

Potential of fungi in the biosorption of heavy metals present in acid mine tailings

*Abstract- Heavy metal contamination from acid mine drainage is a major environmental threat due to the high mobility of elements such as copper, zinc, cadmium, and chromium under low pH conditions. This study analyzes the potential of different fungal species for the biosorption and neutralization of these metals, evaluating their behavior under conditions similar to acid mine drainage. Thirty studies published between 2015 and 2025 were compiled, identifying the genera *Aspergillus*, *Penicillium*, and *Fusarium* as the most efficient in metal retention and biotransformation. The results show that fungi develop complementary metabolic mechanisms, such as surface adsorption, intracellular bioaccumulation, and redox biotransformation (e.g., the reduction of Cr(VI) to Cr(III)), which contribute to metal immobilization and detoxification. Furthermore, the use of simple carbon sources (glucose, malt extract, molasses) and moderate aerobic conditions favor their metabolism and the expression of antioxidant enzymes. Removal efficiencies reached up to 95–99% in species such as *Penicillium simplicissimum* and *Aspergillus niger*. Overall, filamentous fungi are establishing themselves as a viable, sustainable, and economical biotechnological alternative for the remediation of tailings and acid mine drainage.*

Keywords: Biosorption, filamentous fungi, acid mine drainage, heavy metals removal, biotransformation

Potencial de los hongos en la biosorción de metales pesados presentes en relaves ácidos de mina

Resumen- La contaminación por metales pesados proveniente del drenaje ácido de minas constituye una importante amenaza ambiental debido a la alta movilidad de elementos como cobre, zinc, cadmio y cromo en condiciones de pH bajo. Este estudio analiza el potencial de diferentes especies fúngicas para la biosorción y neutralización de estos metales, evaluando su comportamiento en condiciones similares al drenaje ácido de minas. Se recopilaron treinta estudios publicados entre 2015 y 2025, identificando los géneros *Aspergillus*, *Penicillium* y *Fusarium* como los más eficientes en la retención y biotransformación de metales. Los resultados muestran que los hongos desarrollan mecanismos metabólicos complementarios, como la adsorción superficial, la bioacumulación intracelular y la biotransformación redox (p. ej., la reducción de Cr(VI) a Cr(III)), que contribuyen a la inmovilización y desintoxicación de metales. Además, el uso de fuentes simples de carbono (glucosa, extracto de malta, melaza) y condiciones aeróbicas moderadas favorecen su metabolismo y la expresión de enzimas antioxidantes. Las eficiencias de remoción alcanzaron entre el 95 % y el 99 % en especies como *Penicillium simplicissimum* y *Aspergillus niger*. En general, los hongos filamentosos se están consolidando como una alternativa biotecnológica viable, sostenible y económica para la remediación de relaves y drenaje ácido de minas.

Palabras clave: Biosorción, hongos filamentosos, drenaje ácido de minas, remoción de metales pesados, biotransformación

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación por metales pesados derivada de actividades mineras y de los drenajes ácidos de mina representa uno de los problemas ambientales más críticos a nivel global, debido a la alta solubilidad y movilidad de elementos como plomo (Pb), cadmio (Cd), cobre (Cu), zinc (Zn), hierro (Fe) y arsénico (As) en condiciones de pH ácido, lo que incrementa los riesgos ecológicos y para la salud humana [1], [2]. En los drenajes ácidos, la complejidad química del agua caracterizada por una elevada salinidad, presencia de múltiples iones competidores y abundancia de sulfatos limita la eficacia de los métodos convencionales de tratamiento y remediación. Ante esta situación, la ciencia ambiental busca alternativas biotecnológicas sostenibles, seguras y de bajo costo que puedan reemplazar los procesos físico-químicos tradicionales [3].

En este contexto, los hongos se presentan como una alternativa prometedora debido a su alta capacidad de biosorción, su resistencia a ambientes extremos y su amplia disponibilidad. En los últimos años, diversos estudios han demostrado que la biomasa fúngica puede alcanzar altos porcentajes de remoción de metales pesados en condiciones controladas. Ensayos con especies como *Fusarium oxysporum*, *Aspergillus flavus* y *A. terreus* lograron eficiencias de eliminación de hierro superiores al 91–94 % [4]. De igual forma, investigaciones con basidiomicetos del género *Pleurotus* mostraron acumulaciones de plomo y cadmio en el micelio que alcanzaron decenas de miligramos por gramo, como en el caso de *Pleurotus ostreatus* con 48,8 mg Pb·g⁻¹ en condiciones de laboratorio. Además, el uso de soportes modificados como el biochar y otras enmiendas orgánicas ha demostrado aumentar significativamente la capacidad de retención de metales como Cd y Cu [5], [6]. Estos resultados sugieren que la biosorción fúngica podría constituir una estrategia efectiva y sostenible para la mitigación de la contaminación metálica.

Los mecanismos que explican la capacidad biosorbente de los hongos se han caracterizado mediante técnicas espectroscópicas y microscópicas, demostrando que la adsorción ocurre principalmente en la pared celular, donde grupos funcionales como carboxilos, fosfatos, hidroxilos, aminos y tioles interactúan con los iones metálicos por intercambio iónico, complejación o precipitación superficial. Además, los procesos de bioacumulación intracelular y las respuestas antioxidantes contribuyen a la tolerancia y al secuestro interno de los metales, especialmente en cepas adaptadas a ambientes ácidos [1]; [4]. Por otro lado, las melaninas y polisacáridos presentes en hongos negros o “black fungi” también han mostrado una elevada capacidad de adsorción de metales como Cr(VI) y As(V), tanto en biomasa viva como inactiva, lo que amplía las posibilidades de aplicación de estos organismos en distintos escenarios de contaminación.

Sin embargo, a pesar de los resultados alentadores obtenidos en laboratorio, la literatura reciente destaca la necesidad de realizar estudios aplicados en condiciones reales, utilizando muestras de drenajes ácidos de mina en lugar de soluciones sintéticas. Esto permitiría evaluar la influencia de la matriz iónica, los procesos de precipitación y la viabilidad operativa de la biosorción a escala piloto. En esta línea, se ha recomendado el uso de aislados autóctonos hongos naturalmente adaptados a ambientes ácidos y la optimización de parámetros como el pH, el tiempo de contacto, la dosis de biomasa y la temperatura. También se promueven enfoques combinados, como el uso de biomasa fúngica con enmiendas minerales, biorreactores continuos o

materiales híbridos como biochar derivado de residuos fúngicos [2], [3].

