover Cr(VI) y Cr total. A partir de una concentración inicial de Cr(VI) de 102 mg/L, pH de 2.0, concentración de adsorbente de 1 g/L y un tiempo de contacto de 120 minutos, lograron un 96 % de adsorción, concluyendo que la cáscara de aguacate es eficiente para la remoción de cromo.

Netzahuatl et al. (2010), utilizaron corteza de *Pyrus communis* para remover Cr(VI) y Cr total. A partir de una concentración inicial de Cr(VI) de 102 mg/L, pH de 2.0, concentración de adsorbente de 1 g/L y un tiempo de contacto de 120 minutos, logrando un 95 % de adsorción, concluyendo que la corteza de *Pyrus communis* es eficiente para la remoción de cromo.

Pineda, Netzahuatl y Cristiani (2011), utilizaron tegumento de la nuez pecanera para remover Cr(VI) y Cr total de un medio acuoso contaminado. A partir de una concentración inicial de Cr(VI) de 102 mg/L, pH de 2.0, concentración de adsorbente de 1 g/L y un tiempo de contacto de 180 minutos, lograron un 95 % de adsorción, concluyendo que el tegumento de la nuez pecanera es eficiente para la remoción de cromo.

Acosta et al. (2012), utilizaron cáscara de mamey para remover Cr(VI) de un medio acuoso contaminado. A partir de una concentración inicial de Cr(VI) de 100 mg/L, pH de 1.0, concentración de adsorbente de 1 g/L y un tiempo de contacto de 50 minutos, lograron un 95 % de adsorción, concluyendo que la cáscara de mamey es eficiente para la remoción de Cr(VI) .

Pan, Jiang & Xu (2013), utilizaron carbones derivados de paja de cultivos para remover Cr(III) de soluciones ácidas. A partir de una concentración inicial de Cr(III) de 100 mg/L, pH de 4.0, concentración de adsorbente de 0.100 g/L y un tiempo de contacto de 120 minutos. Lograron un 90 % de adsorción, concluyendo que los carbones son eficientes para la remoción Cr(III) .

Pérez, Calzado, Cascaret y Tur (2014), utilizaron cáscara de coco para remover Cr(VI) . A partir de una concentración inicial de Cr(VI) de 100 mg/L, pH de 3.0, concentración de adsorbente de 5 g/L y un tiempo de contacto de 60 minutos, lograron un 96.85 % de adsorción, concluyendo que la cáscara de coco es eficiente para la remoción de Cr(VI) .

Elabbas et al. (2015), utilizaron cáscara de huevo y polvo de mármol para remover Cr(III) de aguas residuales. A partir de una concentración inicial de Cr(III) de 3.0 mg/L, pH de 5.0, concentración de adsorbente de 20 g/L de cáscara de huevo y 12 g/L de polvo de mármol, con un tiempo de contacto de 840 minutos para la cáscara de huevo y 30 minutos para el polvo de mármol, lograron un 40 % de adsorción con polvo de mármol y 25 % de adsorción con cáscara de huevo, concluyendo que ambos materiales son eficientes para la remoción de Cr(III) .

Ashraf, Khalid & Fazal (2016), utilizaron cáscara de banano modificado químicamente para remover Cr(VI) de un medio acuoso contaminado. A partir de una concentración inicial de Cr(VI) de 400 mg/L, pH de 3.0, concentración de adsorbente de 4 g/L y un tiempo de contacto de 120 minutos, lograron un 96 % de adsorción, concluyendo que la cáscara de banano es eficiente para la remoción de Cr(VI) .

1.3. Bases teóricas

1.3.1. Remoción de cromo

En base a la Figura 1, se describirán los aspectos más importantes relacionados con la remoción del cromo y sus efectos sobre el medio ambiente y sobre la salud.

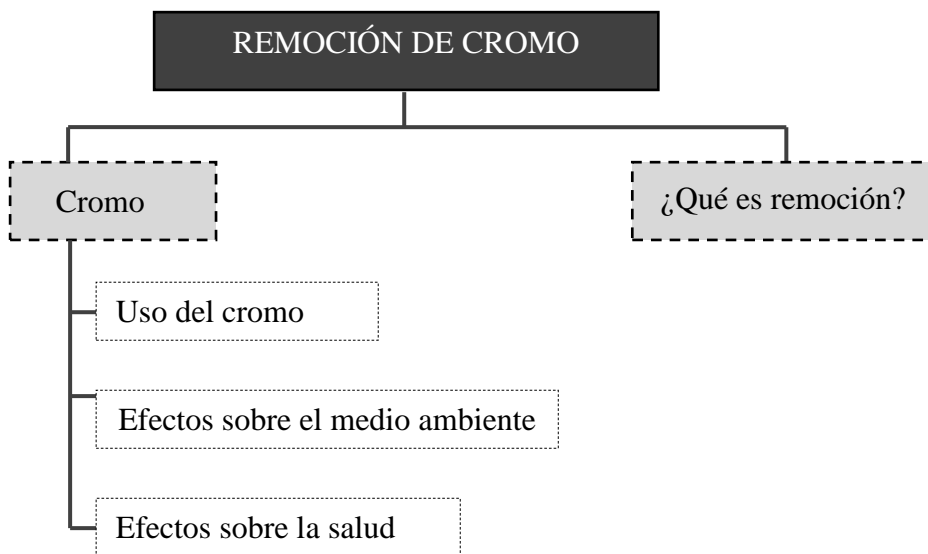


Figura 1. Organigrama de remoción de cromo.

1.3.1.1. ¿Qué es remoción?

Es la eliminación del metal en un medio acuoso, ya sea agua residual de industrias, agroindustrias, metalúrgicas, etc. La remoción, depende de diferentes factores y diferentes técnicas de tratamientos de metales pesados, desde técnicas comunes que siempre se emplean, hasta técnicas innovadoras para la eliminación de metales pesados (Caviedes, Muñoz, Perdomo, Rodríguez y Sandoval, 2015).

1.3.1.2. Cromo

El cromo (Cr) es uno de los elementos que se encuentra en la corteza terrestre, es un compuesto tóxico encontrado en diferentes estados de oxidación, los más principales son el Cr(III) y Cr(VI), siendo este último el más peligroso.

El cromo tiene diferentes características según sus estados de oxidación. El Cr(III) es de color verde y el Cr(VI) es naranja y/o amarillo (Coreño, Tomasini y López, 2010). El cromo Cr(III) es más estable y forma otros compuestos dedicados para el comercio (Nordberg, 2010).

1.3.1.3. Uso del cromo

El cromo (Cr), tiene una amplia variedad de usos en el mercado. Es utilizado para formar el acero inoxidable y como anticorrosivo. Las curtiembres también hacen uso de cromo para el proceso de convertir la piel en cuero, en la etapa de curtido, para darle características finales al cuero. Además, las industrias de productos textiles también lo usan. Del mismo modo se utiliza en la conservación de madera, fabricación de vidrios y esmaltes de diferentes colores (Nordberg, 2010).

1.3.1.4. Efectos sobre el medio ambiente

El Cr es un metal que por naturaleza se encuentra en la corteza terrestre, pero, por las actividades antropológicas, este se ha convertido en un gran causante de daños al medio ambiente. El Cr puede ser encontrado en aire, suelo y agua, después de ser liberado por las industrias, sin embargo, la mayor parte se encuentra en el agua y el suelo (Agencia de Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades [ATSDR], 2012).

El agua es una de las principales fuentes contaminadas por los efluentes de las industrias, estas aguas se convierten en aguas residuales ya que han sido modificadas por actividades humanas, y antes de ser expulsadas a un cuerpo natural de agua o al sistema de alcantarillado necesitan un tratamiento previo (Organismo

de Evaluación y Fiscalización Ambiental [OEFA], 2014). Sin embargo, existen industrias que sobrecargan sus plantas de tratamientos, llevando consigo que excedan los límites máximos permisibles y no cumplan con los estándares de calidad, provocando más problemas de contaminación (OEFA, 2014).

El suelo es otra principal fuente contaminada por las industrias, ya que no todas cuentan con plantas de tratamiento de sus aguas residuales y son vertidas al ambiente llegando a disposiciones finales de regadío. Estudios reportan la presencia de metales tales como mercurio (Hg), arsénico (As), plomo (Pb), cadmio (Cd), zinc (Zn), níquel (Ni) y cromo (Cr) en hortalizas tales como lechuga, repollo, calabaza, brócoli y papa (Singh, Kumar, Agrawal & Marshall, 2010). Las concentraciones de dichos metales son mucho mayores en las hojas que en las raíces de las plantas (Reyes, Vergara, Torres, Díaz y Gonzales, 2016).

1.3.1.5. Efectos sobre la salud

El cromo también ocasiona problemas en la salud, ya que generalmente las industrias lo utilizan en sus procesos. La mayoría de los trabajadores están expuestos a contaminarse con cromo, siendo los trabajadores de las empresas metalúrgicas y de curtido los más expuestos (ATSDR, 2012). Los problemas más comunes en la salud a causa del cromo son los relacionados con las vías respiratorias como irritaciones en la nariz, secreción nasal, problemas de respiración y sarpullidos en la piel (ATSDR, 2012).

El cromo (VI) es el más peligroso, es por ello que se recomienda usar el cromo (III), pero existen industrias que aún usan el cromo (VI), causando problemas de salud mucho más graves, es por ello que la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) determinó que el cromo (VI) clasifica

como sustancia carcinogénica en seres humanos (ATSDR, 2012). El cáncer al pulmón es uno de los principales problemas en los trabajadores ya que son los más expuestos, sin embargo, se transforma en cromo (III) y deja gran parte del cuerpo por medio de la orina, aunque parte de ello no se elimine y quede retenido por muchos años (ATSDR, 2012).

1.3.2. Adsorbente a base de cáscara de mamey

En base al organigrama mostrado en la Figura 2, se describirán los aspectos más importantes relacionados con el adsorbente utilizado para la remoción de cromo, es decir la cáscara de mamey.

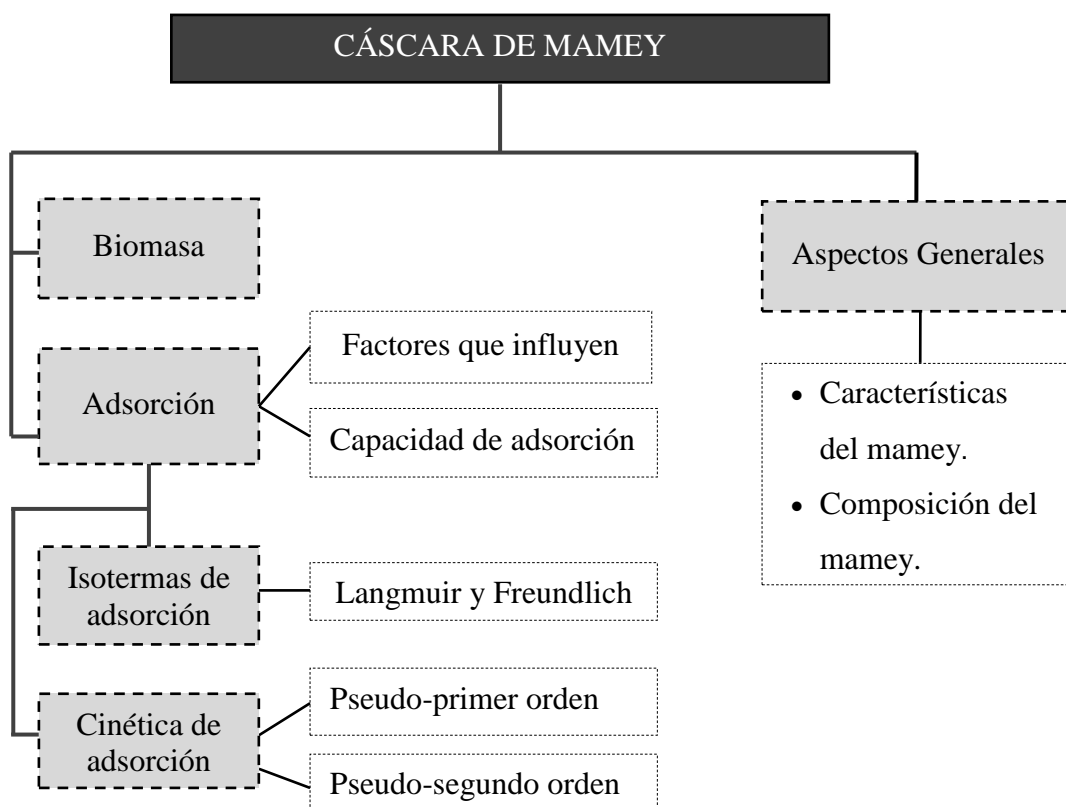


Figura 2. Organigrama de cáscara de mamey.

