



ARTÍCULO DE REVISIÓN

Biosorción microbiana de metales pesados: características del proceso

Biosorption of heavy metals: characteristics of the process

Lizandra Pérez Bou, Irina Salgado Bernal, Celia Larrea Duarte, Armando Martínez Sardiñas, Mario Enrique Cruz Arias, María Elena Carballo Valdés

Departamento de Microbiología, Facultad de Biología, Universidad de La Habana, Cuba.

Autor para correspondencia:
mecarballo@fbio.uh.cu

RESUMEN

Actualmente, uno de los principales problemas medioambientales es la contaminación por metales pesados, debido a la emisión de efluentes contaminados a los cuerpos de agua. Estos compuestos inorgánicos se caracterizan por ser persistentes y no biodegradables, de ahí la importancia de su eliminación. En los años recientes, la biosorción ha emergido como un método económico y amigable con el medio ambiente para la descontaminación de las aguas. El presente trabajo tuvo como objetivo analizar el proceso de remoción de metales por biosorbentes microbianos y sus características fundamentales. Además, se describen los principales factores que influyen en dicho proceso, tales como: el tipo de microorganismo, edad fisiológica del cultivo, concentración y estado de la biomasa, temperatura, pH y concentración de los iones metálicos. Se valoran los modelos cinéticos y las isothermas usualmente utilizadas para el ajuste de los datos experimentales, así como la desorción de los metales, que permite la recuperación de estos elementos con aplicación industrial y la reutilización de los biosorbentes.

Palabras clave: biosorbentes, aguas contaminadas, factores bióticos y abióticos, desorción, biorremediación

ABSTRACT

One of the most serious environmental issues at present is the metal pollution of the aqueous environment due to the releasing of metal-containing effluents into the water bodies. These inorganic species are persistent and non-biodegradable, reasons for which they must be eliminated from water. In recent years biosorption has emerged as an economical and environmental friendly method for the decontamination of polluted water. The present work had as objective to analyze the using of microorganisms as biosorbents for the removal of metal ions from aqueous solution and its major characteristics. Moreover, it describes some of factors that influence on biosorption pro-

Recibido: 2018-03-06

Aceptado: 2018-04-05

cess such as: type of microorganism, culture age, biomass dose, biomass condition, temperature, pH and metal ion concentration. The kinetic and isothermal models usually assessed to fit the biosorption experimental data were also reviewed; as well as desorption process, in order to benefit the recovery of these elements with industrial applications and the regeneration of biosorbents.

Keywords: biosorbents, polluted water, biotic and abiotic factors, desorption, bioremediation

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, uno de los principales problemas medioambientales es la contaminación por metales pesados. Estos elementos alteran el equilibrio de los ecosistemas al persistir de manera indefinida en el ambiente, debido a que no se degradan por vía biológica ni química (Kumar *et al.*, 2016). Su acumulación en los organismos de los diferentes eslabones de la cadena trófica, su movilidad en los ecosistemas acuáticos naturales y su toxicidad, hacen que su eliminación constituya una preocupación a nivel mundial (Chowdhury *et al.*, 2016).

La introducción y redistribución de los iones metálicos en la biosfera, tienen su origen a partir de fuentes naturales y antropogénicas (Fawzy *et al.*, 2017). Sin embargo, la causa principal tanto directa como indirecta de la contaminación por metales son las fuentes urbanas, siendo las operaciones industriales con un deficiente o ausente tratamiento de sus aguas residuales y desechos sólidos, su principal emisor. Algunas de las industrias que generan residuales contaminados con estos elementos son la azucarera, la petrolera, la cervecera, la textil, la de celulosa y papel, la de acabados metálicos, la del cobre y sus aleaciones, curtiduría, la alimentaria y la del hierro y acero, clasificadas legalmente como focos puntuales de contaminación (Chowdhury *et al.*, 2016).

Para mitigar los efectos nocivos de la contaminación por metales pesados diversos métodos físicos y químicos se han aplicado con el objetivo de removerlos de las aguas residuales y medios acuáticos. Entre estos se encuentran la separación a través de membranas, la filtración, el intercambio iónico, la quelación, la adsorción, el tratamiento electroquímico, la precipitación, la extracción con solventes y la oxidación-reducción (Aydin *et al.*, 2016; Bahobil *et al.*, 2017). Sin embargo, estos métodos tienen costos excesivamente altos, resultan ineficientes especialmente cuando los iones

metálicos están presentes en bajas concentraciones ($1-100 \text{ mg.L}^{-1}$) y en ocasiones provocan contaminaciones secundarias (Alipannahpour *et al.*, 2016; Kumar *et al.*, 2016).

Con el objetivo de implementar métodos más eficientes en la remoción y recuperación de metales pesados, se han venido estudiando las interacciones entre estos elementos químicos y diversos biomateriales de bajo costo, fácil obtención y abundancia en la naturaleza (Najam y Andrabi, 2016). En este sentido, la biosorción ha emergido como alternativa a los métodos convencionales, al emplear sistemas biológicos, tales como bacterias, hongos, levaduras, algas y plantas o compuestos obtenidos a partir de estos, para remover y recuperar sustancias contaminantes del ambiente (Khan *et al.*, 2016), lo que se incluye dentro del concepto de biorremediación. El proceso de biosorción se basa en la capacidad de la biomasa completa (viva o muerta) para captar metales, de forma soluble e insoluble, a través de mecanismos fisicoquímicos tales como la adsorción, el intercambio iónico, la formación de complejos y la microprecipitación. En estos mecanismos, la pared celular constituye el principal lugar de captura o enlace de los iones (Kadukova, 2016) y el material biológico utilizado para estos fines se denomina biosorbente (Aydin *et al.*, 2016).

El éxito del proceso de biosorción depende de la selección de un buen biosorbente y un aspecto significativo en esta selección es el nivel basal de captura que presenta la biomasa. La eficiencia de este proceso se puede incrementar mediante la manipulación fisiológica dada por el ajuste u optimización de los factores bióticos y abióticos implicados en el proceso (Carballo *et al.*, 2017). En adición a lo anterior, al considerar que la biosorción es un proceso reversible, el metal adsorbido puede ser removido por un proceso de desorción y el biosorbente puede ser reutilizado, lo que resulta una alternativa de gran interés para el tratamiento de aguas residuales industriales (Khan *et al.*, 2016).

Este trabajo tiene como objetivo analizar los principales aspectos que caracterizan el proceso de biosorción de iones metálicos en solución acuosa, por biomásas microbianas.

DESARROLLO

Microorganismos como biosorbentes

Las biomásas microbianas presentan una marcada afinidad por los iones metálicos y la tendencia a disponer de biosorbentes de bajo costo y carácter renovable, han propiciado el estudio de una gran variedad de especies microbianas (bacterias, hongos, levaduras y microalgas). Estas constituyen alternativas factibles para la remoción de metales, en relación a los métodos físicos y químicos, particularmente en bajas concentraciones y grandes volúmenes de solución (Aydin *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2017).

