

EFICIENCIA DE LA BIOMASA DE *RHIZOPUS SP* EN LA REMOCIÓN DE CADMIO (II)

EFFICIENCY OF THE BIOMASS OF *RHIZOPUS SP* IN THE REMOVAL OF CADMIUM (II)

Hugo Apaza-Aquino^{1,2}, María Rosario Elsa Valderrama Valencia²

¹Asociación de Investigación Científica BIOSS, Urb. San José B-10-Umacollo, Arequipa, Perú,
hapaza89@gmail.com

²Facultad de Ciencias Farmacéuticas, Bioquímicas y Biotecnológicas, Universidad Católica de Santa María, Urb. San José s/n-Yanahuara, Arequipa, Perú.

RESUMEN

La rápida y saturada industrialización en todos los sectores, ocasionan la liberación de diversos contaminantes al medio ambiente como los metales pesados de los cuales el cadmio es un metal persistente y tóxico que causa afectación al ecosistema en general. Se estudió la eficiencia de la biomasa de *Rhizopus sp* en la remoción de cadmio (II) de soluciones acuosas. Se cultivó la biomasa de *Rhizopus sp* en medio caldo papa dextrosa y se realizaron los ensayos de remoción de cadmio (II) en un sistema de régimen batch a distintos valores de pH, temperatura y concentración inicial, a su vez se analizó los modelos matemáticos de primer y segundo orden. Se determinó que la mayor remoción de cadmio (II) empleando la biomasa de *Rhizopus sp* se da a pH 5, temperatura de 25 °C y concentración inicial de metal de 50 ppm, lográndose remover 69,81 %, 67,35 % y 99,97 % respectivamente, además el modelo que más se ajusta a la cinética de sorción fue el modelo de segundo orden. Existen diferentes tecnologías para realizar la descontaminación de los metales pesados, pero la biosorción con biomasa fungal representa una alternativa por ser económica, fácil y no requiere de condiciones especiales.

Palabras clave: *Biorremediación, biosorción, fungal, hongo, metales pesados.*

ABSTRACT

The rapid and saturated industrialization in all sectors, cause the release of various pollutants to the environment such as heavy metals, of which cadmium is a persistent and toxic metal that causes damage to the ecosystem in general. The efficiency of *Rhizopus sp* biomass in the removal of cadmium (II) from aqueous solutions was studied. The *Rhizopus sp* biomass was cultivated in potato dextrose broth medium and cadmium (II) removal tests were performed in a batch system at different values of pH, temperature and initial concentration, in turn the mathematical models of first and second order. It was determined that the greatest removal of cadmium (II) using the *Rhizopus sp* biomass occurs at pH 5, temperature of 25°C and initial metal concentration of 50 ppm, achieving removal of 69.81%, 67.35% and 99.97% respectively, in addition, the model that best fits the sorption kinetics was the second order model. There are different technologies to perform decontamination of heavy metals, but biosorption with fungal biomass represents an alternative because it is cheap, easy and does not require special conditions.

Keywords: *Bioremediation, biosorption, fungal, fungus, heavy metals.*

*Autor para correspondencia: hapaza89@gmail.com



INTRODUCCIÓN

La rápida industrialización, la utilización indiscriminada de recursos, así como las actividades agrícolas intensivas para satisfacer las crecientes necesidades de nuestra sociedad; han conllevado a una contaminación general. La mayoría de los contaminantes que afectan el suelo y el agua son los metales pesados, pesticidas, hidrocarburos de petróleo y gran cantidad de efluentes industriales tóxicos (Singh *et al.* 2020); En especial el cadmio, cromo y mercurio son relevantes, se caracterizan por ser persistentes, tóxicos (Beltrán-Pineda & Gómez-Rodríguez 2016) y no biodegradables (Pérez *et al.* 2018). El cadmio causa alteraciones a nivel enzimático, renal, respiratorio y digestivo (Ramirez 2002); las principales fuentes de exposición al cadmio es mediante la comida y los cigarrillos (Pérez & Azcona 2012). Es por ello importante que se debe aplicar sistemas de tratamiento de metales pesados para evitar y/o minimizar los efectos descritos.