1.3.2.1. Aspectos Generales

Características del mamey

El mamey es conocido como otere, mamay, mata serrana, mamey de Cartagena de Indias o mamey de Santo Domingo. Es un árbol grande de 18 a 25 metros de altura, pertenece a la familia Calophyllaceae, siendo su nombre científico *Mammea americana L.* El mamey es originario de las Antillas y del norte de América del Sur, y crece en regiones de climas tropicales (Morales, Díaz, Fortich, Rodríguez y Yanes, 2017).

El mamey está presente en diferentes departamentos de la costa del Perú. Los meses de mayor producción son marzo y abril, siendo el departamento de Lambayeque el que más produce (Julca y Vásquez, 2018). El mamey es confundido en su mayoría con el zapote o mamey colorado (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2006).

La Tabla 1 muestra la composición química del mamey (López y Moreira, 2015).

Tabla 1

Contenido nutricional del mamey de Cartagena.

Compuesto	Cantidad
Calorías	44.40 – 45.30
Agua	85.50 – 87.60 g
Carbohidratos	11.52 – 12.67 g
Grasas	0.15 – 0.99 g
Proteínas	0.047 – 0.088 g
Fibra	0.80 – 1.07 g
Cenizas	0.17 – 0.29 g
Calcio	4.00 – 19.50 mg
Fósforo	7.80 – 14.50 mg
Hierro	0.15 – 2.51 mg
Tiamina	0.017 – 0.030 mg
Riboflavina	0.025 – 0.068 mg

Niacina	0.160 – 0.738 mg
Ácido Ascórbico	10.20 – 22.0 mg

Nota: Contenido nutricional del mamey de Cartagena.

Adaptado de “Fichas Técnicas, Frutas” (FAO, 2006).

1.3.2.2. Biomasa

La biomasa es materia orgánica de origen vegetal y animal, que puede ser aprovechada con diferentes fines. La biomasa residual de origen vegetal es más utilizada en la adsorción de metales ya sea en forma de cáscara de frutos secos, huesos de aceitunas, residuos de industrias madereras (astillas, cortezas y aserrines), residuos de agroindustrias, etc. (Tejada et al., 2015). La biomasa está conformada por celulosa, hemicelulosa, pectina y lignina, los cuales tienen propiedades de adsorber metales pesados en su superficie, ya que contienen grupos funcionales capaces de enlazar estos metales mediante el fenómeno de adsorción química (Chasquibol, Arroyo y Morales, 2008).

1.3.2.3. Adsorción

La adsorción es un tipo de sorción, definido como la retención de una sustancia por otra cuando están en contacto. La adsorción es un proceso de una fase líquida (agua) que contienen sustancias que serán adsorbidas (ión de metal pesado o adsorbato) y una fase sólida (adsorbente) la que se encargará de adsorber el adsorbato (Tejada et al., 2015) (Figura 3).

Durante el proceso de la adsorción están relacionados el adsorbente y el adsorbato. El adsorbente es el sólido (biomasa) donde se concentra el contaminante que se desea remover. Por otro lado, el adsorbato (iones de metales pesados) es la sustancia adsorbida que se concentra en la superficie del adsorbente (Lagos, 2016).

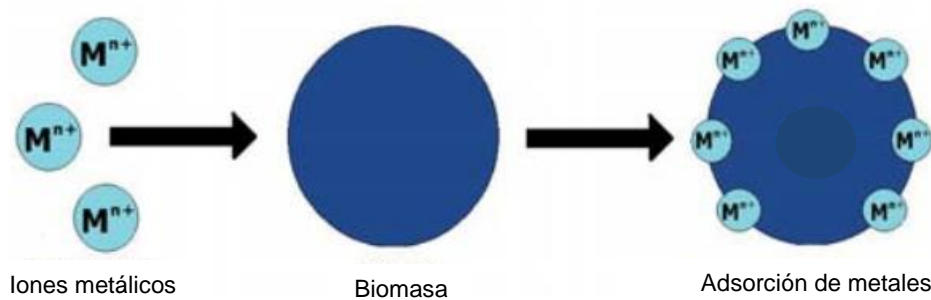


Figura 3. Adsorción de metales pesados mediante biomasa. Adaptado de Reyes, Cerino & Suarez (2006).

En la Tabla 2 se muestran valores de capacidad máxima de adsorción (Q_{\max}) de otros adsorbentes, obtenidos en diferentes estudios previos.

Tabla 2

Capacidad máxima de adsorción de Cr(III) usando diferentes adsorbentes.

Adsorbentes	Q_{\max} (mg/g)	Referencia
Cáscara de huevo	200.25	Elabbas et al. (2015)
Mármol en polvo	434.82	
Campos de carbón de Lokhra	2.61	Anwar et al. (2009)
Campos de carbón de Thar	2.55	
Paja de maní	0.48	Pan, Jiang & Xu (2013)
Paja de soja	0.33	
Paja de arroz	0.28	
Paja de canola	0.27	
Carbón activado	0.12	
Quitosano de camarón	52	Duarte, Olivero & Jaramillo (2009)
Hueso de aceituna	5.185	Tenorio (2006)

Nota: Q_{\max} = Capacidad máxima de adsorción (mg de contaminante /g de biomasa)

A. Factores que influyen en el proceso de adsorción

pH

Encontrar el pH óptimo es esencial para la adsorción, porque este afecta tanto al adsorbato como a la disposición de posibles puntos de unión en el adsorbente (Lagos, 2016).

Temperatura

La temperatura influye ya que la reacción de adsorción es de naturaleza exotérmica, por lo tanto, al disminuir la temperatura el grado de adsorción será mayor y viceversa (Calderón, 2005).

Tamaño de partícula

El tamaño de partícula influye en la adsorción, pues partículas pequeñas tienen mayor área superficial interna, sobre las paredes de los poros en puntos esenciales (Tejada et al., 2015).

Tiempo de contacto

La influencia del tiempo de contacto en el proceso de adsorción de metales está relacionada con el punto de equilibrio. Al alcanzar el punto de equilibrio, un mayor tiempo de agitación no propiciará más adsorción (Izquierdo, 2010).

B. Capacidad de adsorción

En los trabajos experimentales es fundamental determinar la cantidad de adsorción de contaminante en diferentes tiempos por unidad de masa del adsorbente, lo cual se obtiene mediante la ecuación 1 (Izquierdo, 2010).

$$q = \frac{(C_i - C_t)}{M} \times V \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde: q es la adsorción de contaminante en un medio (mg contaminante/g adsorbente), V es el volumen de la solución (L), C_i es la concentración inicial del contaminante en solución (mg/L), C_t concentración del contaminante en el tiempo t (mg/L) y M la masa del adsorbente (g) (Demirbas, 2008).

1.3.2.4. Isotermas de adsorción

Las isotermas son especialmente usadas para describir el proceso de adsorción, proceso que depende ampliamente de ciertas condiciones como la temperatura del sistema, es por ello que la temperatura debe ser fija (Lagos, 2016). Esta función está relacionada a la cantidad adsorbida, bajo condiciones de equilibrio y la concentración en equilibrio de su precursor en el fluido (Rios, 2014).

Entre las isotermas que describen el proceso de adsorción están las de Langmuir, de Freundlich, de Brunauer-Emmet-Teller (BET), etc. Siendo las más usadas en procesos de sólido-líquido las dos primeras.

a. Isoterma de Langmuir:

Esta isoterma es característica de sistemas microporosos. Cuando una solución entra en contacto con un adsorbente, se establece un equilibrio formando una fuerte interacción adsorbato - adsorbente. El equilibrio dependerá de la estabilidad relativa de la fase adsorbida, la temperatura del sistema y la concentración del medio (Lagos, 2016).

Además, la adsorción máxima se restringe a una monocapa y no existen interacciones laterales entre moléculas/átomos/iones del adsorbato (Lazo, Navarro, Sun Kou y Llanos, 2008).

La superficie del adsorbente tiene un número específico de sitios donde el adsorbato puede ser adsorbido, es por ello que al formarse la monocapa la adsorción alcanza la saturación. Al mismo tiempo, el proceso de adsorción tiene lugar sobre una superficie homogénea permaneciendo las moléculas/átomos/iones adsorbidos inmóviles (Rios, 2014).

La expresión que adopta la isoterma se obtiene en la ecuación (2):

$$q_e = q_{max} \frac{b.C_e}{1+b.C_e} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde: q_e es la cantidad de soluto retenido en el adsorbente en el equilibrio (mg/g), C_e es la concentración de soluto en el equilibrio (mg/L), q_{max} es la capacidad máxima de adsorción (mg/g) y b es la afinidad de los sitios de unión (L/mg) (Tejada et al., 2015).

b. Isoterma de Freundlich:

Esta isoterma asume que la superficie del adsorbente es heterogénea, es decir, los sitios de adsorción con la misma energía de interacción adsorbato-adsorbente se encuentran agrupados en pequeñas áreas las cuales son independientes y no equivalentes (Lagos, 2016). En esta isoterma no hay un recubrimiento límite ni se propone una adsorción monocapa, si no multicapa (Linares, 2018).

Se caracteriza por la siguiente ecuación (3):

$$q_e = K_f . C_e^{1/n} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde: q_e es la concentración del soluto retenido en el adsorbente en el equilibrio (mg/g), C_e es la concentración de soluto en la solución en el

equilibrio (mg/L), K_f es la constante de capacidad de adsorción y n es la constante de intensidad de adsorción (Tejada et al., 2015).

1.3.2.5. Cinética de adsorción

Describe la velocidad de fijación del adsorbato, lo cual controla el tiempo de residencia de este en la interfase sólida – líquida. Así mismo este permite predecir la velocidad a la cual el contaminante se remueve del efluente tratado (Linares, 2018).

Existen varios modelos que describen el proceso de la cinética de adsorción, aunque los modelos más conocidos son los de pseudo - primer orden y pseudo - segundo orden.

A. Pseudo - primer orden

La cinética de primer orden se basa en la suposición de que cada ión de metal pesado se le asigna un sitio de adsorción del material adsorbente (Rios, 2014), se expresa en la ecuación 4:

$$q_t = q_e(1 - e^{-K_1 t}) \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde: q_t es la cantidad adsorbida en el tiempo (mmol/g), q_e es la cantidad de adsorción en el equilibrio (mmol/g) y K_1 es la constante de pseudo - primer orden (min⁻¹) (Tejada et al., 2015).

B. Pseudo - segundo orden

Este modelo asume que la capacidad de adsorción es proporcional al número de centros activos del adsorbente, usualmente se atribuye este modelo al proceso que envuelve un mecanismo de adsorción química

(Rios, 2014). La ecuación de este modelo se muestra en la siguiente expresión:

$$\frac{dq}{dt} = K_2(q_e - q_t)^2 \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde: K_2 es la constante de pseudo - segundo orden (g/mmol.min), q_e es la cantidad de adsorción en el equilibrio (mmol/g) y h la velocidad inicial de adsorción (mmol/g.min), a partir de: $h = K_2 \cdot q_e^2$ (Lavado, 2012).

1.4. Marco Normativo

Ley General del Ambiente

Ley N° 28611, publicada el 15 de octubre del 2005. En el capítulo 3 CALIDAD AMBIENTAL, artículo 113.2 establece que son objetivos de la gestión ambiental en materia de calidad ambiental:

- a. Preservar, conservar, mejorar y restaurar, según corresponda, la calidad del aire, el agua y los suelos y demás componentes del ambiente, identificando y controlando los factores de riesgo que la afecten.
- b. Prevenir, controlar, restringir y evitar según sea el caso, actividades que generen efectos significativos, nocivos o peligrosos para el ambiente y sus componentes, en particular cuando ponen en riesgo la salud de las personas.
- c. Recuperar las áreas o zonas degradadas o deterioradas por la contaminación ambiental.
- d. Prevenir, controlar y mitigar los riesgos y daños ambientales procedentes de la introducción, uso, comercialización y consumo de bienes, productos, servicios o especies de flora y fauna.