Las bacterias se destacan entre los agentes biológicos empleados en la biorremediación debido a su capacidad de utilizar diversos constituyentes de las aguas residuales para obtener la energía empleada en su metabolismo biosintético y en la diversidad de mecanismos que pueden presentar en la remoción de contaminantes, entre lo que se encuentran los metales pesados. Entre los diferentes mecanismos involucrados en la interacción microorganismos-metal están los relacionados con la pared celular, la adsorción física, el intercambio iónico, la precipitación inorgánica o la combinación de estos procesos (Salgado Bernal *et al.*, 2015).

Si se tiene en cuenta que en las bacterias, la pared celular constituye el primer frente de interacción con las moléculas presentes en el ambiente, se puede comprender la respuesta de estos microorganismos ante la presencia de iones metálicos. En las bacterias Gram positivas los sitios aniónicos que interactúan con los cationes metálicos son el carboxilato del peptidoglicano y el fosfato de los ácidos teicoicos, ambos presentes en un alto porcentaje (Goswami *et al.*, 2017). En cambio, en las bacterias Gram negativas, la membrana externa que forma parte de su pared celular, es capaz de unir una amplia gama de iones metálicos, sustentado en que los cationes son elementos que estabilizan la arquitectura molecular de la membrana, por lo que la unión a iones metálicos reduce las cargas repulsivas entre los constituyentes aniónicos de moléculas de lipopolisacáridos y proteínas adyacentes. Se ha demostrado que los grupos fosforilo

de los lipopolisacáridos, son los constituyentes de la membrana externa que primero se unen a los iones metálicos y algunos grupos carboxilo también están disponibles para interactuar con los metales. Sin embargo, el peptidoglicano es quien se une fuertemente a los iones metálicos por los grupos carboxilo, al igual que ocurre en las bacterias Gram positivas, pero en menor medida (Salgado-Bernal *et al.*, 2015; Jaafar *et al.*, 2016). Aunque las bacterias Gram positivas y Gram negativas difieren en la estructura de la pared celular, el potencial para la biosorción es similar, debido a la similar composición de los grupos funcionales que interactúan con los iones metálicos (Salgado-Bernal *et al.*, 2015).

Para ilustrar la marcada afinidad que tiene la pared celular en los procesos de captura, Suriya *et al.*, en el 2013 estudiaron la biosorción de iones metálicos (Cu(II), Pb(II), Cd(II), Cr(VI) y Hg(II)) por la cepa *Enterobacter cloacae* AB6. Por un análisis de las fracciones subcelulares de las células demostraron que más del 85 % de estos eran capturados por la pared celular al compararlos con las fracciones correspondientes a la membrana citoplasmática y el citoplasma.

En la remoción de metales las microalgas se destacan entre los biomateriales más promisorios, por su fácil y económica obtención, debido a que crecen en medios de cultivo líquidos simples (Zeraatkar *et al.*, 2016). Como parte de sus requerimientos nutricionales acumulan intracelularmente metales esenciales por transporte activo y pueden secuestrar iones metálicos que les resultan tóxicos por diferentes mecanismos, como la adsorción a grupos activos de la superficie celular y la quelación intracelular por proteínas, respondiendo a un proceso de detoxificación (Kadukova, 2016; Zeraatkar *et al.*, 2016). Como en otros microorganismos y de acuerdo con su función de barrera, su pared celular se destaca en el proceso de biosorción que estos realizan. Esta estructura está compuesta fundamentalmente por polisacáridos, proteínas y lípidos, los cuales aportan grupos funcionales tales como carboxilo, hidroxilo, amino, sulfhidrilo y fosfato que le confieren una carga negativa a la superficie celular y sitios de alta afinidad a los cationes metálicos (Khan *et al.*, 2016).

Los hongos filamentosos y las levaduras también han demostrado una alta afinidad por los iones metálicos, ya que pueden capturarlos del ambiente por medio de mecanismos físico-químicos y biológicos (Fawzy *et al.*, 2017). Una característica distintiva de este grupo microbiano son los

constituyentes de la pared celular (quitina, quitosano, polifosfatos, lípidos y proteínas), que les proporcionan excelentes propiedades para unir metales, a través de grupos funcionales cargados negativamente como aminos, hidroxilos, carboxilos, sulfhidrilos y fosfatos, que permiten la captura o inmovilización de estos compuestos (Aydin *et al.*, 2016). Este proceso también puede tener lugar a través de pigmentos o polisacáridos extracelulares, lo cual involucra procesos metabólicos (Nour y Ghadir, 2014).

Varios estudios realizados por el Grupo de Biotecnología microbiana (Departamento de Microbiología y Virología, Facultad de Biología, Universidad de La Habana) con bacterias, levaduras y microalgas aisladas de diferentes ecosistemas acuáticos, así como de colección, se han dirigido a investigar la remoción de metales, como

el cinc y el cadmio. Dichas investigaciones han confirmado la capacidad de las células de microorganismos eucariontes y procariontes de remover metales disueltos. Por ello constituyen sistemas biológicos prometedores en la eliminación, recuperación o detoxificación de estos contaminantes ambientales. Las diferencias en los niveles de captura de cinc y cadmio se atribuyeron a las características propias de cada biomasa microbiana: como la actividad fisiológica y bioquímica, la dotación genética y la diversidad en la composición química de la pared celular, unida a las características de los metales, que influyen en la afinidad de las biomasas por estos (Carballo *et al.*, 2011; 2012). La diversidad también se refleja en el uso de diferentes biomasas microbianas en relación con los metales que interactúan (Tabla 1).

Tabla 1. Microorganismos utilizados para la remoción de iones metálicos en solución.

Table 1. Microorganisms used for removing metallic ions in solution.

Microorganismo biosorbente	Ion metálico	Referencia
<i>Parachlorella kessleri</i>	Ag(I)	Kadukova, 2016
<i>Klebsiella</i> sp. 3S1		Muñoz <i>et al.</i> , 2016
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Cd(II)	Ghaima <i>et al.</i> , 2017
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>		Qun y Benjun, 2016
<i>Chelatococcus daeguensis</i> TAD1		Li <i>et al.</i> , 2016
<i>Fusarium</i> sp., <i>Myrothecium</i> sp.		Castro-González <i>et al.</i> , 2017
<i>Bacillus subtilis</i> FZUL-33	Pb(II)	Cheng <i>et al.</i> , 2016
<i>Penicillium</i> sp.		Aydin <i>et al.</i> , 2016
<i>Curvularia</i> sp., <i>Neosartorya</i> sp.	Cu(II) Zn(II)	Ling <i>et al.</i> , 2016
<i>Phaeodactylum tricornutum</i> , <i>Nitzschia</i> sp., <i>Skeletonema</i> sp. <i>Chlorella vulgaris</i>		Kwon <i>et al.</i> , 2017
<i>Alternaria alternata</i> , <i>Penicillium aurantiogriseum</i>	Hg(II), Cd(II)	Bahobil <i>et al.</i> , 2017
<i>Deinococcus radiodurans</i>	Cd(II), Pb(II)	Jaafar <i>et al.</i> , 2016
<i>Streptococcus equisimilis</i>	Ni(II), Cd(II)	Costa y Tavares, 2016
<i>Acinetobacter</i> sp. HK-1	Ni(II), Cu(II)	Zhang <i>et al.</i> , 2017
<i>Rhizopus stolonifera</i> <i>Macrophomina phaseolina</i>	Pb(II), Cd(II) Cu(II), Zn(II)	Fawzy <i>et al.</i> , 2017
<i>Aspergillus flavus</i>	Cd(II), Hg(II), Pb(II)	Mahmoud <i>et al.</i> , 2017
<i>Yarrowia lipolytica</i> 70562	Hg(II), Pb(II), Cu(II)	Alipanahpour <i>et al.</i> , 2016
<i>Rhodotorula mucilaginosa</i> , <i>Saccharomyces boulardii</i>	Hg(II), Pb(II), Cu(II)	Grujić <i>et al.</i> , 2017
<i>Rhodococcus opacus</i>	Fe(III), Cu(II), Zn(II) Cd(II), Ni(II), Pb(II)	Goswami <i>et al.</i> , 2017

