

Effect of initial concentration of Cr (VI) and *Rhizopus* sp. on the physicochemical characteristics of tannery wastewater in Trujillo, Peru

Nara de los Milagros Sandoval-Pérez¹ ; Roberto Chuquilín-Goicochea¹ 

¹Universidad Privada del Norte, Perú, N00173563@upn.pe, roberto.chuquilin@upn.edu.pe

Abstract— Worldwide, industries use different toxic substances containing heavy metals, which end up in waters, representing a danger to public health and the environment; due to this, the present research aimed to evaluate the bioremediation capacity of the fungal species *Rhizopus* sp. from wastewater from a tannery in the city of Trujillo, Peru. A 3^k factorial design was applied, with two factors (k=2): initial concentration of Cr⁺⁶ and number of *Rhizopus* sp. roasts. As dependent variables, the percentages of removal of Cr⁺⁶, BOD₅, electrical conductivity (EC) and turbidity (NTU), as well as the final pH of the solution, were measured. It was found that the two factors have a significant effect on the percentage removal of Cr⁺⁶, BOD₅, electrical conductivity, and turbidity, as well as on the final pH. An initial concentration of Cr⁺⁶ 0.05 ppm and 3 roasts of *Rhizopus* sp. are recommended to optimize bioremediation of wastewater from tanneries contaminated with Cr⁺⁶.

Keywords—Metal tolerance, chromium uptake, toxicity, wastewater, Cr (VI).

Efecto de la concentración inicial de Cr (VI) y de *Rhizopus* sp. en las características fisicoquímicas de aguas residuales de curtiembre en Trujillo, Perú

Nara de los Milagros Sandoval-Pérez¹; Roberto Chuquilín-Goicochea¹
¹Universidad Privada del Norte, Perú, N00173563@upn.pe, roberto.chuquilin@upn.edu.pe

Resumen— A nivel mundial, las industrias utilizan diferentes sustancias tóxicas que contienen metales pesados, que terminan en las aguas, representando un peligro para la salud pública y el medio ambiente; debido a esto, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar la capacidad de biorremediación de la especie fúngica *Rhizopus* sp. de aguas residuales de una curtiembre en la ciudad de Trujillo, Perú. Se aplicó un diseño factorial 3^k, con dos factores (k=2): concentración inicial de Cr⁺⁶ y número de asadas de *Rhizopus* sp. Como variables dependientes se midieron los porcentajes de remoción de Cr⁺⁶, DBO₅, conductividad eléctrica (CE) y turbidez (NTU), así como el pH final de la solución. Se encontró que, los dos factores tienen efecto significativo sobre el porcentaje remoción de Cr⁺⁶, DBO₅, conductividad eléctrica y turbidez, así como en el pH final. Se recomienda una concentración inicial de Cr⁺⁶ de 0.05 ppm y 3 asadas de *Rhizopus* sp. para optimizar la biorremediación de aguas residuales provenientes de curtiembres contaminadas con Cr⁺⁶.

Palabras clave— Tolerancia a los metales, captación de cromo, toxicidad, agua residual, Cr (VI).

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación por Cr (VI), un metal tóxico, es un grave problema ambiental de preocupación mundial. En países en desarrollo, como Perú, los efluentes que contienen metales tóxicos se descargan continuamente desde industrias de pequeña y gran escala, como el curtido de cuero, llegando directa o indirectamente a los cuerpos de agua naturales, lo que representa una gran amenaza para el medio ambiente y la salud pública [1]. La ciudad de Trujillo, Perú, ocupa el tercer lugar a nivel nacional en el sector de las curtiembres, antecedida por Lima y Arequipa [2], y los efluentes de esta industria representan una gran preocupación.

Los tratamientos disponibles para remover el Cr (VI) son precipitación, intercambio iónico, ósmosis inversa y evaporación; sin embargo, presentan un bajo rendimiento de remoción [3], [4]. Por ello, las industrias han recurrido a buscar alternativas de tratamiento para el Cr (VI) más eficientes, económicas y ecológicas.

El potencial y la versatilidad de los microorganismos como biosorbente en aplicaciones biotecnológicas modernas son prometedores en comparación con las técnicas anteriormente mencionadas para la remoción de Cr (VI) [5].

Por otro lado, teniendo en cuenta la capacidad que poseen algunas especies fúngicas para reducir la concentración de contaminantes metálicos tóxicos como plomo, cobre, arsénico y hierro, con una tolerancia a estos metales pesados que varía de 400 – 1000 mg.kg⁻¹, siendo las especies con mayor índice de absorción el *Fomitopsis meliae*, *Trichoderma ghanense* y

Rhizopus sp. [6]. Así mismo, otras especies fúngicas como *Aspergillus niger* [7], *Fusarium solani* [8], *Trichoderma viride* [9], entre otros hongos, mostraron porcentajes de absorción de Cr (VI) muy interesantes para ser usados en biorremediación.

Otras especies de hongos endófitos *Chromosporium*, *Fusarium* y *Gonatotryps*, fueron capaces de reducir la bioacumulación de Cd a una concentración de 100 a 200 mg.kg⁻¹ en las raíces de plantas de *S. variegata* [10].