- e. Prevenir y controlar los factores de riesgo a la calidad del ambiente y sus componentes.
- f. Promover el desarrollo de la investigación científica y tecnológica, las actividades de transferencia de conocimientos y recursos, la difusión de experiencias exitosas y otros medios para el mejoramiento de la calidad ambiental.

Estándares de Calidad Ambiental (ECAs) para agua

Decreto supremo N° 004-2017- MINAM. Aprobado el 7 de junio del 2017, en el que se establecen los estándares de calidad ambiental para aguas.

Tabla 3

Estándares de Calidad Ambiental para agua.

Categoría 4 : Conservación del ambiente acuático						
Parámetro	Unidad de medida	E1: Lagunas y lagos	E2: Ríos		E3: Ecosistemas costeros y marinos	
			Costa y Sierra	Selva	Estuarios	Marinos
INORGÁNICOS						
Cromo hexavalente	mg/L	0.011	0.011	0.011	0.05	0.05

Nota: Adaptado del Decreto Supremo N° 004-2017- MINAM.

Valores Máximos Admisibles (VMA)

Decreto supremo N° 010-2019-VIVIENDA. Aprobado el 19 de marzo del 2019, que aprueba el reglamento de los Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas de alcantarillado sanitario.

Tabla 4

Valores Máximos Admisibles para descargas al sistema de alcantarillado.

Parámetro	Unidad	Simbología	VMA Para Descargas Al Sistema De Alcantarillado
Cromo hexavalente	mg/L	Cr(VI)	0.5
Cromo total	mg/L	Cr	10

Nota: Adaptado del Decreto Supremo N° 010-2019-VIVIENDA.

1.5. Definición de términos básicos

- **Metales pesados:** Son grupos de elementos químicos que tienen una densidad alta, mayor a 4 g/mL, siendo en su mayoría tóxicos para los seres humanos (Londoño et al., 2016). Entre ellos destacan el cromo, plomo, mercurio, hierro, cobre, cadmio y zinc (OEFA, 2016).
- **Tóxico:** Son los efectos venenosos o mortales causados en el cuerpo por la inhalación, la ingestión o contacto directo con una sustancia química, generando efectos secundarios no deseados (ATSDR, 2012).
- **Biomasa:** Es materia orgánica, terrestre o subterránea siendo utilizada como biomasa viva o muerta para los proyectos de investigación en forma de harina de cáscaras de frutas, de corteza de árboles, etc. (Reyes et al., 2006).
- **Efluentes:** Son residuos líquidos vertidos a un cuerpo receptor (ríos, lagos, mar). (OEFA, 2014).
- **Tiempo óptimo:** Punto de equilibrio que alcanza en la agitación el adsorbato con el adsorbente (Izquierdo, 2010).

1.6. Formulación del problema

¿A qué condiciones óptimas se logra la máxima remoción de cromo III de aguas contaminadas mediante cáscara de mamey (*Mammea americana* L.)?

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo general

Determinar las condiciones óptimas de remoción de cromo III de aguas contaminadas mediante cáscara de mamey (*Mammea americana* L.).

1.7.2. Objetivos específicos

- Determinar el pH óptimo de remoción de cromo III de aguas contaminadas.
- Determinar el tamaño óptimo de partícula de la cáscara de mamey para la remoción de cromo III de aguas contaminadas.
- Determinar la velocidad de agitación óptima para la remoción de cromo III de aguas contaminadas.
- Determinar el tiempo óptimo de contacto adsorbente- adsorbato para la remoción de cromo III de aguas contaminadas.
- Determinar la capacidad e intensidad de adsorción de cromo III de la cáscara de mamey.

1.8. Hipótesis

Las condiciones óptimas para la remoción de cromo III de aguas contaminadas mediante cáscara de mamey (*Mammea americana* L.) se logra en valores de pH 4.0, tamaño de partícula 300 µm y una velocidad de agitación de 300 rpm, con un tiempo de contacto de 90 minutos.

Tabla 5

Operacionalización de variables.

	VARIABLE	DEFINICION CONCEPTUAL	DEFINICION OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDAD
INDEPENDIENTE	pH	El efecto del pH es muy importante para la adsorción de diferentes metales ya que afecta al adsorbato, actuando sobre su estado de oxidación en el medio (Lagos, 2016).	pH óptimo para la adsorción, porque afecta al adsorbato como a la disposición de probables puntos de unión en el adsorbente.	pH	Valor de pH	Adimensional
	Tamaño de partícula	La adsorción ocurre en el interior de las partículas, sobre las paredes de los poros. El área de superficie interna aumenta con la disminución del tamaño de partícula, proporcionando mayor número de sitios de unión del metal (Tejada et al., 2015).	El tamaño de partícula es proporcional a la superficie disponible para la interacción adsorbente-adsorbato.	Número de malla	Número de malla	μm
	Velocidad de agitación	La velocidad de agitación ayuda al adsorbato a superar la resistencia de transferencia de masa de la capa límite (Pathak et al., 2015).	La velocidad de agitación óptima es necesaria para que el adsorbato entre en los poros del adsorbente.	Velocidad de agitación	Velocidad de agitación	RPM
	Tiempo de contacto	El tiempo de contacto es el tiempo necesario para la unión entre el adsorbente y el adsorbato con la finalidad de encontrar el punto de equilibrio (Bejarano et al., 2016).	Es necesario determinar el tiempo de contacto óptimo, y así estimar el mayor porcentaje de remoción de cromo III.	Tiempo de contacto	Tiempo de contacto	Minutos
DEPENDIENTE	Remoción de cromo III	Remoción de cromo III mediante el proceso de adsorción química (Duarte et al., 2009).	Remoción de cromo III por medio de adsorción con un adsorbente a base de cáscara de mamey.	Capacidad de adsorción	Masa de Cr(III) adsorbida por masa de adsorbente (q)	mg/g

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación

La siguiente investigación, según su propósito es aplicada y según el diseño de investigación es experimental pura.

2.2. Materiales, instrumentos y métodos

2.2.1. Materiales de laboratorio

- Fiolas de vidrio de 50, 250 y 500 mL.
- Vasos de precipitación Pírex de 200, 250 y 100 mL.
- Papel filtro.
- Lunas de reloj de vidrio.
- Pastillas magnéticas.
- Tubos falcón con tapa rosca de 50 mL.

2.2.2. Material biológico

- Cáscara de mamey.

2.2.3. Instrumentos

- Espectrofotómetro de Absorción Atómica 200 series AA. Marca AGILENT TECHNOLOGIES. Modelo 240FS AA.
- Agitador magnético de múltiples posiciones. Serie Multistirrer Digital 6. Marca VELP SCIENCTIFICA.
- Medidor multiparámetro (para medir pH). Marca HACH. Modelo HQ40D.
- Balanza digital. Marca OHAUS. Modelo SJX622/E.
- Estufa. Marca MEMMERT. Modelo UN-30.
- Molino manual.

- Micro pipeta (1000 -5000 μL).
- Micro pipeta (100 – 1000 μL).
- Micro pipeta (20 – 200 μL).
- Bomba de vacío marca GAST. Modelo DOA-P504-BN.
- Purificador de agua ultra pura. Marca THERMO SCIENTIFIC. Modelo MICROPURE ST.

2.2.4. Reactivos

- Ácido nítrico concentrado HNO_3 .
- Hidróxido de sodio.
- Solución estándar de cromo 1000 ppm.
- Sulfato básico de cromo $\text{Cr}(\text{OH})\text{SO}_4$.

2.2.5. Metodología

2.2.5.1. Obtención de la biomasa de cascara de mamey

Para lo obtención del adsorbente a base de biomasa de la cáscara de mamey, se adaptó la metodología descrita por Campos et al. (2018):

1. Se lavó para retirar los restos de materia orgánica.
2. Luego se procedió a cortar la cáscara de mamey en trozos pequeños.
3. Luego se colocó en la estufa a secar a 80 °C durante 24 horas, con el propósito de obtener el material apto para la trituration.
4. La cáscara ya deshidratada, fue triturada con ayuda de un molino manual.

5. Luego fue tamizado, recolectando la biomasa a diferentes tamaños de partícula (entre 75 y 1180 μm). Se realizó el tamizado en el Laboratorio de Química de la Universidad Privada del Norte, sede Trujillo.
6. Finalmente se almacenó la biomasa en bolsas herméticas hasta su utilización.

El procedimiento de la obtención del adsorbente se muestra en la Figura 4.

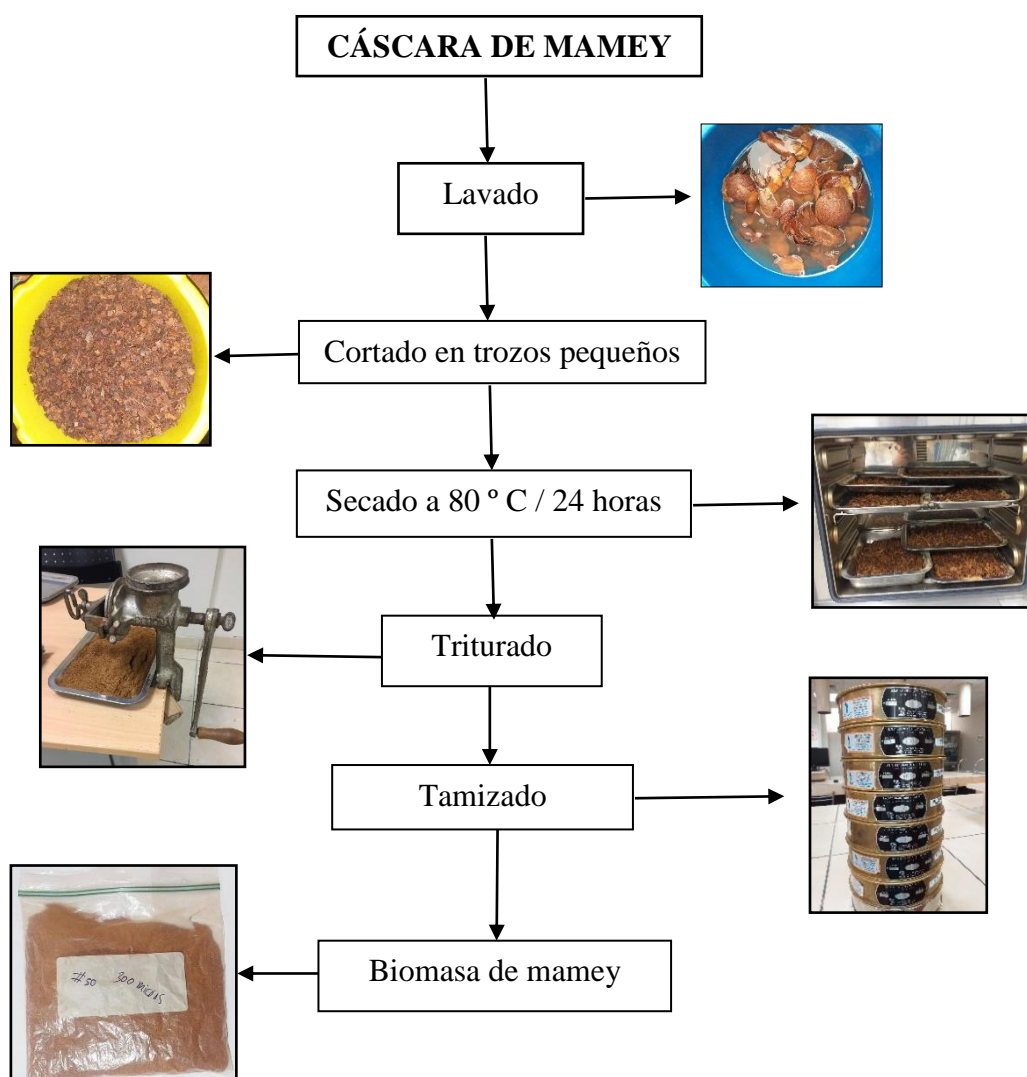


Figura 4. Diagrama del procedimiento de obtención del adsorbente a base de cáscara de mamey. Adaptado de Campos et al. (2018).

2.2.5.2. Curva de calibración para determinar la cantidad de Cr(III)

La curva de calibración del equipo de Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA) con el que se analizaron las muestras fue obtenida en base a la metodología descrita en Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (2012).

