



FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Agroindustrial

“Tuna, potencial adsorbente de cobre (Cu^{2+}), hierro (Fe^{3+}) y cromo (Cr^{3+}) de aguas contaminadas”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero Agroindustrial

Autores:

Jhossep Jhanmartin Morales Aredo

Kedi Yhener Gamboa Meregildo

Asesor:

Ing. Ricardo David Vejarano Mantilla

Trujillo - Perú

2021

ACTA DE AUTORIZACIÓN PARA SUSTENTACIÓN DE TESIS

El asesor Ricardo David Vejarano Mantilla, docente de la Universidad Privada del Norte, Facultad de Ingeniería, Carrera profesional de **INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL**, ha realizado el seguimiento del proceso de formulación y desarrollo de la tesis de los estudiantes:

- Jhossep Jhanmartin Morales Aredo
- Kedi Yhener Gamboa Meregildo

Por cuanto, **CONSIDERA** que la tesis titulada: “Tuna, potencial adsorbente de cobre (Cu^{2+}), hierro (Fe^{3+}) y cromo (Cr^{3+}) de aguas contaminadas” para aspirar al título profesional de: Ingeniería Agroindustrial por la Universidad Privada del Norte, reúne las condiciones adecuadas, por lo cual, **AUTORIZA** al o a los interesados para su presentación.

Dr. Ricardo David Vejarano Mantilla
Asesor

ACTA DE APROBACIÓN DE LA TESIS

Los miembros del jurado evaluador asignados han procedido a realizar la evaluación de la tesis de los estudiantes: Jhossep Jhanmartin Morales Aredo y Kedi Yhener Gamboa Meregildo para aspirar al título profesional con la tesis denominada: "Tuna, potencial adsorbente de cobre (Cu^{2+}), hierro (Fe^{3+}) y cromo (Cr^{3+}) de aguas contaminadas".

Luego de la revisión del trabajo, en forma y contenido, los miembros del jurado concuerdan:

Aprobación por unanimidad

Aprobación por mayoría

Calificativo:

Excelente [20 - 18]

Sobresaliente [17 - 15]

Bueno [14 - 13]

Calificativo:

Excelente [20 - 18]

Sobresaliente [17 - 15]

Bueno [14 - 13]

Desaprobado

Firman en señal de conformidad:

Ing./Lic./Dr./Mg. Nombre y Apellidos
Jurado
Presidente

Ing./Lic./Dr./Mg. Nombre y Apellidos
Jurado

Ing./Lic./Dr./Mg. Nombre y Apellidos
Jurado

DEDICATORIA

Jhossep Jhanmartin Morales Aredo dedica esta tesis a:

A mis padres Tarcila del Pilar y Juan Francisco quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer las adversidades porque siempre estuvieron conmigo para apoyarme y dirigir mi camino por el sendero del bien.

A mis hermanas y hermanos Mirian, Eliana, Roberto, Roger, Fran y Alex por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento, gracias. A toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas. Aunque algunos se encuentren lejos, siempre estuvieron ahí para apoyarme con sus palabras de apoyo y reconforte para poder continuar y lograr cumplir todo lo que me había propuesto.

Finalmente quiero dedicar esta tesis a todos aquellos pocos amigos que estuvieron ahí conmigo, por aguantarme, apoyarme cuando más las necesite, por extender su mano en momentos difíciles y por el amor brindado cada día.

Kedi Yhener Gamboa Meregildo dedica esta tesis a:

En primer lugar, quiero dedicar este trabajo a Dios.

Así mismo a mis padres Dionicio Gamboa y Manuela Meregildo quienes con sus valores, humildad y dedicación me han permitido cumplir mis objetivos y ser ejemplo de superación para ellos.

También quiero agradecer a mi novia Susán Ávila y mis hermanos Jholvin Gamboa, Melvin Gamboa y Diana Gamboa por todo su apoyo incondicional, quienes siempre me aconsejaron y ayudaron a seguir en todas las caídas que tuve.

Finalmente quiero dedicar a todos mis amigos y docentes que estuvieron ahí conmigo inculcando valores y enseñanzas de superación tanto académicas como de vida.

Gracias a todos ya que el logro obtenido es el esfuerzo y dedicación de todos los que nos apoyaron.

AGRADECIMIENTO

Jhossep Jhanmartin Morales Aredo agradece esta tesis a:

Me gustaría agradecer en estas líneas la ayuda que muchas personas y colegas me han prestado durante el proceso de investigación y redacción de este trabajo. En primer lugar, quisiera agradecer a mis padres que me han ayudado y apoyado en todo mi producto, a mi asesor, Ricardo David Vejarano Mantilla, por haberme orientado en todos los momentos que necesité sus consejos y apoyo durante todo este recorrido.

A todos mis amigos y futuros colegas que me ayudaron de una manera desinteresada, gracias infinitas por toda su ayuda y buena voluntad.

Kedi Yhener Gamboa Meregildo agradece esta tesis a:

Quiero agradecer primero a Dios por permitirme llegar a este punto en mi vida profesional. Así mismo quiero agradecer a mis padres por todo el esfuerzo que se hizo para poder educarme y no limitarme en mis metas y objetivos.

También quiero agradecer a mi asesor Ricardo David Vejarano Mantilla, por haberme educado e inculcado enseñanzas académicas y representar un ejemplo de persona en el ámbito profesional y social.

TABLA DE CONTENIDOS

ACTA DE AUTORIZACIÓN PARA SUSTENTACIÓN DE TESIS	2
ACTA DE APROBACIÓN DE LA TESIS.....	3
DEDICATORIA.....	4
AGRADECIMIENTO	6
ÍNDICE DE TABLAS	9
ÍNDICE DE FIGURAS.....	10
RESUMEN.....	11
ABSTRACT	12
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1. Realidad problemática	13
1.1.1. Contaminación por metales en Perú	14
1.1.2. Tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados	16
1.1.3. Residuos agroindustriales para la remoción de metales	17
1.1.4. Tuna: adsorbente potencial de metales pesados	18
1.2. Formulación del problema.....	20
1.3. Objetivos.....	20
1.3.1. Objetivo general	20
1.3.2. Objetivos específicos.....	20
1.4. Hipótesis	21
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA.....	22
2.1. Tipo de investigación.....	22
2.2. Materiales, instrumentos y métodos	22
2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos	23
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES	35
REFERENCIAS.....	36

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	25
Tabla 2:	29
Tabla 3	31

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Tratamientos aplicados para obtener los adsorbentes: cladodio sin tratamiento (CT) y cladodio modificado químicamente con Ca^{2+} ($\text{C}_{\text{T}}\text{Ca}$).	24
<i>Figura 2.</i> Procedimiento experimental para la remoción de Cu^{2+} , Fe^{3+} y Cr^{3+} de aguas contaminadas.....	26
<i>Figura 3.</i> Intercambio entre iones Ca^{2+} del adsorbente $\text{C}_{\text{T}}\text{Ca}$ y los iones metálicos (M^{+}).	32
<i>Figura 4.</i> Porcentaje de remoción (%) de Cu^{2+} , Fe^{3+} y Cr^{3+} con los adsorbentes CT y $\text{C}_{\text{T}}\text{Ca}$, tras 2 y 4 horas de tratamiento.....	34

RESUMEN

El objetivo del estudio fue evaluar la capacidad del cladodio de tuna (*Opuntia ficus*) para la remoción de cobre (Cu^{2+}), hierro (Fe^{3+}) y cromo (Cr^{3+}) de soluciones acuosas. Se utilizaron medios modelo a base de agua destilada, y Cu^{2+} , Fe^{3+} o Cr^{3+} a concentraciones iniciales de 19.60, 16.60 y 17.85 ppm, respectivamente. Los medios se trataron con dos tipos de adsorbente a base de cladodio de tuna: cladodio natural (C_T), y cladodio modificado químicamente con calcio (C_TCa). La mayor adsorción de los metales se obtuvo con el adsorbente C_TCa , indicando los resultados que un tiempo de contacto de 2 horas sería suficiente para remover hasta el 82.75%, 78.36% y 87.84% de Cu^{2+} , Fe^{3+} y Cr^{3+} , respectivamente, con respecto a sus concentraciones iniciales. Nuestros resultados sugieren que el cladodio de tuna podría considerarse como un potencial adsorbente para la remoción ecoamigable de estos metales de aguas contaminadas.

