

Bioadsorbentes no convencionales empleados en la remoción de metales pesados. Revisión

No conventional bioadsorbents employees in the removal of heavy metals.

Revision

Sara Duany-Timosthe^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-6988-636>

Telvia Arias-Lafargue¹ <https://orcid.org/0000-0003-2610-1451>

Taimi Bessy-Horrutiner¹ <https://orcid.org/0000-0001-7595-5547>

Dunia Rodríguez-Heredia¹ <https://orcid.org/0000-0003-4676-7314>

Facultad de Ingeniería Química y Agronomía, Universidad de Oriente. Cuba

*Autor para la correspondencia: correo electrónico: sarad@uo.edu.cu

RESUMEN

Actualmente uno de los principales problemas medioambientales es la existencia de contaminantes en los cuerpos de agua debido a la emisión de efluentes contaminados principalmente por metales pesados. Estos compuestos se caracterizan por ser persistentes y no biodegradables, de ahí la importancia de su eliminación. La parte interior de la bahía de Santiago de Cuba es la más contaminada debido a las características hidrogeográficas que presenta. En este estudio se revisaron trabajos investigativos relacionados con los bioadsorbentes no convencionales empleados a nivel mundial para la mitigación de metales pesados, los cuales poseen ventajas sobre los convencionales por estar altamente disponibles, ser de bajo costos y degradables. De la revisión bibliográfica se pudo comprobar que entre los métodos no convencionales se encuentran la aplicación de biopolímeros, la biorremediación y el uso de residuos agroindustriales. Se enfocó la búsqueda en los residuos agroindustriales por ser los más abundantes en nuestras condiciones. De los empleados con

mayores tendencias están las cáscaras de yuca, de plátano, de cítricos, la borra de café, cáscara de huevo y la caña de azúcar. El presente trabajo tiene como objetivo presentar una revisión de los principales bioadsorbentes de bajo costos más empleados a nivel mundial en la mitigación de los metales pesados, de ahí la selección del más factible para su uso en las aguas de la bahía de Santiago de Cuba en las condiciones actuales.

Palabras clave: adsorbente; adsorción; contaminación; metales pesados; ecosistemas.

ABSTRACT

At the moment one of the main environmental problems is the existence of pollutants in the bodies of water due to the emission of polluted effluents mainly for heavy metals. These compounds are characterized to be persistent and not biodegradable, of there the importance of their elimination. The interior part of the bay of Santiago from Cuba is the polluted due to the characteristic hydro geographical that presents. In this study investigative works related with the bioadsorbentes no conventional employees were revised at world level for the mitigation of heavy metals, which possess advantages on the conventional ones to be highly available, to be of low costs and degradable. Of the bibliographical revision it could be proven that among the no conventional methods they are the biopolímeros application, the biorremediación and the use of agroindustrial residuals. The search was focused in the agroindustrial residuals to be the most abundant under our conditions. Of the employees the shells of Yucca are with more tendencies, of banana, of citric, it erases it of coffee, egg shell and the cane of sugar. The present work has as objective to present a revision of the main bioadsorbentes of low costs more employees at world level in the mitigation of the heavy metals, of there the selection of the most feasible for its use in the waters of the bay of Santiago from Cuba under the current conditions.

Keywords: adsorbent; adsorption; pollution; heavy metals; ecosystems.

Recibido: 08/08/2021

Aceptado: 15/12/2021

Introducción

Según la Organización Mundial de la Salud son trece los metales pesados con mayor incidencia en la salud y en el ambiente: Hg, Pb, Cr, Mn, Zn, Cu, Co, Ti, As, Cd, Ni, Sn y Fe.⁽¹⁾

Entre los efectos producidos por estos en las plantas se tienen: necrosis en las puntas de las hojas, inhibición del crecimiento de las raíces y muerte total de la planta. En humanos pueden llegar a ser muy tóxicos ocasionando erupciones cutáneas, malestar estomacal, problemas respiratorios, debilitamiento del sistema inmune, daño en los riñones e hígado, hipertensión, alteración del material genético, cáncer, alteraciones neurológicas e incluso la muerte.^(2,3)

Por lo anterior surge la idea de utilizar materiales de origen orgánico para la remoción de metales pesados, como los residuos de cosechas; que son fácilmente asequibles, y se les puede dar un nuevo uso como alternativa sustentable.

El presente trabajo constituye una revisión de los principales bioadsorbentes de bajo costo más empleados a nivel mundial en la mitigación de los metales pesados.

Fundamentación teórica

En la tabla 1 se presentan los adsorbentes empleados convencionalmente y los no convencionales.

Tabla 1- Adsorbentes convencionales y no convencionales ^(4,5)

ADSORBENTES	
CONVENCIONALES	NO CONVENCIONALES
Carbón activado	Desecho de frutas
Alúmina activada,	Biomasa agrícolas (Residuos agrícolas plantas, Taninos)
Arenas	Biomasa biológica: hongos, algas, bacterias
Zeolitas	<u>Quitosano</u>

La bioadsorción es un proceso de eliminación de contaminantes de soluciones acuosas empleando biomasa viva o muerta.⁽⁶⁾ Es un método económico y efectivo para la descontaminación de metales pesados en el agua, la biomasa utilizada puede ser

activada o no.⁽⁷⁾ Esta tecnología utiliza residuos orgánicos como material adsorbente que han sido investigados en los últimos años para conocer sus propiedades, mecanismo de adsorción y rendimiento.⁽⁸⁾ El proceso de bioadsorción no requiere de nutrientes y no presenta limitaciones biológicas, además los niveles de remoción comparada con los métodos tradicionales son muy significativos. Este tipo de tratamiento se encuentra influenciado por varios factores tales como la concentración inicial del metal, el tamaño de la partícula, el pH, entre otros.⁽⁹⁾ Los bioadsorbentes son materiales derivados de microorganismos, bacterias, hongos, algas marinas, plantas o algunos polímeros naturales que han demostrado su capacidad para eliminar metales pesados presentes en aguas residuales.⁽⁹⁾

Las características fundamentales que distinguen a un buen adsorbente son: ⁽⁹⁾

- Elevada capacidad de adsorción, para que esta se realice con una menor cantidad de adsorbente, debido al costo económico,
- Alta porosidad,
- Gran superficie de contacto
- Que presente sitios específicos de adsorción.