A partir de una solución de 1000 ppm de Cr se prepararon soluciones de 0.5, 1.0 y 2.0 ppm con agua ultrapura acidificada con HNO_3 al 1%, además de un control consistente en agua acidificada pura. Se seleccionó la respectiva lámpara de cátodo hueco de Cr y se midió la absorbancia de cada solución. Luego se expresó la relación de las diferentes concentraciones versus las absorbancias, verificando el coeficiente de determinación (R^2), el cual tuvo un valor de 0.9995. La curva de calibración se muestra en el Anexo 1.

2.2.5.3. Punto de carga cero (PZC)

Para encontrar el punto de carga cero se siguió la metodología descrita por Amaringo & Hormaza (2013). Se colocó agua destilada en vasos de 100 mL, ajustando el pH de cada solución a valores entre 2.0 y 6.0 con NaOH 0.1 M o HNO_3 0.1 M. A estas soluciones se les agregó 10 g de biomasa de cáscara de mamey por litro y transcurridas 12 horas bajo agitación y a temperatura ambiente se procedió a leer el pH final.

2.2.5.4. Validación del método de digestión

Se procedió a la validación del método de digestión ácida, adaptado de la metodología descrita por Campos et al. (2018). Para ello se prepararon soluciones de cromo de 5, 20, 50 y 200 ppm, a partir de sulfato básico de cromo $\text{Cr}(\text{OH})\text{SO}_4$. Un bloque de estas muestras pasó por un proceso de digestión ácida y posterior análisis del contenido de Cr mediante EAA. En paralelo, otro bloque a las mismas concentraciones de Cr, se

analizaron directamente mediante EAA sin digestión previa. Con ello se validó la eficacia de la digestión ácida previo a la cuantificación del contenido de Cr en las muestras.

2.2.5.5. Condiciones óptimas de adsorción

El procedimiento se realizó a fin de determinar los valores óptimos de los siguientes parámetros, de manera secuencial.

a. Determinación del pH óptimo de adsorción

Para encontrar el pH óptimo de adsorción se prepararon soluciones de cromo de 10 y 200 ppm respectivamente, a partir de sulfato básico de cromo $\text{Cr}(\text{OH})\text{SO}_4$, siendo modificado el pH con NaOH 0.1 y HNO_3 concentrado. Se estudiaron pHs en un rango de 2.0 a 6.0, cada ensayo por duplicado.

En un vaso se agregaron 200 mL de solución de cromo de 200 ppm, 2 g de biomasa de cáscara de mamey a tamaño de 300 μm , dejando en agitación por un tiempo de 300 minutos para que llegará al punto de equilibrio, a 300 rpm.

Terminada la agitación las muestras fueron filtradas con la bomba al vacío, se digestaron y se procedió a la lectura del cromo en el espectrofotómetro de absorción atómica.

b. Determinación del tamaño óptimo de partícula

Una vez determinado el pH óptimo, se procedió a encontrar el tamaño de partícula óptimo. Para ello se utilizaron los adsorbentes obtenidos de los tamices

de 1180, 850, 425, 300, 150 y 75 μm (marca FORNEY, certificada por la Sociedad Americana de Pruebas de Materiales, ASTM).

Se preparó una solución de 200 ppm a partir de sulfato básico de cromo $\text{Cr}(\text{OH})\text{SO}_4$, en un vaso se agregaron 200 mL de solución de cromo, luego se pesó 2 g de biomasa de cáscara de mamey de los diferentes tamaños de partícula, dejando en agitación por un tiempo de 300 minutos con el propósito de que llegara al punto de equilibrio. Con lo cual se determinó el tamaño de partícula óptimo de la biomasa de cáscara de mamey capaz de remover la mayor cantidad de $\text{Cr}(\text{III})$.

c. Determinación de la velocidad de agitación óptima

Teniendo el pH y tamaño de partícula óptimos, se procedió a determinar velocidad de agitación óptima. Para ello se probaron tres velocidades: 200, 300 y 500 revoluciones por minuto (rpm), utilizando el agitador magnético de múltiples posiciones, trabajando con una solución de 200 ppm a partir de sulfato básico de cromo $\text{Cr}(\text{OH})\text{SO}_4$ dosificada con 2 g de biomasa de cáscara de mamey, dejando en agitación por un tiempo de 300 minutos con el fin de que llegar al punto de equilibrio. Con lo cual se determinó la mejor velocidad de agitación en la que fue removida la mayor cantidad de $\text{Cr}(\text{III})$.

2.2.5.6. Pruebas experimentales de capacidad de adsorción

Una vez determinados el pH, tamaño de partícula y la velocidad de agitación óptimos para la remoción de $\text{Cr}(\text{III})$, se realizaron las pruebas experimentales para poder determinar el tiempo óptimo de adsorción y la capacidad de adsorción (q).

Se trabajó con soluciones Cr(III) a base de agua destilada y sulfato básico de cromo Cr(OH)SO₄, preparando 500 mL a diferentes concentraciones iniciales: 20, 50, 100, 250 y 400 ppm. La muestra inicial se ajustó al pH óptimo determinado previamente, añadiendo 5 g de biomasa de cáscara de mamey, agitando a temperatura ambiente a la velocidad de agitación óptima determinada previamente. Se extrajeron alícuotas de 15 mL de las suspensiones a los 5, 10, 15, 30, 60, 90 y 120 minutos, y se filtraron para separar el adsorbente de la solución acuosa. Todos los tratamientos se trabajaron por duplicado.

La muestra filtrada paso por digestión ácida adaptando la metodología descrita por Campos et al. (2018), y finalmente se procedió a analizar la concentración de Cr(III) residual mediante el uso del espectrofotómetro de adsorción atómica.

2.2.5.7. Capacidad de adsorción de Cr(III)

La determinación de la capacidad de adsorción se basó en la fórmula utilizada por Izquierdo (2010), en diferentes tiempos por unidad de masa del adsorbente, es decir la cantidad retenida de Cr por gramo de adsorbente (q , mg de contaminante / g de adsorbente).

$$q = \frac{(C_i - C_t)}{M} \times V \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde: V es el volumen de la solución (L), C_i es la concentración inicial de Cr (mg/L), C_t concentración de Cr en el tiempo t (mg/L) y M la masa de la cáscara de mamey (g).

Afirmados los resultados de las concentraciones iniciales y finales, se determinó la eficiencia de adsorción por la capacidad de remoción del proceso, mediante la fórmula utilizada por Lagos (2016).

$$\% \text{ remoción Cr} = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} \times 100 \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde: C_i es la concentración inicial de Cr (mg/L), es decir la muestra en blanco sin la biomasa de mamey; C_f es la concentración final de Cr (mg/L) luego del tratamiento con la biomasa de mamey.

2.2.5.8. Análisis estadístico

Para la recolección de los datos experimentales se utilizó un diseño completamente al azar, trabajando por duplicado para cada parámetro evaluado (pH, tamaño de partícula, velocidad de agitación). Con los resultados obtenidos se realizó un Análisis de Varianza (ANOVA) para ver si existen diferencias significativas entre los diferentes niveles de los parámetros evaluados respecto a su efecto sobre la capacidad de adsorción de Cr (III), mediante la prueba DSH de Tukey (5% de significancia), y así identificar los tratamientos con mayor efecto sobre la adsorción con cáscara de mamey. Para ello se utilizó el software Statgraphics v.5 (Graphics Software Systems, Rockville, MD, USA).

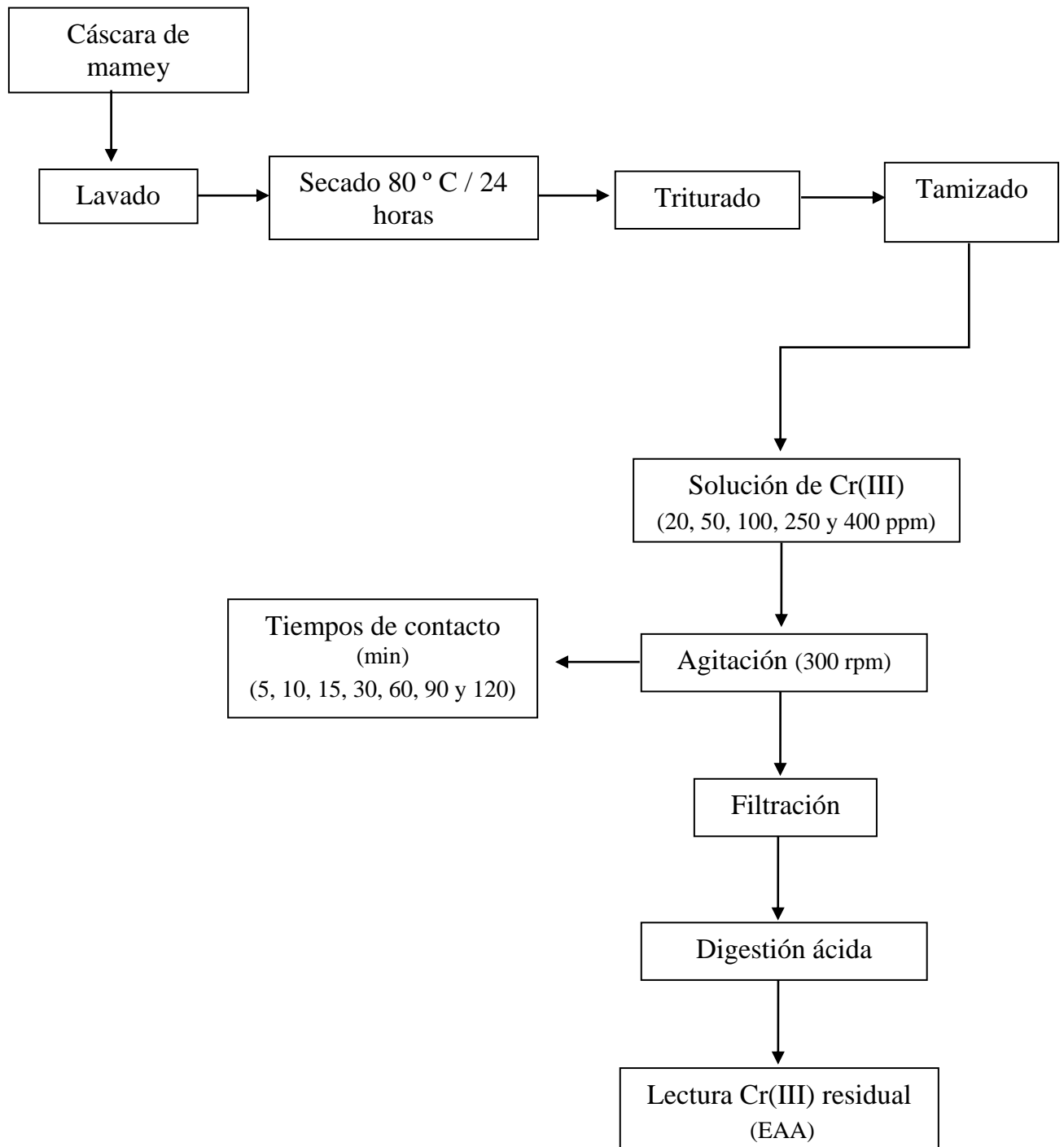


Figura 5. Diagrama de flujo del procedimiento aplicado en la remoción de Cr(III) mediante cáscara de mamey.

CAPÍTULO III. RESULTADOS

3.1. Curva de calibración para determinar el contenido residual de Cr(III)

Se obtuvo la curva de calibración para poder determinar la concentración residual de Cr(III), mostrada en la Ecuación 8, con un R² de 0.9995.

$$C = 15.19526 \times Abs + 0.03601 \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde: Abs es absorbancia, y C la concentración residual de Cr(III) (mg/L).

3.2. Punto de carga cero (PZC)

En la Figura 6 se muestra el punto de carga cero (PZC), que fue determinado sobre el eje de pH inicial, como el valor obtenido a partir de la intersección del gráfico del pH final (línea roja) con la gráfica del pH inicial (diagonal negra), correspondiendo a un valor de 3.80.