Palabras clave: Metales pesados, aguas contaminadas, adsorción, cladodio de tuna.

ABSTRACT

The aim of the study was to evaluate the potential of prickly pear cactus cladode (*Opuntia ficus*) to remove copper (Cu^{2+}), iron (Fe^{3+}) and chromium (Cr^{3+}) from aqueous solutions. Distilled water mixed with Cu^{2+} , Fe^{3+} or Cr^{3+} at initial concentrations of 19.60, 16.60 and 17.85 ppm, respectively, were used as media for testing. The aqueous media were treated with two adsorbents: i) a natural cladode (C_T), and ii) a cladode chemically modified with calcium (C_TCa). The results indicate that a greater metal adsorption was obtained with the C_TCa adsorbent. Moreover, 2 hours of contact was enough to remove up to 82.75%, 78.36% and 87.84% of Cu^{2+} , Fe^{3+} and Cr^{3+} , respectively, with respect to their initial concentrations. Our results suggest that the prickly pear cactus cladode might be potentially effective as an eco-friendly adsorbent for removing heavy metals from contaminated water.

Keywords: Heavy metals, contaminated water, adsorption, prickly pear cactus cladode.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

El Perú es un país de antigua tradición minera, que cuenta con un enorme potencial geológico, la presencia de la Cordillera de los Andes a lo largo del territorio, constituye nuestra principal fuente de recursos minerales. A nivel mundial, Perú se ubica entre los primeros productores de metales como oro, plata, cobre, plomo, zinc, hierro, estaño, molibdeno, telurio, entre otros. Los minerales producidos en el Perú son de gran demanda en el mercado mundial. Estados Unidos, China, Suiza, Japón, Canadá y la Unión Europea son los principales demandantes (Ministerio de Energía y Minas, 2020).

Actualmente a nivel mundial existe una gran preocupación, debido al incremento en los índices de contaminación de efluentes industriales y mineros, en su mayoría metales pesados, los cuales tienden a persistir indefinidamente en el ambiente, comprometiendo el equilibrio y bienestar de la fauna y la flora existentes, así como también la salud de las personas residentes en las comunidades, mediante su acumulación e ingreso a la cadena trófica (Tejada-Tovar, Villabona-Ortiz, Garcés-Jaraba, 2015).

La Organización Mundial de la Salud (WHO, 2003), estableció que la máxima concentración de iones de metales pesados en el agua debe estar en un rango de 0.01-1 ppm, sin embargo, en la actualidad se tienen indicadores de concentraciones iónicas de metales pesados hasta de 450 ppm en los efluentes. Dentro de los principales sectores industriales, que son fuentes de contaminación de metales pesados se encuentran: la minería, industria del cemento, industria productiva, entre otros (Tejada-Tovar et al., 2015).

La legislación ambiental vigente en Perú establece que los efluentes industriales deben tratarse antes de ser vertidos en el agua, suelo y/o aire, ya que contienen sustancias tóxicas que afectan negativamente el funcionamiento de los ecosistemas. Los metales pesados son algunos de los contaminantes más tóxicos presentes en efluentes industriales (OEFA, 2016).

La Resolución 023-2016-OEFA / TFA-SEM del Perú Ministerio del Ambiente (MINAM), se refiere a los metales pesados como peligrosos contaminantes ambientales, debido a su no biodegradabilidad y acumulación (OEFA, 2016). Dado que la mayoría de los metales pesados no tienen funciones en los organismos vivos, no pueden ser degradados o eliminados fácilmente, afectando la biodiversidad de suelos, ríos y lagos, y en muchos casos, matar organismos vivos presentes en estos ecosistemas (Ali, Saeed, Mabood, 2016; Sud, Mahajan, Kaur, 2008).

Los metales pesados pueden ser transportados a cuerpos de agua, filtrados a través del suelo, llegar a fuentes de agua potable o cultivos y en última instancia, incorporarse a la cadena alimentaria y afectar al ser humano con graves consecuencias sobre la salud. De hecho, las altas concentraciones de metales pesados causan enfermedades como erupciones de la piel, hemorragias nasales, problemas respiratorios, inmunodepresión, enfermedades hepáticas, asma, anemia, lesiones cutáneas, diabetes, neurotoxicidad, nefrotoxicidad, enfermedades cardiovasculares, osteoporosis, cáncer, entre otros (Ali et al, 2016; Sud et al., 2008; Squadrone et al, 2016).

1.1.1. Contaminación por metales en Perú

Varias industrias peruanas incluyendo minería, textil, pintura y galvanoplastia son propensos a verter efluentes con altas concentraciones de metales como cobre (Cu), hierro (Fe), cromo (Cr),

plomo (Pb) y arsénico (As) al sistema de alcantarillado y cuencas hidrográficas (Huaranga, Mendez, Quilcat, Huaranga, 2012), superando en muchos casos los límites máximos permitidos por la legislación vigente (MINAM, 2017).

El vertido descontrolado de efluentes con altos niveles de metales en la actividad minera conlleva consecuencias devastadoras para el ambiente y para las poblaciones adyacentes a las explotaciones. Entre ellos tenemos los casos de Cerro de Pasco y Quiruvilca. Un reportaje del programa de televisión Cuarto Poder reveló que, en 2018, en la región Pasco había 3323 personas afectadas con hasta 14 metales pesados. De este número, unas 2670 tenían entre 0 y los 11 años. Al respecto, el jefe del Instituto de Salud del Niño, Daniel Koc, explicó que el problema de los metales pesados, como el plomo o el arsénico, es que dañan diversos órganos y sistemas (RPP, 2020). Así mismo, se informó de la contaminación por la empresa minera Cerro de Pasco Copper Corporation S.A. por el vertimiento de aguas contaminadas hacia lagunas y ríos, con parámetros fuera de los estándares de calidad ambiental (ECA) para agua (Paccara, 2019).

Así mismo, otro problema de contaminación ambiental está ocurriendo en Quiruvilca, provincia de Santiago de Chuco, región La Libertad, cuyas áreas mineras han sido invadidas por mineros informales, convirtiendo dicha actividad en una fuente de contaminación para el río Moche, debido a la inexistencia de labores de remediación ambiental (El Comercio, 2020).

A dicho problema hay que añadir el vertido de efluentes de la industria del curtido de pieles, sin ser tratados previamente, generando contaminación en el río Moche en la ciudad de Trujillo, La Libertad. Como consecuencia, afectando a las poblaciones circundantes que utilizan el agua para regar sus cultivos o criar animales para la producción de carne y leche (Huaranga et al., 2012).

1.1.2. Tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados

Los tratamientos tradicionales de efluentes industriales se basan en procesos físicos, tratamientos químicos de intercambio iónico, precipitación y coagulación, entre otros (Gupta, Kumar, Nayak, Saleh, Barakat, 2013). Sin embargo, estos procesos requieren una inversión tecnológica que, en muchos casos los hace económicamente inviables (Ali et al., 2016).