La mayoría de los adsorbentes tienen estructura porosa, lo que aumenta el área superficial y en consecuencia, la velocidad de adsorción. Un buen adsorbente será aquel que presente área superficial suficientemente grande y que requiera menor tiempo para alcanzar el equilibrio de adsorción.⁽⁴⁾

Es necesario explorar métodos económicos para la remoción de contaminantes, por esto se ha buscado dentro de la adsorción, otros tipos de adsorbentes que permitan una implementación real como es el caso de los adsorbentes de bajo costos.

Características que debe presentar un adsorbente de bajo costo: ⁽¹⁰⁾

- Estar altamente disponible.
- Que no cause daño al medio ambiente.
- Que tenga disponibilidad local en caso de que tenga origen natural.
- Que se obtenga a un bajo costo.

Los adsorbentes no convencionales son materiales bastante porosos, lo que les permite retener o atrapar en su interior partículas, átomos o iones. La estructura química de los tejidos vegetales como cáscaras, semillas, hojas, tallos, raíces, entre otros, presentan orificios y poros que permiten atrapar moléculas pequeñas como los metales e incluso moléculas como las de los colorantes.⁽⁴⁾

Los metales pesados se pueden describir como metales y metaloides que tienen una densidad atómica que es más de 4 g/cm³. Ejemplos de metales pesados son, plomo (Pb), zinc (Zn), cadmio (Cd), mercurio (Hg), níquel (Ni), arsénico (As), cobalto (Co), hierro (Fe), cromo (Cr) y elementos del grupo del platino.⁽¹⁰⁾

En la tabla 2 se presentan algunos metales pesados, junto a su efecto tóxico en los seres humanos.

Tabla 2- Daños que ocasionan los metales pesado a la salud humana ⁽¹¹⁾

Metal pesado	Efecto tóxico
Plomo	Anemia, daño cerebral, anorexia, malestar, pérdida de apetito, hígado, riñón y daño gastrointestinal, retraso mental en niños
Cadmio	Daño renal, bronquitis, trastornos gastrointestinales, médula ósea, cáncer, insuficiencia pulmonar, hipertensión, enfermedad de Itai-Itai y pérdida de peso
Cromo	Erupciones cutáneas, malestar de estómago y úlceras, problemas respiratorios, debilitamiento del sistema inmune, daño en los riñones e hígado, alteración del material genético, e incluso la muerte
Cobre	Neurotoxicidad y toxicidad aguda, mareos y diarrea.
Mercurio	Daño al sistema nervioso, envenenamiento por protoplasma, Corrosivo para la piel, ojos, músculos, dermatitis y daño renal.
Níquel	Bronquitis crónica, función pulmonar reducida y cáncer de pulmón.
Arsénico	Bronquitis, dermatitis, hueso, Depresión medular, hemólisis y hepatomegalia.

Desarrollo

Se realizó una investigación de tipo cualitativo, basada en la revisión bibliográfica de documentos relacionados con los bioadsorbentes no convencionales empleados a nivel nacional e internacional, así como su aplicación en la remoción de metales pesados en las aguas, considerando la última década. Para ello se revisaron tesis de maestría, de doctorado, trabajos de fin de grado, artículos científicos, revistas, entre otros, de donde se recopilaron los datos que mostraron una visión clara y confiable del tema.

La información recopilada fue cuidadosamente organizada y analizada aplicando los métodos de investigación análisis y síntesis.

Entre los métodos no convencionales indagados se encuentran la aplicación de biopolímeros, la biorremediación y el uso residuos agroindustriales. Los autores del trabajo enfocaron la búsqueda en los residuos agrícolas por ser más económicos y estar altamente disponibles.

Se organizaron los bioadsorbentes encontrados, destacando en una tabla aquellos con los que se obtuvieron mejores resultados, identificando el tipo de bioadsorbente, el metal que remueve y la capacidad de adsorción, con el fin de estudiar aquellos, con los cuales, se pueda escalar un proceso de adsorción de metales pesados, en nuestras condiciones, además se resumieron los daños que ocasionan a las personas, así como los grupos funcionales presentes en los bioadsorbentes capaces de atrapar los metales pesados.

Resultados y discusión

En la revisión realizada los residuos vegetales empleados como bioadsorbentes no convencionales de metales pesados que mostraron mejores resultados se encuentran borra de café, ⁽¹²⁾ bagazo de caña, ⁽⁹⁾ cáscara de plátano, ⁽¹³⁾ cáscara de yuca, ⁽¹⁴⁾ vaina de frijol, ⁽¹⁵⁾ marlo de maíz, ⁽¹⁶⁾ cáscara de huevo pulverizada, ⁽¹⁷⁾ cáscara de naranja, ^(18,55) cáscara de mandarina, ⁽¹⁹⁾ cáscara de tamarindo, ⁽²⁰⁾ cáscara de cacao.⁽⁴⁹⁾

En la tabla 3 se presentan los principales componentes de los desechos agrícolas empleados como bioadsorbentes, responsables de adsorber metales pesados.