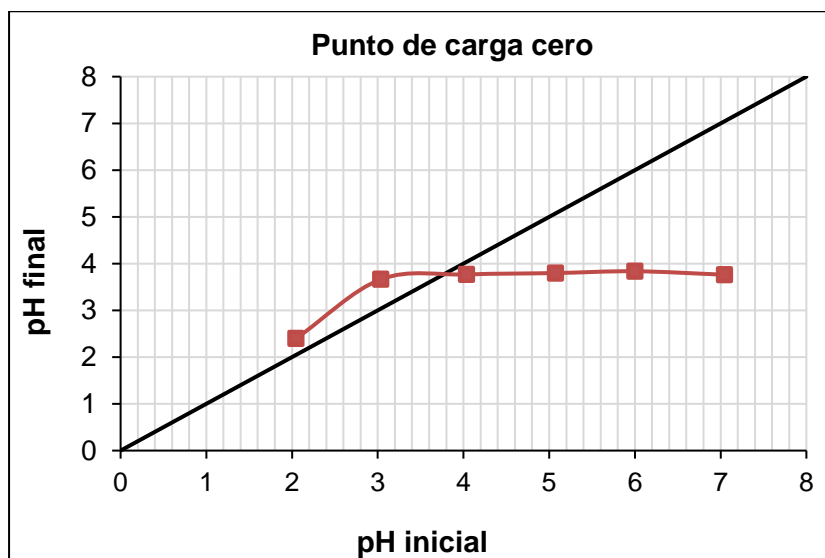


Figura 6: Punto de carga cero (pH_{PZC}) del adsorbente a base de cáscara de mamey a distintos valores de pH.

3.3. Validación del método de digestión

La Figura 7 muestra un alto coeficiente de determinación ($R^2 = 0.9996$) entre los resultados de contenido de Cr(III) obtenidos en las soluciones digeridas y las

soluciones sin digerir, lo que indica que el procedimiento de digestión aplicado es adecuado para tratar las soluciones previo al análisis mediante EAA.

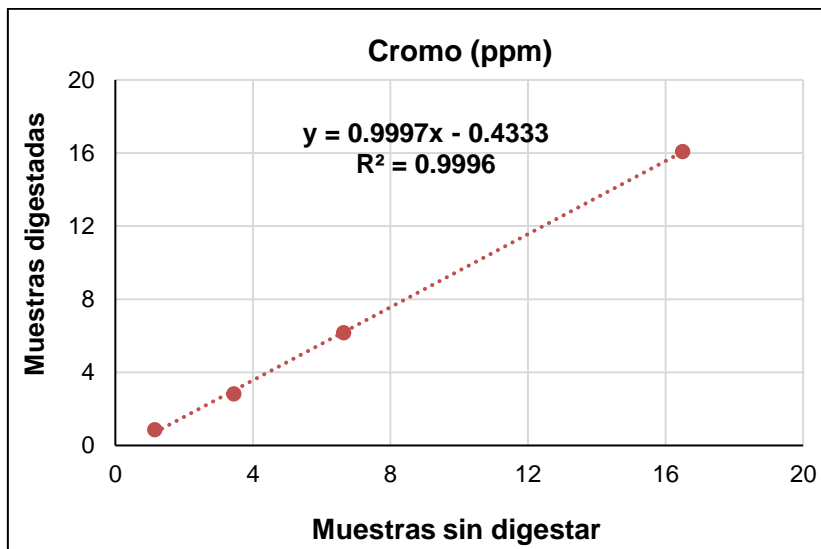


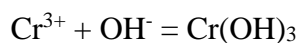
Figura 7. Validación del método de digestión.

3.4. Condiciones óptimas de adsorción

a. pH óptimo de adsorción

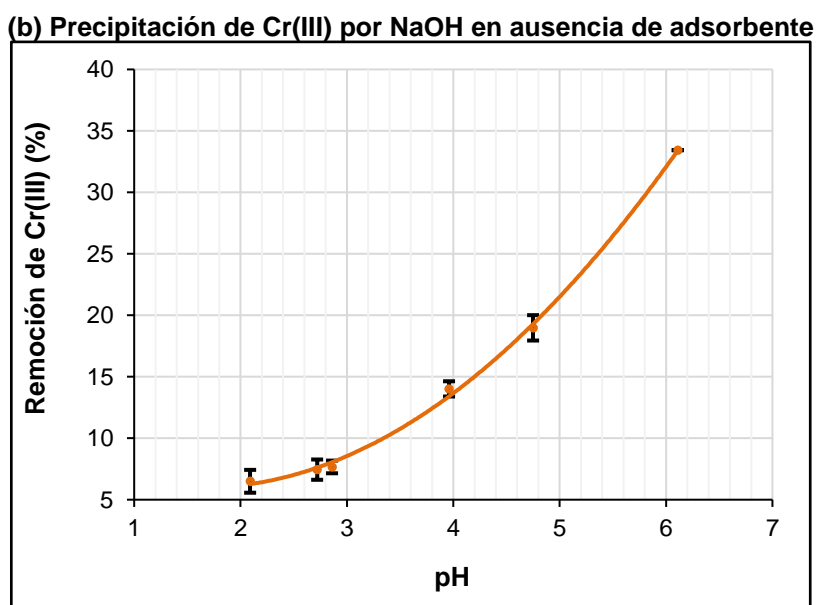
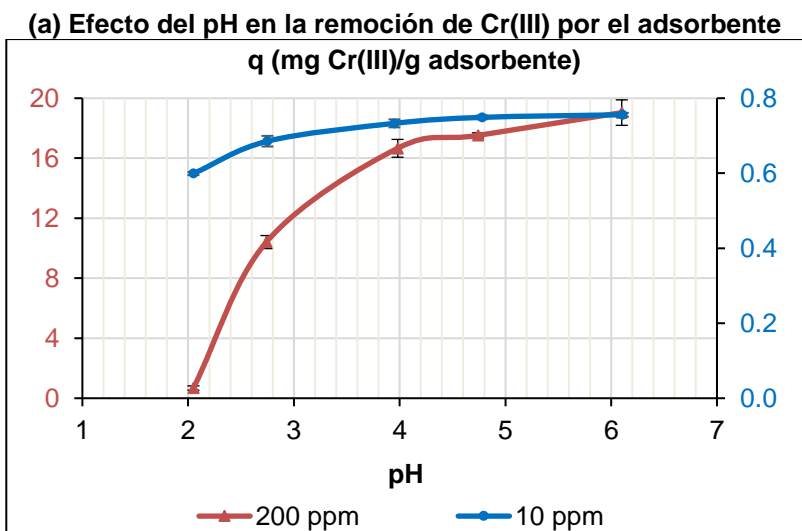
En la Figura 8 se observan los resultados de capacidad de adsorción a diferentes valores de pH en las soluciones de 10 y 200 ppm de Cr(III). Adicionalmente, a fin de verificar el efecto del NaOH se hizo una corrida adicional de un lote de soluciones de 275 ppm de Cr(III) a diferentes valores de pH sin adición del adsorbente, cuyos resultados están representados en la Figura 8.

Dichos resultados indican que a partir de un pH superior a 2.90, el incremento de la remoción se debe a la reacción y precipitación del Cr(III) en presencia del NaOH, en concordancia con lo obtenido por Duarte et al. (2009), como se puede observar en la siguiente reacción química:



Es decir, la reducción de los iones metálicos a $\text{pH} > 2.90$ se debe a la formación de complejos de hidróxido de cromo (III). De modo que el incremento en la remoción del Cr(III) observado en la solución de 275 ppm a mayores valores de pH , se debe más al resultado de la precipitación del metal en presencia de NaOH , que al efecto de adsorción mediante la cáscara de mamey.

Por ello se eligió el pH de 2.90 como el valor óptimo para el proceso de remoción.



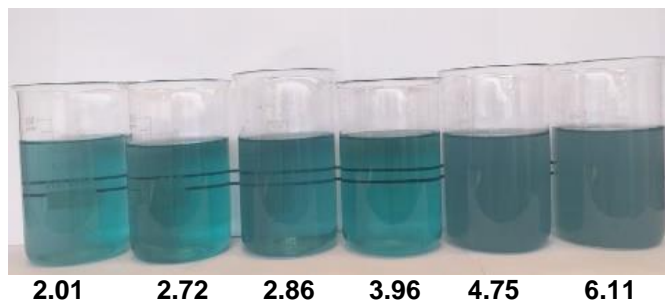


Figura 8. (a) Remoción de Cr(III) por la biomasa de cáscara de mamey a distintos valores de pH en soluciones de 10 y 200 ppm de Cr(III) . (b) Remoción de Cr(III) en ausencia de adsorbente, a diferentes valores de pH .

b. Determinación del tamaño óptimo de partícula

En la Figura 9 se observa una mayor remoción de Cr(III) con el tamiz cuyo tamaño de partícula es de 300 μm . Mayores números de malla (es decir menores tamaños de partícula) además de no mostrar mejoras significativas en la remoción (Prueba de Tukey, especialmente a 150 μm), generaron suspensiones con apariencia pastosa (similares a un lodo), a partir de las cuales la separación de la solución fue muy difícil. Por ello se eligió el tamaño de partícula de 300 μm para las pruebas posteriores.

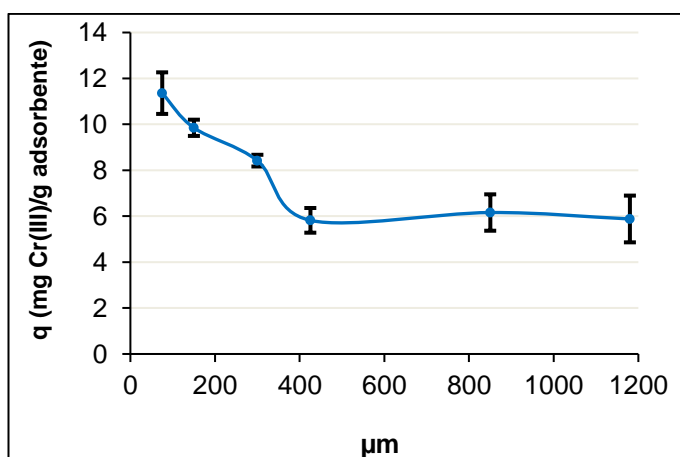


Figura 9. Remoción de Cr(III) a distintos tamaños de partícula (μm) de biomasa de cáscara de mamey.

c. Determinación de la velocidad de agitación óptima

En la Figura 10 se observa una mayor remoción de Cr(III) a la velocidad de agitación de 300 rpm.

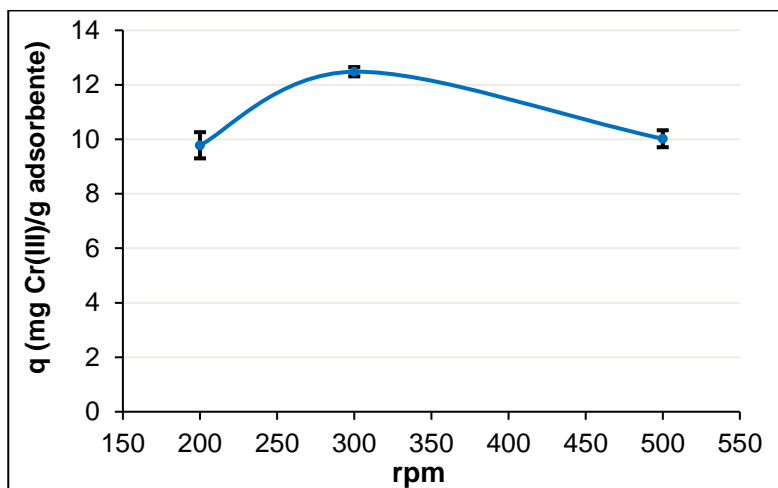


Figura 10. Remoción de Cr(III) a diferentes velocidades de agitación (rpm).

3.5. Capacidad de adsorción de Cr(III)

Una vez determinada las condiciones óptimas de pH, tamaño de partícula (μm) y velocidad de agitación (rpm), se procedió a evaluar el proceso de adsorción a diferentes tiempos de contacto adsorbente – adsorbato, de acuerdo con lo explicado en la sección 2.2.5.7.

Luego de realizar el ajuste matemático de los datos mediante el software DataFit 9.1 (Oakdale Engineering, Estados Unidos), en la Figura 11 se puede visualizar que el tiempo óptimo de contacto es de 120 minutos para alcanzar el punto de equilibrio representado por la capacidad de adsorción (q).

