



Micorremediación de cadmio con fungus ligninolítico: un tratamiento de aguas residuales

Micoremediation of cadmium with ligninolytic fungus: a wastewater treatment

José Luis Paredes Salazar
Universidad Nacional Agraria de la Selva, Perú
jose.paredes@unas.edu.pe
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6431-4768>

Recepción: 25/11/2022

Aceptación: 05/12/2022

Publicación: 30/12/2022

Resumen

En esta investigación se tuvo por objetivo determinar la eficiencia de fungus ligninolíticos para la micorremediación de cadmio. Se aislaron 8 fungus ligninolíticos (*Trametes elegans*, *Ganoderma applanatum*, *Coriolopsis polizona*, *Earliellascabrosa*, *Picnoporus sanguineus*, *Schizophyllum commune*, *Pleurotus ostreatus*, *Polyporus craterellus*), éstos fueron inducidos en concentraciones de cadmio a 10, 40 y 70 mg/L por 14 días. *Earliella scabrosa* presentó mayor desarrollo en todas las concentraciones. Posteriormente se realizaron los ensayos en biorreactores airlift con soluciones de 100, 300 y 500 mg/L, adicionando un inóculo de 100ml de *E. scabrosa*, extracto de levadura como inductor (0,1%) y glucosa como co-metabolito (0,25g/L). El tiempo de operación fue de 20 días, el pH de 5,65 a 7,24, temperatura promedio de 29,8°C, el O₂ disuelto de 3,49 a 7,3 mg/L y CO₂ de 0,02 a 2,63 mg/L. La remoción de cadmio a las concentraciones de 100, 300 y 500mg/L fueron de 86%, 76% y 83% respectivamente. Estadísticamente se determinó que existe diferencia significativa entre los tratamientos aplicados con una confiabilidad del 95%.

Palabras clave: Micorremediación, *Earliella scabrosa*; fungi; remoción de cadmio; biorreactores airlift

Abstract

The objective of this research was to determine the efficiency of ligninolytic fungi for cadmium mycoremediation. Eight ligninolytic fungi were isolated (*Trametes elegans*, *Ganoderma applanatum*, *Coriolopsis polizona*, *Earliellascabrosa*, *Picnoporus sanguineus*, *Schizophyllum commune*, *Pleurotus ostreatus*, *Polyporus craterellus*), they were induced in cadmium concentrations at 10, 40 and 70 mg/L for 14 days. *Earliella scabrosa* presented greater development in all concentrations. Subsequently, the tests were carried out in airlift bioreactors with solutions of 100, 300 and 500 mg/L, adding an inoculum of 100 ml of *E. scabrosa*, yeast extract as inducer (0.1%) and glucose as co-metabolite (0,25g/L). The operation time was 20 days, the pH from 5,65 to 7,24, average temperature of 29,8°C, dissolved O₂ from 3,49 to 7,3 mg/L and CO₂ from 0,02 to 2,63mg/L. Cadmium removal at concentrations of 100, 300 and 500mg/L were 86%, 76% and 83% respectively. Statistically it was determined that there is a significant difference between the treatments applied with a reliability of 95%.

Keywords: Mycoremediation, *Earliella scabrosa*; fungi; cadmium removal; airlift; bioreactors.

1. Introducción

La existencia del ser humano implica el desempeño de actividades indispensables para su supervivencia, con adaptación a nuevas tendencias en su estilo de vida, como parte de su desarrollo. Esto, involucra el uso de diversos productos que son elaborados con

sustancias químicas de diversa de naturaleza, entre ellos los metales pesados, que al final forman parte de los residuos sólidos o terminan incorporados en las aguas residuales, constituyendo un problema en los tratamientos de depuración, debido a la aplicación de tecnologías de baja eficiencia para remoción de estos

compuestos. El cadmio es uno de los metales pesados que frecuentemente se encuentra en las aguas residuales y su remoción está en función a las tecnologías aplicadas, entre las cuales destacan la adsorción, el intercambio iónico, la electrocoagulación entre otras, sin embargo, los estudios de la capacidad de algunas especies como los hongos para remover el cadmio en aguas residuales, dan lugar a la posibilidad su aplicación en tratamiento de aguas, para lo cual es necesario conocer las condiciones más adecuadas para un tratamiento eficiente.