Factores que influyen en el proceso de biosorción

Con el objetivo de aumentar la eficiencia de la captura de metales por biomasa microbiana y su posible aplicación industrial, es esencial el estudio de los factores bióticos y abióticos (Castro-González *et al.*, 2017). En relación a estos factores se describen los siguientes efectos:

Tipo de microorganismo: Diversos grupos microbianos han mostrado capacidad para la remoción de metales. La diferencia entre estos está dada fundamentalmente por la composición celular, así como por sus características fisiológicas y genéticas (Carballo *et al.*, 2017; Fawzy *et al.*, 2017).

Edad fisiológica del microorganismo: Las diferentes etapas fisiológicas de los cultivos microbianos pueden alterar los grupos funcionales (hidroxilos, carboxilos, aminos, sulfatos y fosfatos) presentes en la pared celular, los cuales están fuertemente involucrados en la unión del metal a la biomasa, de ahí que la edad fisiológica del cultivo microbiano pueda influir de manera positiva o negativa en la captura de los metales pesados (Carballo *et al.*, 2017; Ghaima *et al.*, 2017).

Concentración celular: Un incremento en la concentración celular puede ocasionar una interferencia entre los sitios de unión del metal y la biomasa, lo cual puede provocar una disminución en el atrapamiento del metal (Castro-González *et al.*, 2017).

Estado de la biomasa: La biomasa celular tanto viva como muerta, tiene la capacidad de secuestrar metales a través de mecanismos físico-químicos como la adsorción o el intercambio iónico. Para potenciar su capacidad de captura la biomasa microbiana puede someterse a tratamientos físicos y químicos que modifican sus propiedades de enlazar metales a requerimientos específicos (Zeraatkar *et al.*, 2016).

Temperatura: Un incremento en la temperatura del proceso de remoción de metales, aumenta la energía del sistema y facilita el enlace del metal a la superficie del microorganismo. Por encima de la temperatura óptima disminuye el enlace, lo cual puede estar dado por la distorsión de algunos sitios de la superficie celular disponibles para la unión, por un proceso de desorción del metal, así como por la ocurrencia de daños a la biomasa (Ghaima *et al.*, 2017).

pH: Es uno de los principales factores abióticos que influyen en el proceso. El pH de la solución influye en la naturaleza de los sitios de unión, en la solubilidad del metal, en la solución química de los metales, la

actividad de los grupos funcionales de la biomasa y la competencia entre los iones (Najam y Andrabi, 2016). La biosorción depende de la protonación o la desprotonación de los grupos funcionales sobre la pared celular. Con el aumento del pH de la solución del metal, los sitios activos sobre la pared celular se desprotonan y aumenta la carga negativa con un consecuente incremento del enlace de los metales a los grupos funcionales de las biomasa microbianas, debido a una intensificación de las fuerzas electrostáticas involucradas en el proceso de adsorción. A pH ácidos los metales existen como iones libres por lo que hay más protones en la solución que saturan los sitios de adsorción disponibles, mientras que a pH alcalinos los iones precipitan como hidróxidos u óxidos por lo que la disponibilidad depende fuertemente del pH del medio o la solución (Suriya *et al.*, 2013; Bahobil *et al.*, 2017).

Concentración inicial del metal: a bajas concentraciones de soluto la relación entre los iones metálicos y el área superficial disponible del biosorbente es baja, como consecuencia, la sorción se hace en estas condiciones independiente de la concentración inicial. Sin embargo, a altas concentraciones de soluto esta relación varía, siendo mayor la interacción con los sitios de unión, con el consecuente incremento de la captura de iones metálicos por el biosorbente. En estas condiciones, la remoción es fuertemente dependiente de la concentración inicial del metal (Bahobil *et al.*, 2017). La cantidad de metal capturado por las biomasa microbianas se incrementa con la concentración inicial del metal en la solución, seguido frecuentemente por la saturación de los sitios de enlace del biosorbente (Carballo *et al.*, 2017; Costa y Tavares, 2016).

Un aspecto fundamental en la biosorción, es que no se puede predecir fácilmente la efectividad de este proceso, debido a los diversos factores ambientales que pueden influir. Por este motivo, el ajuste de las variables es una parte importante y así lo ratifican la mayoría de las investigaciones de esta índole. Por ejemplo, Carballo *et al.* (2017) señalaron la influencia de varios factores bióticos y abióticos en la capacidad de captura de cinc y cadmio por *Pseudomonas mendocina* (Ps-1) y *Saccharomyces cerevisiae* (Sc-10). Al describir el aumento de los niveles de remoción por ambas biomasa señalaron como los factores más determinantes el pH, la concentración inicial del metal y el estado de los microorganismos. En este sentido, el tratamiento de la biomasa por calor seco condicionó el mecanismo de biosorción en las biomasa inactivadas y potenció la captura de cadmio en 2,5 y 1,5 veces

más que las biomasas vivas de la bacteria y la levadura, respectivamente. Esta condición de la biomasa exhibe numerosas ventajas. Entre estas se señala la disminución de los costos en un proceso de remediación, ya que no requiere la adición de nutrientes al sistema, al no necesitar un metabolismo microbiano activo. Esto minimiza el riesgo del uso ambiental de microorganismos potencialmente dañinos y no seguros al medio ambiente (Salgado-Bernal *et al.*, 2015).

Modelos de evaluación de la remoción de metales por biomasas microbianas

La transferencia de sustancias a partir de una fase móvil (líquida o gaseosa) a una fase sólida es el fenómeno universal conocido como isoterma, donde una curva describe la retención de una sustancia sobre un sólido a varias concentraciones. Esto constituye la principal herramienta para describir y predecir la movilidad de los iones metálicos en solución acuosa (Hlihor *et al.*, 2014). Este fenómeno en ocasiones se controla fuertemente por la cinética del proceso, por lo que la dependencia con el tiempo de la isoterma de sorción también debe especificarse. Las isotermas se caracterizan por parámetros bien definidos, los cuales expresan las propiedades y afinidad del biosorbente bajo determinadas condiciones (concentración y temperatura) y cuán selectiva es la retención, cuando dos o

más adsorbentes coexisten (Moafi *et al.*, 2016). Por ello pueden utilizarse para comparar las capacidades biosortivas de los biosorbentes, frente a diferentes contaminantes (Costa y Tavares, 2016).