Por tanto, en este artículo se plantea como objetivo analizar la eficiencia de la capacidad biosorbente de hongos en la remoción de metales pesados presentes en relaves y drenajes ácidos de mina, identificando las especies más estudiadas, los metales más evaluados, los mecanismos de biosorción propuestos y las tendencias en la eficiencia de remoción reportadas en la literatura científica reciente.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Se llevó a cabo una revisión sistemática de la literatura científica, con el objetivo de recopilar, analizar y sintetizar evidencia sobre la biosorción de metales pesados mediante hongos en drenaje ácido de mina. Este enfoque metodológico se adoptó con el fin de garantizar un proceso transparente, reproducible y estructurado, siguiendo las directrices establecidas por la declaración PRISMA [7].

Previamente, se estableció el protocolo metodológico que definió las estrategias de búsqueda, los criterios de selección y las variables de análisis, con el fin de reducir sesgos y asegurar la coherencia del proceso de revisión.

La búsqueda de artículos científicos se realizó en cinco bases de datos: Scopus, ScienceDirect, Wiley, Web Of Science y Redalyc. La estrategia de búsqueda se aplicó en los campos de título, resumen y palabras clave, utilizando la siguiente ecuación booleana: (biosorption OR adsorption) AND fungi AND heavy metals AND acid mine drainage. El periodo de búsqueda comprendió artículos publicados entre los años 2015 y 2025. Los registros fueron exportados y organizados en una hoja de cálculo (Microsoft Excel), donde se sistematizó la información por las siguientes categorías, autor, año, ubicación, título, objetivo de estudio, especie fúngica, tipo de metal pesado, concentración inicial y final del metal, fuente (oro, cobre, plata), aspecto metodológico, variables evaluadas, y temáticas de interés. El proceso de selección de estudios se llevó a cabo siguiendo las etapas del enfoque PRISMA: identificación, cribado, elegibilidad e inclusión.

En la fase de identificación, se recuperaron un total de 2248 artículos. Posteriormente, se eliminaron los duplicados y se realizó el cribado mediante la lectura de títulos y resúmenes, seleccionándose inicialmente artículos provenientes de Scopus (n = 1), ScienceDirect (n = 25) Wiley (n = 4), Web Of Science (n = 6) y Redalyc (n = 8). Tras esta etapa, se identificaron 44 artículos potenciales, los cuales fueron evaluados en texto completo durante la fase de elegibilidad. Finalmente, en base a los criterios de inclusión y exclusión, se incluyeron en la revisión un total de 24 estudios.

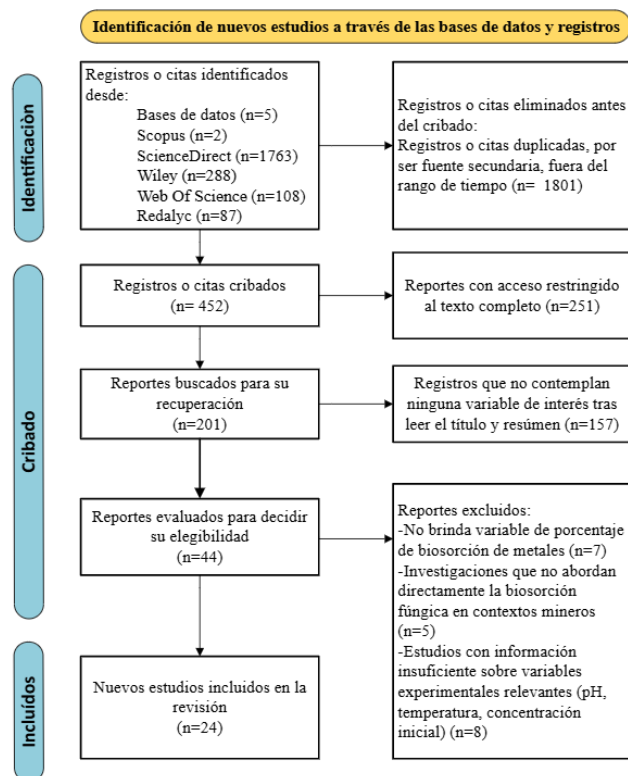


Figura 1: Diagrama de flujo PRISMA para el presente estudio

La selección de artículos se realizó de acuerdo con algunos criterios de inclusión y exclusión para identificar los estudios que cumplieran con nuestros objetivos. Los criterios de inclusión fueron: (1) artículos originales en inglés y español; (2) estudios sobre métodos para la biosorción con hongos de metales pesados de muestras de drenaje ácido de mina; (3) estudios enfocados en la biosorción con hongos de metales pesados obtenidos de minería bajo un enfoque de tecnologías libre de químicos; (4) estudios que reporten datos cuantitativos sobre remoción o concentración de metales. Los criterios de exclusión fueron: (1) artículos de revisión o fuentes secundarias; (2) estudios sin acceso al texto completo; (3) investigaciones que no aborden directamente la biosorción fúngica en contextos mineros; y (4) estudios con información insuficiente sobre variables experimentales relevantes (pH, temperatura, concentración inicial), la reproducibilidad del diseño experimental y la consistencia de los resultados reportados.

III. RESULTADOS

3.1 Aspectos generales

3.1.1 Descripción por área geográfica

Se evidencia que el país con mayor cantidad de publicaciones es China, con un total de 9 artículos identificados. En segundo lugar se encuentra Brasil, con 3 publicaciones. Posteriormente destacan Argentina, Turquía, Irán e India, con 2 artículos cada uno. Finalmente, países como Sudáfrica, Egipto, Italia, Suiza y Japón registran 1 estudio respectivamente.