Actualmente existen diversas tecnologías para la descontaminación de los metales pesados tales como: intercambio iónico, precipitación, ósmosis inversa, oxidación y reducción, filtración, electroquímica, entre otros (McAfee *et al.* 2001). Entre estas tecnologías resalta la biorremediación, que es una tecnología emergente e innovadora por sus ventajas como la viabilidad económica (Mishra *et al.* 2019), mayor competencia y respeto al medio ambiente (Singh *et al.* 2020); los mecanismos de eliminación de metales pesados por los microorganismos son biosorción,

bioacumulación y biotransformación (Fernández *et al.* 2018). Especies de hongos aislados de sitios contaminados con metales pesados son capaces de tolerar altas concentraciones de metales, lo que los convierte en agentes prometedores para remediar metales pesados (Mohammadian *et al.* 2017), tales hongos se conocen como hiperacumuladores (Chaurasia *et al.* 2019), por su alta capacidad de adsorción de metales (Sanchez *et al.* 2014).

Entre los hongos para remediar metales pesados sobresale la biomasa de *Rhizopus*, diversas especies de *Rhizopus* son empleadas como biosorbentes de metales por ejemplo la biomasa de *Rhizopus cohnii* elimina eficiente el cadmio de las aguas residuales (Luo *et al.* 2010), *Rhizopus stolonifer* elimina el plomo del agua (Khan *et al.* 2013), *Rhizopus oryzae* remueve iones de plomo (II) y cobalto (II) (Gharieb *et al.* 2014); entre otros metales que remueve está el arsénico (Vala & Sutariya 2012) y cromo (VI) (Espinoza-Sánchez *et al.* 2019).

Por lo descrito, es necesario e importante descontaminar los metales pesados como el cadmio de fuentes contaminadas. El presente estudio tiene por objetivo principal determinar la eficiencia de la biomasa de *Rhizopus sp* en la remoción de cadmio (II) de soluciones acuosas.

MÉTODOS

Ámbito o lugar de estudio: Propagación de la biomasa fungal

Se preparó el medio de cultivo caldo papa dextrosa, el cual fue autoclavado a 121 °C, 15 libras/pulg² por un periodo de 15 minutos, el pH

fue regulado con la adición de ácido clorhídrico y/o hidróxido de sodio. Se cultivó *Rhizopus sp* en un sistema de régimen batch, en frascos de vidrio de 100 mL, de 5,2 cm de diámetro, en la que se depositó 65 mL del medio caldo papa dextrosa, posteriormente se inoculó la cepa pura de *Rhizopus sp* y fue cultivada sin agitación e incubado a temperatura ambiente. Tras el desarrollo de la biomasa de *Rhizopus sp*, fue lavada en frascos de plástico de 1 litro conteniendo agua destilada estéril, la cual se mantuvo en agitación a 100 rpm en un shaker, se realizó tres veces el lavado y cada lavado por un periodo de 15 minutos, con el objetivo de retirar los residuos de medio, ácidos u otros; la biomasa de *Rhizopus sp* empleada tenía un peso húmedo promedio de 1,6 g, disponiendo de esta manera la biomasa para ser empleada en los ensayos de remoción de cadmio (II).

Descripción de métodos: Ensayos de remoción de cadmio (II)

Con la finalidad de determinar los parámetros óptimos para la remoción de cadmio (II) de soluciones acuosas se ensayó con los factores pH, temperatura y concentración de metal. Se preparó soluciones stock de 100 ppm de cadmio (II) a partir de Cd (NO₃)₂*4H₂O y de esta solución se empleó para los ensayos. Los Donde:

ensayos de remoción se realizaron en sistema batch en frascos de plástico de capacidad de 1 litro, donde se depositó 300 mL de la solución de cadmio (II) a una concentración de 100 ppm, luego se depositó el micelio de *Rhizopus sp* y se mantuvo en agitación a 90 rpm; el primer factor evaluado fue el pH el cual se ensayó a valores de 3, 4 y 5; se sacaron alícuotas con una jeringa

acondicionada con un filtro a distintos tiempos (0, 4, 8, 20, 24 horas), luego se realizaron las lecturas de cadmio (II) en el espectrofotómetro de absorción atómica. Para evaluar el factor de la temperatura se realizó el mismo procedimiento anterior y la solución se ajustó al pH óptimo determinado en el experimento anterior y se trabajó a temperaturas de 10 °C, 25 °C y 40 °C. Para el efecto concentración inicial de metal se evaluó a 10 ppm, 50 ppm y 90 ppm; para lo cual se realizó el mismo procedimiento anterior, se ensayó con los valores óptimos de pH y temperatura determinados en el experimento anterior. Para los análisis de los resultados se aplicaron las siguientes ecuaciones:

- Cantidad de metal removido:

$$q = \left(\frac{C_i - C_f}{m} \right) V$$

q: Capacidad de sorción (mg de metal/g de biosorbente)

V: Volumen de la muestra (mL)

C_i: Concentración inicial de metal en solución (mg.L⁻¹)

C_f: Concentración en el equilibrio de la solución (mg.L⁻¹)

m: Cantidad de biosorbente

- Porcentaje de remoción:

$$\%R = \left(\frac{C_0 - C_t}{C_0} \right) \times 100$$

Donde:

%R: Porcentaje de remoción

C₀: Concentración inicial (mg.L)

C_t: Concentración final (mg.L)

- Modelo matemático de primer orden:

Donde:

$$\frac{C_t}{C_0} = 1 - \frac{m q_{-1}}{C_0 V} (1 - e^{-k_{-1} t})$$

q_{-1} : Cantidad de sustancia adsorbida en el equilibrio (mg.g)

k_{-1} : Constante de adsorción de primer orden (min^{-1})

V: Volumen (L)

m: Cantidad de adsorbente (g)

t: Tiempo de contacto (min)

- Modelo matemático de segundo orden:

$$\frac{C_t}{C_0} = 1 - \frac{m q_{-2}}{C_0 V} \left(1 - \frac{1}{\beta_2 + K_{-2} t}\right)$$

Donde:

q_{-2} : Cantidad de sustancia adsorbida en el equilibrio (mg/g)

k_{-2} : Constante de adsorción de segundo orden (min^{-1})

V: Volumen (L)

β_2 : Constante

m: Cantidad de adsorbente (g)

t: Tiempo de contacto (min)

Para determinar la concentración de cadmio (II) se realizó mediante el espectrofotómetro de absorción atómica Shimadzu AA - 6170IF, realizando la curva de calibración para cadmio (II) a una longitud de onda de 228,8 nm. A los

resultados se aplicó la prueba de Tukey a un nivel de significancia de 0,05 mediante el programa Microsoft office Excel 2007, además

se determinó las constantes de las ecuaciones de primer y segundo orden.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La biomasa *fungal* de *Rhizopus sp* cultivado en caldo papa dextrosa tuvo un desarrollo rápido puesto que a los 5 días ya se evidenciaba el desarrollo del micelio en todo el frasco de cultivo; el medio de cultivo caldo papa dextrosa representa una buena alternativa para el cultivo

de biomasa *fungal* por ser económico y fácil de preparar. *Rhizopus* es un tipo de hongo que presenta características de tolerancia y supervivencia en medios tóxicos como los metales pesados tales como cadmio, cobre, plomo, arsénico y hierro (Oladipo *et al.* 2018), es por ello que se empleó *Rhizopus sp* y además por la facilidad de su propagación en medio líquidos y sólidos; se aprecia la propagación de la biomasa de *Rhizopus sp*, se obtuvo un crecimiento uniforme en todos los lotes realizados (Figura 1).



Figura 1. Propagación de la biomasa de *Rhizopus sp* en medio caldo papa dextrosa.

Rhizopus sp es un hongo que segregá metabolismos como los ácidos, siendo los más relevantes el ácido oxálico y láctico; cuando se cultiva la biomasa esta se torna un medio ácido, lo cual puede influir fuertemente en la sorción de los metales pesados. En los procesos de biosorción diversos factores influyen en la capacidad del biosorbente para la remoción de metales pesados; entre los principales factores son: el pH inicial (McAfee *et al.* 2001), la temperatura y la concentración inicial de iones

metálicos, estos factores afectan altamente la capacidad de sorción del biosorbente (Aksu 2001).