Dentro del proceso de intercambio iónico, un metal disuelto (adsorbato) se retiene en un soporte sólido (adsorbente), típicamente resina, que establece el equilibrio adsorbato-adsorbente, que, en última instancia, permite la eliminación de iones metálicos del medio contaminado. Por ejemplo, la aplicación de resinas sulfatadas a base de poliestireno para eliminar Cr^{6+} a tasas de hasta 98% (León y Ramírez, 2007). Sin embargo, una de sus desventajas está relacionada con el uso de materiales potencialmente contaminantes como el poliestireno para la síntesis de resinas sulfatadas. El poliestireno genera problemas ambientales relacionados con su alta persistencia en el medio ambiente debido a su resistencia a la biodegradación (Yang, Yang, Wu, Zhao, Song, Gao, Yang, Jiang, 2015).

Otro tratamiento, comúnmente utilizado para los efluentes de curtidurías es la precipitación química con NaOH o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, que puede eliminar hasta el 82% de los metales (Esmaili, Mesdaghi, Vazirinejad, 2005). A pesar de su eficacia, el proceso produce grandes cantidades de lodos que también deben ser tratado antes de la disposición final. Por ejemplo, posterior calcinación a $250\text{ }^\circ\text{C}$ y subsiguiente lixiviación con H_2SO_4 , volviendo al proceso costoso debido a su alto consumo de energía (Pinilla, 2014).

Por su parte, la bioadsorción de iones es otra alternativa para la remoción de metales pesados en aguas residuales provenientes del sector industrial, usando como adsorbente a diferentes

materiales de origen biológico (vivo o muerto) tales como algas, hongos, bacterias, cáscaras de frutas, productos agrícolas y algunos tipos de biopolímeros. Estos materiales son de bajo costo y se encuentran en gran abundancia en la naturaleza, además, su transformación a bioadsorbente no es un proceso costoso (Tejada-Tovar et al., 2015).

El proceso de bioadsorción involucra una fase sólida (biomasa) y una fase líquida (agua) que contiene disueltos la sustancia de interés que será adsorbida (en este caso, el adsorbato o iones del metal). Para que el proceso de bioadsorción se pueda realizar con éxito, debe existir afinidad entre los grupos funcionales de la biomasa y el contaminante (adsorbato), ya que este último debe ser atraído hacia el sólido y enlazado por diferentes mecanismos (Cañizares, 2000; Gautam, Mudhoo, Lofrano, Chattopadhyaya, 2014). El fenómeno de bioadsorción de iones metálicos, usando materiales biológicos como adsorbentes, se puede realizar mediante diversos mecanismos fisicoquímicos y metabólicos en los cuales, el proceso de captación de los metales pesados puede diferir (Tejada-Tovar et al., 2015).

1.1.3. Residuos agroindustriales para la remoción de metales

Perú genera cantidades considerables de residuos agroindustriales que no se utilizan adecuadamente, incluidas las pieles de frutas y verduras, residuos de cereales y biomasa agrícola, entre otros. Varios estudios han propuesto el uso de estos residuos como adsorbentes de metales contaminantes del agua (Ali et al., 2016; Campos, Castillo, Gurreonero, Obeso, Diaz, Vejarano, 2018; Campos, Gurreonero, Vejarano, 2019; Tejada-Tovar et al., 2015; Vejarano, Gurreonero, Castillo, 2018).

Estas propuestas se basan en el fenómeno químico de adsorción, aprovechando la interacción entre los iones metálicos y los polímeros que constituyen estos residuos. Entre los polímeros

que tienen la capacidad de adsorber iones metálicos están la pectina y lignina, presentes en una amplia variedad de plantas. Ambos polímeros contienen grupos hidroxilo (OH), carbonilo (CO) y carboxilo (COOH), que pueden fijar iones (Campos et al., 2019; Pehlivan, Altun, Parlayici, 2012).

Además, se ha demostrado que la pectina aislada de vegetales puede ser una alternativa interesante para la remoción de metales. Por ejemplo, la pectina de la cáscara de naranja se ha utilizado para eliminar efluentes que contienen Fe en minas peruanas, eliminando hasta 54% de metales (Bejarano, Gonzales, Rodriguez, Abal, Rivera, Cruzado, Huaman, 2016), en un proceso que está directamente relacionado con los grupos -COOH de la pectina y su capacidad quelante. Sin embargo, el procedimiento es costoso ya que implica la extracción y purificación de la pectina.

1.1.4. Tuna: adsorbente potencial de metales pesados

La tuna o nopal (*Opuntia ficus-indica*) es una planta de gran importancia en los sistemas agropastoriles de los andes peruanos. Esta cactácea se encuentra ampliamente distribuida en el país, especialmente en los valles interandinos donde ha encontrado condiciones adecuadas para su establecimiento. Se usa principalmente para producir la fruta que crece en los cladodios, consumida por los pobladores locales y comercializada en los principales mercados locales (GRALL, 2009), y como anfitrión para la cría de cochinilla (*Dactylopius coccus*), y en menor medida como forraje para ganado (Nharingo y Moyo, 2016).

Los cladodios de tuna son pencas de 30 a 60 cm de largo por 20 a 40 cm de ancho y de 2 a 3 cm de espesor, de color verde opaco con areolas que contienen espinas más o menos numerosas de color amarillo. Estas estructuras transforman la luz en energía química a través de la

fotosíntesis y están recubiertos por una cutícula del tipo lipídica, interrumpida por la presencia de estomas, los mismos que permanecen cerrados durante el día. La conformación de la cutícula del cladodio evita la deshidratación provocada por las altas temperaturas del verano. La hidratación normal del cladodio alcanza hasta un 95% de agua en peso. El sistema radicular es profundo; no obstante, dependiendo de la humedad ambiental, pueden desarrollar raíces laterales superficiales (GRALL, 2009).

Esta planta crece salvaje en diferentes áreas de la costa y los Andes y aún no ha sido explotado masivamente con fines industriales. Al respecto, algunos estudios han reportado la utilidad de extractos de cladodio de nopal como floculantes para la clarificación del agua y como adsorbentes de metales en aguas contaminadas (Bayar, Kriaa, Kammoun, 2016; Nharingo y Moyo, 2016; Ibarra, Lizardi, Lopez, Maldonado, Oropeza, 2017).

Su mecanismo de adsorción está relacionado con la presencia de polímeros en el mucílago del cladodio, cuyo principal componente son arabinosa, galactosa, ramnosa, xilosa, ácido galacturónico, y especialmente pectina (Vargas, Arroyo, Herrera, Perez, Garcia, Rodriguez, 2015). Sin embargo, como en otros casos, la principal desventaja de esta alternativa es el alto costo involucrado en la obtención y purificación de los extractos con alto contenido de pectina (Bayar et al., 2016; Nharingo y Moyo, 2016).

Estudios previos han informado que es posible mejorar la capacidad de adsorción de las biomásas utilizadas como adsorbentes de metales mediante la aplicación de tratamientos químicos, como la incorporación de iones calcio (Ca^{2+}) (Cazón, Benitez, Donati Viera, 2012). El mejoramiento en la capacidad de adsorción podría estar relacionado con el intercambio iónico entre los iones de Ca^{2+} incorporados y los metales disueltos en el agua contaminada.

En este contexto, el objetivo del estudio fue evaluar la capacidad para disminuir la concentración de cobre (Cu^{2+}), hierro (Fe^{3+}) y cromo (Cr^{3+}) de aguas contaminadas mediante cladodio de tuna, considerando su bajo costo y alta disponibilidad en Perú, así como evaluar si la modificación química de la biomasa de cladodio de tuna mediante iones de Ca^{2+} (C_TCa) mejora la capacidad de adsorción de metales en comparación con la biomasa natural de cladodio de tuna (C_T).