Los mecanismos de biorremediación de metales pesados son la bioacumulación y la biosorción. La bioacumulación se basa en el metabolismo en el que los iones metálicos se acumulan a través de biosorbentes intercelulares [11]. La biosorción es un proceso fisicoquímico en el cual la biomasa recoge gradualmente los metales pesados al adherirse a la estructura celular [12]. Las técnicas de bioacumulación y biosorción son los enfoques emergentes en el tratamiento de aguas residuales que son rentables y respetuosos con el medio ambiente [13].

Este estudio ha enfocado toda su atención en la especie *Rhizopus* sp., la cual, por su fácil obtención, acceso y crecimiento en una vasta variedad de vegetales y levaduras [14]; es importante considerarla para un proceso remediador del contaminante en cuestión.

Diversas investigaciones se enfocan desde diferentes ángulos donde se demuestra el potencial de *Rhizopus* sp. en procesos de absorción de metales pesados, como el Cr, usando un consorcio de dos variedades, *Paecilomyces lilacinus* y *Fusarium equiseti* después de 120 horas de tratamiento de agua residual [15].

Ante el estrés originado por el exceso de metales pesados como el cromo, diversos microorganismos han optimizado vías de resiliencia —tales como la biosorción, sistemas de eflujo y biotransformación enzimática— que aseguran su supervivencia [16]. La integración de estas propiedades biológicas fundamenta la biorremediación, una estrategia sustentable que aventaja a los métodos fisicoquímicos convencionales al frenar la biomagnificación en redes tróficas acuáticas y preservar la integridad de la biodiversidad [17].

Por lo anteriormente expuesto, el objetivo de este trabajo de tesis es evaluar el efecto de la concentración inicial de Cr (VI) y de *Rhizopus* sp. en la biorremoción de Cr (VI) en aguas residuales provenientes de una curtiembre, en la ciudad de Trujillo, Perú.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Muestra y especie

Se trabajó con biomasa de *Rhizopus sp.* húmeda con un peso aproximado de 2 g y 0,5 L de agua residual contaminada con Cr (VI) proveniente de una curtiembre de Trujillo, Perú.

La especie de hongo *Rhizopus sp.* se obtuvo a partir de la producción de esporas adheridas a la superficie de arroz blanco cocido. Igualmente se hizo crecer la especie en condiciones húmedas y cálidas (20°C – 30°C, 80% a 90% de humedad relativa) y se incubó por 9 días en oscuridad. Luego se procedió a cultivar la biomasa obtenida de *Rhizopus sp.* en medio de cultivo Agar Sabouraud Dextrosa (SDA), preparado con 8,15 g de medio en 125 mL de agua destilada, en una botella. Se procedió a esterilizar en el calor húmedo en una autoclave (FV3035, Famarel, Perú) a 121°C y 15 psi por 15 minutos. Se procedió a retirar, enfriar y depositar el contenido de la botella en 5 placas Petri de 25 mL y se incubó por 3 días a 35 °C en una estufa (Mettler, IN75 y Alemania). Posteriormente se realizó el conteo de colonias (UFC) con un equipo contador de colonias (Reichert, modelo Quebec Darkfield). En promedio hubo un conteo de 32.6 UFC (Fig. 1). La caracterización de la biomasa en seco con azul de metileno a 100X y en fresco con agua destilada a 40X se llevó a cabo en un microscopio binocular (Primo Star, Zeiss, Alemania) [18] (Fig. 2).

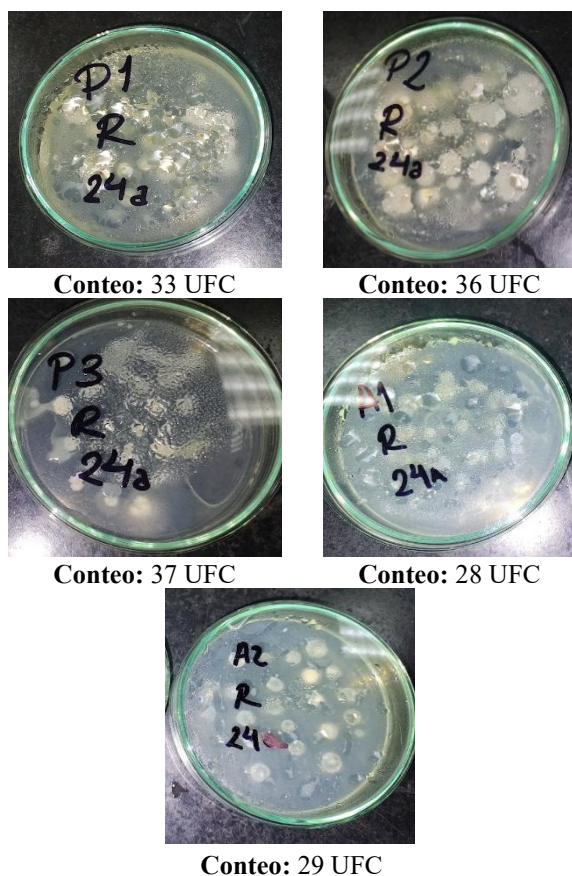


Fig. 1. Conteo de *Rhizopus sp.*

Biosorción de Cromo (VI)

Se prepararon 27 unidades experimentales para evaluar la capacidad de biosorción de biomasa fúngica de *Rhizopus sp.* Se establecieron 9 tratamientos (T1 a T9) y 3 repeticiones mediante un diseño factorial 3^k. Se tomaron 2 variables independientes, en primer lugar, el nivel de cromo Cr (VI) con 3 concentraciones (0.05, 0.1 y 0.15 mg/L, respectivamente), en un volumen de 250 mL de agua destilada. Se incluyeron grupos control (T°) que contenían únicamente la solución de Cr (VI) sin biomasa. En segundo lugar, La biomasa fúngica fue inoculada utilizando 3 niveles: 1, 2 y 3 asas de siembra (muestras M1, M2 y M3) provenientes de cultivos puros en placas Petri.