A continuación, se aprecia la capacidad de biosorción de cadmio (II) por *Rhizopus sp*, en la cual se logra mayor biosorción a pH 5 con un valor final de 4,37 mg.g, se evidencia mayor capacidad de sorción respecto a pH 3 y pH 4. Teniendo el pH óptimo, los ensayos del factor temperatura se realizaron a pH 5 (Figura 2).

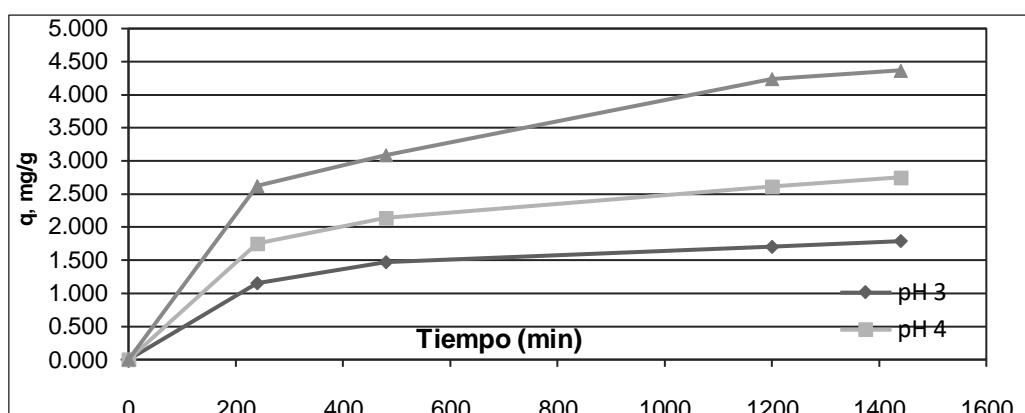


Figura 2. Capacidad de biosorción de cadmio (II) por *Rhizopus sp* a distintos valores de pH.

La biomasa de *Rhizopus sp* trabajando a pH 3 removió el cadmio (II) en 28,65 %, a pH 4 en 44,04 %, y a pH 5 en 69,81 %. Tras el análisis estadístico a tiempo final de ensayo se obtiene que el nivel de significancia es menor a 0,05, por lo que se establece que existe diferencia estadística entre los porcentajes de remoción para cadmio (II) trabajando a pH 3, pH 4 y pH 5 por parte de la biomasa de *Rhizopus sp*; por los resultados obtenidos se determina que el pH 5 es el más adecuado para la remoción de cadmio (II) empleando la biomasa de *Rhizopus sp*; por su parte Luo *et al.* (2010) determinaron

que la mayor eficiencia de biosorción de cadmio empleando *Rhizopus cohnii* se dio a un pH de 4,5; esto nos indica que la remoción de cadmio se ve favorecida en pH ácido.

La capacidad de biosorción de cadmio (II) por *Rhizopus sp* a distintas temperaturas, se evidencia que a 40 °C y 25 °C se logra valores similares, con un valor final de 3,9 mg.g y 4,1 mg.g respectivamente; pero se opta a trabajar por 25 °C porque no demanda gasto en energía (Figura 3).