1.2. Formulación del problema

¿Es posible remover cobre (Cu^{2+}), hierro (Fe^{3+}) y cromo (Cr^{3+}) de aguas contaminadas mediante adsorbentes a base de cladodio de tuna (*Opuntia ficus*)?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Remover cobre (Cu^{2+}), hierro (Fe^{3+}) y cromo (Cr^{3+}) de aguas contaminadas mediante adsorbentes a base de cladodio de tuna (*Opuntia ficus*).

1.3.2. Objetivos específicos

- Evaluar la capacidad del cladodio de tuna (*Opuntia ficus*) para remover cobre (Cu^{2+}), hierro (Fe^{3+}) y cromo (Cr^{3+}) de aguas contaminadas.
- Evaluar si la modificación química mejora la capacidad del cladodio de tuna (*Opuntia ficus*) para remover cobre (Cu^{2+}), hierro (Fe^{3+}) y cromo (Cr^{3+}) de aguas contaminadas.

1.4. Hipótesis

Si es posible remover cobre (Cu^{2+}), hierro (Fe^{3+}) y cromo (Cr^{3+}) de aguas contaminadas mediante adsorbentes a base de cladodio de tuna (*Opuntia ficus*).

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación

2.1.1. De acuerdo con el fin que se persigue: Aplicada.

2.1.2. De acuerdo con la naturaleza de los datos: Cuantitativa.

2.1.3. De acuerdo con el nivel: Explicativa.

2.1.4. De acuerdo con el diseño de investigación: Experimental pura.

2.2. Materiales, instrumentos y métodos

2.2.1. Instrumentos y equipos

- Estufa eléctrica *Ofinezza*, No fz - 202d3 (China)
- Balanza analítica digital, *OHAUS* Coporation Model: PA224C (Estados Unidos)
- pH-metro *HANNA* pHep®5 (HI 98128) (Alemania)
- Spectrophotometer Agilent Technologies 200 Series AA (Estados Unidos)
- Digestor - Digi Prep Jr (SCP Science, Canadá)

2.2.2. Material de laboratorio

- Vasos de precipitación
- Bureta
- Matraz
- Hidróxido de sodio (NaOH)
- Cloruro de Calcio (CaCl_2)
- Nitrato de hierro III: $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$

- Nitrato de cobre II: $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$
- Nitrato de cromo III: $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$

2.2.3. Materiales consumibles

- Cladodio de tuna
- Agua destilada

2.2.4. Fuentes de Datos

Base de datos Science Direct y E-Book

2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos

La metodología adoptada para las pruebas experimentales es basada en los procedimientos de las referencias presentadas en secciones correspondientes. El estudio se realizó en el Laboratorio de Análisis Instrumental de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Privada del Norte (ciudad de Trujillo).

2.3.1. Preparación de adsorbentes a base de cladodio de tuna

Los cladodios se lavaron para eliminar impurezas y se cortaron en trozos de 1 cm x 1 cm, para ser posteriormente secados a 60 °C durante 48 horas. La biomasa seca se dividió en dos porciones y tratadas siguiendo la metodología mostrada en la Figura 1. Esto se hizo para obtener dos tipos de adsorbentes:

- C_T : Adsorbente a base de cladodio sin tratamiento químico.
- C_TCa : Adsorbente a base de cladodio modificado químicamente con Ca^{2+} .

Se aplicó un diseño bifactorial (Tabla 1), en el que la concentración residual de Cu^{2+} , Fe^{3+} o Cr^{3+} (o su equivalente en porcentaje de remoción) es la variable dependiente, mientras que el tipo de biomasa y el tiempo de contacto se trataron como variables independientes, trabajando por triplicado.

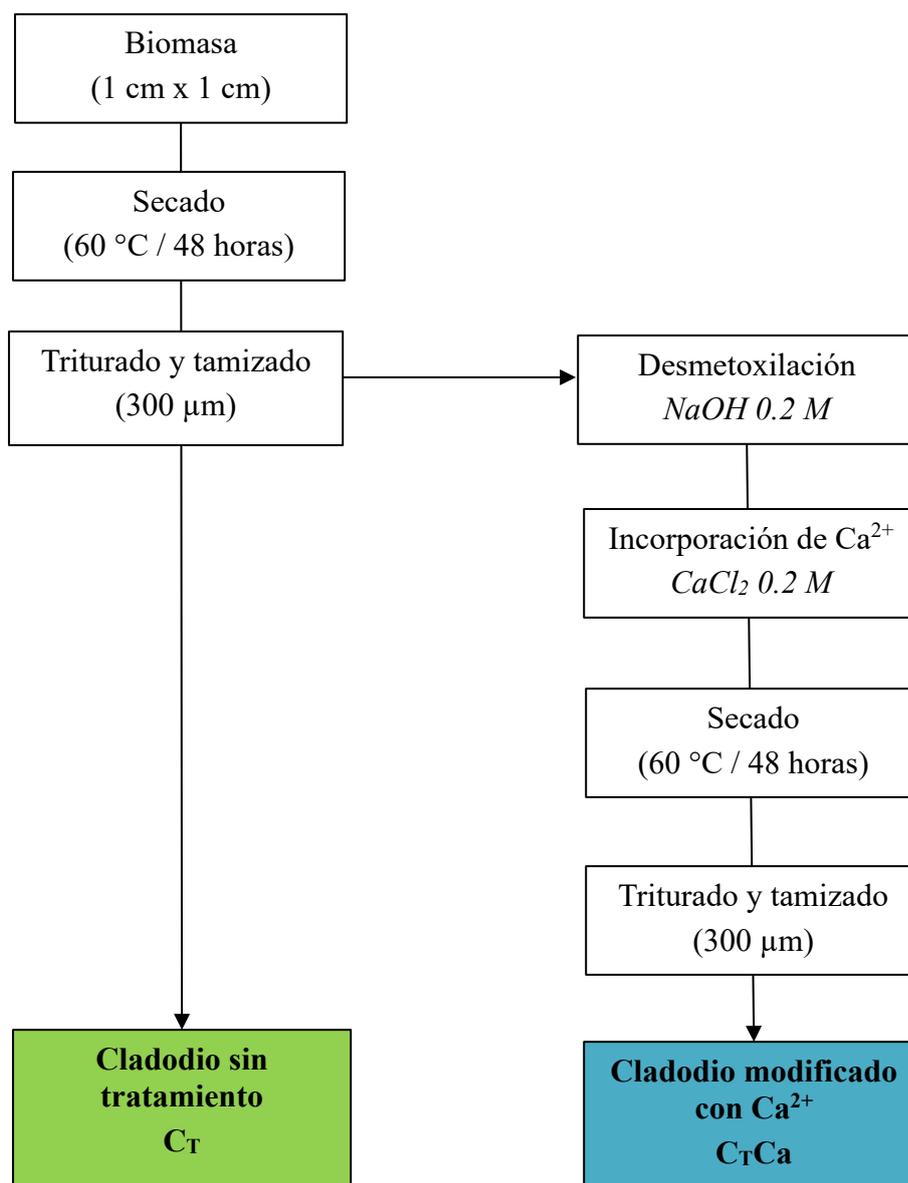


Figura 1. Tratamientos aplicados para obtener los adsorbentes: cladodio sin tratamiento (C_T) y cladodio modificado químicamente con Ca^{2+} ($C_T\text{Ca}$).

Tabla 1:

Diseño experimental aplicado para cada metal.