El proceso de agitación e incubación se llevó a cabo en una incubadora con agitación orbital (Lab Companion, modelo IST-3075, serie W095222), bajo condiciones controladas de 25 °C, una velocidad de agitación de 100 rpm y un tiempo de residencia de 4 horas. Finalizado este periodo, la concentración residual de cromo en cada muestra fue cuantificada mediante espectrometría de absorción atómica tipo llama (Agilent Technologies, modelo 240FS AA, serie MY1518004).

Medición de Cr (VI)

Las muestras se hornearon en una estufa (Mettler, IN75, Alemania) a 75 °C hasta peso constante, se trituraron y se tamizaron con malla 100. Se realizó la digestión de muestras con ácidos fluorhídrico y nítrico. Se utilizó espectrometría de absorción atómica de llama (240FS AA, serie MY1518004, Agilent Technologies, USA) para determinar el contenido total de Cr⁺⁶ [19].

Medición de DBO₅

La DBO₅ de la solución experimental se determinó con el método estándar, en un sistema para análisis de la demanda bioquímica de oxígeno (modelo BOD TRACK II, serie 1808C008294, HACH, USA) [20].

Medición de conductividad eléctrica

Con un equipo multiparámetro portátil (modelo HQ40D, serie 130800092366, HACH, USA), se midió la conductividad (μS/cm) de la solución experimental [21].

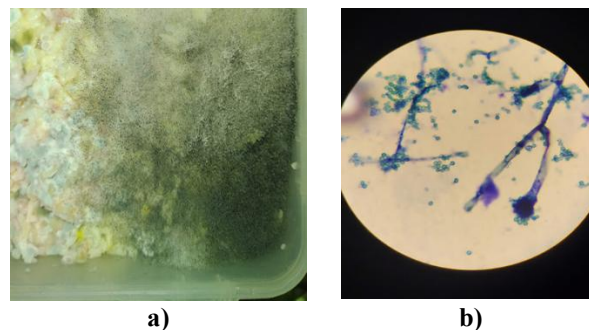


Fig. 2. Identificación de cultivo a) Siembra de *Rhizopus sp.* en arroz, b) Identificación de *Rhizopus sp.* con azul de metileno

Medición de turbidez

La turbidez mediante el método nefelométrico en un tubímetro digital marca HACH, modelo 2100Q, serie 18120C072417 [22].

Medición de pH

Se utilizó un equipo multiparámetro portátil (HACH modelo HQ40D, USA) a 25 °C usando un método directo [23].

Análisis estadístico

Se realizó el análisis de varianza del diseño factorial completo 3^k para analizar el efecto de los factores principales y su interacción. Se aplicó una prueba de Tukey con 0,05 de significancia para observar diferencias entre los tratamientos. Así mismo se utilizó un gráfico optimizador de respuesta múltiple. Para ello se aplicó el software Minitab 19.

TABLA I
DISEÑO EXPERIMENTAL

Tratamiento	Concentración inicial de Cr (mg/L)	Asadas	Variables dependientes
1	0,05	1	Y_1
2	0,10	1	Y_2
3	0,15	1	Y_3
4	0,05	2	Y_4
5	0,10	2	Y_5
6	0,15	2	Y_6
7	0,05	3	Y_7
8	0,10	3	Y_8
9	0,15	3	Y_9

III. RESULTADOS

Las muestras de agua residual de curtiembre mostraron un nivel de contaminación elevado. Se encontró una concentración de Cr^{+6} de 3361,75 ppm, DBO₅ de 290 mg O₂/L, pH de 3,45, turbidez de 23 NTU y conductividad eléctrica (CE) de 64,6 μ S/cm.

En la Tabla II se observó que, existe efecto significativo de la concentración inicial de Cr (VI) (A), el número de asadas (B) y la interacción de ambos factores (A x B) en el porcentaje de remoción de Cr (VI) de las aguas residuales.

Análisis de varianza

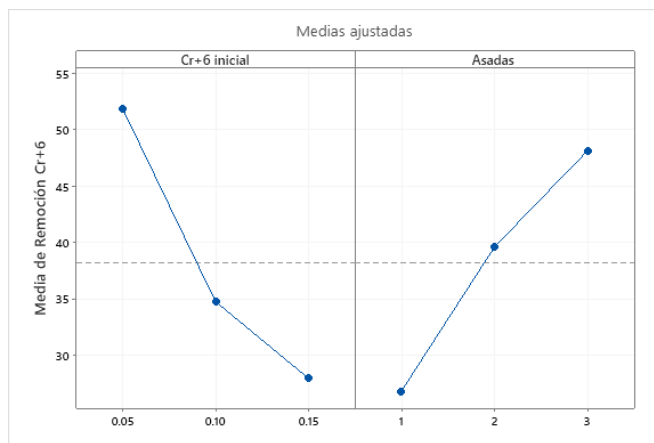
TABLA II
ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL DISEÑO FACTORIAL