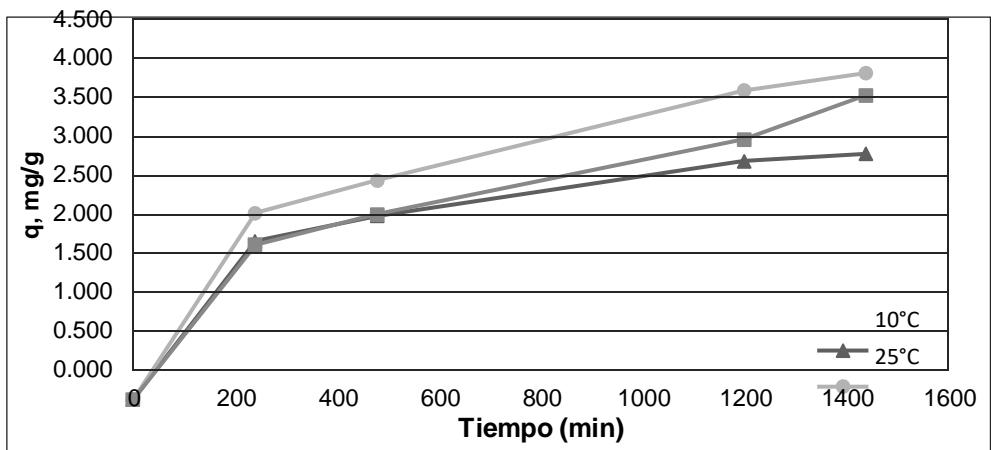


Figura 3. Capacidad de biosorción de cadmio (II) por *Rhizopus sp* a distintas temperaturas.

Otro de los factores de importancia es la temperatura, se obtiene que trabajando a temperatura de 10 °C remueve cadmio (II) en 50,32 %, a 25 °C en 67,35 % y a 40 °C en 63,21 %; no existe diferencia estadística entre los porcentajes de remoción entre las temperaturas de 25 °C y 40 °C por parte de *Rhizopus sp*. Pero trabajar a 25 °C resulta adecuado ya que en caso de escalar el sistema no requerirá mucha energía extra para poder llegar a esa temperatura, por su parte Gharieb *et al.* (2014) demuestran que la biosorción por parte de biomasa fungal es más

eficiente trabajando a 25 °C; por lo descrito se demuestra que los procesos de sorción de cadmio (II) es adecuado a 25 °C.

La capacidad de biosorción de cadmio a distintas concentraciones se obtiene los mayores valores trabajando a 90 ppm y a 50 ppm con 3,8 mg.g y 3,1 mg.g respectivamente, pero concentraciones altas de metales pesados generan toxicidad en el microorganismo, por lo que es preferible trabajar a concentraciones menores a 50 ppm (Figura 4).

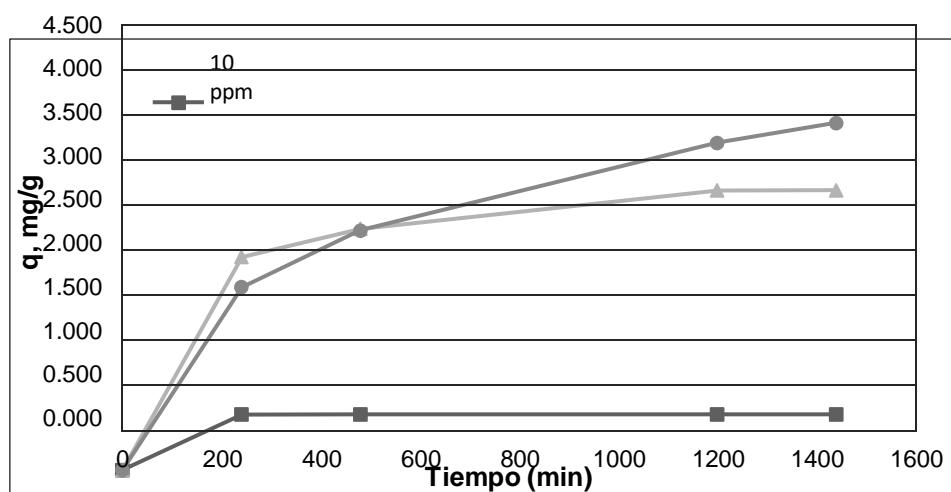


Figura 4. Capacidad de biosorción de cadmio (II) por *Rhizopus sp* a distintas concentraciones iniciales de metal.

Al trabajar a distintas concentraciones iniciales de metales, se obtuvo que a 10 ppm se remueve cadmio (II) en 99,90 %, a 50 ppm en 99,97 % y trabajando a 90 ppm se remueve cadmio (II) en 68,73 %; no existe diferencia estadística entre los porcentajes de remoción trabajando a las concentraciones de 10 ppm y 50 ppm por parte de la biomasa de *Rhizopus sp*. Por los resultados obtenidos se determina que al trabajar a concentraciones menores a 50 ppm se da una mayor remoción de cadmio (II) mediante el uso de la biomasa de *Rhizopus sp*.