Numerosos modelos de isotermas de equilibrio se han empleado para determinar la naturaleza de los procesos de adsorción. Estos incluyen modelos simples y multicomponentes. Las curvas de isotermas típicas se evalúan variando la concentración inicial del soluto, mientras se fijan parámetros ambientales tales como pH, temperatura y fuerza iónica. De manera general la captura incrementa con el aumento de la concentración y alcanza la saturación a elevadas concentraciones (Salman *et al.*, 2014). Este comportamiento se observó en la remoción de iones Zn (II) y Cd (II) por biomasas bacterianas aisladas de la cuenca hidrográfica Almendares-Vento, La Habana, Cuba, por Carballo *et al.* (2008). De acuerdo a la clasificación de las isotermas, informada por Volesky (1999), las curvas muestran un comportamiento favorable, ya que la remoción del metal en cada caso se incrementa con el aumento de la concentración inicial en la solución (Fig. 1). Es importante destacar que las isotermas de biosorción pueden exhibir patrones irregulares debido a la naturaleza compleja del material sorbente y sus múltiples sitios activos, así como a la compleja solución química de algunos compuestos metálicos (Volesky y Holan, 1995).

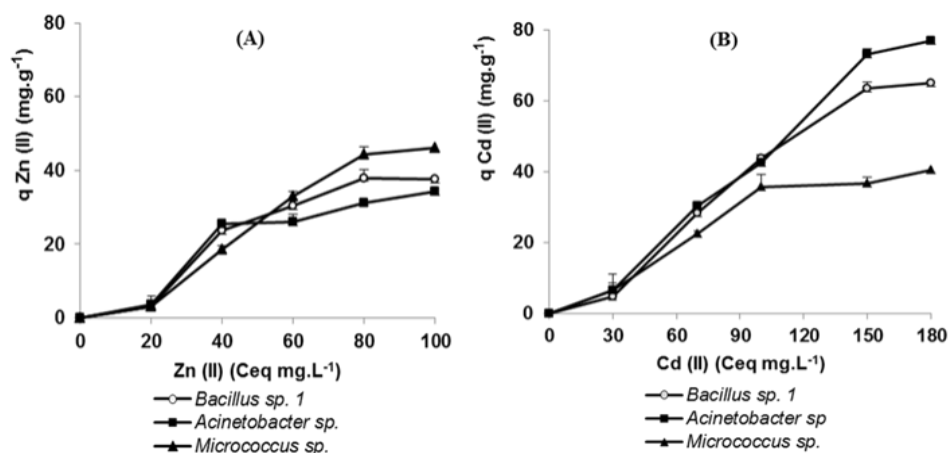


Figura 1. Isotermas de biosorción de Zn (II) (A) y de Cd (II) (B) por biomasas inactivadas. (q: cantidad de metal removido por gramo de biomasa, Ceq: concentración del metal en el equilibrio). Condiciones experimentales: $28 \pm 2^\circ\text{C}$, pH 6, agitación a 100 r.min^{-1} , 6h. Barras de error representan desviación estándar de tres repeticiones ($n=3$) por concentración del metal en equilibrio para cada bacteria. Cepas aisladas por Carballo *et al.*, (2008). Datos no publicados.

Figure 1. Biosorption isotherms of Zn (II) (A) and Cd (II) (B) by inactivated biomass. (q: amount of metal removed per gram of biomass, Ceq: concentration of the metal in the equilibrium). Experimental conditions: $28 \pm 2^\circ\text{C}$, pH 6, agitation at 100 r.min^{-1} , 6h. Error bars represent standard deviation of three repeats ($n = 3$) per concentration of the metal in equilibrium for each bacterium. Bacterial stains isolated by Carballo *et al.* (2008). Unpublished data.

Para describir los resultados, el modelo que se utilice debe predecir la unión de los iones metálicos, tanto a altas como a bajas concentraciones. Algunos de estos son el Modelo de Freundlich, Modelo de Langmuir, Modelo de Temkin (Moafi *et al.*, 2016), Modelo BET, Modelo de Harkins-Henderson, Modelo de Dubinin-Radushkevich (D-R) y el Modelo de Sips (Nour y Gadhir, 2014). Estos se utilizan independientemente o combinados por diferentes autores. Además se encuentran los sistemas multicomponentes que utilizan modelos ampliados o la combinación de dos ecuaciones como el Modelo Ampliado de Langmuir, el Modelo Combinado de Langmuir-Freundlich, el Modelo de Redlich-Peterson y el Modelo Ampliado de Freundlich (Salman *et al.*, 2014).

Modelo de Freundlich

La primera ecuación matemática que describe una isoterma la informaron Freundlich y Kuster en 1906. Este modelo puede aplicarse a la adsorción de superficies heterogéneas con la interacción entre las moléculas adsorbidas (Najam y Andrabi, 2016). Sugiere que la energía de sorción decrece exponencialmente con la saturación de los sitios de unión en el adsorbente (Moafi *et al.*, 2016). La ecuación empírica de Freundlich basada en una superficie heterogénea es:

$$q_e = K_F C_e^{1/n}$$

En dicha ecuación q_e es la cantidad de soluto adsorbido por unidad de peso de biosorbente en equilibrio (mg.g^{-1}), C_e es la concentración de equilibrio de soluto en la solución (mg.L^{-1}), K_F (mg/g ó l/mg), $1/n$ y n son las constantes de Freundlich que caracterizan el sistema y son indicadores de la capacidad e intensidad de enlace, respectivamente. El valor de n indica el grado de linealidad entre la concentración de la solución y la adsorción siendo lineal la adsorción si $n = 1$, un proceso químico si $n < 1$ y un proceso físico si $n > 1$ (Salman *et al.*, 2014).

Modelo de Langmuir

El modelo de isoterma de Langmuir asume una superficie con sitios de unión homogéneos, energía de sorción equivalente, que la adsorción ocurre por un mismo mecanismo en sitios definidos y la no interacción entre las especies adsorbidas (Moafi *et al.*, 2016; Najam y Andrabi, 2016). En este modelo una vez que un sitio se ocupa sorciones posteriores no tienen lugar

en ese sitio. En este sentido, la superficie eventualmente alcanza el punto de saturación, donde se logra la máxima adsorción (Kumar *et al.*, 2016). La ecuación fue desarrollada por Irving Langmuir en 1918 y se representa por:

$$q_e = \frac{q_m b C_e}{1 + b C_e}$$

Donde q_e es la cantidad de soluto adsorbido por unidad de peso de biosorbente en equilibrio (mg/g), C_e es la concentración de equilibrio de soluto en la solución (mg/L), q_m es la capacidad de adsorción de monocapa (mg/g) y b es el recíproco de la concentración a la cual se alcanza la mitad de la saturación del adsorbente.

La característica esencial de este modelo puede ser expresado en términos del parámetro de separación dimensional R_L o parámetro de equilibrio, el que indica la forma de la isoterma que predice si un sistema de adsorción es viable o no y se describe por la siguiente ecuación:

$$R_L = \frac{1}{1 + b C_0}$$

El proceso de biosorción en función de R_L puede describirse como: desfavorable cuando $R_L > 1$, lineal cuando $R_L = 1$, favorable cuando $0 < R_L < 1$, irreversible cuando $R_L = 0$ (Kumar *et al.*, 2016).