Tiempo de tratamiento (horas)	Tipo de adsorbente	
	C_T	$\text{C}_{T\text{Ca}}$
2	Y_{111}	Y_{211}
	Y_{112}	Y_{212}
	Y_{113}	Y_{213}
4	Y_{121}	Y_{221}
	Y_{122}	Y_{222}
	Y_{123}	Y_{223}

2.3.2. Pruebas experimentales

La Figura 2 resume el procedimiento experimental. Los medios acuosos se prepararon a partir de soluciones comerciales de 1000 ppm de $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$, $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ y $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$ (Merck Millipore, Alemania), diluyendo en agua destilada hasta concentraciones en torno a 20 ppm. Se tomaron 100 ml de cada medio acuoso y 10 g del adsorbente correspondiente se añadió a cada medio. Las muestras se agitaron a 250 rpm, a temperatura ambiente, con tiempos de contacto de 2 y 4 horas, como se muestra en la Tabla 1.

Una vez transcurridos los tiempos de agitación y contacto adsorbente-solución de metal, se removió el respectivo adsorbente mediante filtración al vacío, separando y almacenando el sobrenadante para los posteriores análisis.

2.3.3. Digestión de las muestras y análisis del metal residual contenido

Siguiendo el procedimiento propuesto por Campos et al. (2018), a cada sobrenadante se añadió 2 ml de HNO_3 y 1 ml de HCl . Se llevó a digestión a $120\text{ }^\circ\text{C}$ (digestor Digi Prep Jr, SCPScience, Canadá), evaporando la mitad del contenido. Luego, la temperatura se aumentó a $140\text{ }^\circ\text{C}$ para evaporar hasta un volumen final de 5 ml. Se dejó enfriar y se añadió 0.5 ml de HCl a cada muestra, enrasando con agua ultrapura hasta 50 ml. Finalmente en el espectrofotómetro de absorción atómica (Agilent Technologies 200 Series AA, Estados Unidos) se midieron las cantidades residuales de los metales pesados que las muestras contenían, en longitudes de onda de 248.3, 324.8 y 357.9 nm para Cu^{2+} , Fe^{3+} , Cr^{3+} , respectivamente.

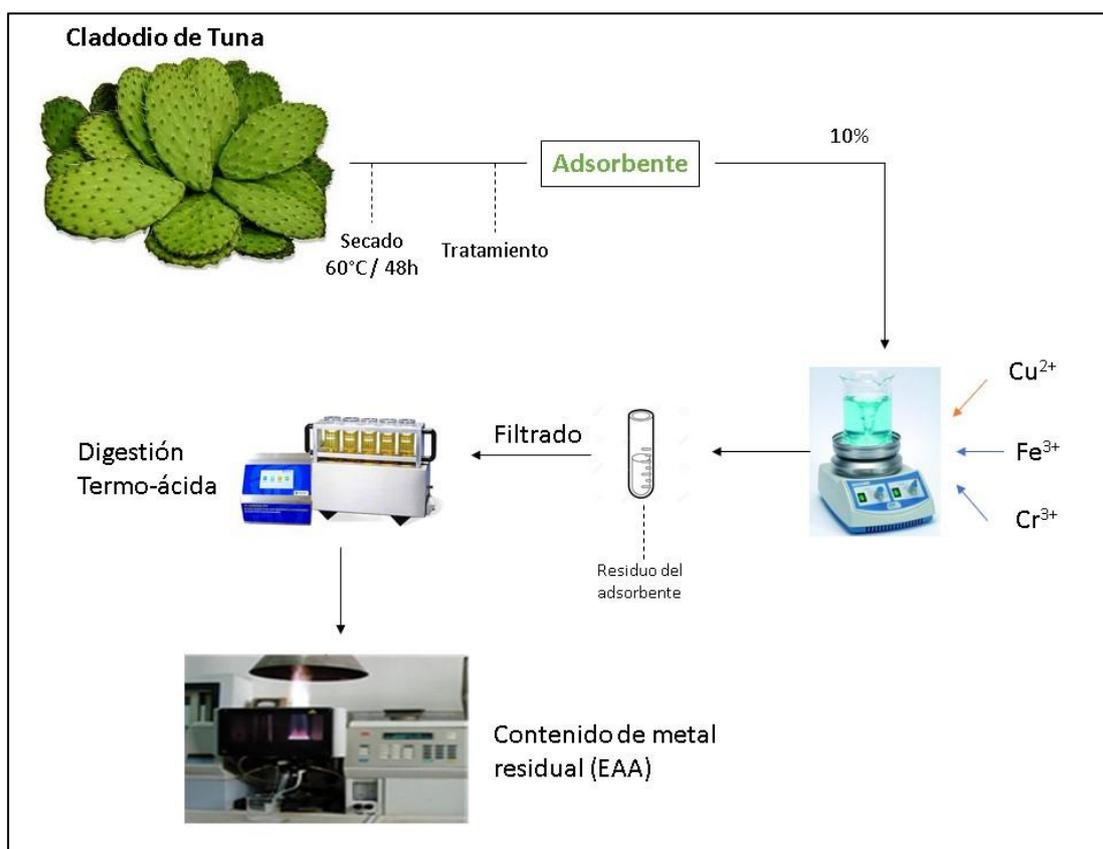


Figura 2. Procedimiento experimental para la remoción de Cu^{2+} , Fe^{3+} y Cr^{3+} de aguas contaminadas.

2.3.4. Cálculo de porcentajes de remoción de Cu^{2+} , Fe^{3+} y Cr^{3+}

El porcentaje de cada metal adsorbido por el respectivo adsorbente se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Remoción (\%)} = \frac{(C_0 - C)}{C_0} \times 100$$

Donde C_0 es la concentración inicial de cada metal ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ o ppm), y C es la concentración residual de metal ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ o ppm) después de ser tratado con el adsorbente respectivo.

2.3.5. Análisis estadístico

Se empleó un análisis de varianza (ANOVA) para identificar diferencias significativas, mientras que la prueba HSD de Tukey (5% significancia) se utilizó para identificar los tratamientos con el mayor efecto respecto a cada tipo de adsorbente y cada tiempo de contacto. Se utilizó el software Statgraphics v.5 (Graphics Software Systems, Rockville, MD, USA).

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los problemas recurrentes asociados a un control inadecuado del vertido de metales en las cuencas fluviales peruanas son una amenaza para los ambientes naturales. Por ejemplo, en la cuenca del río Moche (La Libertad) (Huaranga et al. 2012), se han identificado altos niveles de metales en varios campos de cultivo. De hecho, la ingestión de productos agrícolas con niveles elevados de estos metales podría conducir a su acumulación, eventualmente alcanzando niveles tóxicos para el organismo humano.

Se ha detectado hasta 11.0 ppm de Fe en la cuenca alta del río Moche (Huaranga et al., 2012), mientras que en la cuenca baja del mismo río se ha informado de niveles de hasta 9.3 ppm de Cu (Soplopucó, 2000). El último hallazgo es alarmante considerando que en promedio 5.0 ppm de Cu es letal para algunos peces tras 48 horas de exposición (Huaranga et al., 2012). Además, cuando el Cu se combina con otros metales más peligrosos, como el arsénico (As), puede generar graves consecuencias para la salud humana (Squadrone et al., 2016). En cuanto al Cr, se han reportado niveles superiores a 100 ppm en efluentes de curtiduría de pieles en varias ciudades de Perú en las cuales se concentra un número importante de empresas dedicadas a dicha actividad, donde en muchas ocasiones los efluentes son vertidos directamente a la red de alcantarillado (Cordova, Vargas, Cesare, Flores, Visitación, 2014).