Fuente	Cr^{+6}	DBO ₅	C.E.	NTU	pH
Factor A	0,000*	0,000*	0,000*	0,003*	0,000*
Factor B	0,000*	0,000*	0,000*	0,007*	0,000*
A x B	0,000*	0,467	0,000*	0,167	0,000*
R ² (%)	99,99	85,07	99,99	66,86	99,80

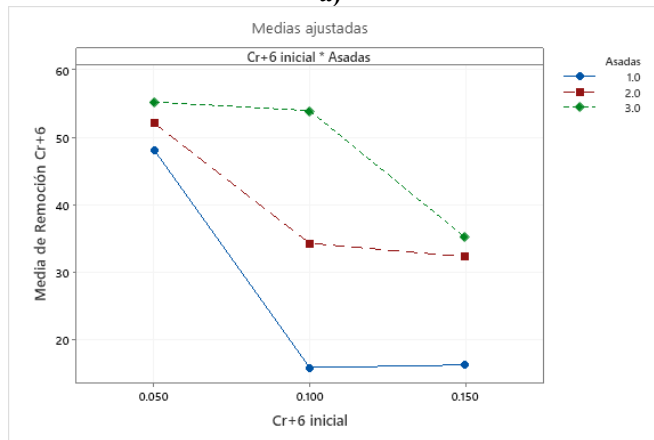
*Significativo a $\alpha = 0,05$

La Fig. 3a muestra el comportamiento de las variables independientes; como se pudo observar, a mayor concentración de Cr (VI) inicial, menor fue la remoción de Cr (VI) al final del proceso de biorremediación. Un mayor número de asadas

estuvo relacionado a una mayor cantidad de biomasa fúngica y afecta directamente a los procesos de adsorción y remediación [24]. La Fig. 3b muestra la interacción de las variables, y se pudo observar una mejor sinergia con una asada y 0.100 ppm de Cr^{+6} inicial.



a)



b)

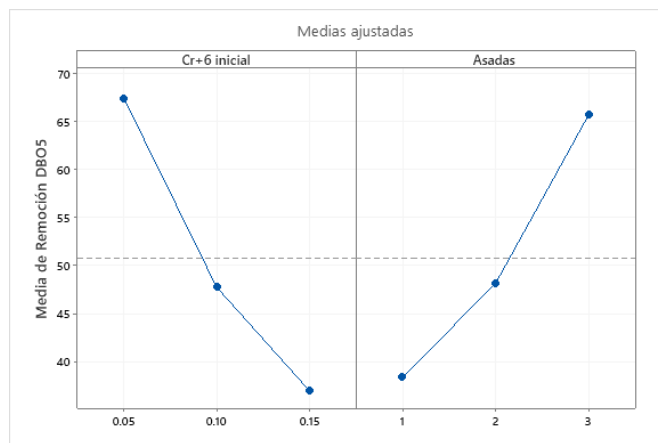
Fig. 3. Remoción de Cr^{+6} . a) Gráfico de efectos principales, b) Gráfico de interacción.

El *Rhizopus sp.* ostentó un mecanismo de adsorción basado en sus grupos funcionales en su pared celular y los procesos que se dan en su pared, tales como el intercambio iónico, que le ayudan a obtener los nutrientes; es así como logra adsorber diferentes metales, como en este caso, el Cr^{+6} [6].

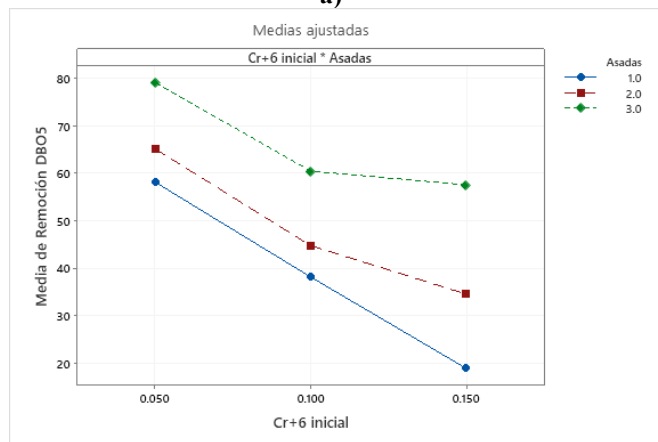
Con respecto a la remoción de DBO₅, en la Tabla II se evidencia que existe un efecto significativo de la concentración inicial de Cr (VI) (A) y el número de asadas (B) en el porcentaje de remoción de DBO₅; sin embargo, no existe influencia de la interacción de ambos factores (A x B), lo que significa que estos efectos pueden darse de manera individual. La Fig. 4a señaló que la concentración inicial de Cr^{+6} es inversamente proporcional a la remoción de DBO₅, pero el número de asadas es directamente proporcional a la remoción de DBO₅.