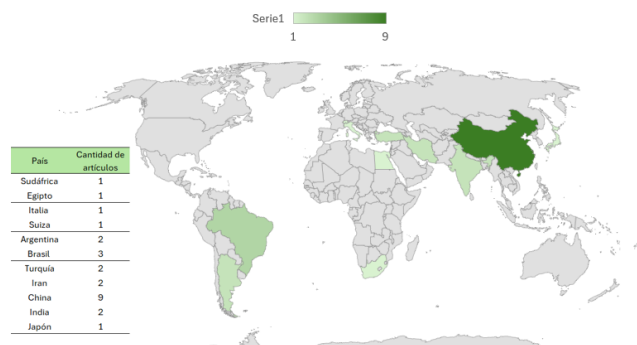


Figura 2: Descripción por área geográfica

3.1.2 Descripción por temporalidad

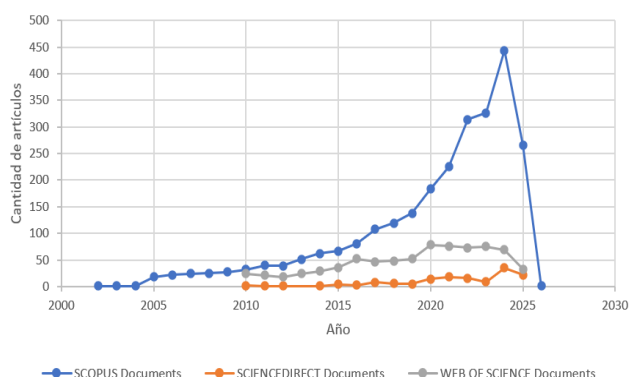


Figura 3: Evolución temporal de investigaciones

3.1.3 Red de coocurrencia de todas las palabras clave

En la Figura 4 se presenta el mapa de coocurrencia de palabras clave correspondiente al periodo total analizado, enfocado en los estudios sobre biorremediación y contaminación por metales pesados. Este análisis resulta fundamental para identificar las conexiones conceptuales entre los principales temas de investigación, reconocer tendencias emergentes y comprender la estructura del conocimiento científico en el campo ambiental [8]. A partir

de la base de datos revisada, se identificaron 353 palabras clave, de las cuales 47 cumplieron con el umbral mínimo de dos ocurrencias y fueron empleadas en el software VOSviewer para la elaboración del mapa. El resultado muestra 47 ítems agrupados en 4 clústeres, interconectados mediante 667 enlaces y con una fuerza total de enlace de 836, lo que evidencia una red moderadamente densa y con alta interrelación temática. En esta representación, la proximidad entre los nodos refleja el grado de relación entre los términos: una menor distancia indica una mayor afinidad conceptual [9]. Los colores diferencian los clústeres temáticos, que agrupan palabras clave con vínculos o enfoques de investigación comunes. Se distinguen claramente núcleos de interés como bioremediation, contamination, heavy metals, biochemistry y adsorption, que articulan el desarrollo científico en torno a la remediación ambiental, el impacto de los metales pesados y los procesos biotecnológicos aplicados a la descontaminación de suelos y aguas. Asimismo, los clústeres reflejan diferentes enfoques de investigación dentro del área estudiada. El clúster asociado a heavy metals y contamination evidencia el interés por los riesgos ambientales y sanitarios derivados de estos contaminantes, mientras que el grupo centrado en bioremediation, bacteria y bioaccumulation destaca el papel de los microorganismos y procesos biológicos en la remediación ambiental. Por otro lado, términos como adsorption, isotherm y scanning electron microscopy muestran la relevancia de los enfoques fisicoquímicos y metodológicos para optimizar la remoción de metales pesados. En conjunto, la red evidencia una evolución hacia investigaciones interdisciplinarias que integran herramientas biológicas, químicas y tecnológicas para enfrentar los problemas de contaminación ambiental.

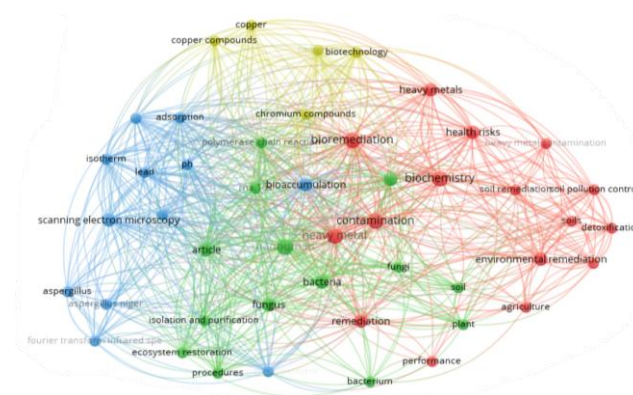


Figura 4: Red de coautores de la base de datos de Scopus

TABLA I
CONDICIONES DE LA MUESTRA RECOLECTADA

Especie de hongo	pH	T°	Metal	Concentración	Autor
<i>Aspergillus niger</i>	2	30°	Zn(II) Co(II) Cd(II)	105.12 mg/L 65.25 mg/L 229.5 mg/L	[10]
<i>Aspergillus sp.</i>	3.5	28°C	Mn(II)	500 mg/L	[11]
	3.5	25°C	U	4.46 mg/L	[12]
<i>Aspergillus terricola</i>	3	30°C	Cr(VI)	50mg/L	[13]
<i>Aspergillus tubingensis</i>	3	30°C	Mn(II) Zn(II)	1.832mg/L 1.663 mg/L	[14]
<i>Aspergillus flavus</i> <i>Aspergillus fumigatus</i>	2	30°C	Cr(VI)	500 mg/L	[15]
<i>Actinomucor sp.</i>	2	28°C	Cd(II)	300 mg/L	[16]
<i>Dekkera bruxellensis</i>	2.5	30 °C	Fe Mn	10-25 % de MAD 75% de cultivo nutritivo o Melasa	[17]
<i>Fusarium tricinctum</i>	2.94	30°C	Cu(II)	40 ug/mL	[18]
<i>Fusarium sp.</i>	2.7	31 °C	Cu Pb Ni Cd Cr	5238 mg kg-1 1939 mg kg-1 44 mg kg-1 38 mg kg-1 34 mg kg-1	[19]
<i>Hypocrea sp.</i>	2.7	32 °C	Cu Pb Ni Cd Cr	5239 mg kg-1 1939 mg kg-1 44 mg kg-1 38 mg kg-1 34 mg kg-1	[19]
<i>Penicillium janthinellum</i>	2.5-4.5	30°C	Pb(II) y Ni(II)	123mg/L 33mg/L	[20]
<i>Penicillium simplicissimum</i>	2	25 - 40 °C	Cr, Hg, Fe, Ni, Zn, U	0.3 mg/L 0.3mg/L 6.1mg/L 10.7mg/L 14.8mg/L 0.2mg/L	[21]
<i>Penicillium sp.</i>	3.5	25°C	U	4,46 mg/L	[12]
<i>Penicillium piscarium</i>	3.5	25°C	U	50 mg/L	[22]
<i>Penicillium ochrochloron</i>	5	27°C	Cu(II)	50 mg/L	[23]
	3.5	25°C	Cu Al	200 mg/L	[24]
<i>Talanomices sp.</i>	3.5	25°C	U	4.46 mg/L	[12]