Tabla 3- Bioadsorbentes y sus componentes que adsorben metales pesados

Bioadsorbentes	Componentes que atrapan los metales pesados	Fuente
Cáscara de banano	Lignina	Gonzales, 2016 ⁽²¹⁾
Cáscara de mandarina	Lignina, celulosa, Éter, OH- NH, amida, alcano, alqueno, alquilos	Verdugo 2017 ⁽¹⁹⁾
Zea mays (tusa)	Alquilo, OH o -NH, Alcohol, Éter, Celulosa, Lignina	Vera, Uguña, García, Flores, & Vázquez, 2016 ⁽⁹⁾
Cáscara de cacao	celulosa, hemicelulosa y lignocelulosa	Fernández y Sánchez 2017 ⁽²²⁾
Moringa	Aminoácidos como Asp, Glu, His, Arg y Lis	Ahumada Triviño 2018 ⁽²³⁾
Cáscara de huevo	Grupo hidroxilo (-OH), amidas, metileno, amina secundaria, ácidos carboxílicos, aldehídos, compuestos carbonatados, amina terciaria, nitrilos, carbonato de calcio.	Marmanillo V, Taboada H. 2019 ⁽²⁴⁾
Cáscara de tamarindo	grupos carboxilo	Hodelin 2020 ⁽²⁰⁾
Cáscaras de naranja	grupos carboxílicos	Muñoz 2007 ⁽²⁵⁾
Bagazo de caña de azúcar	C-N, Alquilo, OH o -NH, Alcohol, Éter, Celulosa, Lignina.	Vera, Uguña, García, Flores, & Vázquez, 2016 ⁽⁹⁾
Borra de café	taninos, polialginatos, péptidoglucanos, polisacáridos, glicoproteínas, fucanoides, compuestos heterocíclicos, flavonoides β , ácidos clorogénicos, ácido feruloilquinico	Torres, 2018 ⁽¹²⁾
Cáscaras de Yuca	grupos O-H, principalmente compuestos de alcoholes y fenoles	Albis, 2016 ⁽¹⁴⁾
Zea mays	OH-o- NH, alquilo, alcohol, éter, celulosa, lignina	Vera, Uguña, García, Flores, & Vázquez, 2016 ⁽⁹⁾

Los componentes que atrapan los metales pesados en los diferentes bioadsorbentes que aparecen en la tabla 3 fueron obtenidos de las siguientes referencias bibliográficas:

Cáscara de banano, ⁽²¹⁾ Cáscara de mandarina, ⁽¹⁹⁾ Zea mays (tusa), ⁽⁹⁾ cáscara de cacao, ⁽²²⁾ Moringa, ⁽²³⁾ cáscara de huevo, ⁽²⁴⁾ cáscara de tamarindo, ⁽²⁰⁾ cáscara de naranja, ⁽²⁵⁾ bagazo de caña de azúcar, ⁽⁹⁾ borra de café, ⁽¹²⁾ cáscara de yuca. ⁽¹⁴⁾

Se comprobó que los grupos funcionales presentes en los materiales orgánicos utilizados como bioadsorbentes juegan un papel fundamental en el proceso de bioadsorción. Al respecto plantea ⁽⁵⁸⁾ que los desechos agrícolas están compuestos principalmente de lignina y celulosa y pueden incluir además otros grupos funcionales polares de la lignina, tales como alcoholes, aldehídos, fenoles y otros grupos. Los metales pesados donan un par de electrones a estos grupos funcionales para formar complejos con los iones metálicos en solución, permitiendo el proceso de adsorción.

Tanto la quitina como los compuestos péptidos-glucanos presentes en la pared celular son los protagonistas en la adsorción de metales pesados, existiendo una fuerte atracción de los iones metálicos por los grupos funcionales de estas macromoléculas. ⁽²⁶⁾

El pH es uno de los factores a tener en cuenta cuando se utiliza residuos vegetales como bioadsorbentes. A pH bajos, los protones (H^+) se encuentran en una concentración elevada, existiendo competencia con los iones metálicos por ocupar los sitios de unión en el biosorbente, esta competencia generalmente conlleva a una reducción de la inmovilización de los metales presentes en disolución. Es decir, la protonación de la pared celular inhibe fuertemente la adsorción de metales si el pH es muy ácido. Además, cuando el pH disminuye, la superficie de la célula tiende a estar más cargada positivamente, reduciendo la atracción entre la biomasa y los iones metálicos, existiendo competencia entre los protones y el metal. También a bajos valores de pH la mayoría de los grupos funcionales de las moléculas que conforman la pared celular no se encuentran disociados y pierden la capacidad de unirse a los iones metálicos presentes en la solución; sin embargo, pueden participar en reacciones de formación de complejos.⁽²⁰⁾

Con el objetivo de implementar métodos más eficientes en la remoción y recuperación de metales pesados, se han venido estudiando las interacciones entre los elementos químicos y diversos biomateriales de bajo costo, de fácil obtención y abundancia en la naturaleza.⁽²⁷⁾

Uno de los métodos mayormente utilizados para la remoción de metales pesados es aquel donde se pueden emplear biomásas de origen agrícola y biológico (viva o muerta) como material bioadsorbente, como algas, hongos, bacterias, cáscaras de frutas, desechos agrícolas, taninos y algunos tipos de biopolímeros. Estos bioadsorbentes son utilizados en la remoción de metales pesados como Hg, As, Pb y otros debido a que presentan bajo costo, son fáciles de operar y se encuentran en abundancia en la corteza terrestre.⁽²⁸⁾

Los residuos sólidos agrícolas como bioadsorbentes tienen ventajas porque se producen en grandes cantidades y son económicos. Tienen la capacidad de adsorber contaminantes del agua pues presentan grupos químicos activos en su estructura como la hemicelulosa, lignina, lípidos, taninos, azúcares, proteínas, agua, almidón, los cuales ayudan a que tenga mayor capacidad de adsorción.⁽²⁹⁾

Algunos residuos como la cascarilla arroz, cáscara de huevos, hojas de bambú en polvo, han mostrado una gran capacidad de remoción. Estos residuos han sido capaces de remover hasta un 100% de Pb y Cu.⁽³⁰⁾