La capacidad de sorción que tiene *Rhizopus sp*, es por su composición que tiene en su pared celular ya que principalmente es esta parte del hongo que entra en contacto directo con el metal; las paredes tienen en su composición polisacáridos que comprenden la mayor parte (80 – 90 %) y el contenido restante incluye polifosfatos, lípidos y proteínas (Shakya *et al.* 2016). Los grupos carboxilo, amino (Khan *et al.* 2013) e hidroxilo en la superficie biosorbente son los responsables de la biosorción de cadmio (Luo *et al.* 2010) y el mecanismo de biosorción podrían ser una combinación de intercambio iónico y complejación con los grupos funcionales presentes en la pared celular

fúngica (Gharieb *et al.* 2014) y además las enzimas extracelulares fúngicas, juegan un papel importante en la biorremediación (Chaurasia *et al.* 2019), por estas características *Rhizopus sp* es un buen biosorbente.

Modelo de primer orden

A continuación, muestran que a pH 5 la cantidad de sustancia adsorbida de cadmio (II), es mayor en comparación con los que se obtiene trabajando a pH 3 y pH 4. En cuanto a la temperatura muestran que a la temperatura de 25 °C la cantidad de sustancia adsorbida para cadmio (II) es mayor en comparación con los que se obtiene trabajando a 10 °C y 40 °C, aumentando la temperatura no se ve favorecida la adsorción como se aprecia en los resultados obtenidos a 40 °C. En cuanto a la concentración inicial del metal muestran que a 90 ppm la cantidad de sustancia adsorbida para cadmio (II) es mayor en comparación con los que se obtiene trabajando a 10 ppm y 50 ppm. Los coeficientes R calculados en el modelo matemático de primer orden, muestran que los datos experimentales se ajustan a los calculados en el modelo ya que presentan un valor cercano a 1 (Tabla 1).

Tabla 1. Resultados del proceso de sorción de cadmio (II) en biomasa de *Rhizopus sp*, aplicando el modelo matemático de primer orden para diferentes tratamientos.

Factor	Unidad	Valor	R	q₋₁ (mg/g)	k₋₁ (min⁻¹)
pH	Valor	3	0,9406	1,5380	0,1000
		4	0,9959	2,6729	0,0040
		5	0,9922	4,3063	0,0033
Temperatura	°C	10	0,9297	2,6329	0,1000
		25	0,9908	4,1488	0,0030
		40	0,8627	2,9707	0,1000
Concentración inicial de metal	mg/L	10	0,9999	0,6244	0,0334
		50	0,9706	2,8323	0,1000
		90	0,8787	3,0611	0,1000

Modelo de segundo orden

Se aprecia el pH 5 la cantidad de sustancia adsorbida es mayor en comparación con pH 3 y pH 4, dándose la mayor remoción de cadmio (II) a pH 5; en cuanto a las constantes de adsorción de segundo orden, a pH 5 se obtiene un valor menor en comparación con pH 3 y pH 4, lo que indica que trabajando un pH 5 la sorción es más rápida. En cuanto a la temperatura, a 25 °C la constante es mayor en comparación con las temperaturas de 10 °C y 40 °C, lo que nos indica que trabajando a 25 °C, se remueve mayor cantidad de cadmio (II); las constantes de adsorción de segundo orden

muestran que a 40 °C presentan un valor menor en comparación con 10 °C y 25 °C, lo que indica que trabajando a 40 °C la sorción es más rápida. En cuanto a las concentraciones iniciales del metal, la cantidad de remoción incrementa a medida que se aumenta la concentración, se aprecia que a concentración 90 ppm la cantidad de sustancia adsorbida son mayores en comparación con 10 ppm y 50 ppm y los coeficientes R calculados en el modelo matemático de segundo orden, muestran que los datos experimentales se ajustan a los calculados en el modelo por presentar un valor cercano a 1 (Tabla 2).

Tabla 2. Resultados del proceso de sorción de cadmio (II) en biomasa de *Rhizopus sp*, aplicando el modelo matemático de segundo orden para diferentes tratamientos.