Los modelos de Langmuir y Freundlich se destacan por ser de los más aplicados, ya sea independientemente o de manera combinada. Varias investigaciones así lo confirman (Hlihor *et al.*, 2014; Nwidi y Agunwamba, 2015; Khan *et al.*, 2016; Qun y Benjun, 2016).

Modelos cinéticos

Para la comprensión del tipo de mecanismo de biosorción, es necesario el estudio de la cinética de este proceso. Este parámetro ofrece información detallada acerca de la velocidad de captura y de los pasos que la controlan, como la transferencia de masa externa, la transferencia de masa en el interior de la partícula y las reacciones de biosorción (Moafi *et al.*, 2016). Numerosos modelos describen cuantitativamente el comportamiento cinético durante los procesos de adsorción (Hlihor *et al.*, 2014; Nwidi y Agunwamba, 2016).

Entre los principales se encuentran el modelo cinético de velocidad de primer orden, de velocidad de segundo

orden, el modelo cinético de pseudo-primer orden o Ecuación de Lagergren, el modelo cinético de pseudo-segundo orden, el de Elovich y el de Webber-Morris. En los últimos años, se destaca la aplicación de los modelos de pseudo-primer orden y de pseudo-segundo orden (Tabla 2). El primero asume que cada ión metálico tiene un sitio de sorción en el biosorben-

te y el índice de ocupación de estos es proporcional al número de sitios desocupados. El segundo asume que tiene dos sitios y que el paso limitante de la unión está gobernado por reacciones de interacción de naturaleza química siendo tan fuertes como los enlaces covalentes, el intercambio iónico y la formación de complejos (Nour y Gadhir, 2014).

Tabla 2. Modelos cinéticos que describen los mecanismos de biosorción.

Table 2. Kinetic models for describing biosorption mechanisms.

Expresión	Ecuación	Referencia
Modelo cinético de pseudo-primer orden	$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 \cdot t$	Lagergren, 1898
Modelo cinético de pseudo-segundo orden	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t$	Ho y Mckay, 1998

q_e : cantidad de metal absorbido por unidad de masa del biosorbente ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) en el equilibrio.

q_t : cantidad de metal absorbido por unidad de masa del biosorbente ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) a un tiempo t (min).

K_1 : constante cinética de pseudo-primer orden (min^{-1}).

K_2 : constante cinética de pseudo-segundo orden ($\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$).

$K_2 q_e^2$: velocidad inicial de adsorción ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$).

En diferentes trabajos se ha informado el uso combinado de estos modelos cinéticos. Por ejemplo en la biosorción de Hg (II), Pb (II) y Cu (II) por la cepa *Yarrowia lipolytica* 70562, se aplicaron los siguientes modelos: Modelo cinético de pseudo -primer orden, Modelo cinético de pseudo-segundo orden, Ecuación cinética de Webber-Morris y el Modelo cinético de Elovich. Los datos experimentales se describieron mejor por el Modelo cinético de pseudo-segundo orden, el cual predice el comportamiento durante todo el tiempo de reacción, siendo el proceso de quimioadsorción el imperante y el paso limitante de la reacción (Alipanahpour *et al.*, 2016). De manera general este modelo se destaca por ser el que mejor se ajusta en la biosorción de metales, resultados referidos por varios autores (Costa y Tavares, 2016; Castro-González *et al.*, 2017; Muñoz *et al.*, 2017).

Desorción de metales

Las investigaciones sobre los procesos de biosorción/desorción tienen como objetivo recuperar los metales retenidos y reutilizar el biosorbente en ciclos sucesivos. La selección de la especie metálica para su eliminación está determinada por su toxicidad o el valor del metal recuperado y no implica que ambos aspectos estén necesariamente separados (Hlihor *et al.*, 2014).

Un proceso de desorción exitoso requiere una selección apropiada del agente químico de elución, del biosorbente y del mecanismo de biosorción. Como premisa, el agente químico no debe dañar la biomasa, debe ser poco costoso, ambientalmente amigable y efectivo (Hlihor *et al.*, 2014). Además, sobre este proceso puede influir el pH, la concentración de los iones metálicos, la fuerza iónica, el índice catiónico y la temperatura. También puede influir el volumen del agente de elución, el cual debe ser tan bajo como sea posible, para obtener la máxima concentración del soluto. Al mismo tiempo, el volumen de la solución debe ser suficiente para propiciar la máxima solubilización del metal adsorbido (Vijayaraghavan y Yun, 2008).

Entre los métodos más utilizados para la separación del metal de la biomasa se encuentran: el tratamiento con ácidos minerales diluidos (ácido clorhídrico (HCl), ácido sulfúrico (H_2SO_4), ácido nítrico (HNO_3)) y orgánicos (ácido acético (CH_3COOH)), así como agentes formadores de complejos (ácido etilendiaminotetraacético (EDTA)) (Yang *et al.*, 2015). La efectividad de los agentes químicos utilizados como eluyentes depende entre otros factores del volumen y la concentración empleados. En este sentido, Shoaib *et al.* (2013) estudiaron el proceso de adsorción/desorción en *Thricoderma harzianum*, esta biomasa exhibió una máxima capacidad de captura para

el ion Cr (VI) de $16,33 \text{ mg.g}^{-1}$ a una concentración de 25 mg.L^{-1} en solución. Cuando esta biomasa cargada con el metal se trató con diferentes agentes químicos la máxima desorción del metal se obtuvo con HNO_3 0,1M, seguido de HNO_3 0,5M, HNO_3 0,1M, HCl 0,1M, HCl 0,5M, H_2SO_4 0,1M, CH_3COOH 0,1M, CH_3COOH 0,5M y H_2SO_4 0,5 M. Los agentes con más potencialidades para su aplicación como agentes eluyentes fueron el ácido nítrico y el ácido clorhídrico. La acción favorable de estos agentes se atribuyó al intercambio de H^+ libres de la solución por los cationes metálicos bioadsorbidos sobre la biomasa, dado por la capacidad intercambiadora de cationes que presentan estructuras como la pared celular de las células microbianas. Se plantea que una especie microbiana puede presentar más de un mecanismo de biosorción, como la precipitación, la formación de complejos y la adsorción. Sin embargo, es importante considerar que, en el caso del tratamiento con ácidos, se refuerza la captura y separación de los iones por un intercambio iónico (García *et al.*, 2003).

Es importante tener en cuenta que, en algunos casos, el empleo de estos compuestos químicos puede potenciar la captura de los iones, mientras que en otros puede causar la pérdida de la capacidad de la biomasa para retener los iones metálicos. Este efecto negativo quedó demostrado en la adsorción/ desorción de Ni (II) y Cu (II) por la cepa bacteriana *Acinetobacter* sp. HK-1 con HNO_3 0,1 M (Zhang *et al.*, 2017). Este resultado se explicó por un posible efecto agresivo de los agentes eluyentes sobre la biomasa, que probablemente provocaron alteraciones, que conllevaron a la pérdida de las capacidades para retener los cationes metálicos, unido a una posible merma de biomasa. En relación al empleo de soluciones alcalinas, es posible la precipitación de los metales. Este efecto se informó en la remoción de Cr (VI) por *Arthrimum Malaysianum*, mediante la reducción a Cr (II) y el predominio de esta especie oxidada sobre la superficie celular, al emplear como agente eluyente NaOH 0,1 M (Majumder *et al.*, 2017).