La Tabla 1 presenta un compendio de estudios que caracterizan diferentes especies fúngicas con capacidad de tolerar y remover metales pesados bajo condiciones típicas del drenaje ácido de mina (DAM). En general, los valores de pH oscilan entre 2.0 y 5.0, lo que refleja ambientes altamente ácidos, análogos a los encontrados en los efluentes mineros, donde el pH bajo facilita la solubilización de metales. Estas condiciones son características in situ del DAM, confirmando la adaptación metabólica de los microorganismos a entornos extremos con elevada carga metálica y escasa disponibilidad de nutrientes. En este contexto, Bonilla [18] reportaron el crecimiento de *Fusarium tricinctum* a pH 2.94 y 30 °C, con una notable tolerancia al Cu(II) (40 µg/mL), evidenciando su potencial de

biorremediación en medios ácidos. De modo similar, Ayta [20] demostraron que *Penicillium janthinellum* puede sobrevivir entre pH 2.5–4.5 en presencia de Pb(II) y Ni(II), alcanzando concentraciones de hasta 123 mg/L y 30 mg/L respectivamente, lo cual indica una resistencia y capacidad de bioacumulación significativa en condiciones similares a las de un DAM.

Asimismo, especies del género *Aspergillus* destacan como organismos altamente resistentes. Hajahmadi [10] y Kumari [19] mostraron que *Aspergillus niger* prospera en pH 2–3 y temperaturas cercanas a 30 °C, removiendo metales como Zn(II), Cd(II) y Cu(II) con eficiencia notables (hasta 229.5 mg/L). Estas condiciones son comparables a las de los drenajes ácidos activos, donde las temperaturas

moderadas y la acidez extrema seleccionan cepas fúngicas acidófilas. En este rango, la presencia de *Penicillium simplicissimum* y *Dekkera bruxellensis* [21], [17] sugiere la coexistencia de especies adaptadas a fluctuaciones térmicas entre 25 °C y 40 °C, con resistencia a metales como Cr, Hg, Fe, Mn y Ni. Por último, los estudios de [19] sobre *Fusarium sp.* e *Hypocrea sp.* consolidan la evidencia de que los hongos

filamentosos pueden mantener un metabolismo activo en pH 2.7 y temperaturas de 31–32 °C, condiciones típicas de los sitios contaminados por DAM. La bioacumulación de Cu, Pb, Ni, Cd y Cr en niveles superiores a 5000 mg kg⁻¹ demuestra su papel en los procesos de inmovilización metálica natural.

TABLA II
PARÁMETROS DE CULTIVO Y CONDICIONES DE INCUBACIÓN EMPLEADAS EN ESTUDIOS DE BIOSORCIÓN FÚNGICA

Disponibilidad de nutrientes	Concentración de oxígenos	Incubación	Días	Autor
Medio con glucosa como fuente de carbono	200 rpm	-	-	[18]
Medio de malta (7 días de cultivo)	125 rpm	-	-	[20]
Caldo de dextrosa de patata	170 rpm	28°C	5	[16]
Czapek-Dox con glucosa, nitrato, fosfato	-	30°C	7	[13]
Fuente de Carbono: Glucosa (10 g/L). Fuente de Nitrógeno: Sulfato de amonio ((NH ₄) ₂ SO ₄).	120-150 rpm	-	-	[21]
→Medio nutritivo NB (Nitrógeno, Vitaminas, NaCl) →Melasa de caña de azúcar (Carbono, Nitrógeno, Minerales y Vitaminas (K,Ca,Mg,Fe)	150 rpm	30°C	7	[17]
Medio con glucosa, extracto de levadura y peptona	125 rpm)	-	-	[23]
Medio de extracto de Malta (ME)	150 rpm	25°C	-	[24]
Caldo Dextrosa de Papa (PDB) 7 días	150 rpm	25°C	7	[12]
Medio PDA y PDB (contiene papa, dextrosa y agar); se añadieron NO ₃ ⁻ -N y PO ₄ ³⁻ -P en AMD real para estimular crecimiento	160 rpm	30°C	7	[14]
Potato Dextrose Broth (PDB)	120 rpm	30	5	[15]

El metabolismo de los hongos en ambientes contaminados depende de un conjunto de factores físicos y nutricionales que determinan su capacidad de adaptación y eficiencia biotecnológica. En este contexto, la Tabla 2 recopila diversas condiciones experimentales que promueven el crecimiento y la actividad metabólica fúngica bajo escenarios similares a los del drenaje ácido de mina (DAM). Dichos parámetros reflejan la importancia de la disponibilidad de nutrientes, la oxigenación y la temperatura en la respuesta fisiológica de los hongos frente al estrés metálico y a la acidez del medio. Diversos autores coinciden en que la presencia de fuentes simples de carbono, como la glucosa, el extracto de malta o el caldo de dextrosa de papa, es esencial para sostener el metabolismo energético en condiciones adversas. Se demostraron que medios con glucosa y malta, acompañados de una agitación entre 125 y 200 rpm, favorecen la aireación y el crecimiento celular, reproduciendo las condiciones

microaeróbicas típicas de suelos y efluentes asociados al DAM [18][20].

Medios enriquecidos, como el Czapek-Dox [13], aportan fuentes balanceadas de carbono, nitrógeno y fósforo, esenciales para la síntesis enzimática y la estabilidad celular ante concentraciones elevadas de metales. Además, resaltan la eficacia de combinar nutrientes complejos melaza, extractos vitamínicos y sales minerales para estimular el metabolismo de hongos resistentes como *Penicillium* y *Dekkera* [21][17]. Estas formulaciones imitan la composición natural del drenaje ácido, donde coexisten iones metálicos, azúcares y micronutrientes que modulan la tolerancia fúngica. Se lograron utilizar medios como PDA y PDB, ajustados a pH ácido y complementados con nitratos y fosfatos, para replicar las condiciones in situ del DAM y estimular la expresión de enzimas implicadas en la detoxificación [14][15].