Factor	Unidad	Valor	R	q ₂ (mg/g)	β ₂	k ₂ (min ⁻¹)
pH	Valor	3	0,9998	1,9872	1,0035	0,0059
		4	0,9992	3,0585	1,0010	0,0053
		5	0,9966	5,0900	1,0019	0,0039
Temperatura	°C	10	0,9975	3,5252	0,9964	0,0050
		25	0,9956	4,9956	1,0102	0,0033
		40	0,9906	4,7533	1,0216	0,0026
Concentración inicial de metal	mg/L	10	0,9997	0,6244	1,0145	9,9349
		50	0,9995	3,3499	1,0064	0,0098
		90	0,9990	4,7126	1,0065	0,0030

De acuerdo a las Tablas 1 y 2 hay mayor afinidad al modelo de segundo orden. En el presente estudio se logra una máxima remoción de cadmio (II) en 69,81 %; un estudio similar realizado por Naeimi *et al.* (2018) reportan que *Rhizopus oryzae* logra una remoción de cadmio (II) en 94,55 %, a pH y temperatura de 6 y 25 °C respectivamente a partir de una concentración inicial de 10 mg.L; con esto se demuestra que la biomasa de *Rhizopus sp* remueve eficientemente el metal cadmio.

Trabajar con hongos como *Rhizopus sp* tiene distintas ventajas tales como el crecimiento rápido, no requiere de un medio altamente nutritivo, sobreviven en diferentes hábitats, crecen en diferentes condiciones climáticas (Singh *et al.* 2020). La biomasa presenta versatilidad, se puede disponer de distintas maneras el biosorbente, por ejemplo usar biomasa seca de *Rhizopus oryzae* (Mcafee *et al.*

2001). En general la biomasa fúngica remueve eficientemente cadmio (II) en solución acuosa.

CONCLUSIONES

Cultivar *Rhizopus sp* en el medio de cultivo caldo papa dextrosa resulta ser adecuado para generar biomasa; los parámetros óptimos para la remoción de cadmio (II) empleando la biomasa de *Rhizopus sp* corresponde a: pH 5, temperatura de 25 °C y concentración inicial de metal de 50 ppm, lográndose remover 69,81 %, 67,35 % y 99,97 % respectivamente. Emplear biomasa de *Rhizopus sp* como biosorbente representa una alternativa eficiente, renovable y ecológica para la descontaminación del metal cadmio (II).

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores de iniciales (HAA) (MREVV), no tienen conflictos de ninguna índole.

REFERENCIAS

- Acosta I., Moctezuma-Zárate M. de G., Cárdenas J. F., Gutiérrez C. 2007. Bioadsorción de cadmio (II) en solución acuosa por biomasas fúngicas. *Información Tecnológica*, 18(1), 9–14. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642007000100003>
- Aksu Z. 2001. Equilibrium and kinetic modelling of cadmium(II) biosorption by *C. vulgaris* in a batch system: effect of temperature. *Separation and Purification Technology*, 21(3), 285–294. [https://doi.org/10.1016/S1383-5866\(00\)00212-4](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(00)00212-4)
- Beltrán-Pineda M. E., Gómez-Rodríguez A. M. 2016. Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg), mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: una revisión. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 12(2), 172–197. <https://doi.org/10.18359/rfcb.2027>
- Chaurasia P. K., Bharati S. L., Mani A. 2019. Significances of fungi in bioremediation of contaminated soil. In *New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering* (pp. 281–294). <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-64191-5.00020-1>
- Espinoza-Sánchez M. A., Arévalo-Niño K., Quintero-Zapata I., Castro-González I., Almaguer-Cantú V. 2019. Cr(VI) adsorption from aqueous solution by fungal bioremediation based using *Rhizopus sp.* *Journal of Environmental Management*, 251(February), 109595. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109595>
- Fernández P. M., Viñarta S. C., Bernal A. R., Cruz E. L., Figueroa L. I. C. 2018. Bioremediation strategies for chromium removal: Current research, scale-up approach and future perspectives. *Chemosphere*, 208, 139–148. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.166>
- Gharieb M. M., Al-Fakih A. A., Ali M. I. 2014. Biosorption of pb(II) and co(II) ions from aqueous solutions using pretreated *Rhizopus oryzae* (Bread Mold). *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(4), 2435–2446. <https://doi.org/10.1007/s13369-013-0784-x>
- Khan S., Umer A. S. M., Rehman W. 2013. Biosorption of Lead by *Rhizopus stolonifer* Biomass : Role of Functional Groups. *Journal of Ecophysiology and Occupational Health*, 13(3/4), 21–28. <https://doi.org/10.18311/jeoh/2013/1715>
- Luo J.-M., Xiao X., Luo S.-L. 2010. Biosorption of cadmium (II) from aqueous solutions by industrial fungus *Rhizopus cohnii*. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20(6), 1104–1111. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(09\)60264-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(09)60264-8)
- Mcafee B. J., Gould W. D., Nadeau J. C., Da Costa A. C. A. 2001. Biosorption of metal ions using chitosan, chitin, and biomass of *Rhizopus oryzae*. *Separation Science and Technology*, 36(14),