El cadmio, ha sido identificado, estudiado y etiquetado como uno de los metales que causa afecciones críticas para la salud, las cuales puede ser desde leves hasta severas y en algunos casos crónicas, tal es así que se ha demostrado que genera daños renales, afecta la estructura ósea y es un factor que conlleva a la hipertensión (Cuper, 1999). En las últimas décadas, las investigaciones científicas para fines de remediación de ecosistemas degradados, han buscado aplicar tecnologías amigables con el medio ambiente, esto ha generado una tendencia de aprovechamiento de algunas especies que presentan características peculiares en su sistema de vida, una de estas, son los hongos, que para su desarrollo presentan la capacidad para romper estructuras complejas y de gran tamaño, en simbiosis con algunos microorganismos, (Stamets,2005).

Los recientes estudios para la remoción de metales pesados son diversos entre los cuales podemos mencionar la aplicación de intercambio iónico que permite remover en forma selectiva un metal en un medio acuoso generando una baja producción de lodos y operando bajo estrictas condiciones de operación (Zewail & Yousef, 2015); la adsorción que permite remoción de una gran variedad de contaminantes, cuya capacidad, selectividad y desarrollo cinético está en función al tipo de material y su estructura del adsorbente (Liu & Lee, 2014). La electrocoagulación es una técnica con capacidad para remover metales pesados, basada en la aplicación de energía eléctrica, Khosa et al. (2013), realizó un estudio de remoción de níquel, cadmio y plomo divalentes, utilizando electrodos de fierro y una solución acida de potasio, para favorecer la conductividad de la solución; donde el cadmio fue removido en un 96,8%, porcentaje más bajo respecto a los otros dos metales. La fitorremediación también

permite la remoción de metales pesados, tal como reportó Ibrahim et al. (2012), quienes utilizaron la biomasa seca de Jacinto de agua para remover cadmio y plomo y con un tiempo de retención hidráulico de 12 horas obtuvieron un 75% y 90% de remoción de cadmio y plomo respectivamente.

El aprovechamiento de la microbiota en la aplicación de tratamientos de agua contaminada con metales pesados es aún solo una alternativa en desarrollo, debido a la falta de conocimiento en el manejo de estas especies, que si bien es cierto exhiben su potente mecanismo para degradar estructura complejas de la madera, como la que presenta la lignina, por otro, el estadio inicial de su ciclo de vida permitiría su adaptación a medios contaminados con metales pesados, hasta un límite de concentración que interrumpa su crecimiento y por ende la depuración de metales pesados del medio.

Este estudio busca conocer las condiciones más favorables para la remoción de cadmio en medio acuoso utilizando fungus de pudrición blanca, con alta tolerancia a ambientes acuáticos contaminados con metales pesados, así mismo determinar sus limitaciones en este proceso de biorremediación, para su futura aplicación y manejo en el tratamiento de aguas residuales industriales con presencia de metales pesados.

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

La investigación se desarrolló entre los años 2015 y 2016, en la Tingo María, Huánuco, ciudad ubicada con latitud -9.29532, longitud -75.99574 y una altitud de 662 m s.n.m, presenta una temperatura máxima media anual de 31,5 °C y una temperatura mínima media anual de 21,0 °C, siendo la temperatura media anual de 25,4 °C. La humedad relativa media anual es cercana al 85% y la precipitación media anual es de 3,755 mm. En términos de ecología, según la clasificación de áreas importantes o composición vegetal de organismos y mapa biológico, Tingo María fue encontrado en el muy húmedo premontano tropical de formación vegetal bmh-PT y según el área natural del Perú, corresponde a Rupa o Selva Alta.

El material biológico utilizado en la investigación se conformó de los especímenes de *Trametes elegans* (Spreng.) Fr., *Ganoderma applanatum* (Pers.) Pat., *Corioloopsis polizona* (Pers.) Ryvarden, *Earliella*

scabrosa (Pers.) Gilb. & Rivarden., *Pycnoporus sanguineus* (L.) Murill., *Schizophyllum commune* Fr., *Pleurotus ostreatus* (Jacq.: Fr.) Quéf., *Polyporus craterellus* Berk. & M.A. Curtis, los cuales fueron colectados de los troncos en descomposición y árboles en pie del Bosque Reservado y Jardín Botánico de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. Una solución patrón de cadmio de 1000 mg/l marca Merck fue utilizada en la preparación de soluciones con concentraciones diferentes planteadas en la investigación.