Utilizando cáscara de frutas los resultados obtenidos muestran que para el Cu el mejor tratamiento fue con 100 g de cáscaras de coco, obteniendo un 96.36% de remoción; para el

Fe el tratamiento compuesto por coco-naranja (50 gr de cada uno) con una eficiencia de (92.05%); y el plomo presentó una mayor remoción del 97.34% con los tratamientos compuestos por 100 g de naranja y coco-naranja (50 g de cada uno), respectivamente.⁽³¹⁾

Se han presentado diversos estudios de bioadsorción con residuos orgánicos, por ejemplo se usó fibras de coco para remoción de cromo (III y VI), cáscara de sandía para el cadmio (II); cáscara de naranja para diferentes metales (Zn, Ni, Cu, Cr, Cd, Co e Pb); cáscara de banano para el plomo (II); residuos de café para compuestos fenólicos bagazo de caña para iones de Cu^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} y Cd^{2+} ; cáscara de huevo para el Cd^{2+} ; y otros subproductos agrícolas como el bagazo de caña de azúcar, etc. Todos estos productos presentan una eficiencia superior a 80 %.⁽³¹⁾

Borra de café (Coffea)

La capacidad de bioadsorción conferida a la borra de café se debe a que la composición química de esta materia orgánica posee taninos, polialginatos, péptidoglucanos, polisacáridos, glicoproteínas, fucanoides, compuestos heterocíclicos, flavonoides 5,6, ácidos clorogénicos, ácido feruloilquínico, entre otros compuestos que permiten atrapar al metal pesado y dejarlo adherido a la superficie del adsorbente. La remoción de cadmio y plomo disuelto fue de 96,54 % y 94,05 % respectivamente con una dosis de 30 g de borra de café.^(12, 32,33)

Los residuos del café como la borra tiene propiedades fisicoquímicas que los convierten en excelentes intercambiadores iónicos con los metales pesados, por lo que tienen ventajas en comparación con adsorbentes convencionales.⁽³⁴⁾

La borra de café es el residuo derivado de la preparación de la bebida del café tostado, la cual representa 10% del peso del fruto seco.⁽³⁵⁾

La lignina, la celulosa y la hemicelulosa juegan un papel importante en la remoción de metales pesados, ya que contienen fenoles, ácidos carboxílicos y otros grupos funcionales que facilitan su afinidad con iones metálicos.⁽³⁶⁾

En el 2018 la remoción de Pb fue de un 94,05 % y para el Cd de un 96,5% utilizando borra de café lavada con agua desionizada aplicando 30 g/L de agua.⁽¹²⁾

Bagazo de caña (Saccharum officinarum)

En el caso del bagazo de caña su morfología puede facilitar la bioadsorción de metales debido a la superficie irregular y gran variedad de grupos funcionales como los anillos aromáticos de lignina, lo que hace posible la biosorción del plomo en diferentes partes de este material.⁽⁹⁾

Cáscara de plátano (*Musa Sapientum*)

La cáscara molida tiene la capacidad para extraer iones de metales pesados del agua. La adsorción de la cáscara de plátano se debe en gran parte a la lignina, que son polímeros insolubles, presenta un elevado peso molecular, que resulta de la unión de varios ácidos y alcoholes fenilpropílicos, pulverizados en ella. Coincide esta investigación con otros resultados que aparecen en la literatura, ⁽¹³⁾ el cual plantea que la cáscara de plátano posee un poder de adsorción de 80%.⁽²¹⁾

En la investigación sobre la remoción del cadmio se obtuvo los mejores resultados cuando se preparó la cáscara de plátano con ácido sulfúrico, provocando la oxidación del biomaterial y de este modo aumenta la porosidad y por tanto el porcentaje de remoción, obteniendo como cifra más alta un 80 %.⁽³⁷⁾

Cáscara de yuca (*Manihot esculenta*).

La cáscara de yuca modificada y sin modificar, es una biomasa es factible para procesos de remoción de metales pesados puesto que presenta grupos O-H, principalmente compuestos de alcoholes y fenoles, que son facilitadores de la captación de los iones de plomo.⁽¹⁴⁾

Vaina de frijol (*Phaseolus vulgaris*)

La vaina de frijol contiene aproximadamente 39% de carbohidratos y eso ayuda a que tenga activos sus grupos funcionales al momento de estar en contacto con el contaminante.⁽²²⁾

Marlo de maíz (*Zea mays*)

El marlo de maíz presenta en su estructura los siguientes grupos funcionales: alquilos, OH; alcohol, éter, celulosa, lignina, los que posibilitan una buena adsorción de contaminantes.⁽⁹⁾

Cáscara de huevo pulverizada

Algunos autores⁽²⁴⁾ plantean que la cáscara de huevos posee grupos funcionales tales como hidroxilos, aminas, aldehídos, carbonatos de calcio, amidas, que los hacen responsables de la adsorción de metales pesados de soluciones acuosas ya que tienen la capacidad de separar los iones metálicos. A este aspecto se unen además, ^(17, 38, 40) que la membrana de la cáscara de huevo tiene una estructura porosa y fibrilar, que une a los iones metálicos y otras moléculas de carga positiva con lo que se posibilita su separación y son los encargados de la buena adsorción, los cuales plantean que resultó muy eficaz para adsorber los iones de Fe⁽³⁺⁾. La cáscara de huevo calcinada es más eficaz que la cáscara de huevo sin calcinar. El bajo costo y su disponibilidad lo hace un bioadsorbente no convencional muy atractivo. ^(39,40)

Moringa (*Oleifera Lam*)

Diversos investigadores coincidieron en que la semilla de *Moringa oleífera* demostró una alta eficiencia en la reducción de la turbidez, eliminó hasta 85-94% y mejoró el oxígeno disuelto (OD). Se observó después del tratamiento como el Fe, Cu y Cd, se eliminaron hasta un 98% y el Pb un 78,1%.⁽⁴¹⁾