3207–3222. <https://doi.org/10.1081/SS-100107768>

Mishra A., Bhattacharya A., Mishra N. 2019. Mycorrhizal symbiosis: an effective tool for metal bioremediation. In *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering* (pp. 113–128). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818258-1.00007-8>

Mohammadian E., Babai Ahari A., Arzanlou M., Oustan S., Khazaei S. H. 2017. Tolerance to heavy metals in filamentous fungi isolated from contaminated mining soils in the Zanjan Province, Iran. *Chemosphere*, 185, 290–296. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.022>

Naeimi B., Foroutan R., Ahmadi B., Sadeghzadeh F., Ramavandi B. 2018. Pb(II) and Cd(II) removal from aqueous solution, shipyard wastewater, and landfill leachate by modified rhizopus oryzae biomass. *Materials Research Express*, 5(4), 045501. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aab81b>.

Oladipo O. G., Awotoye O. O., Olayinka A., Bezuidenhout C. C., Maboeta M. S. 2018. Heavy metal tolerance traits of filamentous fungi isolated from gold and gemstone mining sites. *Brazilian Journal of Microbiology*, 49(1), 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2017.06.003>

Pérez Bou L., Salgado Bernal I., Larrea Duarte C., Martínez Sardiñas A., Cruz Arias M. E., Carballo Valdés M. E. 2018. Biosorción microbiana de metales pesados : características del proceso. *Revista Cubana de Ciencias Biológicas*, 6(1), 1–12. Recuperado de <http://www.rccb.uh.cu/index.php/RCCB/article/view/216>

Pérez P. E., Azcona M. I. 2012. Los efectos del cadmio en la salud. *Revista de Especialidades Médico-Quirúrgicas*, 17(3), 199–205. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/473/47324564010.pdf>

Ramirez A. 2002. Toxicología del cadmio. Conceptos actuales para evaluar exposición ambiental u ocupacional con indicadores biológicos. *Anales de La Facultad de Medicina*, 63(1), 51–64. <https://doi.org/ISSN: 1025-5583>

Sanchez J. G., Marrugo J. L., Urango I. D. 2014. Biosorción simultanea de plomo y cadmio en solución acuosa por biomasa de hongos Penicillium sp. *Temas Agrarios*, 19(1), 63–72. <https://doi.org/https://doi.org/10.21897/rta.v19i1.725>

Shakya M., Sharma P., Meryem S. S., Mahmood Q., Kumar A. 2016. Heavy Metal Removal from Industrial Wastewater Using Fungi: Uptake Mechanism and Biochemical Aspects. *Journal of Environmental Engineering*, 142(9). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000983](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000983)

Singh P., Borthakur A., Singh V. K., Singh R., Madhav S., Ahamad A., Mishra P. K. 2020. Bioremediation: a sustainable approach for management of environmental contaminants. In *Abatement of Environmental Pollutants* (pp.1-23). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0->

[12-818095-2.00001-1](#)

Singh R. K., Tripathi R., Ranjan A., Srivastava A. K. 2020. Fungi as potential candidates for bioremediation. In *Abatement of Environmental Pollutants* (pp. 177–191).
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818095-2.00009-6>

Vala A. K., Sutariya V. 2012. Trivalent arsenic tolerance and accumulation in two facultative marine fungi. *Jundishapur Journal of Microbiology*, 5(4), 542–545. <https://doi.org/10.5812/jjm.3383>