Una variedad de contaminantes se libera durante el proceso de curtido para producir cuero en costra a partir de pieles

crudas, lo que aumenta sustancialmente la DBO_5 , la DQO y los sólidos totales [25]. El agua de curtiembre normalmente posee altos niveles de N_2 orgánico y bajos niveles de P, junto con un nivel de sólidos totales disueltos de aproximadamente 37 g/L [26].



a)



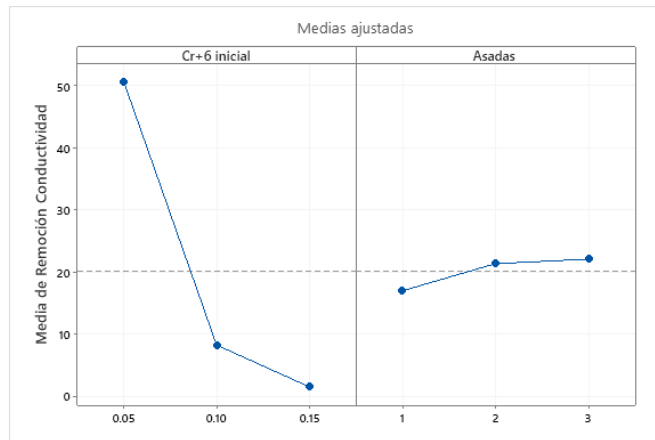
b)

Fig. 4. Remoción de DBO_5 . Remoción de Cr^{+6} . a) Gráfico de efectos principales, b) Gráfico de interacción.

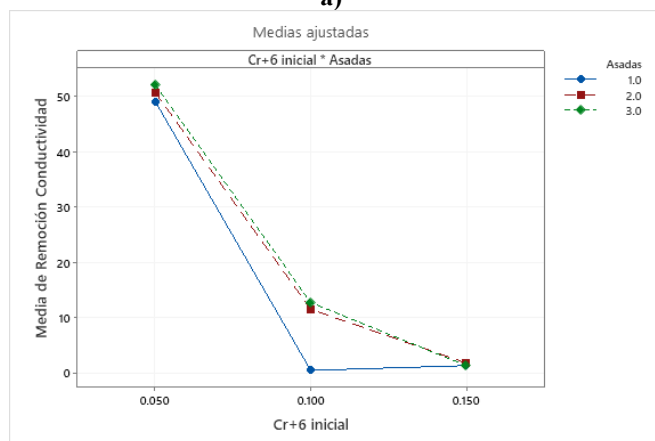
Por otro lado, en la Tabla II se observó que existe un efecto significativo de la concentración inicial de Cr^{+6} (A), el número de asadas (B), y la interacción entre ambas A x B en el porcentaje de remoción de conductividad. La Fig. 5 efectos principales (a) e interacción (b) captura muestra cómo es que a mayor concentración inicial de Cr^{+6} menor es la reducción de la conductividad, y de igual modo, a mayor cantidad de asadas mayor es la reducción de la conductividad, pero en una ratio menor que en la remoción del Cr^{+6} .

La conductividad eléctrica de la muestra original fue de $64,6 \mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$, muy superior a los valores hallados en la India ($18,56 \mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$) [27], Italia ($2,25 \mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$) [28] y México ($50 \mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$) [29]. La alta conductividad eléctrica se debe a la presencia de sustancias inorgánicas y sales [30]. Teniendo en cuenta las características iniciales de las aguas residuales, se ha observado en otro trabajo que el pH y la conductividad eléctrica

proporcionan la mayor eficiencia de eliminación sin la necesidad de agregar ningún otro producto químico [31]. Por otro lado, otros trabajos afirman que dosificaciones más altas de biomasa fúngica afectan positivamente en la absorción de Cr^{+6} y que este, junto a los parámetros fisicoquímicos tomados en cuenta, ayuda a determinar resultados más claros y precisos [32].



a)

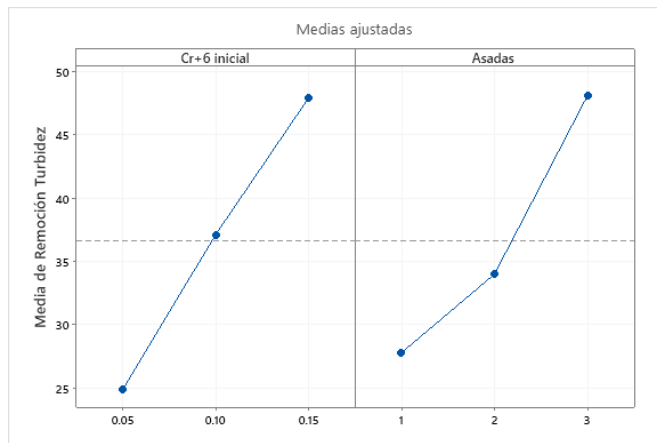


b)

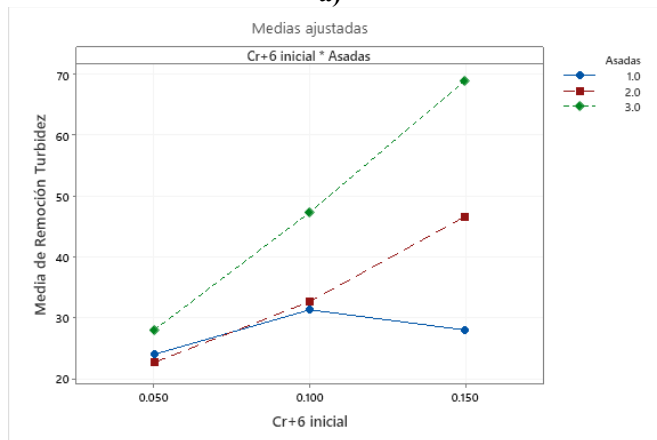
Fig. 5. Remoción de Conductividad eléctrica. a) Gráfico de efectos principales, b) Gráfico de interacción.