2.2. Metodología

Obtención, acondicionamiento y desarrollo de los fungi

Los cuerpos fructíferos de los fungi fueron colectados cuidadosamente con una navaja y guardados en sobres de papel manila, y se registraron los datos de colección en un formato de elaboración propia que contenía información de: características de sombrero, píleo, estípites, margen del píleo, láminas, contexto entre otras características. Se tomaron fotografías para registrar imágenes de sus características originales, posteriormente en el laboratorio se registraron otras características macroscópicas y microscópicas con la ayuda de bisturí, lupa de 6x de aumento, regla y equipos como estereoscopio (Ríos y Ruiz, 1993).

Para efecto de la conservación de las estructuras microscópicas de las muestras se aplicó un secado rápido, con el cual también se consigue eliminar insectos (Robledo, 2006). El secado fue realizado a la estufa en el laboratorio a una temperatura de 60 °C durante 24 a 72 horas, para los fungi de consistencia suave y para los fungi de consistencia dura o carnosa, el secado se complementó, con un freezado a 4 °C por 72 horas. Las muestras fueron debidamente codificadas y rotuladas en el exterior de los envases de plástico transparentes cerrados herméticamente. Las muestras se agruparon por sus características macroscópicas y algunas características microscópicas (Morales et al., 2002).

La identificación taxonómica, se realizó con la ayuda de guías de campo (catálogos) de especies de fungi en la Reserva Nacional Allpahuayo Mishana (Espinoza et al., 2006) y de especies del jardín botánico de ECOSUR- México (González et al., 2011). Para confirmar su nombre específico, algunas de las

muestras secas y fotografías fueron enviadas a un especialista obteniendo como respuesta los nombres científicos de las especies fúngicas.

Seguidamente se procedió a la desinfección de materiales y sembrado de las muestras esterilizando la cámara de flujo laminar con aplicación de radiación UV por 15 minutos; las placas Petri, pinzas y asas de siembra fueron esterilizadas en la estufa a 150°C por 2 horas. Previamente al sembrado, las muestras se cortaron en fragmentos de 0,5 x 0,5 mm y se desinfectaron con alcohol al 70% durante 1 minuto; seguido de la aplicación de NaOCl al 1.5 % por 3 minutos, terminando con un lavado con agua destilada por tres veces continuas (Ríos y Ruiz, 1993). Luego se realizó la siembra en placas con agar papa dextrosa y en agar extracto de malta, se procedió a sellar las placas y se incubaron a temperatura ambiental, hasta evidenciar el crecimiento de los micelios. Durante la incubación se realizaron observaciones en estereoscopio, a fin de asegurar las condiciones favorables de crecimiento.

Para la preservación de las cepas se repicó en tubos de ensayo utilizando el mismo medio de procedencia del asa de siembra de las placas Petri para cada cepa; teniendo como criterio de elección la uniformidad del crecimiento micelial y ausencia de materiales extraños o contaminantes. Cada fungi se trabajó con tres repeticiones incubadas a temperatura ambiente por 7 días.

Determinación de los fungi con resistencia y adaptación al cadmio

Para la activación de los fungi se repicó desde los tubos de ensayo, micelios de las cepas preservadas, en matraces esterilizados conteniendo caldo Sabouraud, y se dejó incubar al ambiente por 5 días. Seguidamente se procedió a inducir el crecimiento de los fungi en presencia de cadmio, en una solución preparada con glucosa (0.25 g/L), extracto de levadura al 0.1% y cadmio a 10 mg/L, 40 mg/L y 70 mg/L, esta mezcla se esterilizó, y enfrió antes de agregar xetraxona a una dosis de 0.2 g/L, la solución se dividió en alícuotas de igual volumen que fueron vertidas en matraces Erlenmeyer estériles y luego se inoculó en cada matraz 7,5 mL del caldo Sabouraud de las distintas cepas de fungi en activación. Finalmente se sometió a incubación por 14 días a temperatura ambiental. La adaptación de los fungi al

cadmio se evaluó mediante observaciones de crecimiento y biomasa fúngica. Se seleccionó la especie que mostró mayor capacidad de desarrollo (mayor biomasa) sobre cadmio a distintas concentraciones comparando el crecimiento con el control (medio sin cadmio).