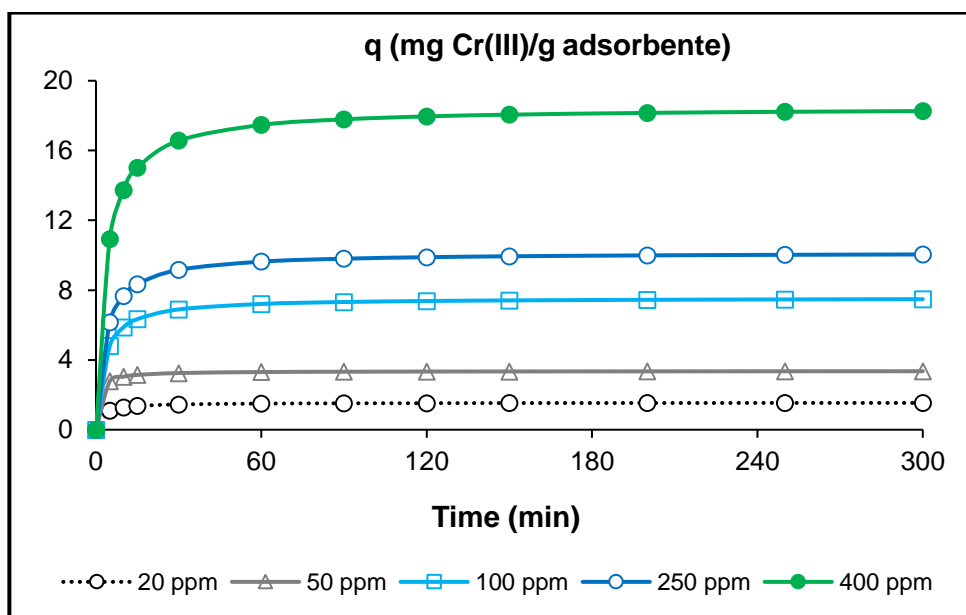


Figura 11. Capacidad de adsorción de Cr(III) a diferentes tiempos de contacto en soluciones de 20, 50, 100, 250 y 400 ppm de Cr(III) .

3.6. Aplicación de los modelos de Langmuir y de Freundlich para evaluar el proceso de adsorción de Cr(III) mediante cáscara de mamey

En la Tabla 6 se observan los resultados de los cálculos de los modelos. En el modelo de Langmuir se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.7978, una capacidad máxima de adsorción $q_{max} = 21.7865$ mg Cr(III) /g de biomasa de cáscara de mamey y una afinidad en los sitios de unión $b = 0.0117$. Mientras que en el modelo de Freundlich se obtuvo un mejor coeficiente de determinación (R^2) de 0.9291, una capacidad de adsorción $k = 0.5866$, y una intensidad de adsorción $n = 1.5876$.

Tabla 6

Modelos para el proceso de adsorción de Cr(III) mediante cáscara de mamey.

Modelo	Ecuación	Constantes	R^2
Langmuir	$C_e/q_e = 0.0459 C_e + 3.9326$	q_{max} : 21.7865 b : 0.0117	0.7978
Freundlich	$\ln q_e = 0.6299 \ln C_e - 0.5334$	k : 0.5866 n : 1.5876	0.9291

3.7. Cinética de adsorción

En la Figura 12 se observa los resultados de los cálculos de la cinética de adsorción a las concentraciones de 20, 50, 100, 250 y 400 ppm.

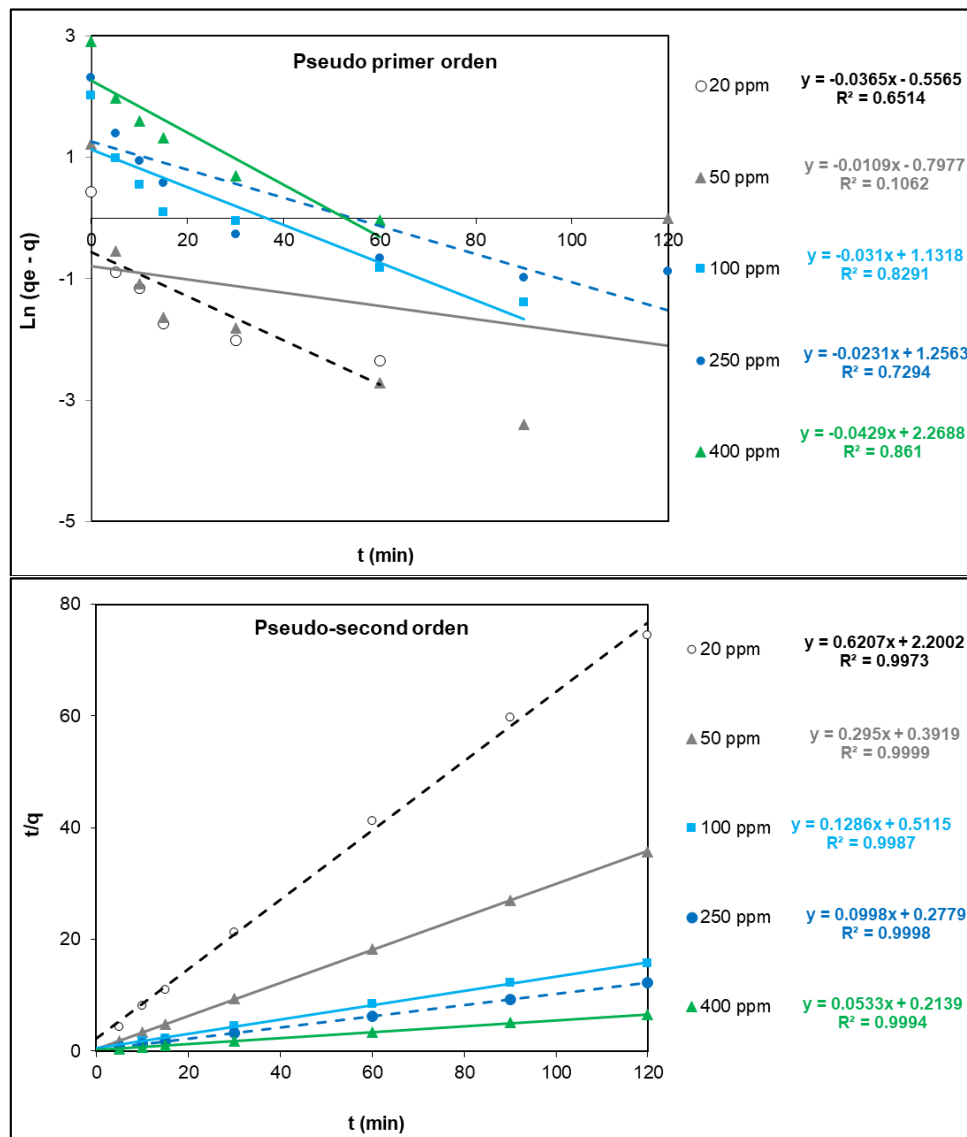


Figura 12. Cinética de adsorción de pseudo - primer orden y de pseudo - segundo orden.

En el modelo de pseudo – segundo orden se obtuvo un mejor ajuste de los datos, obteniendo valores de R^2 de 0.9973, 0.9999, 0.9987, 0.9998 y 0.9994 a las concentraciones de 20, 50, 100, 250 y 400 ppm de $\text{Cr}(\text{III})$, respectivamente, como se observa en la Tabla 7.

Tabla 7

Modelos de cinética de adsorción de Cr(III) mediante la cáscara de mamey.

Solución	Ecuación	R²	k₂ g mg ⁻¹ min ⁻¹	h mg g ⁻¹ min ⁻¹	q_e mg g ⁻¹
20 ppm	t/q = 0.6207t + 2.2002	0.9973	0.1898	0.4545	1.6111
50 ppm	t/q = 0.2950t + 0.3919	0.9999	0.1278	1.4453	3.3898
100 ppm	t/q = 0.1286t + 0.5115	0.9987	0.0343	1.9550	7.7760
250 ppm	t/q = 0.0998t + 0.2779	0.9998	0.0349	3.5984	10.0200
400 ppm	t/q = 0.0533t + 0.2139	0.9994	0.0137	4.6751	18.7617

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1 Discusión

Punto de carga cero (PZC)

En la Figura 6 se muestra el punto de carga cero (pH_{PZC}). Cabe indicar que el punto de carga cero señala el intervalo más adecuado del valor de pH para alcanzar la remoción eficiente de un determinado contaminante (Amaringo et al., 2013), correspondiendo a un valor de 3.80. Este valor de pH muestra que la carga neta total (externa e interna) de las partículas de la superficie de la cáscara de mamey (material adsorbente) es neutra, es decir el número de sitios positivos y negativos es igual (Franks & Meagher, 2003).

Previamente se ha reportado por Amaringo et al., (2013), con residuos agrícolas para la remoción de colorantes, un valor de punto de carga cero de 5.40 para la cascarilla de arroz. La diferencia encontrada en el pH_{PZC} en estos dos materiales adsorbentes puede ser debido a su diferente composición.

pH óptimo de adsorción

En la Figura 8a se observa el efecto del pH en la remoción de Cr(III). A un pH superior a 3.90 se observa remoción, y a medida que aumenta el pH va aumentando la remoción, indicando así la importancia del pH en el proceso de remoción de Cr(III) especialmente en la solución de 200 ppm.

Sin embargo, en el efecto del pH a partir de 3.90, la remoción se debe a la reacción y precipitación del Cr(III) con el NaOH, formándose hidróxido de cromo (III), siendo este el motivo por el cual la remoción de cromo (III) es mayor, respecto al efecto de adsorción mediante la cáscara de mamey.

Resultados similares han sido reportados por Duarte et al., (2009), quienes a pH mayores de 4.50, lograron mayores remociones de Cr(III). La dependencia del pH ocurre cuando los iones metálicos y los protones compiten por los mismos sitios de unión activos, tales como los grupos hidroxilo y grupos amino en la superficie de la biomasa (Duarte et al., 2009).

Teniendo en cuenta que las aguas residuales de la industria de curtiembres presentan valores de pH en torno a 3.0, se eligió el pH de 2.90 como valor óptimo para realizar las siguientes pruebas.

Determinación del tamaño óptimo de partícula

En la Figura 9 se observa el efecto del tamaño de partícula en la remoción de Cr(III). A medida que disminuye el tamaño de partícula, aumenta la remoción. No obstante, al disminuir el tamaño de partícula se formaron suspensiones como un lodo, que dificultaron la separación del sobrenadante, por ello se eligió el tamaño de partícula de 300 μm para las siguientes pruebas.

Estos resultados concuerdan con Pan et al. (2013), quienes obtuvieron una mayor remoción de Cr(III) a un tamaño de partícula de 250 μm con carbones derivados de paja de cultivos, logrando remover hasta 90.00 % de Cr(III).

Del mismo modo resultados similares han sido reportados por Pinzón et al. (2009), quienes encontraron el mismo comportamiento, obteniendo resultados de remoción de Cr(III) con tamaños de partícula entre 300 a 425 μm de cáscara de naranja, logrando remover hasta el 61.52 % de Cr(III).

Estos resultados se deben a que el tamaño de partícula es proporcional a la superficie disponible para la interacción adsorbente-adsorbato (Lagos, 2016). Así

mismo, partículas pequeñas tienen mayor área superficial interna, sobre las paredes de los poros en puntos esenciales, es decir, un área superficial más alta proporciona un mayor número de sitios de unión para la adsorción mejorando la remoción de metales pesados (Tejada et al., 2015).

Determinación de la velocidad de agitación óptima

En la Figura 10 se observa el efecto de la velocidad de agitación sobre la remoción de Cr(III) . Se eligió la velocidad de agitación de 300 rpm para las pruebas posteriores, ya que a esta velocidad se obtuvo una mayor remoción de Cr(III) .

Resultados similares han sido reportados por Anwar et al. (2009), quienes obtuvieron una mayor remoción de Cr(III) utilizando carbón como adsorbente, a una velocidad de agitación de 250 rpm.

Estos resultados se deben a que la velocidad de agitación ayuda al adsorbato a superar la resistencia de la transferencia de masa de la capa límite (Pathak et al., 2015; Marín et al., 2010). Si la velocidad de agitación es lenta, el adsorbato se acumula y queda solamente en la parte superior del adsorbente, y los poros inferiores del adsorbente no participan en el proceso ya que no tienen contacto con el metal (Anwar et al., 2009). Así que la velocidad de agitación debe ser suficiente para asegurar que todo el adsorbato entre en los poros del adsorbente.