TABLA III
REACCIONES METABÓLICAS Y TIPO DE SORCIÓN

Medios selectivos	Reacciones metabólicas	Sorción	Autor
Agar Papa Dextrosa	Expresión de proteínas de oxidación-reducción y estrés oxidativo	Adsorción superficial (intercambio iónico en pared celular)	[18]
Agar Dextrosa Sabouraud	Interacción electrostática de iones metálicos	Biosorción en biomasa fúngica inactivada.	[20]

-	Intercambio iónico	Biosorción en biomasa fúngica inactivada.	[10]
-	Acumulación en la pared celular	Biosorción pasiva y bioacumulación	[11]
Caldo de dextrosa de patata	Acumulación en la pared celular	Biosorción pasiva	[16]
Czapek-Dox con glucosa, nitrato, fosfato	Grupos funcionales –OH, –NH y –C–O en la fijación de Cr(VI)	Fisisorción controlada por difusión en película	[13]
Agar Papa Dextrosa	-	Biosorción	[21]
Agar Malta Dox	Reducción de Fe ²⁺ y Mn ²⁺	Biosorción y bioacumulación	[17]
Agar Malta	-	Biosorción pasiva	[23]
Agar Malta	Precipita metales formando carbonatos	Biosorción	[19]
Dichloran 18% glycerol Y Agar	-	Biosorción	[24]
PDA suplementado con ácido tartárico al 3.5%	Producción de enzimas y secuestro intracelulares/extracelulares de U	Biosorción, biomineralización y bioacumulación	[12]
Potato Dextrose Agar Potato Dextrose Broth	Secreción de ácidos orgánicos y metabolitos	Adsorción electrostática, intercambio iónico, quelación y precipitación	[14]
Potato Dextrose Broth con Cr(VI)	Biotransformación enzimática de Cr(VI) → Cr(III)	Biosorción y bioacumulación	[15]

El comportamiento fisiológico de los hongos frente a ambientes contaminados con metales pesados se explica principalmente por sus reacciones metabólicas y mecanismos de sorción, los cuales determinan su eficacia en procesos de biorremediación. En este sentido, la Tabla 3 reúne diferentes estudios que evidencian las vías bioquímicas y los tipos de interacción entre los metales y las estructuras fúngicas, mostrando cómo estos organismos pueden neutralizar la toxicidad metálica a través de procesos tanto físicos como metabólicos.

En primer lugar, se observa que la biosorción tanto pasiva como activa es el mecanismo predominante en la mayoría de los hongos estudiados. Este proceso involucra la adsorción superficial de iones metálicos en la pared celular y la acumulación intracelular mediada por grupos funcionales como –OH, –NH₂ y –COOH [13], en la fijación de Cr(VI). De manera complementaria, Bonilla [18] evidencia que *Fusarium tricinctum* expresa proteínas relacionadas con el estrés oxidativo, lo que le permite reducir y estabilizar los metales mediante reacciones de oxidación-reducción, transformando especies metálicas tóxicas en formas menos solubles.

La interacción electrostática entre iones metálicos y biomoléculas fúngicas, junto con los procesos de intercambio iónico en la superficie celular, constituye la etapa inicial de la biosorción. Estos mecanismos pueden producirse incluso en biomasa inactivada, lo que evidencia

el papel estructural de la pared celular, particularmente de la quitina, los glucanos y las proteínas, en la captura eficiente de metales pesados. [10][20]

La acumulación de metales en la pared celular permite una inmovilización superficial eficiente, asociada a un proceso de biosorción pasiva independiente de la actividad metabólica. Esta forma de retención resulta relevante debido a su capacidad para reducir la biodisponibilidad de los contaminantes sin requerir consumo energético por parte del microorganismo [11][15].

Además de los mecanismos pasivos, algunos hongos presentan rutas metabólicamente activas que favorecen la transformación química de los metales mediante reacciones de reducción enzimática o procesos de precipitación. Transformaciones redox como la reducción de Fe³⁺ y Mn²⁺, así como la conversión de Cr(VI) a Cr(III), constituyen estrategias eficaces para disminuir la movilidad, solubilidad y toxicidad de determinados metales en el medio [17][19]. La precipitación de metales en forma de carbonatos o complejos orgánicos por aislamientos de *Aspergillus* y *Penicillium* favorece la neutralización del medio y el confinamiento estable de los iones metálicos. Estos procesos se ven reforzados por la secreción de ácidos orgánicos y metabolitos secundarios, los cuales intervienen en fenómenos de solubilización, quelación y biomineralización. En conjunto, la acción simultánea de mecanismos físico-químicos y biológicos contribuye a la neutralización del drenaje ácido de mina y a la estabilización de los metales en formas no biodisponibles [12][14].

TABLA IV
CAPACIDAD DE BIOSORCIÓN DE METALES PESADOS

Especie	Parámetros físico químicos		Concentración Mínima Inhibitoria (CMI)	Concentración final	% de sorción	Autor
	pH	T° (°C)				
<i>Fusarium tricinctum</i>	5	30	-	38 ug/L de Cu(II)	5.23% de Cu	[18]