Si se toman en cuenta estos aspectos, en el proceso de desorción pueden estar participando varios submecanismos, como la atracción electrostática, el intercambio iónico y la formación de complejos (Chen y Wang, 2016). Por ello una especie microbiana puede presentar más de un mecanismo de biosorción, que al ser reversibles permiten la recuperación de los metales. Además, es posible inferir que es viable la regeneración del biosorbente

después de la desorción de los iones metálicos. Este proceso debe ser mejorado u optimizado, mediante el ajuste de las condiciones experimentales, entre las que se pueden citar el agente apropiado de elución, el tipo de biosorbente y el mecanismo de biosorción.

Ventajas y aplicaciones de los procesos microbianos en la remoción de iones metálicos

La biorremediación de metales tóxicos por biosorción o bioacumulación es especialmente conveniente como un paso de limpieza en sistemas acuáticos, debido a que posibilita obtener agua con la calidad requerida para su reutilización. Estos procesos biotecnológicos logran efectividad en el tratamiento de grandes volúmenes de aguas residuales contaminadas con metales a concentraciones en el orden de $1\text{-}100 \text{ mg.L}^{-1}$ (Wang y Chen, 2006) y no generan residuos que impacten negativamente al ambiente (Torres, 2007). Además, constituyen tecnologías con aplicaciones promisorias para la eliminación de metales presentes en suelos y así disminuir la contaminación de este ecosistema y del manto freático (Bonaventura y Johnson, 1997, Barkay y Schaefer, 2001).

A diferencia de las tecnologías convencionales, la biorremediación se puede llevar a cabo en el sitio contaminado y es más económica. Por ejemplo, la aplicación de la biosorción presenta un menor costo (\$8,4 - \$197 en tres días) en comparación con la incineración que tiene de un costo entre \$300 a \$1000 para igual tiempo de tratamiento (Atlas y Unterman, 1999). A las ventajas económicas que presentan estos procesos biotecnológicos, tributa el hecho de que las biomasa microbianas pueden resultar de fácil acceso, a partir de desechos de plantas de fermentación o por crecimiento de los microorganismos en sustratos baratos (Kiran *et al.*, 2007). La biosorción permite la recuperación del material biológico de manera sencilla sin grandes tecnologías, ya que estos pueden ser regenerados por la desorción del metal con ácidos o soluciones de sales. La solución resultante, altamente concentrada de metales, puede ser procesada por otras técnicas, como la precipitación para remover el metal concentrado. Estos recursos naturales recobrados pudieran ser utilizados en otros procesos industriales (Acosta *et al.*, 2007).

En la bioacumulación, la biomasa microbiana cargada de metal posee un volumen pequeño comparado

con el efluente, por lo que es efectiva para reducir el volumen del desecho. Este proceso limita la recuperación del biosorbente, pero también facilita la recuperación de los iones metálicos (Cañizares-Villanueva, 2000).

En este campo, los países con mayor número de artículos científicos, relacionados con este tema son la India, Estados Unidos y Brasil. Se destaca el empleo de las biomásas bacterianas, fundamentalmente en estado inactivado, en la remediación de aguas residuales industriales, suelos y otros cuerpos de agua. Entre los mecanismos biológicos más estudiados sobresalen la bioacumulación, la oxidación y la formación de complejos, sin embargo son la biosorción y la reducción los más aplicados en procesos de remoción de metales pesados en solución acuosa. Además, los iones metálicos que con mayor frecuencia se utilizan como elemento contaminante a remediar son, en orden decreciente, el cromo, el cadmio, el cobre, el plomo, el hierro y el cinc (Lacerda *et al.*, 2017).

En adición a lo anterior, la aplicación de los procesos microbianos para la eliminación de metales pesados, poseen una elevada eficiencia a bajas concentraciones de metales y radioactivos, y operan en un amplio rango de pH y de temperatura. Además, los iones de las sales de calcio y magnesio no compiten con los sitios activos de las superficies celulares, como sucede en las resinas de intercambio iónico (Kiran *et al.*, 2007).

Todas estas particularidades de los procesos de remoción de metales, como resultado de las interacciones entre los microorganismos e iones metálicos, han permitido desarrollar biosorbentes con fines comerciales, hechos con algas marinas, de agua dulce y bacterias cuyas denominaciones comerciales son: ATM-BIOCLAIMTM, AlgaSORBTM y BiofixTM, respectivamente.

AlgaSORBTM, se compone de algas de agua dulce como *Chlorella vulgaris* y ATM-BIOCLAIMTM de biomasa de bacterias del género *Bacillus* sp. Ambos biosorbentes pueden remover eficientemente iones metálicos de soluciones diluidas (10 a 100 mg.L⁻¹) y reducir la concentración de estos por debajo de 1mg.L⁻¹, además el proceso no se afecta por la presencia de otros iones como calcio y magnesio (Hutchins *et al.*, 1997). ATM-BIOCLAIMTM, es capaz de adsorber, oro, cadmio y cinc, de soluciones cianhídricas con una eficiencia del más del 99%. No es selectivo, y los metales pueden recuperarse usando H₂SO₄, Na(OH) y agentes formadores de complejos. Permite que los gránulos del biosor-

bente pueden ser regenerados y reusados nuevamente en otro ciclo de adsorción. Respecto a AlgaSORBTM, se comprobó mediante ensayos de laboratorio, que este biosorbente puede remover y reducir las concentraciones de cadmio y mercurio a niveles inferiores a los estándares requeridos para agua de bebida (Basha y Murthy, 2007). BiofixTM, es una mezcla de biomásas, musgos, algas, levaduras, cianobacteria (*Spirulina* sp.) y plantas (*Lemna* sp. y *Sphagnum* sp.). La adsorción de cinc a este biosorbente es cuatro veces más alta que a las resinas de intercambio iónico sintéticas. Tiene una marcada afinidad por los diferentes metales, según el siguiente orden: Al (III)>Cd (II)>Zn (II)>Mn (II) y menor afinidad por Mg (II) y Ca (II). Los metales pueden separarse con HCl y HNO₃ y el biosorbente puede ser usado en más de 120 ciclos de extracción/elución (Basha y Murthy, 2007).

Entre otros biosorbentes comercializados están Meta-GeneR y RAHCO Bio-beads, los que son efectivos para la remoción de metales pesados, aplicados a los efluentes industriales de la galvanoplastia y de la minería. La información sobre sus aplicaciones industriales y otra información es limitada (Atkinson *et al.*, 1998).