Cáscara de Naranja (*Citrus cinensis*)

La cáscara de naranja está formada por pigmentos, pectina, celulosa, hemicelulosa y elementos de peso molecular bajo, los que le permiten llevar a cabo un buen proceso de adsorción.⁽⁴²⁾ La máxima capacidad de remoción se presentó a los 40 min de haberse producido el contacto de esta con el agua contaminada ⁽⁴³⁾ y la máxima capacidad de bioadsorción se obtuvo con un pH de 4.8.⁽⁴⁶⁾ La cáscara de naranja tiene un poder de adsorción para el Pb de 99,5 %⁽⁴⁴⁾ y para el Cu (II) tiene un rendimiento de 36,23 mg/g.⁽⁴⁵⁾

Se han realizado investigaciones sobre el uso de la cáscara de naranja pulverizada con la piedra alumbre, obteniendo como resultados que se reduce el porcentaje de turbidez en el tratamiento de las aguas residuales domésticas, utilizando 60 g y tiempo de tratamiento de 60 min, además demostró que se reduce el porcentaje de sólidos disueltos totales.⁽⁴¹⁾

La máxima capacidad de bioadsorción la obtuvo con un pH de 4.8, la pared celular de la cáscara de naranja contiene una cadena de grupos funcionales, ácidos débiles, principalmente grupos carboxílicos, esto implica que el tipo y estado iónico de los grupos

funcionales de la pared celular determinan la magnitud de adsorción. La biosorción depende de la protonación o desprotonación de estos grupos carboxílicos.⁽⁴⁶⁾

Cascarilla de arroz (*Oryza sativa*)

Algunos investigadores afirman que la cascarilla de arroz es una mezcla de diversos componentes en cuya superficie se encuentra un considerable porcentaje de carbono fijo, lo cual le brinda al material excelentes propiedades como adsorbente.⁽⁴²⁾

Cáscara de Tamarindo (*Tamarindus Indica*)

En la utilización de la cáscara de Tamarindo es importante el pH en el proceso de remoción de metales pesados ya que influye en la biosorción de iones metálicos, esto se da por la competencia entre los iones del metal y los iones hidronio, presentes en la solución y por los sitios activos en la superficie de la biomasa. La dependencia de la captura de los iones por la biomasa en función del pH, puede justificarse por la asociación o disociación de algunos grupos funcionales presentes, como, por ejemplo, los grupos carboxilo.⁽²⁰⁾

En la tabla 4 se muestra algunos de los metales pesados que se encuentran en las aguas de la bahía de Santiago de Cuba y bioadsorbentes que mundialmente han sido empleados para descontaminar aguas residuales, así como el porcentaje de remoción de los mismos. Estos datos fueron tomados de las siguientes referencias bibliográficas:

Para el cromo (Cr), ^(47, 48, 16, 28,49,50,17, 51, 20, 52, 53, 54,55) para el cadmio (Cd), ^(9, 37, 12, 15) para el plomo (Pb). ^(12, 14, 56, 44, 13, 19, 9, 16, 20, 57)

En la misma se observa que para la remoción del Cr los mejores resultados se obtuvieron cuando se utilizó la cáscara de naranja y la cáscara de mamey con un 100 % de remoción en cada caso, obtenidos por ^(52,55) sin dejar de destacar la tusa de maíz y la cáscara de coco con un 98% de remoción en ambos casos.

Tabla 4- Metales pesados encontrados en la bahía de Santiago de Cuba y bioadsorbentes que se pueden emplear para su remoción

Contaminantes	Bioadsorbentes	% de remoción	Fuente
Cr	Cáscara de banano (<i>Musa paradisiaca</i>)	92	Carrillo y col, 2017 ⁽⁴⁷⁾
	Cáscara de mandarina (<i>citrus reticulata</i> var. <i>clementina</i>)	54	Vergara y col., 2017 ⁽⁴⁸⁾
	Marlo de Maiz (<i>Zea mays</i>)	98	Pintado K. 2018 ⁽¹⁶⁾
	Cáscara de cacao (<i>Theobroma cacao</i>)	90	Tejada Tovar et al., 2014 2017 ^(28,49)
	Moringa (<i>Moringa oleifera</i> Lam)	90	Rondón M, et al, 2017 ⁽⁵⁰⁾
	Cáscara de huevo	93	Mesias, 2019 ⁽¹⁷⁾
		89	Quispe 2018 ⁽⁵¹⁾
	Cáscara de tamarindo (<i>Tamarindus Indica</i>)	89.8	Hodelín 2020 ⁽²⁰⁾
	Cáscara de mamey (<i>Pouteria sapota</i>)	95 y 100	Acosta y col., 2012 ⁽⁵²⁾
	Cáscara de coco (<i>Cocos nucifera</i>)	98	Calzado y col ⁽⁵³⁾
	Cáscaras de naranja (<i>citrus Cinensis</i>)	99,5	Romero & E, 2015 ⁽⁵⁴⁾
		100	Martínez y col 2012 ⁽⁵⁵⁾
Cd	Bagazo de caña de azúcar (<i>Saccharum officinarum</i>)	77.81	Vera L. et al 2016 ⁽⁹⁾
	Cáscara de plátano (<i>Musa Cavendishii</i>)	80	Peña D, 2016 ⁽³⁷⁾
	Borra de café (<i>Coffea</i>)	96.54	Torres 2018 ⁽¹²⁾
	Vaina de frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	89,19	Estupiñán 2014 ⁽¹⁵⁾
Pb	Borra de café (<i>Coffea</i>)	94.05	Torres 2018 ⁽¹²⁾
	Cáscaras de Yuca (<i>Manihot esculenta</i>)	86.8	Albis, 2016 ⁽¹⁴⁾ , Tejada et al, 2016 ⁽⁵⁶⁾
	Cáscaras de naranja (<i>Citrus cinensis</i>) seca pretratada con CaCl	99,5	Cardona, et al 2013 ⁽⁴⁴⁾
	Cáscaras de plátano fruta (<i>Musa × paradisiaca</i>)	80	Castro 2015 ⁽¹³⁾
	Cáscara de mandarina (<i>citrus reticulata</i>)	71,9	Verdugo 2017 ⁽¹⁹⁾
	Bagazo de caña (<i>Saccharum officinarum</i>)	97.6	Vera 2016 ⁽⁹⁾
		99.76	Vera et al 2016 ⁽⁹⁾
	Maíz (<i>Zea mays</i>)	95.2	Pintado K. 2018 ⁽¹⁶⁾
	Cáscara de Tamarindo (<i>Tamarindus Indica</i>)	(Cr V) 89.8 (Cr II) 90.8	Hodelín 2020 ⁽²⁰⁾
Cáscara de Cacao (<i>Theobroma cacao</i>)	91,32	Lara et al 2016 ⁽⁵⁷⁾	