Capacidad de adsorción de Cr (III)

En la Figura 11 se muestra la capacidad de adsorción (q) a las concentraciones de 20, 50, 100, 250 y 400 ppm de Cr(III) , respectivamente. El valor de este parámetro aumenta con el incremento del tiempo de contacto, alcanzando el equilibrio a los

120 minutos de contacto de adsorbente-adsorbato, es decir, la biomasa de cáscara de mamey, ya no adsorbe más Cr(III) a partir de ese momento, al no observarse diferencias significativas (test de Tukey, $p > 0.05$) con los valores de (q) obtenidos en tiempos más altos. Estos resultados concuerdan con Pan et al. (2013), quienes trabajaron con carbones derivados de paja de cultivos para la remoción de Cr(III) y obtuvieron un tiempo de contacto óptimo de 120 minutos. Resultados similares han sido reportado por Tenorio (2006), quien trabajo con hueso de aceituna para remover Cr(III), obteniendo un tiempo de contacto óptimo de 60 minutos.

Aplicación de los modelos de Langmuir y de Freundlich para evaluar el proceso de adsorción de Cr(III) mediante cáscara de mamey

Bajo la condición de tiempo de equilibrio de 120 minutos, se aplicaron los modelos de Langmuir y Freundlich. En la Tabla 6 se puede ver que los modelos obtenidos. En el modelo de Langmuir se obtuvo una capacidad máxima de adsorción $q_{max} = 21.7865$ mg de Cr(III)/g de biomasa de cáscara de mamey. Cabe indicar que el modelo de Langmuir indica que la superficie del adsorbente tiene un número específico de sitios donde el adsorbato puede ser adsorbido, es decir, la adsorción tiene lugar sobre una superficie homogénea permaneciendo los iones adsorbidos inmóviles y no interaccionando entre ellos (Rios, 2014). La adsorción se realiza en una monocapa, en lo cual las moléculas del adsorbato no se depositan unas sobre otras, si no lo hacen en la superficie libre del adsorbente, por ello que al formarse la monocapa la adsorción alcanza la saturación (Lazo et al., 2008).

En un estudio previo de remoción de Cr(III) con quitosano de camarón (Duarte et al., 2009), obtuvieron un q_{max} de 52.00 mg/g, aunque los autores para mejorar la

capacidad de adsorción, modificaron químicamente la superficie del adsorbente, mientras que en el presente estudio no se realizó ninguna modificación química.

Por su parte, el mejor ajuste se obtuvo con el modelo de Freundlich ($R^2 = 0.9291$), el cual indica la capacidad e intensidad de adsorción, indicados por las constantes k y n (Tejada et al., 2015). La biomasa de cáscara de mamey mostro una adecuada capacidad de adsorción ($k = 0.5866$), indicando un adecuado número de sitios de unión del Cr(III) a la biomasa de cáscara de mamey. Además, se obtuvo una alta intensidad de adsorción, con un valor para n de 1.5876, por lo que puede considerarse un proceso de adsorción favorable ($n > 1$; Borja et al., 2015). El modelo de Freundlich indica que no hay un recubrimiento límite ni se propone una adsorción monocapa, si no multicapa (Linares, 2018). Este modelo asume que la superficie del adsorbente es heterogénea, es decir, los sitios de adsorción con la misma energía de interacción adsorbato-adsorbente se encuentran agrupados en pequeñas áreas las cuales son independientes y no equivalentes (Lagos, 2016).

Así mismo se observa que la capacidad de adsorción de Cr(III) se incrementa con el incremento de la concentración inicial de Cr(III). Este incremento es atribuido a la competición por los sitios de unión disponibles. Una alta concentración provee la fuerza necesaria para superar a la resistencia en la transferencia de masa del ión metálico entre el medio y el adsorbente que establece el tiempo requerido para alcanzar el estado de equilibrio (Llhan et al., 2004). Este efecto fue observado en la Figura 11.

Resultados similares han sido reportados por Campos et al. (2018), cuyos resultados se ajustaron a la isoterma de Freundlich, utilizando biomasa de cáscara de maracuyá para la adsorción de Pb, Cr y Cu. Obtuvieron una capacidad de

adsorción de $k = 0.6784$ y una intensidad de adsorción de $n = 2.3474$ para el Cr. Estos resultados se deben a que la cáscara de maracuyá puede tener más pectina que la cáscara de mamey.

Cinética de adsorción

La cinética de adsorción de Cr(III) de la presente investigación se ajustó mejor al modelo de pseudo-segundo orden, el cual es uno de los modelos más representativos en los procesos de adsorción. Este modelo se basa en la capacidad de adsorción química en equilibrio y asume que la capacidad de adsorción es proporcional al número de centros activos del adsorbente (Mora et al., 2018). Según Rios (2014) el modelo de pseudo-segundo orden presupone que los iones metálicos se adsorben en 2 sitios activos de los adsorbentes. Este modelo de cinética de adsorción es más apropiado para el modelamiento de adsorción de iones como el Pb, Cd, Cr, entre otros.

En la Tabla 7 se observa los coeficientes de determinación (R^2) de 0.9973, 0.9999, 0.9987, 0.9998 y 0.9994 a las concentraciones de 20, 50, 100, 250 y 400 ppm de Cr(III), respectivamente. Los resultados mostraron que velocidad de adsorción k_2 ($\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$) disminuye al aumentar la concentración del metal, estos resultados se deben a que los sitios disponibles para la adsorción en la superficie de la cáscara de mamey ya se encuentren saturados (Duarte et al., 2009). Sin embargo, la velocidad inicial de adsorción h ($\text{mg g}^{-1} \text{min}^{-1}$) aumenta al aumentar la concentración de Cr(III), debido a que una alta concentración provee la fuerza necesaria para superar a la resistencia en la transferencia de masa del ión metálico entre el medio y el adsorbente (Llhan et al., 2004).

4.2 Conclusiones

- Se determinó un pH óptimo de remoción de Cr(III) 2.90, un tamaño óptimo de partícula de cáscara de mamey de 300 μm , y una velocidad de agitación óptima de 300 rpm, suficientes para asegurar que el adsorbato ingrese y se adsorba en los poros del adsorbente.
- Se determinó un tiempo de contacto óptimo de 120 minutos, que sería el necesario para alcanzar el equilibrio adsorbente-adsorbato en la remoción de Cr(III) mediante cáscara de mamey.
- Se determinó una capacidad de adsorción (k) de Cr(III) de 0.5866, indicando un adecuado número de sitios de unión de Cr(III) a la cáscara de mamey; así como una buena intensidad de adsorción de ($n = 1.5876$), considerándose un proceso de adsorción favorable ($n > 1$).

REFERENCIAS

- Ashraf, A., Khalid, S., and Fazal, M. (2016). Removal of chromium (VI) from aqueous medium using chemically modified banana peels as efficient low-cost adsorbent. *Alexandria Engineering Journal*, 55, 2933-2942.
- Anwar, J., Shafique, U., Salman, M., Zaman, W., Anwar, S., and Anzano, J. (2009). Removal of chromium (III) by using coal as adsorbent. *Journal of Hazardous Materials*, 171, 797-801.
- Acosta, I., Sandoval, P., Bautista, D., Hernández, N., Cárdenas, J., y Martínez, V. (2012). Bioadsorción de cromo (VI) por la cáscara de mamey (*Mammea americana L.*). *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 3(2), 1-9.
- Agencia De Sustancias Tóxicas Y El Registro De Enfermedades. (2012). *Resumen De Salud Pública Cromo*. Recuperado de https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs7.pdf.
- Amaringo, F., y Hormaza, A. (2013). Determinación del punto de carga cero y punto isoeléctrico de dos residuos agrícolas y su aplicación en la remoción de colorantes. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 4(2), 27-36.
- Bejarano, J.P., Gonzales, O., Rodríguez, J., Abal, I., Rivera, C., Cruzado, M., y Huamán, K. (2016). Influencia del tiempo de contacto y del tamaño de partícula de pectina de naranja (*Citrus sinensis*) en la disminución del contenido de hierro (Fe) en efluentes mineros. *Agroindustrial Science*, 6(2), 169-173.
- Borja, N., García, V., Yipmantin, A., Guzmán, E., y Maldonado, H. (2015). Equilibrio De Biosorción De Plomo (II) Y Caracterización Mediante FT-IR Y SEM-EDAX En Alga *Ascophyllum nodosum*. *Rev Soc Quím*, 81(3).

- Cano, I., Pérez, J., Gutiérrez, M., y Gardea, J. (2002). Remoción y recuperación de cromo (III) de soluciones acuosas por biomasa de sorgo. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 1 (3), 97-103.
- Caviedes, D., Muñoz, R., Perdomo, A., Rodríguez, D., y Sandoval, I. (2015). Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. *Revista Ingeniería y Región*, 13(1), 73-90.
- Coreño, A., Tomasini, A., y López, R. (2010). Cromo: Lo bueno y lo malo, los inicios de una historia. *Revista Enlace Químico*, 4(102).
- Campos, G., Castillo, A., Gurreonero, J., Obeso, A., Díaz, V., y Vejarano, R. (2018). Adsorbent material base don passion-fruit wastes to remove lead (Pb), chromium (Cr) and copper (Cu) from metal – contaminated wasters. *AIP conference Proceeding*, 1952: 020079.
- Chasquibol, S., Arroyo, B., y Morales, G. (2008). Extracción y caracterización de pectinas obtenidas a partir de frutos de la biodiversidad peruana. *Ingeniería Industrial*, (26), 175-199.
- Duarte, E., Olivero, J., y Jaramillo, B. (2009). Remoción de cromo de aguas residuales de curtiembres usando quitosan obtenido de desechos de camarón. *Scientia et technica*, 2(42).
- Demirbas, A. (2008) “Heavy Metal Adsorption onto Agro-Based Waste Materials: A Review”. *Journal of Hazardous Materials*, 157, 220–229.
- Elabbas, S., Mandi, L., Berrekhis, F., Pons, M., Leclerc, J., and Ouazzani, N. (2015). Removal of Cr(III) from chrome tanning wastewater by adsorption using two natural carbonaceous materials: Eggshell and powdered marble. *Journal xxx*, 1-7.

- Franks, G. & Meagher, L. (2003). The isoelectric points of sapphire crystals and alpha-alumina powder. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. 214 (1-3), 99-110.
- Greenpeace. (2012). *Cuerpos Tóxicos. Nuevas evidencias de contaminación de curtiembres en la Cuenca Matanza-Riachuelo*. Buenos Aires, Argentina.
- Gerencia Regional de la Producción. (2012). *Problemática de Curtiembres en Trujillo*
- Jayson, G., Sangster, A., Thompson., and Wilkinson, M. (1993). Adsorption of chromium from aqueous solution onto activated charcoal cloth. *Printed* ,31(3), 487-492.
- Julca, L., & Vásquez, F. (2018). *Deshidratación Osmótica De Mamey (Mammea Americana L.) Y Su Efecto En Las Características Fisicoquímicas Y Organolépticas* (tesis de pregrado). Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, Chiclayo, Perú.
- Lavado, C., Sun Kou, M., y Recuay, N. (2012). Remoción de cromo (VI) empleando carbones preparados por activación química a partir de las astillas de eucalipto. *Rev Soc Quím Perú*, 78 (1).
- López, L., & Moreira, C. (2015). *Estudio de factibilidad y plan de exportación de la pulpa de mamey congelado hacia el mercado español* (tesis de pregrado). Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Colombia.
- Lagos, L. (2016). *Bioadsorción de cromo con borra de café en efluentes de una industria curtiembre local* (tesis pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
- Lazo, J., Navarro, A., Sun-Kou, M., & Llanos, B. (2008). Síntesis y caracterización de arcillas organofílicas y su aplicación como adsorbentes del fenol. *Rev Soc Quím Perú*,74(1), 3-19.