CONCLUSIONES

Las interacciones entre los microorganismos y los diferentes iones metálicos ofrecen una solución de remoción y recuperación de estos contaminantes de manera eficiente, económica y ecológica, para el tratamiento de aguas residuales en diferentes procesos industriales. Para ello, se han potenciado las investigaciones que abordan el proceso de biosorción por biomásas microbianas y su caracterización, donde el ajuste de los principales factores es de vital importancia para su implementación. Se destaca el empleo de modelos matemáticos para describir la naturaleza del proceso, así como para dilucidar el posible mecanismo por el que ocurre la captura de los iones metálicos. Estos modelos además, justifican y caracterizan el comportamiento de cada biosorbente frente a estos contaminantes, por lo que ayudan a profundizar en el conocimiento de las interacciones específicas de cada biomasa con el metal en estudio y complementan las acciones a seguir para lograr mejores niveles de remoción. Sin embargo, no se ha fomentado de igual manera el desarrollo y aplicación de métodos de desorción de los iones, que garanticen la recuperación de estos como cierre del ciclo de remoción de metales.

LITERATURA CITADA

- Alipanahpour, E., M. Ghaedi, G. Reza, A. Asfaram, *et al.* (2016) Highly efficient simultaneous biosorption of Hg(II), Pb(II) and Cu(II) by live yeast *Yarrowia lipolytica* 70562 following response surface methodology optimization: kinetic and isotherm study. *JIEC.* 48, 162-172.
- Acosta, I., Zarate, M., Cárdenas, J. F., Gutiérrez, C. (2007) Bioadsorción de cadmio en solución acuosa por biomasa fúngica. *Información tecnológica.* 18 (1): 9-14.
- Atkinson, B.W., Bux, F. y Kasan, H. C. (1998) Considerations for application of biosorption technology to remediate metal-contaminated industrial effluents. *Water SA.* 24: 129-35.
- Atlas, R. M. y R. Unterman (1999) *Bioremediation. Manual of Industrial Microbiology and Biotechnology.* Second Edition. ASM Press. Washington D.C. 666-681.
- Aydin, M., A. Güven, S. Malkoç, E. Korcan, *et al.* (2016) Lead biosorption by a moderately halophile *Penicillium* sp. isolated from Çamalti Saltern in Turkey. *Anadolu Univ. J.of Sci. and Technology-C-Life. Sci. and Biotech.* 5(1): 13-22.
- Bahobil, A., R. Bayoumi, H. Atta y M. El-Sehrawey (2017) Fungal biosorption for cadmium and mercury heavy metal ions isolated from some polluted localities in KSA. *Int. J. Curr. Microbiol.App.Sci.* 6 (6): 2138-2154.
- Barkay, T. y J. Schaefer (2001) Metal and radionuclide bioremediation: issues, considerations and potentials. *Curr. Opin. Microbiol.* 4: 318-323
- Basha, S., Murthy, Z. V. P. (2007) Kinetic and equilibrium models for biosorption of Cr (VI) on chemically modified seaweed, *Cystoseira indica*. *Process Biochemistry.* 42: 1521-1529
- Bonaventura, C., Jonson, F. M. (1997) Healthy environments for healthy people: Bioremediation today and tomorrow. *Environ. Health. Perspect. Suppl.* 1: 5-20.
- Cañizares-Villanueva, R. (2000) Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana. *Rev. Latinoam. Microbiol.* 42: 131-143.
- Carballo M. E., M. Heydrich, N. Rojas, I. Salgado, *et al.* (2011) Impact of microbial and chemical pollution in Cuban freshwater ecosystems: strategies for environmental recovery. *Biotechnol Apl.* 28: 274-277.
- Carballo M. E., A. Martínez, I. Salgado, M. Cruz *et al.* (2008) Microorganismos usados en la remoción de metales pesados de soluciones acuosas: estudio de cepas promisorias. *SCIENDO.* 11 (1): 1-11.
- Carballo, M. E., A. Martínez, I. Salgado-Bernal, I. Maldener, *et al.* (2012) Capacidad de captura de cadmio y cinc por bacterias, microalgas y levaduras. *Rev. Cub. Cien. Biol.* 1(1):34-43
- Carballo, M. E., A. Martínez, I. Salgado Bernal, L. Pérez-Bou, *et al.* (2017) Standardization of variables involved in cadmium and zinc microbial removal from aqueous solutions. *Biotechnol. Apl.* 33:1221-1225.
- Castro-González, I., G. Rojas-Verde, I. Quintero-Zapata y V. Almaguer-Cantú (2017) A comparative study on removal efficiency of Cr (VI) in aqueous solution by *Fusarium* sp. and *Myrothecium* sp. *Water Air Soil Pollut.* 228(8), 301.
- Costa, F. y Tavares, T. (2016) Biosorption of nickel and cadmium in the presence of diethylketone by a *Streptococcus equisimilis* biofilm supported on vermiculite. *Int. Biodeterior. Biodegradation.* 115: 119-132.
- Chen, C. y Wang, J. (2016) Uranium removal by novel graphene oxide-immobilized *Saccharomyces cerevisiae* gel beads. *J. Environ. Radioact.* 162-163:134-145.
- Cheng, Y., W. Ling, S. Huang, X. Li, *et al.* (2016) Bio-remediation of acephate-Pb (II) compound contaminants by *Bacillus subtilis* FZUL-33. *J Environ Sci.* 45: 94-99.
- Chowdhury, S., M. A. Jafar, O. Al-Atta y T. Husain (2016) Heavy metals in drinking water: Occurrences, implications and future needs in developing countries. *Sci. Total Environ.* 569-570: 476-488.
- Fawzy, E. M., F. F. Abdel-Motaal y S. A. El-zayat (2017): Biosorption of heavy metals onto different eco-friendly substrates. *J. Toxicol. Environ. Health Sci.* 9(5): 35-44.
- Ghaima, K. K., Mohamed A. I., W. Y. Al Meshhdany y A. A. Abdulhassan (2017) Resistance and bioadsorption of cadmium by *Pseudomonas aeruginosa* isolated from agricultural soil. *IJAES.* 12 (9): 1649-1660.
- García M., F. I. Ramírez y T. Manzano (2003) Biosorción de metales pesados de aguas ácidas de minas (1). *Ingeniería Química.* 155-168.
- Goswami, L., N. A. Manikandan, K. Pakshirajan y G. Pugazhenth (2017) Simultaneous heavy metal removal and anthracene biodegradation by the oleaginous bacteria *Rhodococcus opacus*. *3 Biotech.* 7(37): 2-9
- Grujić, S., S. Vasić, I. Radojević, L. Čomić, *et al.* (2017) Comparison of the *Rhodotorula mucilaginosa* biofilm and planktonic culture on heavy metal susceptibility and removal potential. *Water Air Soil Pollut.* 228(73): 1-8.
- Hlihor, R. M., L. Bulgariu, D. L. Sobariu, M. Diaconu, *et al.* (2014) Recent advances in biosorption of heavy metals: support tools for biosorption equilibrium, kinetics and mechanism. *Rev. Roum. Chim.* 59(6-7): 527-538.
- Ho, T.S. y McKay G. (1998) The kinetics of sorption of basic dyes from aqueous solution by sphagnum moss peat. *Can. J. Chem. Eng.* 76: 822-827.