En añadidura, en la Tabla II se halló un efecto significativo de la concentración inicial de Cr^{+6} y el número de asadas en el porcentaje de remoción de turbidez. No obstante, en la interacción de ambos factores no se evidenció efecto significativo. Se pudo observar en la Fig. 6a, que la concentración inicial de Cr (VI) y el número de asadas, tienen una relación directa y proporcional a la remoción de turbidez.

Así mismo, con respecto al parámetro del pH, en la Tabla II se observó que existe un efecto significativo en la concentración inicial de Cr^{+6} y la cantidad de asadas utilizadas por tratamiento, así como también se demuestra el efecto significativo de la interacción entre ambos factores en los resultados del pH final.



a)



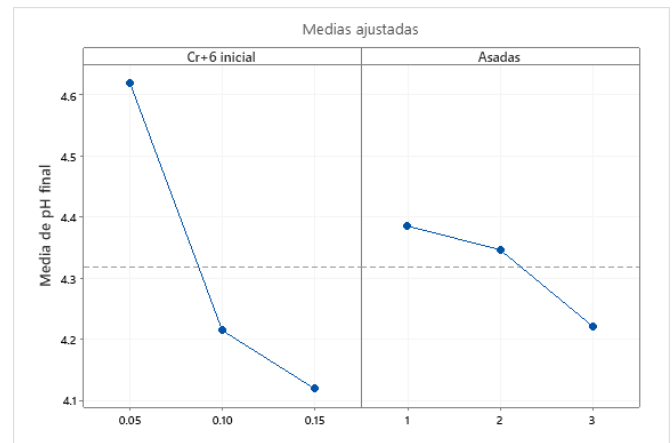
b)

Fig. 6. Remoción de turbidez. a) Gráfico de efectos principales, b) Gráfico de interacción.

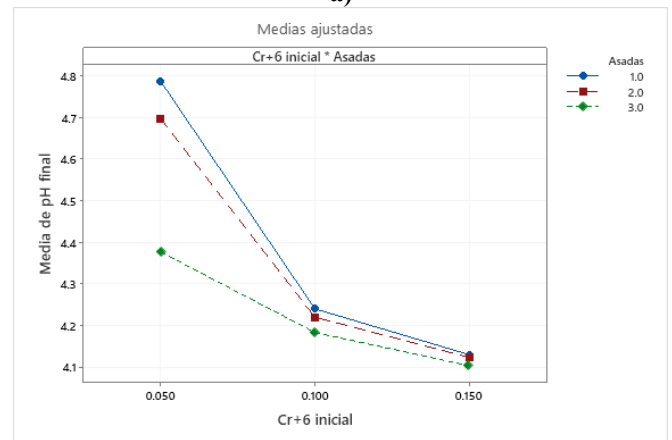
La Fig. 7 reflejó cómo una mayor concentración inicial de Cr^{+6} y un mayor número de asadas reducen el pH final del agua tratada. El Cr^{+6} coexiste en varias formas estables: $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$, HCr_2O_7^- , HCrO_4^- y CrO_4^{2-} , y la abundancia relativa de cada una de las especies depende de la concentración de Cr y del pH (Pájaro y Díaz, 2012), por lo que se evidenció que la variación del pH estuvo muy relacionada con el nivel de remoción logrado de Cr^{+6} [33].

TABLA III
OPTIMIZACIÓN MULTIRRESPUESTA

Cr ⁺⁶ inicial		Asadas	Deseabilidad global
A: 0.05 ppm		B: 3	0,7618
Variable respuesta	Valor predicho	Deseabilidad Individual	Objetivo
Cr ⁺⁶	55,23	0,998	Maximizar
DBO ₅	79,07	0,986	
CE	52,10	0,996	
Turbidez	28,00	0,343	
pH final	-	-	No optimizar



a)



b)

Fig. 7. pH final. a) Gráfico de efecto principales, b) Gráfico de interacción.

En este estudio, se utilizó una función de deseabilidad unilateral con las respuestas a maximizar. La Tabla III enumera los parámetros de optimización para las respuestas múltiples remoción de Cr^{+6} , DBO_5 , CE (conductividad eléctrica) y turbidez, y las soluciones de optimización y las respuestas predichas junto con sus valores de deseabilidad.

Dentro de los factores críticos de la remoción de Cr (VI) usando este hongo, la interacción entre el microorganismo y el transportador define la eficiencia de la remoción. El proceso se basa en la adsorción de metales en la pared celular, un fenómeno gobernado por el equilibrio cinético que ocurre de manera casi instantánea [34], [35]. Sin embargo, para que la bioacumulación sea efectiva, las cepas seleccionadas deben demostrar no solo resistencia a múltiples metales, sino también una eficiencia metabólica superior para transformar los contaminantes en especies de menor toxicidad, facilitando así la retención del metal sin comprometer la viabilidad celular [36].

IV. CONCLUSIONES

Se puede concluir que el proceso de biorremediación con la especie de hongo *Rhizopus sp.* es capaz de remover no solo el Cr^{+6} de aguas residuales provenientes de una curtiembre, sino también otros parámetros fisicoquímicos, que pueden indicar el nivel de contaminación del agua. Además, se logró identificar que 0,05 ppm de Cr^{+6} inicial y 3 asadas pueden maximizar la remoción del Cr^{+6} y los parámetros fisicoquímicos del agua de curtiembre.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen el patrocinio de la Universidad Privada del Norte por hacer posible esta publicación.