3.1. Efecto de la remoción sobre el pH de las muestras

Inicialmente, las soluciones presentaban valores de pH en torno a 2.0 (alta acidez), menores a 5.5, que es el valor mínimo requerido las aguas puedan ser potabilizadas con tratamiento convencional según la legislación vigente en Perú (MINAM, 2017). Por otro lado, para la

conservación del ambiente acuático en ríos de las regiones del Perú, se debe tener como mínimo un pH de 6.5, según la legislación vigente (MINAM, 2017).

En la Tabla 2, después de aplicar los adsorbentes C_T y C_TCa , la acidez del medio disminuyó, evidenciando un aumento del pH, con mayor efecto en el adsorbente C_TCa , alcanzando valores superiores a 5.5 en el caso del Fe^{3+} y Cr^{3+} después de 2 horas de tratamiento. En el caso del Cu^{2+} teniendo 4 horas de contacto alcanzo un pH de 5.31 ± 0.03 siendo un valor cercano al valor mínimo según la legislación vigente en Perú (MINAM 2017).

Tabla 2:
Medio antes y después de la aplicación de los adsorbentes C_T y C_TCa .

Metal	Tiempo de tratamiento	C_T	C_TCa
	Inicial	1.99 ± 0.00 aA	1.99 ± 0.00 aA
Cu^{2+}	2 horas	2.81 ± 0.01 bA	5.06 ± 0.04 bB
	4 horas	2.79 ± 0.01 bA	5.31 ± 0.03 cB
	Inicial	2.09 ± 0.00 aA	2.09 ± 0.00 aA
Fe^{3+}	2 horas	2.85 ± 0.01 bA	5.57 ± 0.01 bB
	4 horas	2.83 ± 0.01 bA	6.01 ± 0.03 cB
	Inicial	2.03 ± 0.00 aA	2.03 ± 0.00 aA
Cr^{3+}	2 horas	3.17 ± 0.00 bA	5.64 ± 0.04 bB
	4 horas	3.21 ± 0.01 cA	5.72 ± 0.00 cB

Promedio \pm D.E. para tres repeticiones. Para cada metal, diferentes letras minúsculas en la misma columna indican diferencia significativa entre diferentes tiempos de tratamiento. Diferentes letras mayúsculas en la misma fila indican diferencia significativa entre adsorbentes (prueba de DSH Tukey, $p < 0.05$).

3.2. Contenido residual de metales en las muestras

La Tabla 3 muestra las concentraciones residuales de Cu^{2+} , Fe^{3+} y Cr^{3+} . El análisis estadístico (DSH de Tukey, $p < 0.05$) indica que no existen diferencias significativas entre el tiempo de tratamiento con ambos adsorbentes. Esto indica que 2 horas del tratamiento es suficiente para reducir el contenido metálico, ya que el adsorbente alcanza su máxima capacidad de adsorción debido a la saturación de los grupos $-\text{COOH}$ de la pectina, que actúan como agentes quelantes de los iones metálicos (Bejarano et al., 2016; Chao, Chang, Nieva, 2014; Hu, Zhang, Pan, Zhang, Lv, Zhang, 2012; Vargas et al., 2015), conduciendo al equilibrio del sistema adsorbente-adsorbato (Jacques, Lima, Dias, Mazzocato, Pavan, 2007), es decir, a partir de ese momento el adsorbente ya no es capaz de adsorber más iones metálicos.

En cuanto al tipo de adsorbente, se observaron diferencias significativas entre los adsorbentes C_T y C_{TCa} (Tabla 3). Para el Cu^{2+} (concentración inicial de 19.60 ppm), tras 2 horas de tratamiento, el contenido residual fue de 3.38 ppm con el adsorbente C_{TCa} , mientras que para el adsorbente C_T la concentración solo se redujo a 15.22 ppm. Es decir, la misma dosis de C_{TCa} adsorbió mayor cantidad de iones en el mismo tiempo (2 horas). Un comportamiento similar fue observado después de 4 horas de tratamiento. Respecto al Fe^{3+} (concentración inicial de 16.6 ppm), se observó un comportamiento similar con ambos adsorbentes (C_T y C_{TCa}).

Por su parte, se observó una mayor adsorción de Cr^{3+} respecto a los otros metales. El contenido residual fue de 5.05 y 2.17 ppm para los adsorbentes C_T y C_{TCa} , respectivamente, tras 2 horas de tratamiento (concentración inicial de 17.85 ppm). No se observó mayor remoción a un mayor tiempo de tratamiento (4 horas) (HSD de Tukey, $p < 0.05$).

Estos resultados indican que los adsorbentes a base de cladodio de tuna poseen una mayor capacidad de adsorción de Cr^{3+} con respecto a Cu^{2+} y Fe^{3+} , siendo aún mayor para el adsorbente $\text{C}_{\text{T}}\text{Ca}$, que estaría relacionada con la incorporación de Ca^{2+} , en concordancia con estudios previos (Cazón, Benítez, Donati, Viera, 2012).

Tabla 3
Concentración residual de metales (ppm) después de los tratamientos de adsorción.

Metal	Tiempo de tratamiento	Contenido residual de metal (ppm)	
		C_{T}	$\text{C}_{\text{T}}\text{Ca}$
	Inicial	19.60 ± 0.00 aA	19.60 ± 0.00 aA
Cu^{2+}	2 horas	15.22 ± 0.11 bA	3.38 ± 0.25 bB
	4 horas	15.69 ± 0.25 bA	3.70 ± 0.12 bB
	Inicial	16.60 ± 0.00 aA	16.60 ± 0.00 aA
Fe^{3+}	2 horas	12.07 ± 0.15 bA	3.59 ± 0.55 bB
	4 horas	12.38 ± 0.35 bA	3.35 ± 0.36 bB
	Inicial	17.85 ± 0.00 aA	17.85 ± 0.00 aA
Cr^{3+}	2 horas	5.05 ± 0.15 bA	2.17 ± 0.12 bB
	4 horas	5.23 ± 0.23 bA	1.71 ± 0.25 bB

Promedio \pm D.E. para tres repeticiones. Para cada metal, diferentes letras minúsculas en la misma columna indican diferencia significativa entre diferentes tiempos de tratamiento. Diferentes letras mayúsculas en la misma fila indican diferencia significativa entre adsorbentes (prueba de DSH Tukey, $p < 0.05$).

Para el adsorbente CrCa , la adsorción se realiza mediante el intercambio iónico entre el Ca^{2+} y cada uno de los metales en cada medio (Cu^{2+} , Fe^{3+} o Cr^{3+}), de acuerdo con el esquema de la Figura 3. El proceso incluye dos etapas: una migración rápida del ion metálico (M^+) hacia la superficie del adsorbente, seguido por una migración más lenta hacia el sitio activo donde se ubica el catión Ca^{2+} , desplazándolo hasta alcanzar el equilibrio en ambas fases (Cazón et al., 2012). Esto provoca la captura de iones metálicos en una red tridimensional formada por los polímeros del adsorbente, y como consecuencia, el ion metálico queda inmovilizado.