- Hutchins, R. A. (1973) New method simplifies design of activated-carbon systems. *Chemical Engineering Journal*. 80: 133-138.
- Jaafar, R., A. Al-Sulami, A. Al-Taei, F. Aldoghachi, *et al.* (2016) Biosorption of some heavy metals by *Deinococcus radiodurans* isolated from soil in Basra Governorate-Iraq. *J. Bioremed. Biodeg.* 7(2): 1-4.
- Kadukova, J. (2016) Surface sorption and nanoparticle production as a silver detoxification mechanism of the freshwater alga *Parachlorella kessleri*. *Bioresour. Technol.* 216: 406-413.
- Khan, T. A., A. A. Mukhlif, Equbal A. Khan y K. Sharma (2016) Isotherm and kinetics modeling of Pb (II) and Cd (II) adsorptive uptake from aqueous solution by chemically modified green algal biomass. *Model. Earth Syst. Environ.* 2: 2-13.
- Kiran, A. B., Kaushik, Kaushik, C.P. (2007) Biosorption of Cr (VI) by native isolate of *Lyngbya putealis* (HH-15) in the presence of salts. *J. Hazard. Mater.* 141: 662-667.
- Kumar, B., K. Smita, E. Sanchez, C. Stael, *et al.* (2016) Andean Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.) shell biomass as a new biosorbents for Pb(II) and Cu(II) ions. *Ecol Eng.* 93: 152-158.
- Kwon, H. K., J.Y. Jeon y S. Jin Oh (2017) Potential for heavy metal (copper and zinc) removal from contaminated marine sediments using microalgae and light emitting diodes. *Ocean Sci. J.* 52 (1): 57-66.
- Lacerda F., J. A. Navoni y V. Souza (2017) The use of bacterial bioremediation of metals in aquatic environments in the twenty-first century: a systematic review. *Environ Sci Pollut Res.* 24 (20): 16545-16559.
- Lagergren, S. (1898) Zur theorie der sogenannten adsorption gelöster stoffe, K. Sven. Vetenskapsakad. Handl. 24: 1-39.
- Li, H., S. Huang y Y. Zhang (2016) Cr(VI) removal from aqueous solution by thermophilic denitrifying bacterium *Chelatococcus daeguensis* TAD1 in the presence of single and multiple heavy metals. *J. Microbiol.* 54 (9): 602-610.
- Ling, O. M., L. P. Teen, A. Mujahid, P. Proksch, *et al.* (2016) Initial screening of mangrove endophytic fungi for antimicrobial compounds and heavy metal biosorption potential. *Sains Malays.* 45(7): 1063-1071
- Mahmoud, M. E., G. M. El Zokm, A. E.M. Farag y M. S. Abdelwahab (2017) Assessment of heat-inactivated marine *Aspergillus flavus* as a novel biosorbent for removal of Cd (II), Hg (II), and Pb (II) from water. *Environ Sci Pollut Res.* 24(22): 18218-18228.
- Majumder, R., L. Sheikh, A. Naskar, M. Mukherjee, *et al.* (2017) Depletion of Cr (VI) from aqueous solution by heat dried biomass of a newly isolated fungus *Arthrimum malaysianum*: A mechanistic approach. *Scientific Reports.* 7 (1): 11254-1259.
- Moafi, H. F., R. Ansari, F. Ostovar (2016) Ag₂O/Sawdust nanocomposite as an efficient adsorbent for removal of hexavalent chromium ions from aqueous solutions. *J. Mater. Environ. Sci.* 7 (6): 2051-2068.
- Muñoz, A. J., F. Espínola y E. Ruiz (2017) Biosorption of Ag (I) from aqueous solutions by *Klebsiella* sp. 3S1. *J. Hazard. Mater.* 329:166-177.
- Najam, R. y Andrabi, S. M. (2016) 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.* 57 (56): 27363-2737.
- Nour, A.T. y Ghadir, El. A. (2014) Biosorption for metal ions removal from aqueous solutions: a review of recent studies. *IJLRST.* 3(1): 24-42.
- Nwidi, I. C. y Agunwamba, J. C. (2015) Selection of biosorbents for biosorption of three heavy metals in a flow metals in a flow-batch reactor using removal efficiency as parameter. *NIJOTECH.* 34 (2): 406-413.
- Qun, C. y Benjun, Z. (2016) Application of Response Surface Methodology (RSM) for optimization of Cd (II) uptake by *Saccharomyces cerevisiae* biomass. *JRST.* 14(1):311-317
- Salgado, Bernal I., Pérez J. E., M.E. Carballo, A. Martínez, *et al.* (2015) Aplicación de rizobacterias en la biorremediación del cromo hexavalente presente en aguas residuales. *Rev. Cub. Cien. Biol.* 4(2): 20-34.
- Salman, H. A., M. I. Ibrahim, M. M. Tarek y H. S.Abbas (2014) Biosorption of Heavy Metals: A Review. *JCST.* 3(4): 74-102.
- Sati, M., M. Verma y J.P. Rai (2014) Biosorption of Pb (II) ions from aqueous solution onto free and immobilized cells of *Bacillus megaterium*. *Int. J. Recent. Sci. Res.* 5(7): 1286-1292.
- Shoaib, A., N. Aslam y N. Aslam (2013) *Trichoderma harzianum*: adsorption, desorption, isotherm and FTIR studies. *J. Anim. Plant Sci.* 23(5): 1460-1465.
- Suriya, J., S. Bharathiraja y R. Rajasekaran (2013) Biosorption of heavy metals by biomass of *Enterobacter cloacae* isolated from metal-polluted soils. *Int. J. Chem.Tech Res.* 5(3): 1329-1338.
- Vijayaraghavan, K. y Yun, Y. (2008) Bacterial biosorbents and biosorption. *Biotechnol. Adv.* 26: 266-291.
- Torres, V. M. (2007) Reducción de pasivos ambientales en el beneficio de concentrados minerales de zinc. *Revista de Ciencias Ambientales.* 1 (2): 17-26.
- Volesky, B. (1999) Biosorption for the next century. *Process Metallurgy. International Biohydrometallurgy Symposium, El Escorial, Spain, June.* 20-23. 9:161-170.

- Volesky, B., Holan, ZR. (1995) Biosorption of heavy metals. *Biotechnol Prog.* 11(3):235-250.
- Wang, J. y Chen, C. (2006) Biosorption of heavy metals by *Saccharomyces cerevisiae*: A review. *Biotechnol Adv.* 24 (5): 427-451.
- Wang, T., J. Yao, Z. Yuan, Y. Zhao, *et al.* (2017) Isolation of lead-resistant *Arthrobacter* strain GQ-9 and its biosorption mechanism. *Environ Sci Pollut Res.* 25 (4): 3527-3538.
- Yang J., J. Cao, G. Xing, Yuang H (2015) Lipid production combined with biosorption and bioaccumulation of cadmium, copper, manganese and zinc by oleaginous microalgae *Chlorella minutissima* UTEX2341. *Bioresource Technol.* 175: 537-534.
- Zeraatkar, A. K., H. Ahmadzadeh, A. F. Talebi, N. R. Moheimani, *et al.* (2016): Potential use of algae for heavy metal bioremediation, a critical review. *J. Environ. Manage.* 30: 1-15.
- Zhang, H., X. Hu y H. Lu (2017) Ni (II) and Cu (II) removal from aqueous solution by a heavy metal-resistance bacterium: kinetic, isotherm and mechanism studies. *Water Sci. Technol.* 76(3-4):859-868.



Editor para correspondencia: Dra. Annia Hernández