En cuanto al Cd, el valor más alto de remoción fue con el uso de la borra de café, siendo este de 96,54%. Para la remoción del Pb, el uso de bagazo de caña obtenido por⁽⁹⁾, y de cáscaras de naranja seca pretratada con CaCl₂ obtenido por⁽⁴⁴⁾ fueron los más altos resultados.

Conclusiones

Los diversos estudios científicos revisados muestran el potencial de aplicación que los bioadsorbentes de origen natural tienen para la remoción de metales pesados en las aguas, es un método eficiente, económico y sustentable que contribuye al control eficaz y a la prevención de la contaminación.

En el trabajo se contó con materiales no utilizados en otras actividades y son eficientes para su uso en la descontaminación de las aguas, como es el caso de la borra de café, los cascarones de huevos, la tusa de maíz, residuos de cosechas como la cáscara de frijol, cáscara de tamarindo, cáscaras de naranjas, mandarinas, bagazo de caña de azúcar, entre otros.

De la revisión bibliográfica realizada se evidenció que para metales pesados presentes en la bahía de Santiago de Cuba, como el Cr, Cd y Pb, los mejores bioadsorbentes no convencionales son cáscara de naranja, cáscara de mamey, borra de café y bagazo de caña. Siendo la cáscara de naranja la más versátil al eliminar varios metales pesados.

Referencias bibliográficas

1. ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS), 2011. Adverse health effects of heavy metals in children. Recuperado de https://www.who.int/ceh/capacity/heavy_metals.pdf [consultado 25 de febrero 2021].
2. NAVA. C-RUIZ, Y M. MÉNDEZ-ARMENTA. “Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio)”. *Arch. Neurocienc.*, **6**(3), pp. 140-147, julio-septiembre 2011. [Consultado 25 de febrero 2021]. Disponible en <https://www.medigraphic.com/pdfs/arcneu/ane-2011/ane113f.pdf>.
3. B. ROIG MARINO, Evaluación de las tecnologías de tratamiento de aguas subterráneas contaminadas con Cromo. Trabajo final de carrera. Universidad Politécnica de Catalunya, 2006.
4. VALLADARES M G; VALERIO C; DE LA CRUZ P; MELGOZA R M. Adsorbentes no-convencionales, alternativas sustentables para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, **16**(31) p. 55-73. Colombia. 2016. ISSN 1692 – 3324

5. MERMA, V. Remoción de mercurio a través de la bioadsorción con biomasa vaina de frijol (*Phaseolus vulgaris*) y tara (*Caesalpinia spinosa*) en soluciones acuosas. Tesis presentada para optar el título de Ingeniero ambiental. Universidad peruana Unión. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental. Juliaca. Perú. 2018
6. TEJADA, C., VILLABONA, Á., & GARCÉS, L. Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *Tecno Lógicas*, 2015. **18**(34), p109–123. ISSN 0123-7799.
7. SALA, L. Biosorción para la eliminación de metales pesados en aguas de desecho. *In Anales de la Real Sociedad Española de Química*. p 114-120. **106**(2). 2010. ISSN-e 1575-3417.
8. VERDUGO, J. Bioadsorción de iones de plomo y cromo procedentes de aguas residuales utilizando la cáscara de la mandarina (*Citrus reticulata*). Trabajo de titulación previo al título de Ingeniero Ambiental. Universidad politécnica Salesiana. Cuenca. Ecuador. 2017.
9. VERA L, UGUÑA M., GARCÍA N, FLORES M, VÁZQUEZ V. Eliminación de los metales pesados de las aguas residuales mineras utilizando el bagazo de caña como biosorbente. Centro de Estudios Ambientales de la Universidad de Cuenca, Ecuador. Facultad de Química de la Universidad de Cuenca, Ecuador. *AFINIDAD LXXIII*, 2016. **73**(573) p 43-49. ISSN 2339-9686.
10. KURNIAWAN, T., Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water. *Journal of hazardous materials*, 2003. **97**(1-3) p 219-243. ISSN 0304-3894.
11. YING C. P. Biosorption of copper (II) and chromium (VI) onto activated sludge: isotherms and kinetic models. Thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science. Universiti Sains Malaysia. 2007.
12. TORRES. CH GIANLUIGGI R. "Uso de borra de café como bioadsorbente para la remoción de cadmio y plomo disuelto en el agua del río Añasmayo. Sector La Perla- Huaral. Facultad de ingeniería escuela profesional de ingeniería ambiental. Tesis para obtener el título profesional de ingeniero ambiental. Lima. Perú. 2018.
13. CASTRO B. Uso de la cáscara de Banano (*Musa Paradisiaca*) maduro deshidratada (seca) como proceso de bioadsorción para la retención de metales pesados, plomo y cromo en aguas contaminadas. Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Magister en impactos ambientales Universidad de Guayaquil, Ecuador. 2015.