Determinación de eficiencia de la micorremediación de cadmio

En esta etapa se utilizaron biorreactores air lift de vidrio 8L de capacidad los cuales se desinfectaron con alcohol ácido al 1% por 2 días, complementando con un posterior llenado y reposo con una solución de hipoclorito al 20% durante 24 horas y se concluyó con un lavado utilizando agua destilada. La aireación se realizó con una bomba de aire de las que se utilizan en peceras, que proporciona un caudal de 1100 ml aire/ minuto. En estos biorreactores air lift, se vertió un medio mínimo de Davis esterilizado a 70°C preparado con glucosa (0,25 g/L), extracto de levadura (0,1 %) a 100ppm, 300ppm y 500ppm de cadmio y se inoculó 100 ml de la cepa más resistente al cadmio en cada reactor y se completó a un 10 % del volumen total (800 ml) del biorreactor. El tiempo de operación fue de 20 días en un ambiente estéril, a temperatura ambiente y se puso en marcha con la aireación, utilizando un filtro de solución concentrada de NaCl, para esterilizar el aire de ingreso a los biorreactores.

Los datos registrados semanalmente durante el periodo de operación fueron, el oxígeno disuelto utilizando un oxímetro marca HANNA y el dióxido de carbono, utilizando fenolftaleína 1 % como indicador y una solución de NaOH 0,01M para titular, a esta concentración el consumo de 5 gotas de titulante indicó 1 mg/L de CO₂. Como referencia también se registró la temperatura interna, y externa utilizando un termómetro digital y un termómetro ambiental respectivamente, el pH del medio utilizando un pH-metro marca HANNA debidamente calibrado.

Para determinar la concentración de la densidad celular fúngica y cadmio, se utilizó 50 ml de muestra tomada del biorreactor en operación, se procedió a centrifugar a 2500 rpm por 20 minutos para separar las partículas sedimentables de biomasa y la fase líquida o sobrenadante. Con a la biomasa obtenida se determinó el número celular fúngico en los biorreactores, realizando recuentos directos, con diluciones, en medio Plate Count adicionado con

extracto de malta al 1 %, expresándose los resultados en células por mililitro y para determinar la densidad celular se pesó en seco la biomasa celular (micelio), para este procedimiento se centrifugó la muestra a 3500 rpm por 15 minutos para separar la biomasa, la cual fue lavada tres veces consecutivas y llevada a la estufa por 8 h a 80 °C de temperatura. Antes de medir el peso final de biomasa, ésta se llevó a enfriamiento en un desecador por 1 h y se pesó, en forma continua hasta tener un peso constante, los resultados fueron expresados en miligramos por mililitro.

$$\text{Biomasa} \frac{\text{mg}}{\text{ml}} = X_2 - X_1$$

donde, X₁: Peso inicial del papel filtro y X₂: Peso del papel filtro con biomasa. La concentración de cadmio fue cuantificada por la técnica de absorción atómica en llama.

Para calcular la eficiencia de micorremediación, se utilizó la siguiente fórmula:

$$E_m = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100$$

Donde, E_m = eficiencia de micorremediación (%),
C_i = Concentración inicial de contaminante (mg/L),
C_f = Concentración final de contaminante (mg/L).

El diseño experimental fue de estímulo creciente, con un solo factor y tres niveles con tres repeticiones. Posteriormente los resultados fueron analizados con el software Info Stat, para conocer el análisis de varianza y determinar si existe diferencia significativa entre los tratamientos mediante con comparación de medias por Tukey (p<0,05)

3. Resultados

3.1. Aislamiento e identificación de fungi ligninolíticos

En la Tabla 1, se presentan las 8 especies fungi encontradas con su lugar de procedencia, que fueron sometidas a las pruebas experimentales con fines de evaluar su crecimiento en medio acuoso contaminado con cadmio. Se puede observar que 6 de las ocho especies, proceden del Jardín Botánico y solo dos del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS), aunque son áreas cercanas, posiblemente eso es debido al manejo de especies en el Jardín Botánico, presenta



mayor cantidad de hongos por la existencia de la concentración de diferentes especies vegetales y algunos restos de troncos como mezclado con la hojarasca, que al parecer influyen en la diversidad de la microbiota.

Tabla 1

Especies de fungi recolectados y sometidos a desinfección.

Código	Especie recolectada	Familia	Procedencia
FT-203	<i>Ganoderma applanatum</i>	Ganodermataceae	Jardín Botánico UNAS
FT-200	<i>Trametes elegans</i>		
FT-206	<i>Coriolopsis polyzona</i>		
FT-211	<i>Earliella scabrosa</i>	Polyporaceae	Jardín Botánico UNAS
FT-226	<i>Polyporus craterellus</i>		
FT-212	<i>Pycnoporus sanguineus</i>		BRUNAS
FT-216	<i>Schizophyllum commune</i>	Schizophyllaceae	BRUNAS
FT-220	<i>Pleurotus ostreatus</i>	Pleurotaceae	Jardín Botánico UNAS

3.2. Selección de las cepas más adaptables al cadmio.

En la Tabla 2, se observan los resultados cualitativos de la resistencia de las especies a las concentraciones de cadmio, en la cual *E. scabrosa*, presentó un crecimiento abundante en las tres concentraciones de cadmio y algo muy particular es el comportamiento de *Coriolopsis polyzona*, la cual presentó una gran tolerancia en las concentraciones de 10 mg/L y 40 mg/L de Cd, mientras a 70 mg/L de

Cd, no se desarrolló, esta diferencia podría radicar en la translocación del metal en las estructuras de ambos hongos o a la presencia y mecanismos específicos de siderofóros.