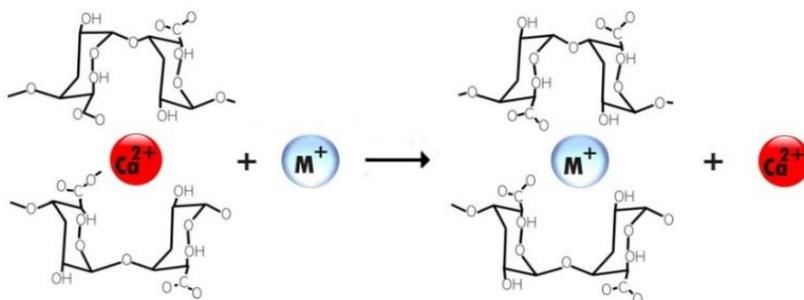


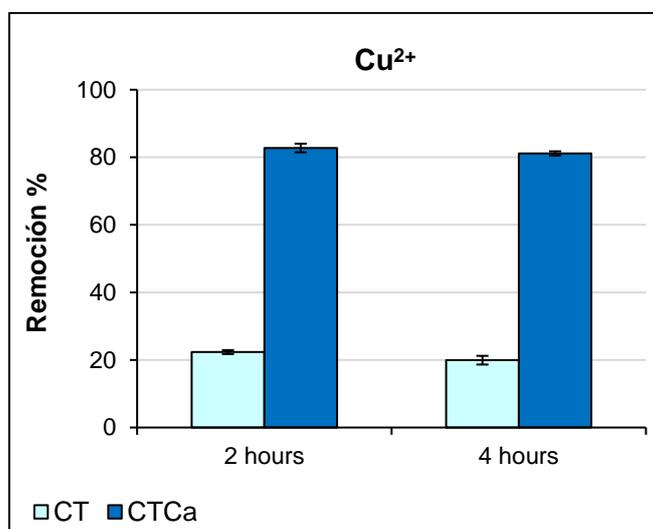
Figura 3. Intercambio entre iones Ca^{2+} del adsorbente CrCa y los iones metálicos (M^+).

Adaptación de Villanueva (2006).

La modificación química de la biomasa de tuna ocurre a nivel de la pectina, mejorando su capacidad para adsorber Cu^{2+} , Fe^{3+} y Cr^{3+} , a tasas de hasta 82.75%, 78.36% y 87.84%, respectivamente, tras 2 horas de tratamiento, no mostrando una mayor reducción a mayor tiempo (Figura 4). Respecto al Cu^{2+} , un estudio anterior mostró un potencial de eliminación similar después de 2 horas de tratamiento con cladodio de tuna modificado con Ca^{2+} , reduciendo el contenido de Cu^{2+} de 19.2 ppm a 3.5 ppm (Villanueva, 2006). No obstante, en el estudio mencionado se trabajó a un pH de 4.5 y un tiempo de tratamiento de 24 horas.

Otro estudio reportó la remoción de Cu^{2+} , Cr^{3+} y otros metales mediante pectina aislada de cladodio de tuna (Ibarra et al, 2017), a tasas de hasta 99 y 98%, respectivamente. A pesar de la alta eficiencia lograda, el proceso puede ser costoso, al requerir el uso de reactivos químicos y calor para lograr el aislamiento y purificación de la pectina.

No se ha reportado previamente la remoción de Cr^{3+} mediante la utilización de adsorbentes a base de cladodio de tuna modificado químicamente, aunque en el caso de remoción de Cr^{6+} se ha estudiado el efecto de la modificación química de biomasa de tuna con H_2SO_4 (Fernández, Angosto, Avilés, 2014), logrando remover hasta un 68 y 40% de Cr^{6+} a partir de soluciones de 10 y 30 ppm (pH = 2.0). Tampoco se ha reportado aplicaciones de adsorbentes a base de tuna modificada químicamente con Ca^{2+} para la remoción de Fe^{3+} .



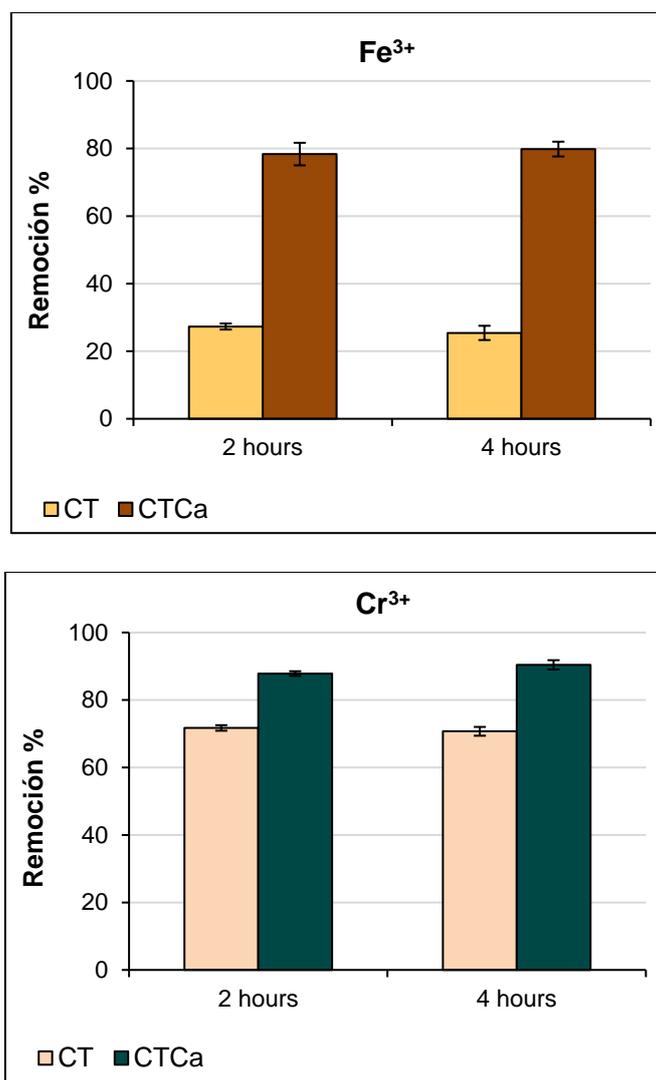


Figura 4. Porcentaje de remoción (%) de Cu^{2+} , Fe^{3+} y Cr^{3+} con los adsorbentes C_T y $\text{C}_{T\text{Ca}}$, tras 2 y 4 horas de tratamiento.

CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES

Se logro remover cobre (Cu^{2+}), hierro (Fe^{3+}) y cromo (Cr^{3+}) de aguas contaminadas mediante adsorbentes a base de cladodio de tuna (*Opuntia ficus*) modificado químicamente con Ca^{2+} ($\text{C}_{\text{T}}\text{Ca}$), alcanzando porcentajes de remoción de hasta 82.75%, 78.36% y 87.84%, superiores a los porcentajes de remoción obtenidos con el cladodio de tuna sin tratamiento (C_{T}), de hasta 22.34%, 27.30% y 71.72%.

Se determinó la eficacia de la biomasa de cladodio de tuna como adsorbente de Cu^{2+} , Fe^{3+} y Cr^{3+} , logrando reducir más del 75% el contenido de estos metales en los medios ensayados, con tan solo 2 horas de tratamiento, alcanzando la mayor remoción con el cladodio de tuna modificado con Ca^{2+} ($\text{C}_{\text{T}}\text{Ca}$).

La adsorción mediante cladodio de tuna constituye una potencial alternativa a los métodos convencionales de remoción de metales en aguas contaminadas, por lo que se puede utilizar como una tecnología efectiva, de fácil manejo y amigable con el ambiente.

Son necesarios posteriores estudios para evaluar la efectividad del cladodio de tuna para la remoción de Cu^{2+} , Fe^{3+} y Cr^{3+} en efluentes industriales, como los producidos por la minería y la curtiduría de pieles, y desarrollar un procedimiento de remoción con perspectivas de aplicabilidad a nivel industrial.