REFERENCIAS

- [1] D. Sivakumar, "Biosorption of hexavalent chromium in a tannery industry wastewater using fungi species," *Global Journal of Environmental Science and Management*, vol. 2, no. 2, pp. 105–124, 2016.
- [2] P. R. Villegas Jiménez, "Aplicación De La Teoría De Restricciones En El Proceso Productivo Para Aumentar La Productividad De La Empresa Curtiembre Piel Trujillo SAC-2016," Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo, 2017. Accessed: Feb. 01, 2025. [Online]. Available: https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/23860/villegas_jp.pdf?sequence=1
- [3] M. S. Samuel, M. E. A. Abigail, and C. Ramalingam, "Biosorption of Cr(VI) by *Ceratocystis paradoxa* MSR2 Using Isotherm Modelling, Kinetic Study and Optimization of Batch Parameters Using Response Surface Methodology," *PLoS One*, vol. 10, no. 3, p. e0118999, Mar. 2015, doi: 10.1371/journal.pone.0118999.
- [4] I. Castro-González, G. Rojas-Verde, I. Quintero-Zapata, and V. Almaguer-Cantú, "A Comparative Study on Removal Efficiency of Cr(VI) in Aqueous Solution by *Fusarium sp.* and *Myrothecium sp.*," *Water Air Soil Pollut.*, vol. 228, no. 8, p. 301, Aug. 2017, doi: 10.1007/s11270-017-3476-4.
- [5] A. Safitri, P. Mahardini, S. Prasetyawan, and A. Roosdiana, "Biosorption of Cr(VI) in Aqueous Solution using Microorganisms: Comparison of the Use of *Rhizopus oryzae*, *Bacillus firmus*, and *Trichoderma viride*," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 299, p. 012023, Jan. 2018, doi: 10.1088/1757-899X/299/1/012023.
- [6] O. G. Oladipo, O. O. Awotye, A. Olayinka, C. C. Bezuidenhout, and M. S. Maboeta, "Heavy metal tolerance traits of filamentous fungi isolated from gold and gemstone mining sites," *Brazilian Journal of Microbiology*, vol. 49, no. 1, pp. 29–37, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.bjm.2017.06.003.
- [7] D. Park, Y.-S. Yun, J. Hye Jo, and J. M. Park, "Mechanism of hexavalent chromium removal by dead fungal biomass of *Aspergillus niger*," *Water Res.*, vol. 39, no. 4, pp. 533–540, Feb. 2005, doi: 10.1016/j.watres.2004.11.002.
- [8] M. Sen, M. Ghosh Dastidar, and P. K. Roychoudhury, "Biological removal of Cr(VI) using *Fusarium solani* in batch and continuous modes of operation," *Enzyme Microb. Technol.*, vol. 41, no. 1–2, pp. 51–56, Jul. 2007, doi: 10.1016/j.enzmictec.2006.11.021.
- [9] N. R. Bishnoi, R. Kumar, and K. Bishnoi, "Biosorption of Cr (VI) with *Trichoderma viride* immobilized fungal biomass and cell free Ca-alginate beads," *Indian J. Exp. Biol.*, vol. 45, no. 7, pp. 657–64, Jul. 2007.
- [10] H. An *et al.*, "Characterization of cadmium-resistant endophytic fungi from *Salix variegata* Franch. in Three Gorges Reservoir Region, China," *Microbiol. Res.*, vol. 176, pp. 29–37, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.micres.2015.03.013.
- [11] W.-X. Wang, "Bioaccumulation and Biomonitoring," in *Marine Ecotoxicology*, Elsevier, 2016, pp. 99–119. doi: 10.1016/B978-0-12-803371-5.00004-7.
- [12] M. Fomina and G. M. Gadd, "Biosorption: current perspectives on concept, definition and application," *Bioresour. Technol.*, vol. 160, pp. 3–14, May 2014, doi: 10.1016/j.biortech.2013.12.102.
- [13] F. M. Hassan, A. N. A. R. AL-Baidhani, and S. H. H. Al-Khalidi, "Bioadsorption of Heavy Metals From Industrial Wastewater Using Some Species of Bacteria," *Baghdad Science Journal*, vol. 13, no. 3, p. 0435, Sep. 2016, doi: 10.21123/bsj.2016.13.3.0435.
- [14] B. Naeimi, R. Foroutan, B. Ahmadi, F. Sadeghzadeh, and B. Ramavandi, "Pb(II) and Cd(II) removal from aqueous solution, shipyard wastewater, and landfill leachate by modified *Rhizopus oryzae* biomass," *Mater. Res. Express*, vol. 5, no. 4, p. 045501, Apr. 2018, doi: 10.1088/2053-1591/aab81b.
- [15] S. Sharma and P. Malaviya, "Bioremediation of tannery wastewater by chromium resistant novel fungal consortium," *Ecol. Eng.*, vol. 91, pp. 419–425, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.03.005.
- [16] H. Zhang, X. Yuan, T. Xiong, H. Wang, and L. Jiang, "Bioremediation of co-contaminated soil with heavy metals and pesticides: Influence factors, mechanisms and evaluation methods," *Chemical Engineering Journal*, vol. 398, p. 125657, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.cej.2020.125657.
- [17] G. A. de P. Ferreira and K. F. Mendes, "Bioaccumulation of Pesticides in Non-Target Organisms," in *Pesticides in Agriculture and Environment*, Book Publisher International (a part of SCIEDOMAIN International), 2021, pp. 28–37. doi: 10.9734/bpi/mono/978-93-91882-14-3/CH3.
- [18] Z. M. Şenol, Ü. D. Gül, R. Gurbanov, and S. Şimşek, "Optimization the removal of lead ions by fungi: Explanation of the mycosorption mechanism," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 9, no. 2, p. 104760, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.jece.2020.104760.
- [19] Y. Shi *et al.*, "Removal and reduction mechanism of Cr (VI) in *Leersia hexandra* Swartz constructed wetland-microbial fuel cell coupling system," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 277, p. 116373, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.ecoenv.2024.116373.
- [20] K. Nielson and D. W. Smith, "Ozone-enhanced electroflocculation in municipal wastewater treatment," *Journal of Environmental Engineering and Science*, vol. 4, no. 1, pp. 65–76, Jan. 2005, doi: 10.1139/s04-043.
- [21] M.-L. Liu, L. Li, Y.-X. Sun, Z.-J. Fu, X.-L. Cao, and S.-P. Sun, "Scalable conductive polymer membranes for ultrafast organic pollutants removal," *J. Memb. Sci.*, vol. 617, p. 118644, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.memsci.2020.118644.
- [22] B. U. Okoro, S. Sharifi, M. A. Jesson, and J. Bridgeman, "Natural organic matter (NOM) and turbidity removal by plant-based coagulants: A review," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 9, no. 6, p. 106588, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.jece.2021.106588.
- [23] H. Zou *et al.*, "Ball milling biochar iron oxide composites for the removal of chromium (Cr(VI)) from water: Performance and mechanisms," *J. Hazard. Mater.*, vol. 413, p. 125252, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125252.
- [24] H. Apaza-Aquino and M. del R. V. Valencia, "Aislamiento de cepas fúngicas de una poza de relaves para la biorremediación de plomo y cadmio," *UCV Hacer*, vol. 9, no. 4, pp. 47–54, 2020.
- [25] P. Dey, J. W. Osborne, and K. B. Lincy, "An insight on the plausible biological and non-biological detoxification of heavy metals in tannery waste: A comprehensive review," *Environ. Res.*, vol. 258, p. 119451, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.envres.2024.119451.
- [26] J. Zhao, Q. Wu, Y. Tang, J. Zhou, and H. Guo, "Tannery wastewater treatment: conventional and promising processes, an updated 20-year review," *Journal of Leather Science and Engineering*, vol. 4, no. 1, p. 10, Dec. 2022, doi: 10.1186/s42825-022-00082-7.
- [27] D. Rai and S. Sinha, "Impact of different anode materials on electro-Fenton process and tannery wastewater treatment using sequential electro-Fenton and electrocoagulation," *Chemosphere*, vol. 336, p. 139225, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.139225.
- [28] M. Tammamo, A. Salluzzo, R. Peretto, and A. Lancia, "A comparative evaluation of biological activated carbon and activated sludge processes for the treatment of tannery wastewater," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 2, no. 3, pp. 1445–1455, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.jece.2014.07.004.