Tabla 2

Inducción al desarrollo de fungi a distintas concentraciones de cadmio en la etapa de adaptación.

Código de Fungi	70 mg Cd/L			40 mg Cd/L			10 mg Cd/L		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
FT-200	+	+	+	++	+	++	++	++	++
FT-203	----	+	+	+	++	++	++	++	++
FT-206	----	----	----	++	++	++	++	++	+++
FT-211	++	++	++	++	++	++	++	++	+++
FT-212	+	+	++	++	++	++	++	++	+++
FT-216	+	+	+	++	++	++	++	++	++
FT-220	----	+	+	++	+	++	++	++	+++
FT-226-15	++	+	++	+	+	+	++	++	++

-----: No se desarrolló el fungi, +: Muy escaso desarrollo del fungi, ++: Regular desarrollo del fungi, +++: Abundante desarrollo del fungi.

3.3. Determinación de eficiencia de remoción del cadmio con *Earliella scabrosa*

En la Tabla 3, se presenta el desarrollo progresivo de la remoción de cadmio, durante el período de evaluación en 20 días, donde las concentraciones de cadmio remanentes guardan una aparente proporcionalidad con las concentraciones iniciales, sin embargo, en la Tabla 4, observamos que el mayor porcentaje de remoción se produce con la menor concentración de cadmio y que el menor porcentaje de remoción de cadmio se produce con la concentración media de cadmio: 300 mg/L. Al respecto, se podría explicar este resultado por el mecanismo de biosorción con *E. scabrosa*, donde el metal podría acumularse excesivamente en la

superficie del hongo, adsorber hasta su capacidad límite y desorber el sobrante.

Tabla 3

Promedio de las concentraciones de cadmio durante la operación en los biorreactores y sus rangos de parámetros.

Concentraciones de cadmio durante la operación(mg/L)					Rango de valores de los parámetros de operación				
0 días	5 días	10 días	15 días	20 días	pH	Temp. Interna (°C)	Temp. Externa (°C)	Oxígeno disuelto(mg/L)	CO ₂ (mg/L)
100	56,2	29,3	19,1	13,6					
300	144,4	83,7	74,4	70,2	5,65-7,24	28,4-28,9	26,1-33,5	3,49-7,3	0,02-2,63
500	234,9	114,2	85,9	90,0					

Tabla 4

Porcentaje de remoción de cadmio durante el tiempo de operación

Concentración inicial (mg/L)	a 5 días (%)	a 10 días (%)	a 15 días (%)	a 20 días (%)
100	44	70,7	80,9	86,4
300	51,8	72,1	75,2	76,6
500	53,0	77,2	82,8	81,9

4. Discusión

En la etapa de aislamiento de las distintas especies fúngicas se observó que 7 de las especies crecieron mejor en el medio agar extracto de malta y solo 1 creció mejor en el medio agar papa dextrosa. Las exigencias nutricionales de algunos fungi son muy variadas, mientras unos son capaces de crecer en condiciones diversas, otros tienen necesidades muchas más determinadas, los medios tienen que ser adecuados para cada clase de fungi que se desea cultivar (Ríos y Ruiz, 1993).

Después de la etapa de desinfección, se seleccionó la especie *Earliella scabrosa* para la operación en los biorreactores pues predominó en desarrollo en la etapa de adaptación a la inducción con cadmio como se observa en la Tabla 2. Esta especie pertenece al orden Polyporales, phylum basidiomycota y clase Basidiomycetes como también se encuentran las especies en estudio *Ganoderma aplanatum*,

Polyporus craterellus, *Pycnoporus sanguineus*, *Corioloopsis polizona*, *Trametes elegans* y en el orden agaricales se encuentran las especies *Pleurotus ostreatus* y *Schizophyllum commune* (Valenzuela et al., 2011). Para este caso todas estas especies fúngicas, aunque sean del mismo phylum y clase manifestaron diferentes capacidades de desarrollo en medio acuoso con cadmio.