14. ALBIS, A. Remoción de plomo de soluciones acuosas usando cáscara de yuca modificada con ácido cítrico. *Avances Investigación En Ingeniería*.2016, **13**(1). P1-11. ISSN 1562-3297
15. ESTUPIÑAN V. Evaluación de la vaina de frijol como material adsorbente en un sistema que opera en modo semibatch para la remoción de cadmio ($cd+2$) presente en soluciones acuosas. Anteproyecto de Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Ambiental. Universidad Libre. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Ambiental. Bogotá. 2014
16. PINTADO K. Comparación de la biosorción y desorción de metales pesados mediante el uso de marlo de maíz (zea mays) en aguas contaminadas. Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera en Biotecnología de los recursos naturales. Ecuador. 2018.
17. MESIAS A. Aplicación de Cascara de Huevo Calcinada para la Remoción de metales pesados en soluciones acuosas. Trabajo de investigación para aspirar al grado académico de Bachiller en Ingeniería ambiental. Lima, Perú. 2019.
18. PINZÓN M, *et al* y MARTÍNEZ y col. Caracterización de la cáscara de naranja para su uso como material bioadsorbente.” Trabajo de investigación. *Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*.2012, **6**(1), pp. 1-23. ISSN: 0120-4211.
19. VERDUGO JOSÉ. Bioadsorción de iones de plomo y cromo procedentes de aguas residuales utilizando la cáscara de la mandarina (citrus reticuata. Var Clementina). Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero ambiental. Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca. 2017.
20. HODELÍN, R. Bioadsorción de cromo (VI) y plomo (II) por biomasas de *Kluyveromyces marxianus* y cáscara del fruto *Tamarindus indica*. Tesis en opción al título de Máster en Biotecnología. Mención Ambiental. Santiago de Cuba. Cuba. 2020.
21. GONZALES, A. Influencia de la velocidad de agitación y la temperatura sobre la adsorción de plomo (Pb) y zinc (Zn) con cáscara de plátano (*Musa Sapientum*), en las aguas residuales de laboratorios de análisis químico. Tesis de investigación para optar el título profesional de Ingeniero Metalurgista. Perú. 2016.
22. FERNÁNDEZ, A. F., & SÁNCHEZ, E. Estudio de las propiedades fisicoquímicas y calidad nutricional en distintas variedades de frijol consumidas en México. *Nova Scientia*, 2017. **9**(1) p133–148. ISSN 2007-0705

23. AHUMADA N. SEVERICHE J. Implementación de un Tratamiento Alternativo para la Remoción de Fósforo Y Nitrógeno en Aguas Residuales Mediante Absorbentes a Base de Semillas y Tallos de Moringa Oleífera Lam. Trabajo de investigación presentado para obtener el título de Ingeniero Ambiental. Barranquilla. Colombia. 2018
24. MARMANILLO V, TABOADA H. Evaluación de la adsorción de cobre (II) con cáscara de huevo de las aguas de relave minero. Tesis presentada para optar el título profesional de Ingeniero químico ambiental. Huancayo – Perú. 2019
25. MUÑOZ J C. Biosorción de plomo (II) por cáscara de naranja “citrus cinensis” pretratada. Tesis para optar el Título Profesional de Químico. Lima. Perú.2007.
26. VARGAS K, Biosorption of heavy metals in polluted water, using different waste fruit cortex. *Phys Chem Earth, Parts A/B/C*. 2012. **37**(39) p26-29. ISSN 14747065.
27. NAJAM, R. y ANDRABI, S. M. Removal of Cu(II), Zn(II) and Cd(II) ions from aqueous solutions by adsorption on walnut shell-Equilibrium and thermodynamic studies: treatment of effluents from electroplating industry. *Desalin Water Treat. Desalination and Water Treatment*, 2016. **57**(56) p 27363-27373. ISSN 19443986.
28. TEJADA TR, C. VILLAVONA – ORTIZ, A.; MARIMÓN, W. Bioadsorción de Cr VI en aguas usando lignocelulósicos modificado. 2014. *Revista Educación en Ingeniería*. 2014, **9** (17), pp. 86-97. ISSN 1900-8260.
29. MONTES, E. J. Estudio de adsorción de ácido rojo 114 y básico azul 3 sobre tallo de girasol. Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Ambiental. Universidad Libre. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Ambiental. Bogotá. 2014.
30. ROMERO V. Materiales polímeros provenientes de residuos vegetales, usados en síntesis de adsorbentes para la remoción de iones metálicos y colorantes presentes en aguas residuales. Tesis para obtener el título de Maestro en Ciencias de los Materiales. Universidad autónoma del estado de Hidalgo. México. 2017.
31. FERNANDEZ M, *et.al*. Remoción de metales pesados desde efluentes mineros, mediante cáscaras de frutas. Aibi, *Revista de investigación, administración e ingeniería*. 2020. **8** (1), p 21-28. ISSN 2346-030X
32. PACHECO, *et. al*. Cinética de la bioadsorción de iones cadmio (II) y plomo (II) de soluciones acuosas por biomasa residual de café (*Coffea arabica L.*) *Revista de la Sociedad Química del Perú*. 2010. **76**(3) p.279-292. ISSN 1810-634X