REFERENCIAS

- Ali, A., Saeed, K., Mabood, F. (2016). Removal of chromium (VI) from aqueous medium using chemically modified banana peels as efficient low-cost adsorbent. *Alexandria Engineering Journal*, 55, 2933-2942.
- Bayar, N., Kriaa, M. y Kammoun, R. (2016). Extraction and characterization of three polysaccharides extracted from *Opuntia ficus indica* cladodes. *International Journal of Biological Macromolecules*, 92, 441-450.
- Bejarano, J., Gonzales, O., Rodríguez, J., Abal, I., Rivera, C., Cruzado, M. y Huamán, K. (2016). Influence of contact time and particle size of pectin from orange (*Citrus sinensis*) in decreasing of iron (Fe) content in mining effluents. *Agroindustrial Science*, 6(2), 169-173.
- Campos, G., Castillo, A., Gurreonero, J., Obeso, J., Díaz, V. y Vejarano, R. (2018). Adsorbent material based on passion-fruit wastes to remove lead (Pb), chromium (Cr) and copper (Cu) from metal-contaminated waters. *AIP Conference Proceedings*, 1952, 020079.
- Campos, G., Gurreonero, J. y Vejarano, R. (2019). Passion-fruit shell biomass as adsorbent material to remove chromium III from contaminated aqueous mediums. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 620, 012110.
- Cañizares-Villanueva, R. (2000). Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 42(3), 131-143.

- Cazón, J., Benítez, L., Donati, E. y Viera, M. (2012). Biosorption of chromium (III) by two brown algae *Macrocystis pyrifera* and *Undaria pinnatifida*: Equilibrium and kinetic study. *Engineering in Life Sciences*, 12(1), 95-103.
- Chao, H., Chang, C. y Nieva, A. (2014). Biosorption of heavy metals on Citrus maxima peel, passion fruit shell, and sugarcane bagasse in a fixed-bed column. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(5), 3408-3414.
- Córdova, H., Vargas, R., Cesare, M., Flores, L. y Visitación, L. (2014). Tratamiento de las aguas residuales del proceso de curtido tradicional y alternativo que utiliza acomplexantes de cromo. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 80(3), 183-191.
- Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, de 06 de junio, de *Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias*. Diario Oficial El Peruano, de 07 de junio de 2017. Recuperado de: <http://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-004-2017-minam/>
- Esmaeili, A., Mesdaghi, A. y Vazirinejad, R. (2005). Chromium (III) removal and recovery from tannery wastewater by precipitation process. *American Journal of Applied Sciences*, 2(10), 1471-1473.
- Fernández, J., Angosto, J. y Avilés, M. (2014). Biosorption of hexavalent chromium from aqueous medium with *Opuntia* biomass. *The Scientific World Journal*, 2014, 670249.
- Gautam, R., Mudhoo, A., Lofrano, G. y Chattopadhyaya, M. (2014). Biomass-derived biosorbents for metal ions sequestration: Adsorbent modification and activation

- methods and adsorbent regeneration. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(1), 239-259.
- Gupta, V., Kumar, R., Nayak, A., Saleh, T. y Barakat, M. (2013). Adsorptive removal of dyes from aqueous solution onto carbon nanotubes: a review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 193-194, 24-34.
- Hu, M., Zhang, S., Pan, B., Zhang, W., Lv, L. y Zhang, Q. (2012). Heavy metal removal from water/wastewater by nanosized metal oxides: a review.” *Journal of Hazardous Materials*, 211-212, 317-331.
- Huaranga, F., Méndez, E., Quilcat, V. y Huaranga, F. (2012). Contaminación por metales pesados en la cuenca del río Moche, 1980 – 2010, La Libertad – Perú. *Scientia Agropecuaria*, 3(3), 235-247.
- Ibarra, D., Lizardi, J., López, E. y Oropeza, M. (2017). Capacity of ‘nopal’ pectin as a dual coagulant-flocculant agent for heavy metals removal. *Chemical Engineering Journal*, 323, 19-28.
- Jacques, R., Lima, E., Dias, S., Mazzocato, A. y Pavan, F. (2007). Yellow passion-fruit shell as biosorbent to remove Cr (III) and Pb (II) from aqueous solution. *Separation and Purification Technology*, 57, 193-198.
- León, R. y Ramírez, M. (2007). Síntesis, caracterización y aplicación del PS entrecruzado a partir de residuos de PS. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 8(2), 112-137.

Ministerio de Energía y Minas (2020). *Perú: País Minero*. Recuperado de:

[http://www.minem.gob.pe/_detalle.php?idSector=1&idTitular=159&idMenu=sub149
&idCateg=159](http://www.minem.gob.pe/_detalle.php?idSector=1&idTitular=159&idMenu=sub149&idCateg=159)

Nharingo, T. y Moyo, M. (2016). Application of *Opuntia ficus-indica* in bioremediation of wastewaters. A critical review. *Journal of Environmental Management*, 166, 55-72.

OEFA. (2016). *RESOLUCION N° 023-2016-OEFA/TFA-SEM*. Recuperado de:
https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=17626

Pehlivan, E., Altun, T., y Parlayici, S. (2012). Modified barley straw as a potential biosorbent for removal of copper ions from aqueous solution. *Food Chemistry*, 135(4), 2229-2234.

Pinilla, D. (2014). *Precipitación de cromo y reutilización del agua de vertimientos de curtiembres de San Benito (Bogotá)* (Tesis de pregrado). Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia.

Quiruvilca dejaría de ser foco de informalidad y contaminación. (06 de enero de 2020). El Comercio. Recuperado de: <https://elcomercio.pe/economia/dia-1/plata-quiruvilca-dejaria-de-ser-foco-de-informalidad-y-contaminacion-mineria-informal-noticia/?ref=ecr>

Squadrone, S., Burioli, E., Monaco, G., Koya, M., Prearo, M., Gennero, S., Dominici, A. y Abete, A. (2016). Human exposure to metals due to consumption of fish from an artificial lake basin close to an active mining area in Katanga (D.R. Congo). *Science of the Total Environment*, 568, 679-684.

- Soplopucó, M. (2000). *Contaminación por relaves sobre agua, suelos y cultivos en la cuenca baja del río Moche, enero-diciembre de 1998*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Trujillo, Perú.
- Sud, D., Mahajan, G., y Kaur, M. (2008). Agricultural waste material as potential adsorbent for sequestering heavy metal ions from aqueous solutions: a review. *Bioresource Technology*, 99, 6017-6027.
- Tejada-Tovar, C., Villabona-Ortiz, A. y Garcés-Jaraba, L. (2015). Adsorption of heavy metals in wastewater using biological materials. *TecnoLógicas*, 18(34), 109-123.
- Vargas, L., Arroyo, G., Herrera, C., Pérez, A., García, M. y Rodríguez, J. (2015). Physical properties of mucilage prickly pear. *Acta Universitaria*, 26(1), 8-11.
- Vejarano, R., Gurreonero, J. y Castillo, A. (2018). Adsorption of lead (Pb) from contaminated aqueous mediums using banana (*Musa paradisiaca*) peel. *Proceedings of the LACCEI International Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, 67.
- Villanueva, C. (2006). *Biosorción de cobre (II) por biomasa pretratada de cáscara de Citrus sinensis (naranja), Citrus limonium (limón) y Opuntia ficus (palmeta de nopal)* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
- World Health Organization. (2003). *Chromium in drinking-water*. Recuperado de: https://www.who.int/water_sanitation_health/water-quality/guidelines/chemicals/chromium.pdf
- Yang, Y., Yang, J., Wu, W., Zhao, J., Song, Y., Gao, L., Yang, R. y Jiang, L. (2015). Biodegradation and mineralization of polystyrene by plastic-eating mealworms: part 1.

Chemical and physical characterization and isotopic tests. *Environmental Science and Technology*, 49(20), 12080-12086.