- [29] A. D. Villalobos-Lara *et al.*, "Electrocoagulation treatment of industrial tannery wastewater employing a modified rotating cylinder electrode reactor," *Chemosphere*, vol. 264, p. 128491, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128491.
- [30] S. Sharma and P. Malaviya, "Bioremediation of tannery wastewater by chromium resistant novel fungal consortium," *Ecol. Eng.*, vol. 91, pp. 419–425, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.03.005.
- [31] E. Ü. Deveci, C. Akarsu, Ç. Gönen, and Y. Özyay, "Enhancing treatability of tannery wastewater by integrated process of electrocoagulation and fungal via using RSM in an economic perspective," *Process Biochemistry*, vol. 84, pp. 124–133, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.procbio.2019.06.016.
- [32] A. K. Vala and V. Sutariya, "Trivalent Arsenic Tolerance and Accumulation in Two Facultative Marine Fungi," *Jundishapur J. Microbiol.*, vol. 5, no. 4, pp. 542–545, Jan. 2012, doi: 10.5812/jjm.3383.
- [33] Y. Pájaro and F. Díaz, "Removal of hexavalent chromium from contaminated water using chitosan obtained from shrimp exoskeleton," *Revista Colombiana De Química*, vol. 41, no. 2, pp. 283–298, 2012.
- [34] M. Fomina and G. M. Gadd, "Biosorption: current perspectives on concept, definition and application," *Bioresour. Technol.*, vol. 160, pp. 3–14, May 2014, doi: 10.1016/j.biortech.2013.12.102.
- [35] A. Malik, "Metal bioremediation through growing cells," *Environ. Int.*, vol. 30, no. 2, pp. 261–278, Apr. 2004, doi: 10.1016/j.envint.2003.08.001.
- [36] A. Mosa *et al.*, "Chemo-mechanical modification of cottonwood for Pb²⁺ removal from aqueous solutions: Sorption mechanisms and potential application as biofilter in drip-irrigation," *Chemosphere*, vol. 161, pp. 1–9, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.06.101.