33. LAGOS, L. K. Bioadsorción de cromo con borra de café en efluentes de una industria curtiembre local. Tesis de Licenciatura. Pontificia Universidad Católica del Perú. 2016
34. CARVAJAL, E. Modelo de sorción para la remoción de cobre y plomo de lixiviados de rellenos sanitarios. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Doctora en Ingeniería de Recursos Hidráulicos. Medellín, Colombia. 2019
35. PEÑARANDA L, S. P. MONTENEGRO, AND P. A.GIRALDO, "Exploitation of agroindustrial waste in Colombia, *Revista Investigación Agraria y Ambiental*. 2018, **8** (2), pp. 141–150. ISSN 2145-6097
36. GÓMEZ, V.; VELASQUEZ, J, y QUINATANA, G. Lignina como adsorbente de metales pesados. *Revista Investigaciones Aplicadas*. 2013. **7** (2), pp. 74–87.
37. PEÑA D; Remoción del Cadmio por *Musa Cavendishii*, L. Tesis para obtener el grado de Licenciatura en Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma del Estado de México. 2016.
38. MITTAL, ALOK, MEENU TEOTIA, R. K. SONI, y JYOTI MITTAL. Applications of egg shell and egg shell membrane as adsorbents: A review. *Journal of Molecular Liquids* 2016. **223** p. 376-387. ISSN 0167-7322
39. SALAZAR. D; RODRÍGUEZ L. Desarrollo y evaluación de un material adsorbente a partir de residuos orgánicos para la adsorción de Cu^{+2} en soluciones sintéticas. Tesis para optar el Título profesional de Ingeniero de Materiales. Arequipa-Perú. 2017
40. PETTINATO, M., S. CHAKRABORTY, HASSAN A. ARAFAT, Y V. CALABRO'. Eggshell: A green adsorbent for heavy metal removal in an MBR system. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 2015. **121** p57-62.ISSN 0147-6513.
41. AGUILAR. J. "Eficiencia de la cáscara de naranja pulverizada con la piedra Alumbre en el tratamiento de aguas residuales domésticas del distrito de Puente Piedra. Trabajo de investigación para obtener el grado académico de Bachiller en Ingeniería Ambiental. Lima. Perú. 2019.
42. RODRÍGUEZ, A. C., CAMPOS-ROSARIO, A. M. Y PÉREZ-FLORES, A. Obtención y caracterización de materiales adsorbentes a partir de cascarilla de arroz. *Revista Mutis*. 2019 **9**(1) p 29-39. ISSN 2256-1498.

43. LLAMUCA. J. Evaluación de la actividad biosorbente de la cáscara de naranja y espiga de arroz para la remoción de mercurio inorgánico en solución acuosa”. Proyecto de Investigación para optar por el título de Ingeniero en Biotecnología Ambiental. Ecuador. 2018.
44. CARDONA, CABAÑAS y CEPEDA. Evaluación del poder biosorbente de cáscara de naranja para la eliminación de metales pesados, Pb (II) y Zn (II). *Ingeniería*, 2013, **17** (1) p. 1-9. ISSN 1665-529X.
45. VILLANUEVA. C, TAPIA N. Bioadsorción de Cu (II) por biomásas que contienen pectina. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, 2005, **8**(1) p.11-15. ISSN 1726 2208
46. MUÑOZ CARPIO. Biosorción de plomo (II) por cáscara de naranja “*citrus cinensis*” pretratada. Tesis para optar el Título Profesional de Químico. Lima. Perú. 2007
47. CARRILLO *et al.* Adsorción de Cromo y Arsénico en Óxidos. *Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila*, 2014. **6**(12). p 1-4. ISSN 2007-2627
48. VERGARA *et al.* Bioadsorción de iones plomo y cromo procedentes de aguas residuales utilizando la cáscara de la mandarina (*Citrus reticulata*). Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental. Cuenca. 2017.
49. TEJADA TOVAR *et al.*, Remoción de cromo hexavalente sobre residuos de cacao pretratados químicamente. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 2017, **20**(1), p139–147. ISSN 0123-4226.
50. RONDÓN M; ET AL. Empleo de semillas de Moringa oleífera en el tratamiento de residuales líquidos. *Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 2017. **28**(2), p.87-101. ISSN 1680-0338.
51. QUISPE J, ONOFRE E. Investigación para controlar en las aguas residuales industriales la contaminación con cromo, usando cáscara de huevo calcinado, en soluciones sintéticas y posterior aplicación a las aguas contaminadas reales. Tesis. Universidad César Vallejo, p13-17. Arequipa. Perú.2018.
52. ACOSTA y COL. Bioadsorción de Cr (VI) por la cáscara de mamey. *Avances en Ciencias e Ingeniería*; 2012. **3**(2), p. 1 -9. ISSN 0718-8706.
53. CALZADO, et al. Determinación de la capacidad de adsorción de cromo (VI) por biomasa. *Revista Cubana de Química*. 2014, **26**(3), p 215-224. ISSN 2224-5421
54. ROMERO & E, Bioadsorción de Pb y Cr mediante la utilización de Cáscara de Naranja (*Citrus sinensis*) molida, Tesis de Licenciatura. Machala. 2014.

55. MARTÍNEZ *et al.* Remoción de cromo (VI) en solución por la cáscara de naranja (*Citrus sinensis*) Osbeck 2012; *Revista Académica de investigación*; 2012. **9**, p1-16.
56. TEJADA *et al.* Aprovechamiento de Cáscaras de Yuca y Ñame para el Tratamiento de Aguas Residuales Contaminadas con Pb (II). *Información Tecnológica*, 2016. **27**(1), p 09-20. ISSN 0718-0764.
57. LARA *et al.* Adsorción de plomo y cadmio en sistema continuo de lecho fijo sobre residuos de cacao. Revisión. *Revista ION*. 2016; **29**(2) p113-124. Bucaramanga (Colombia). ISSN 0120-100X

Conflicto de interés

Los autores declaran que no hay conflictos de intereses.

Contribución de autores

Sara Duany Timosthe: investigación del tema, análisis de los resultados y escritura del artículo.

Telvia Arias-Lafargue: colaboró con el análisis de los resultados y escritura del artículo.

Taimi Bessy Horruitiner: colaboró con el análisis de los resultados y revisión del artículo.

Dunia Rodríguez Heredia: colaboró con el análisis de los resultados y escritura del artículo.