En la etapa de adaptación e inducción se mostraron diferentes capacidades de desarrollo como también se encontraron especies sensibles al cadmio *Corioloopsis polizona* es sensible a la concentración de cadmio 70 mg/L y *Ganoderma aplanatum* manifestó poco desarrollo en las tres concentraciones. Los fungi son especies que muestran alta capacidad de supervivencia y desarrollo, esta condición está en función sus propiedades intrínsecas de adaptación que se ven influenciadas por factores fisicoquímicas del medio donde se desarrollan (Morales y Ruiz, 2008). Cuando se aislaron 7 fungi resistentes (5 *Aspergillus flavus*, 2 *Aspergillus fumigatus*) y se inocularon en una solución con metales pesados preparada a partir de desechos mineros, se demostró que algunas especies presentan resistencia a 500 ppm de Pb, Cu y Zn, y a 200 ppm de Ag, mientras otras presentan alta sensibilidad al Cd, As y Hg (Díaz et al., 2002)

En la etapa de adaptación e inducción *Pleurotus ostreatus* y *Trametes elegans* tuvieron muy escaso desarrollo en las distintas concentraciones de cadmio. Los fungi de la pudrición blanca, como



Pleurotus ostreatus, *Phanerochaete chrysosporium* y *Trametes versicolor* producen altas cantidades de oxalato, que son sustancias que reaccionan con metales para formar oxalatos de metal, estos metales pueden ser el Cr, Cd, Co, Cu, Mn, Sr, y Zn. El ácido oxálico tiene la capacidad de reaccionar con iones metálicos solubles, lo cual permite que éstos se inmovilicen, formando compuestos de oxalato insolubles, reduciendo su biodisponibilidad e incrementando su tolerancia (Morales y Ruiz, 2008).

Con la cepa *Phanerochaete chrysosporium*, se removió 300 ppm de cadmio, de este total un 74% se encontró en células libres y 16% en células inmovilizadas. *Phanerochaete chrysosporium* fue la cepa presentó una gran resistencia y tolerancia a concentraciones de 1500 mg/L de cadmio, con tiempos mínimos de dos días (Morales y Ruiz, 2008). Un estudio donde aislaron 7 fungi resistentes a metales pesados de efluentes mineros, fueron probados en su capacidad de remoción de metales pesados y flúor en solución, en el caso del cadmio estas especies alcanzaron una remoción que varió entre 8% y 47% (Díaz et al., 2002).

Scragg (2001), afirma que el material biológico tiene la capacidad de enlazarse a elevados niveles de metales, que puede representar hasta un 30% del peso seco. Los fungi de la pudrición blanca y café de la madera, son especies que pueden tolerar y reaccionar con sales de metales pesados, porque en su estructura están provistos de sideróforos o agentes quelantes, entre estos se pueden mencionar el catecol y el ácido oxálico (Díaz et al., 2002).

La especie lignícola *Earliella scabrosa* resultó con gran eficiencia para la remoción de cadmio en solución, este resultado no coincide con los que reporta, el estudio sobre la presencia de cadmio, mercurio, plomo, cobre y zinc, evaluados en 238 muestras de carpóforos pertenecientes a 28 especies comestibles de fungi silvestres. Los resultados mostraron que las más altas concentraciones metálicas estaban en las especies saprófitas terrícolas, mientras las especies lignícolas y cultivadas presentaron más baja concentración metálica (Alonso et al., 2003).

En la Tabla 4 se observa la variación del nivel de eficiencia de remoción de cadmio durante los días de operación, aquí se puede observar que el mayor porcentaje de remoción de cadmio se produce a la

concentración de 100 mg/L, seguida por la de 500mg/L y finalmente la de 300 mg/L, esto podría deberse al mayor crecimiento celular que alcanzó el fungi a menor concentración de cadmio. El crecimiento del micelio será hasta que sea limitado con una barrera física o interrumpido por la presencia de otro organismo con el que compite por el sustrato. Durante esta etapa de crecimiento es natural y producto de su metabolismo la liberación de calor y dióxido de carbono (Stamets, 2005). La capacidad de adsorción del fungi *Penicillium sp* se va estabilizando conforme aumentan las concentraciones (hasta 103 mg/l) de los metales en la solución, esto se explica por la saturación la superficie activa de biosorbente (Sánchez et al., 2014).