- Linares, J. (2018). *Remoción de iones plomo (II) de aguas sintéticas mediante el bioadsorbente obtenido de la cáscara de castaña (Bertholletia Excelsa)* (tesis doctoral). Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Arequipa, Perú.
- Lavado, C., Sun Kou, M., y Recuay, N. (2012). Remoción de cromo (VI) empleando carbones preparados por activación química a partir de las astillas de eucalipto. *Rev Soc Quím Perú*, 78(1).
- Londoño, L., Londoño, P., y Muñoz, F. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 2(14), 145-153.
- Llhan, M., Nourbakhsh, S., Kilicarlan, S., & Ozdag, H. (2004). "Removal of chromium, lead and copper from industrial waste by *Staphylococcus saprophyticus*". *Turk. Electron. J. Biotechnol*, 2, 50-57.
- Martín Mendoza, H y Jhon Carranza C, (2006) *Remoción De Cromo Total Del Efluente De La Curtiembre Chimú – Hermanos Murguía – Trujillo Por Medio De Ulva Fasciatica* (tesis de pregrado). Universidad Nacional De Trujillo. Trujillo, Perú.
- Morales, E., Díaz, A., Fortich, N., y Yanes, L. (2017). *Evaluación de la actividad antibacteriana de los metabolitos de extractos de semillas de Mammea americana sobre Enterococcus faecalis*. (tesis de posgrado). Universidad de Cartagena, Colombia.
- Ministerio del Ambiente MINAM. (2017). Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM. Recuperado de : <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-004-2017-minam/>.

- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento MVCS. (2019). Decreto Supremo N° 010-2019-VIVIENDA. Recuperado de :
<https://www.gob.pe/institucion/vivienda/normas-legales/272120-010-2019-vivienda>.
- Marín, A., Ortuno, J., Aguilar, M., Meseguer, V., Sáez, J., y Lloréns, M. (2010). Use of chemical modification to determine the binding of Cd(II), Zn(II) and Cr(III) ions by orange waste. *Biochem Eng J*, 53, 2–6.
- Mora, A., Pastrana, J., Lagos, Y., & Lozada, J. (2018). Evaluation of mercury (Hg²⁺) adsorption capacity using exhausted coffee waste. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 10, 60-70.
- Netzahuatl, A., Pineda, G., Barragán, B., y Cristiani, E. (2010). Evaluación de la cáscara del aguacate para la remoción de cromo hexavalente y cromo total de soluciones acuosas. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 41, 1-10.
- Netzahuatl, A., Pineda, G., Barragán, B., y Cristiani, E. (2010). Remoción de cromo hexavalente y cromo total por la corteza de *Pyrus communis*. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 41, 1-10.
- Nordberg, G. (2010). Metales: Propiedades químicas y toxicidad. *Productos químicos*, (63).
- Netzahuatl, A., Cristiani, M., y Cristiani, E. (2008). Remoción de Cr(VI) y biosorción de cromo por la cáscara de la semilla de mamey. *Revista Cubana de Química*, XX (2), 3-9.
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. (2014). *Fiscalización en Aguas Residuales*. Recuperado de https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827.
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. (2016). *Resolución N° 023-2016-OEFA/TFA-SEM*. Recuperado de https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=17626.

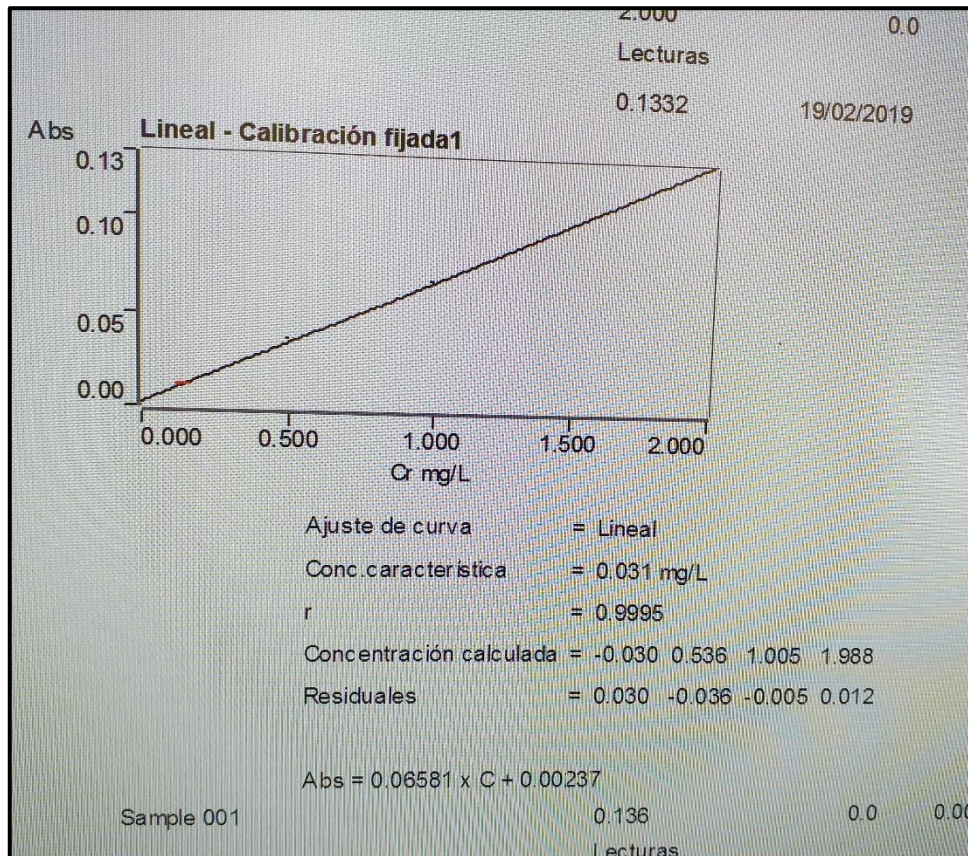
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2006). *Fichas técnicas: Productos frescos de frutas*. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-au173s.pdf>.
- Pan, J., Jiang, J., and Xu, R. (2013) Adsorption of Cr(III) from acidic solutions by crop straw derived biochars. *Journal* 25(10), 1957-1965.
- Pineda, G., Netzahuatl, A., y Cristiani, E. (2011). Evaluación del tegumento de la nuez pecanera (*Carya illinoensis*) para la remoción de cromo hexavalente y cromo total de soluciones acuosas. *Revista Cubana de Química*, XXIII (3), 39-45.
- Pinzón, M., y Vera, L. (2009). Modelamiento de la cinética de bioadsorción de Cr (III) usando cáscara de naranja. *Dyna*, 76 (160), 95-106.
- Pérez, R., Calzado, O., Cascaret, D., y Tur, E. (2014). Adsorción de Cr (VI) por *Cocos nucifera* L. en residuales de fibrocemento en Santiago de Cuba. *Revista Colombiana de Biotecnología*, XVI (1), 9-18.
- Pathak, D., Sachin, A., y Bhaskar, D. (2015). Fruit peel waste as a novel low-cost bio adsorbent. *Reviews in Chemical Engineering*, 31(4), 361-381.
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Díaz, M., y Gonzales, E. (2016). Contaminación Por Metales Pesados: Implicaciones En Salud, Ambiente y Seguridad Alimentaria. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 16(2), 66-77.
- Reyes, E., Cerino, F., y Suárez, M. (2006). Remoción de metales pesados con carbón activado como soporte de biomasa. *Ingenierías*. IX (31).
- Rios, P. (2014). *Cinética de bioadsorción de arsénico utilizando cáscara de banano maduro en polvo* (tesis pregrado). Universidad Técnica de Machala. Machala, El Oro, Ecuador.

- Secretaría Ambiental y Desarrollo Sustentable de la Nación. (2006). *Plan Integral de Saneamiento Ambiental- Cuenca Matanza Riachuelo*. Buenos Aires, Argentina.
- Singh, A., Kumar, R., Agrawal, M., and Marshall, F. (2010). Risk assessment of heavy metal toxicity through contaminated vegetables from waste water irrigated area of Varanasi, India. *Tropical Ecology*, 51(2 S.), 375–387.
- Tejada, C., Villabona, A., y Garcés, L. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *Tecno Lógicas*, 18 (34), 109-123.
- Tenorio, G. (2006). *Caracterización de la biosorción de cromo con hueso de aceituna* (tesis doctoral). Universidad de Granada, Granada, España.
- Vásquez Erik, (2015). Estudio De Impacto Ambiental De Curtiembre Sabogal, En El Distrito El Porvenir, Provincia De Trujillo, Región La Libertad.

ANEXOS

Anexo 1

Curva de calibración de espectrofotómetro de absorción atómica.



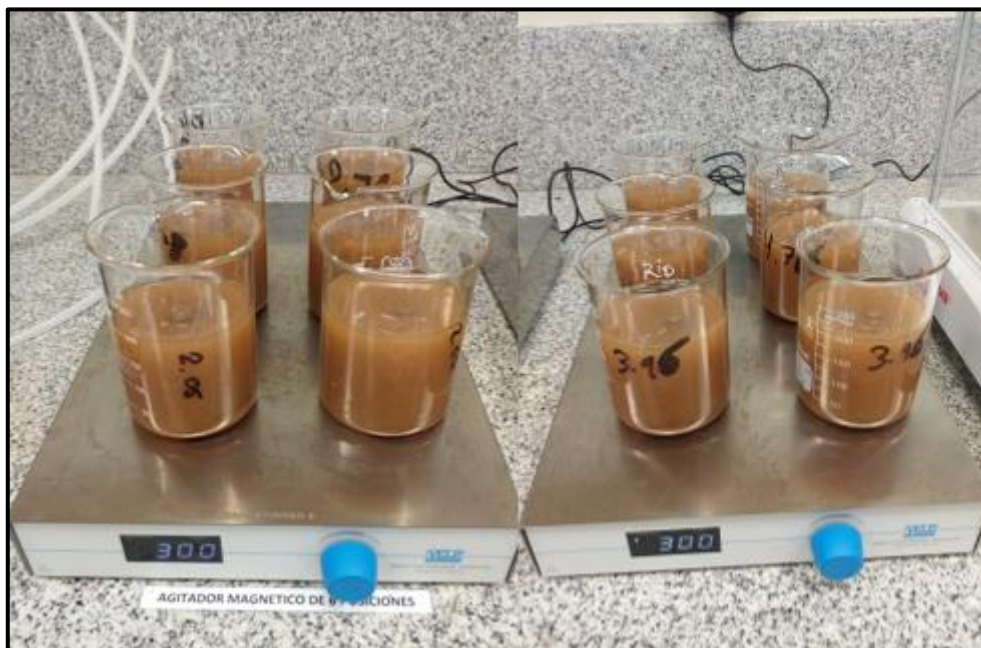
Anexo 2

Cáscara de mamey lista para ser deshidratada en estufa a 80 °C por 24 horas y posterior al proceso de triturado.



Anexo 3

Ajuste de pH de las soluciones de Cr(III) y sistema de agitación a 300 rpm a temperatura ambiente.



Anexo 4

Muestras filtradas listas para lectura de Cr(III) mediante Espectrofotometría de Absorción
Atómica.



Anexo 5

Artículo Científico aprobado para publicar.

Mamey Apple Peel for Cr³⁺ Removal from Contaminated Waters

Nathali Cotrina¹[0000-0002-1850-7307], and Ricardo Vejarano²*[0000-0002-7482-1077]

¹ Environmental Engineering Program, Universidad Privada del Norte, Trujillo, Peru

² Directorate of Research and Development, Universidad Privada del Norte, Trujillo, Peru
ricardo.vejarano@upn.edu.pe

Abstract. The aim of the study was to evaluate the capacity of an adsorbent based on mamey apple (*Mammea americana* L.) peel for Cr³⁺ removal. Model mediums composed of distilled water and different concentrations of Cr³⁺, with a dose of 10 g of adsorbent per liter, were used. The residual concentrations of Cr³⁺ were determined by Atomic Absorption Spectrophotometry, obtaining optimum values of pH of 2.9, adsorbent particle size of 300 μm, and stirring rate of 300 rpm, for Cr³⁺ removal. Kinetics studies indicate a chemical adsorption process, with the best adjustment to pseudo-second order models ($R^2 \geq 0.9973$), a contact time of 120 minutes to reach the adsorbent-Cr³⁺ equilibrium, and a good fit to the Freundlich model ($R^2 = 0.9291$), with an adsorption intensity n of 1.5876. So, our results suggest that Cr³⁺ ions can be efficiently removed by using mamey apple peel-adsorbent, which with a minimum treatment could be used as an adsorbent in the treatment of chromium-contaminated waters.

Keywords: Chromium-contaminated Waters, Adsorption, Mamey Apple Peel.

1 Introduction

In Peru, industrial activities such as leather tanning, paint manufacturing, metal galvanizing, etc., generate considerable volumes of effluents with high contents of chromium (Cr), exceeding in many cases the maximum permissible limits [1]. Like most of heavy metals, Cr cannot be easily degraded or removed from environmental,