<i>Penicillium janthinellum</i>	4.5	30	-	29,52 mg/L de Pb (II) 17,49 mg/L de Ni (II)	76% de Pb (II) Ni(II): 47% de Ni (II)	[20]
<i>Aspergillus niger</i>	5	25	-	8.41 mg/L de Zn(II) 7.83 mg/L de Co(II) 9.18mg/L de Cd(II)	92 % de Zn(II) 88 % de Co(II) 96% de Cd(II)	[10]
<i>Aspergillus sp.</i>	6.5	30	500mg/L de Mn(II)	113,95 mg/L de Mn(II)	77.21% de Mn(II)	[11]
<i>Actinomucor sp.</i>	7	40	-	275 mg/L de Cd(II)	45% de Cd(II)	[16]
<i>Aspergillus terricola</i>	3	30	-	1.85 mg/L de Cr (VI)	96.3% de Cr (VI)	[13]
<i>Penicillium simplicissimum</i>	3	25	-	0.01mg/L de Cr 0.03mg/L de Hg 0.02mg/L de Fe 0.01mg/L de Ni 0.02mg/L de Zn Menor a 0.01mg/L de U	95-99.9%	[21]
<i>Dekkera bruxellensis</i>	5.8	30	-	17.5 mg/L de Fe 20 mg/L de Mn	30% de Fe 20% de Mn	[17]
<i>Penicillium ochrochloron</i>	5	27	-	12.5 mg/L de Cu(II)	75% de Cu(II)	[23]
<i>Penicillium ochrochloron</i>	-	30	-	78 mg/L de Cu y Al	61%	[16]
<i>Penicillium sp.</i> <i>Talaromices sp.</i> <i>Aspergillus sp.</i>	-	25	8000 mg/L	0,892 mg/L de U	80% de U	[12]
<i>Aspergillus tubingensis</i>	5	30	-	0.54 mg/L de Mn (II) 0.87 mg/L de Zn (II)	94.6% de Mn (II) 91.3% de Zn (II)	[14]
<i>Aspergillus flavus</i> <i>Aspergillus fumigatus</i>	6	30	500 mg/L	100 mg/L de Cr(VI)	80% de Cr(VI)	[15]

Diversos estudios recientes han demostrado la capacidad de los hongos filamentosos para remover metales pesados en soluciones contaminadas, evidenciando su potencial como agentes biotecnológicos en la remediación ambiental. En particular, especies de los géneros *Penicillium*, *Aspergillus* y *Fusarium* destacan por su eficiencia en la biosorción de iones metálicos, incluso bajo condiciones fisicoquímicas variables. Aytar [20] reportaron que *Penicillium janthinellum* alcanzó remociones del 76% para Pb(II) y 47% para Ni(II) a un pH de 4.5 y 30 °C, mientras cepas como *Aspergillus niger* logran adsorber Zn(II) y Cd(II) con eficiencias cercanas al 96% [25]. De manera similar, se describieron una notable afinidad de *A. niger* hacia Cd(II) (hasta 96%) y Zn(II) (93%) [10], sugiriendo una fuerte interacción iónica entre los grupos funcionales de la pared celular fúngica (carboxilos, fosfatos y aminos) y los metales divalentes. Por su parte, estudios con *Actinomuor sp.* y *Aspergillus tereiola* [16][13] evidenciaron porcentajes de sorción superiores al 90% para Cd(II) y Cr(VI), respectivamente, bajo condiciones neutras y moderadas de temperatura. Estos resultados son relevantes desde el punto de vista ambiental, ya que sugieren que los hongos mantienen una alta eficiencia sin requerir condiciones extremas de operación, lo cual facilita su aplicación a escala

industrial o en sitios mineros con condiciones variables de pH.

Se destacaron el desempeño de *Penicillium simplicissimum*, con tasas de eliminación superiores al 99% para múltiples metales (Cr, Ni, Zn y U) [21], lo que evidencia su versatilidad en entornos con contaminantes mixtos, una condición común en efluentes mineros. De igual modo, Apramadha [17] demostraron que *Dekkera bruxellensis* logró retener entre 28–30% de Fe y hasta 20% de Mn, metales de particular relevancia en drenajes ácidos de mina.

En contraste, *Penicillium ochrochloron* presentó una remoción moderada de Cu(II) (61–75%) [24][23], mientras que *Aspergillus fumigatus* y *A. tubingensis* mostraron altos niveles de captura de Mn(II), Zn(II) y Cr(VI) (Ruan et al., 2024; Talukdar et al., 2022), alcanzando valores de hasta 94.6% de sorción. Estos resultados reflejan la plasticidad fisiológica de las especies del género *Aspergillus*, capaces de adaptarse a distintos tipos de iones metálicos. Finalmente, [18] evaluaron la capacidad biosorbente de *Fusarium tricinctum*, que mostró una eficiencia de 5.23% para Cu(II) a pH 5 y 30 °C. Aunque el valor es bajo comparado con otras especies, el estudio resulta relevante porque indica la sensibilidad del proceso ante la variación del pH y la afinidad selectiva del hongo hacia determinados iones.

TABLA V
COMPARACIÓN DE ESPECIES FÚNGICAS Y METALES PESADO REMOVIDOS

Metal Pesado	Especie fúngica más eficiente	% máximo de remoción	Condiciones óptimas reportadas	Referencia
Cd (II)	<i>Aspergillus niger</i>	96 %	pH: 5; 25 °C	[10]
Zn (II)	<i>Aspergillus tubingensis</i>	91.3 %	pH: 5; 30 °C	[14]
Cr (VI)	<i>Aspergillus terricola</i>	96.3 %	pH: 3; 30 °C	[13]
Pb (II)	<i>Penicillium janthinellum</i>	76 %	pH: 4; 30 °C	[20]
U	<i>Penicillium simplicissimum</i>	95 -99 %	pH: 3; 25 °C	[21]
Mn (II)	<i>Aspergillus tubingensis</i>	94.6 %	pH: 5; 30 °C	[14]
Fe	<i>Dekkera bruxellensis</i>	30 %	pH: 5; 30 °C	[17]