En la Tabla 4 también se observa que hasta el día 10, que el porcentaje de remoción de cadmio es proporcional a las tres concentraciones evaluadas, mientras que al día 15, el tratamiento con concentración de 300 mg/L de cadmio, disminuye su eficiencia. Estos resultados se deberían al ciclo de vida de los hongos, ya que estos organismos acumulan nutrientes temporalmente, por tanto, se podría producir una desorción de nutrientes, entre los cuales estaría el cadmio. Los fungi son especies que a diferencia de las plantas no almacenan su energía en forma de almidón, como parte de su reserva. En forma similar estas especies, almacenan otros polisacáridos como la trehalosa y el glucógeno, también son compuestos que son una reserva alimenticia de carácter temporal (Sánchez y Royse, 2001). La acumulación de nutrientes en el micelio se denomina primordio, es la siguiente etapa de su ciclo de vida y se ve favorecida por la disminución natural de temperatura en el sustrato y su relación con un estímulo ambiental como variaciones de humedad, agua, temperatura, reducción de CO₂ (Stamets, 2000).

Respecto a la concentración y densidad celular fúngica, se observó una relación inversa entre el crecimiento de biomasa fúngica y la concentración del cadmio en las soluciones, mostrándose en el día 20 una densidad celular de 4.14, 4 y 3.16 mg/ml a las concentraciones de 100, 300 y 500 mg/L, lo cual, comparado con el testigo, el cadmio afectó negativamente el crecimiento celular en 28.7%, 31.1% y 45.6%.

Se evidenció durante los días de operación un incremento de CO₂. El incremento fue mayor en los

primeros días mientras en los últimos días de operación se va haciendo constante la concentración de CO₂. Después que el micelio alcance su total desarrollo, empezará una etapa estacionaria dentro del ciclo de vida, en la cual es capaz de soportar las alteraciones del clima, producto de ello la emisión calor y CO₂, se reduce (Stamets, 2000).

Los valores de oxígeno disuelto medidos disminuyeron a lo largo de la operación, siendo la solución de menor concentración de cadmio, 100 mg/L la que terminó con el menor valor de oxígeno disuelto 4.09 mg/L. Al utilizar un flujo de entrada de aire controlado (vvm) se tiene la posibilidad de que las enzimas ligninolíticas sean activadas por la tensión de oxígeno en el medio. Por otra parte, al agregarse a la cámara de cultivo aditivos en concentraciones bajas a moderadas se asegura que las enzimas ligninolíticas sean producidas en el estadio idiofásico (desarrollo exponencial) que es estimulado por la adición de nutrientes como carbono, nitrógeno, etc. (Martinez et al., 2005).

La temperatura externa varió en aproximadamente entre 0.2 - 0.3 °C teniendo un promedio 28.68 °C mientras la temperatura interna varió aproximadamente en 3.7°C teniendo en promedio 29.8°C. Para una mayor remoción de metales con fungi, la temperatura debe estar entre 25 a 30 °C, y es importante considerar que la temperatura tiene influencia en la adsorción física entre el metal y el fungi (Morales y Ruiz, 2008).

El pH en los biorreactores mantuvo un valor máximo de 7.24 y un mínimo de 5.65. Cuando el pH de la estructura fúngica es menor de 3.5, se produce una protonación de los grupos fosfatos y carboxilos, que terminan carga positiva y promueven una repulsión electrostática entre los iones metálicos y la pared, por otro lado, también existirá una competencia entre protones y los metales. Cuando el pH es superior a 4 y menor que 6, se produce un acercamiento aniónico con los iones metálicos, debido la carga negativa de la pared fúngica (Morales y Ruiz, 2008).

5. Conclusiones

Con la investigación se logró coleccionar, identificar y aislar 8 especies de fungi ligninolíticos, entre las cuales *Earliella scabrosa* presentó la mayor

adaptación en un medio acuoso contaminado con cadmio. Con los ensayos de micorremediación de cadmio aplicados en reactores airlift, se demostró la capacidad de *E. scabrosa* para la remoción de cadmio, siendo más eficiente en el medio acuoso con menor concentración de cadmio.