La Tabla V permite comparar de manera integrada la eficiencia biosorbente de las principales especies fúngicas reportadas en la literatura. En general, las especies del género *Aspergillus* mostraron mayor eficiencia para la remoción de Cd(II), Zn(II), Cr(VI) y Mn(II), mientras que *Penicillium simplicissimum* destacó por su elevada capacidad de remoción de Pb (II) y U. Estos resultados evidencian que la eficiencia de biosorción depende tanto de la especie utilizada como de las condiciones fisicoquímicas del medio, especialmente el pH y la temperatura.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian que la eficiencia de biosorción de los hongos filamentosos frente a metales pesados depende estrechamente de las condiciones fisicoquímicas y del tipo de especie utilizada. En general, las especies del género *Aspergillus* y *Penicillium* demostraron mayor tolerancia en medios ácidos (pH 2–5) y temperaturas moderadas (25–30 °C), lo que refleja su adaptación natural a ambientes similares a los drenajes ácidos de mina (DAM). Estudios como los de Aytar [20] y Hajahmadi [10] evidenciaron porcentajes de remoción superiores al 90 % para iones como Pb(II), Zn(II) y Cd(II), confirmando la eficacia de la adsorción pasiva en la pared celular. Este comportamiento se asocia a la presencia de grupos funcionales (carboxilos, fosfatos y aminos) que actúan como sitios activos de unión metálica. Sin embargo, se observaron diferencias metodológicas importantes entre los estudios analizados, debido a que algunos emplearon biomasa viva y otros biomasa inactivada o medios enriquecidos, lo que influye directamente en la capacidad biosorbente y dificulta la comparación directa de las eficiencias reportadas. Por otro lado, la diversidad metabólica de las especies fúngicas demuestra que la biosorción no constituye un proceso uniforme, sino multifactorial, en el que intervienen mecanismos físicos, químicos y biológicos. De acuerdo con Masoudi [16] y Mohamed [13], hongos como *Actinomyces* sp. y *Aspergillus terricola* emplean tanto adsorción superficial como bioacumulación intracelular para fijar Cd(II) y Cr(VI), alcanzando eficiencias superiores al 90 %. Asimismo, *Penicillium simplicissimum* [21] mostró alta capacidad de remoción multimetálica, eliminando hasta el 99

% de Cr, Ni, Zn y U, lo cual resulta particularmente relevante en contextos mineros donde los efluentes presentan mezclas complejas de contaminantes.

Los resultados también revelan que el desempeño biosorbente se encuentra condicionado por factores metabólicos y nutricionales. Medios de cultivo ricos en carbono y nitrógeno, como extracto de malta, glucosa o melaza, favorecieron la producción de biomasa activa y la expresión de enzimas relacionadas con la tolerancia metálica, según lo reportado por Apramadha [17] y Ruan [14]. Asimismo, la adecuada aireación y disponibilidad de oxígeno fueron determinantes para mantener la actividad metabólica, especialmente en especies sensibles a variaciones extremas de pH. Estas observaciones sugieren que el control de las condiciones de cultivo constituye un factor clave para optimizar la biosorción en aplicaciones piloto o industriales.

No obstante, una limitación importante identificada en la literatura es que la mayoría de los estudios fueron desarrollados bajo condiciones controladas de laboratorio y utilizando soluciones sintéticas, las cuales no reproducen completamente la complejidad química de los drenajes ácidos de mina reales. La presencia simultánea de múltiples metales, sulfatos y variaciones fisicoquímicas del medio podría alterar significativamente la eficiencia observada experimentalmente. En este sentido, aunque los resultados demuestran un elevado potencial biotecnológico, todavía son necesarios estudios a escala piloto y evaluaciones en condiciones reales que permitan determinar la viabilidad operativa y la escalabilidad de la biosorción fúngica en ambientes mineros contaminados.

Finalmente, la comparación global de las eficiencias de remoción permitió identificar a *Aspergillus niger*, *A. tubingensis* y *Penicillium simplicissimum* como las especies con mayor potencial biosorbente. Sin embargo, la variabilidad observada entre especies y tipos de metales evidencia la necesidad de seleccionar cepas específicas según las características de cada matriz contaminante. A partir de los estudios analizados, se propone un enfoque conceptual basado en tres factores clave para la selección de hongos biosorbentes: tolerancia a condiciones ácidas, capacidad de remoción multimetálica y estabilidad operativa bajo diferentes condiciones fisicoquímicas. Desde una perspectiva ambiental, estos hallazgos respaldan el

desarrollo de estrategias integradas de biorremediación que combinen microorganismos adaptados, optimización de parámetros fisicoquímicos y tecnologías complementarias para mejorar la estabilidad y eficiencia del tratamiento en campo.

V. CONCLUSIONES

Las especies fúngicas evaluadas demostraron una alta capacidad de supervivencia y adaptación en condiciones ácidas y con presencia de metales pesados, propias de los drenajes ácidos de mina. Los géneros *Aspergillus*, *Penicillium* y *Fusarium* destacaron por su resistencia y eficiencia de remoción, con registros superiores a 90 % para Cd(II), Zn(II) y Pb(II). Este comportamiento confirma que la acidez no limita la actividad metabólica de los hongos, sino que puede incluso favorecer la exposición de grupos funcionales activos en la pared celular, aumentando la afinidad por los iones metálicos. Dichas características posicionan a los hongos filamentosos como agentes clave en la mitigación biotecnológica de efluentes mineros.

Los factores nutricionales y de cultivo fueron determinantes para potenciar la actividad biosorbente. El suministro de fuentes de carbono simples como glucosa, melaza o extracto de malta, junto con condiciones de agitación controlada y temperaturas moderadas, generó una respuesta metabólica favorable para la síntesis de enzimas y la formación de biomasa activa. Se evidenció que los hongos responden de manera eficiente a medios enriquecidos con nitrógeno y fósforo, logrando una mayor estabilidad frente al estrés metálico. Este conocimiento es esencial para el diseño de sistemas de biorremediación que integren medios económicos y sostenibles adaptados a las características del drenaje ácido de mina. Las reacciones metabólicas y mecanismos de sorción observados confirman la coexistencia de procesos pasivos y activos en la inmovilización de metales. La adsorción superficial, la bioacumulación intracelular y la biotransformación enzimática particularmente la reducción de Cr(VI) a Cr(III) y la precipitación de carbonatos metálicos fueron los principales modos de acción identificados. La combinación de interacciones electrostáticas, intercambio iónico y quelación explica la alta eficiencia observada en especies como *Aspergillus niger* y *Penicillium simplicissimum*. Estos mecanismos sugieren que la biomasa fúngica, incluso inactiva, podría emplearse como biofiltro natural o componente de materiales híbridos en la descontaminación minera.

Las eficiencias de remoción alcanzadas superan el 90 % en la mayoría de los casos, destacando la versatilidad de los hongos frente a metales como Cr(VI), Zn(II), Mn(II) y Cd(II). Sin embargo, se observó variabilidad entre especies, lo que indica la necesidad de seleccionar cepas específicas para cada tipo de metal y matriz contaminada. Resultados como los obtenidos con *Penicillium simplicissimum* y *Aspergillus tubingensis* evidencian la posibilidad de

remediar efluentes complejos sin recurrir a tratamientos químicos. Estas conclusiones respaldan la integración de la biosorción fúngica como alternativa ecológica, escalable y económicamente viable para la gestión sostenible de relaves y drenajes ácidos de mina.

REFERENCIAS

- [1] Dinakarkumar, Y., Ramakrishnan, G., Gujjula, K. R., Vasu, V., Balamurugan, P., & Murali, G. (2024). Fungal bioremediation: An overview of the mechanisms, applications and future perspectives. *Environmental Chemistry And Ecotoxicology*, 6, 293-302. <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.07.002>
- [2] Dong, Y., Zan, J., & Lin, H. (2023). Bioleaching of heavy metals from metal tailings utilizing bacteria and fungi: Mechanisms, strengthen measures, and development prospect. *Journal Of Environmental Management*, 344, 118511. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118511>
- [3] Tang, H., Xiang, G., Xiao, W., Yang, Z., & Zhao, B. (2024). Microbial mediated remediation of heavy metals toxicity: mechanisms and future prospects. *Frontiers In Plant Science*, 15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1420408>
- [4] Dusegemungu, L., Kasali, G., Gwanama, C., & Mubemba, B. (2021). Overview of fungal bioleaching of metals. *Environmental Advances*, 5, 100083. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100083>
- [5] El-Sayed, M. T., Ezzat, S. M., Taha, A. S., & Ismaiel, A. A. (2021). Iron stress response and bioaccumulation potential of three fungal strains isolated from sewage-irrigated soil. *Journal Of Applied Microbiology*, 132(3), 1936-1953. <https://doi.org/10.1111/jam.15372>
- [6] Liu, M., Liu, X., Wu, Z., Zhang, Y., Meng, Q., & Yan, L. (2022). Sulfur-modified *Pleurotus ostreatus* spent substrate biochar enhances the removal of cadmium in aqueous solution: Characterization, performance, mechanism. *Journal Of Environmental Management*, 322, 115900. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115900>
- [7] Genderson (2022). Análisis de PRISMA como metodología para revisión sistemática: Una aproximación general. *Revista [Nombre de la revista si aplica]*, 8(Sup1), 339–360. <https://doi.org/10.18310/2446-4813.2022v8nsup1p339-360>
- [8] Zhao, Y., et al. (2022). Immobilization of metal(loid)s from acid mine drainage by biological soil crusts through biomineralization. *Science of the Total Environment*, 830, 154743. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154743>
- [9] Paolone, G., et al (2025). A map of the research about lighting systems in the 1995–2024 time frame. *Computers*, 14(8), 313. <https://doi.org/10.3390/computers14080313>
- [10] Hajahmadi, M., et al. (2015). Biosorption of heavy metals from acid mine drainage by fungal strains isolated from mining sites. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 4, 37–43. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212371715300032>
- [11] Wang, Y., et al. (2023). Biosorption and bioaccumulation of manganese by *Aspergillus* sp. isolated from acid mine drainage. *Journal of Water Process Engineering*, 55, 10724. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772416623000724>
- [12] Coelho, E., et al. (2019). Resistant fungi isolated from contaminated uranium mine in Brazil shows a high capacity to uptake uranium from water. *Chemosphere*, 248, 126068. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126068>
- [13] Mohamed, E. F., et al. (2017). Mechanistic and analytical understanding of biological immobilization of chromium metal ions from waste-sites. *Environmental Advances*, 2(3), 100152. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266679082100152X>
- [14] Ruan, Z., et al. (2024). Uranium and manganese biosorption by *Aspergillus tubingensis* isolated from acid mine drainage: Mechanisms

- and modeling. *Journal of Water Process Engineering*, 67, 105927.
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105927>
- [15] Talukdar, D., et al. (2022). Mechanistic and analytical understanding of biological immobilization of chromium metal ions from waste-sites. *Journal Of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107498.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107498>
- [16] Masoudi, R., et al. (2017). Mycoremediation of cadmium from aqueous solution using newly isolated *Actinomucor* sp.: Isotherm and kinetic studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(3), 2435–2443.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1944398624123697>
- [17] Apramadha, M. S., et al. (2023). Biosorption of heavy metals from acid mine drainage using yeast *Dekkera bruxellensis*. *Polish Journal of Environmental Studies*, 32(3), 2815–2825.
<https://doi.org/10.12911/22998993/166556>
- [18] Bonilla, J. O., et al. (2021). Characterization of copper stress response in *Fusarium tricinctum* M6: A metal-resistant microorganism isolated from an acid mine drainage-affected environment. *Journal of Hazardous Materials*, 412, 125216.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125216>
- [19] Kumari, P., et al. (2015). Biosorption and bioaccumulation potential of *Aspergillus* and *Fusarium* species for removal of multiple heavy metals from contaminated effluents. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4349-z>
- [20] Aytar, P., et al. (2018). Biosorption characteristics of *Penicillium janthinellum* for removal of heavy metals from aqueous solution. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15(6), 1375–1386. <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0354-5>
- [21] Bakatula, E. N., et al. (2015). Biosorption of heavy metals from acid mine drainage by fungi: Mechanisms and efficiency evaluation. *Journal of Geochemical Exploration*, 159, 79–87.
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.04.012>
- [22] Coelho, et al. (2020). Bioremediation of water contaminated with uranium using *Penicillium piscarium*. *Biotechnology Progress*, 36(5), e30322. <https://doi.org/10.1002/btpr.3032>
- [23] Miranda, E., et al. (2019). Biosorption of copper by *Penicillium ochrochloron* isolated from polluted environments. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(10), 629.
<https://doi.org/10.1007/s10661-019-7399-y>
- [24] Aytar, P., et al. (2016). Biosorption of copper and aluminum by *Penicillium ochrochloron*: Equilibrium, kinetic, and thermodynamic studies. *Desalination and Water Treatment*, 57(23), 10664–10675.
<https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1098567>
- [25] Cecchi, G., Marescotti, P., Di Piazza, S., Zappatore, S., & Zotti, M. (2019). Fungal richness in the extreme environments of the Libiola mine (eastern Liguria, Italy): correlations among microfungi, lithology, mineralogy, and contaminants. *Environmental Earth Sciences*, 78(17).
<https://doi.org/10.1007/s12665-019-8553-0>