Referencias

- Alonso, J., García, M., Pérez, M., Melgar, M. (2004). Acumulación de metales pesados en macromicetos comestibles y factores que influyen en su captación. *Rev. de Toxicología*, 21 (1), 11-15.
- Cuper O. (1999). *Contaminación de efluentes, residuos líquidos y sólidos con metales pesados*. Ingeniería Sanitaria y Ambiental 45p.
- Díaz, M.P. Moctezuma, M.G. y Acosta I. (2002). Aislamiento de hongos resistentes a metales pesados a partir de desechos mineros y su capacidad de remoción de Metales pesados y Flúor en solución. *Actas INAGEQ*, 2 (1), 253-257.
- Espinoza M., Mata M., Pavlich M., Mori T. (2006). *Hongos de Allpahuayo-Mishana, Reserva Nacional Allpahuayo-Mishana, Iquitos, Loreto, Perú*. https://fieldguides.fieldmuseum.org/sites/default/files/rapid-color-guides-pdfs/209-Hongos-Iquitos_1.pdf.
- González, A. & Acosta, E. & Olivas, A., & Jáuregui, A., & Cifuentes, J., & Valenzuela, R. (2011). *Los Macromicetos del Jardín Botánico de ECOSUR "Dr. Alfredo Barrera Marín" Puerto Morelos, Quintana Roo*. https://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/versiones_digitales/Macromicetos.pdf
- Ibrahim, H., Ammar, N., Soylak, M., Ibrahim, M. (2012). Removal of Cd(II) and Pb(II) from aqueous solution using dry water hyacinth as a biosorbent. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 96 (1), 413-420. DOI: [10.1016/j.saa.2012.05.039](https://doi.org/10.1016/j.saa.2012.05.039)
- Khosa, M., Jamal, M., Hussain A., Muneer, M., Zia, K., Hafeez, S. (2013). Efficiency of Aluminum and Iron Electrodes for the Removal of Heavy Metals [(Ni (II), Pb (II), Cd (II))] by Electrocoagulation Method. *Journal of the Korean Chemical Society*, 57 (3), 316-321. <https://doi.org/10.5012/JKCS.2013.57.3.316>
- Liu, X., Lee, D. (2014). Thermodynamic parameters for adsorption equilibrium of heavy metals and dyes

from wastewaters, *Bioresource Technology*, 160, 24-31.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.053>

Martinez, M., Pedrosa, A., Rodriguez, R., Rosas, J. (2005). Efecto de la glucosa y nitrato de amonio sobre las enzimas ligninolíticas producidas por *Trametes versicolor* inmovilizado en espuma y la decoloración de un efluente papelerero en un biorreactor de lecho fluidizado. *Revista Universitas Scientiarum*, 10(2), 27-36.

Morales, D., Ruiz, J. (2008). Determinación de la capacidad de remoción de cadmio, plomo y níquel por fungi de la podredumbre blanca inmovilizados. <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.35853.56803>

Morales, O., Flores, R., Samayoa, B., & Bran, M. (2002). Estudio Etnomicológico de la cabecera municipal de Tecpán Guatemala, Chimaltenango. *Revista Científica*, 15(1), 10–21. <https://doi.org/10.54495/Rev.Cientifica.v15i1.252>

Ríos R., Ruiz, R. (1993). Aislamiento y cultivo del fungi *Pleurotus afin ostreatus* (Jacq. Ex Fr) Kumm. Tingo María, Perú, *Revista Folia Amazónica*, 5(1-2), 5-14. <https://doi.org/10.24841/fa.v5i1-2.217>

Robledo, G. (2006). Taxonomía, ecología y diversidad de *Polyporus*. 15-19 mayo 2006. Cuzco, Perú. 13 p.

Sánchez, J., Marrugo Negrete, J. L., & Urango, I. (2016). Biosorción simultánea de plomo y cadmio en solución acuosa por biomasa de hongos *penicillium* sp. *Temas Agrarios*, 19(1), 2016. <https://doi.org/10.21897/rta.v19i1.725>

Sánchez, J., Royse, D. (2001). *La biología y el cultivo de Pleurotus sp.* UTEHA Noriega editores.

Scragg, A. (2001). *Biotecnología medioambiental*, Acribia S.A.

Stamets, P. (2000). Cultivo de hongos medicinales y gourmet. 3.ª edición, Ten Speed Press, Berkeley.

Stamets, P. (2005). *Micelio corriendo: cómo los hongos pueden ayudar a salvar el mundo*. Berkeley, California, Ten Speed Press.

Valenzuela, R., Cifuentes, J., Aguirre, E., Pompa, A. De Anda, A., Encalada, A. (2011). Los macromicetos del jardín botánico de Ecosur, Tlapan. *Revista mexicana de micología*, 6(1), 1-12.

Zewail, T., Yousef, N. (2015). Kinetic study of heavy metal ions removal by ion exchange in batch conical air spouted bed, *Alexandria Engineering Journal*, 54, 83-90. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2014.11.008>