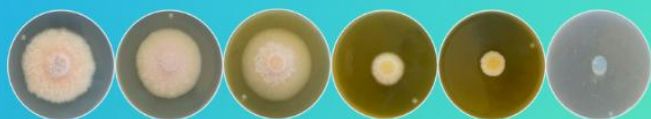


Leandris Argentel-Martínez
Ofelda Peñuelas-Rubio
Jaime Garatuza-Payán
Editores

Investigaciones Biológicas, Agrícolas y Ambientales de México

Volumen II



Pantanal Editora

2025

Leandris Argente!-Martínez
Ofelda Peñuelas-Rubio
Jaime Garatuza-Payán
Editores

**Investigaciones Biológicas, Agrícolas
y Ambientales de México**
Volumen II



Pantanal Editora

2025

Copyright© Pantanal Editora

Editor Jefe: Dr. Alan Mario Zuffo

Editores Ejecutivos: Dr. Jorge González Aguilera y Dr. Bruno Rodrigues de Oliveira

Diseño: El editor. **Diseño y arte:** el editor. Imágenes de portada y contraportada: Canva.com. **Reseña:** Autor(es), organizador(es) y editor.

Consejo editorial

Grado académico y nombre

Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos
Profa. MSc. Adriana Flávia Neu
Profa. Dra. Albys Ferrer Dubois
Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior
Profa. MSc. Aris Verdecia Peña
Profa. Arisleidis Chapman Verdecia
Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva
Prof. Dr. Bruno Gomes de Araújo
Prof. Dr. Caio Cesar Enside de Abreu
Prof. Dr. Carlos Nick
Prof. Dr. Claudio Silveira Maia
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos
Prof. Dr. Cristiano Pereira da Silva
Profa. Ma. Dayse Rodrigues dos Santos
Prof. MSc. David Chacon Alvarez
Prof. Dr. Denis Silva Nogueira
Profa. Dra. Denise Silva Nogueira
Profa. Dra. Dennyura Oliveira Galvão
Prof. Dr. Elias Rocha Gonçalves
Prof. Me. Ernane Rosa Martins
Prof. Dr. Fábio Steiner
Prof. Dr. Fabiano dos Santos Souza
Prof. Dr. Gabriel Andres Tafur Gomez
Prof. Dr. Hebert Hernán Soto Gonzáles
Prof. Dr. Hudson do Vale de Oliveira
Prof. MSc. Javier Revilla Armesto
Prof. MSc. João Camilo Sevilla
Prof. Dr. José Luis Soto Gonzales
Prof. Dr. Julio Cezar Uzinski
Prof. MSc. Lucas R. Oliveira
Prof. Dr. Luciano Façanha Marques
Profa. Dra. Keyla Christina Almeida Portela
Prof. Dr. Leandris Argentele-Martínez
Profa. MSc. Lidiene Jaqueline de Souza Costa Marchesan
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann
Prof. MSc. Marcos Pisarski Júnior
Prof. Dr. Marcos Pereira dos Santos
Prof. Dr. Mario Rodrigo Esparza Mantilla
Profa. MSc. Mary Jose Almeida Pereira
Profa. MSc. Núbia Flávia Oliveira Mendes
Profa. MSc. Nila Luciana Vilhena Madureira
Profa. Dra. Patrícia Maurer
Profa. Dra. Queila Pahim da Silva
Prof. Dr. Rafael Chapman Auty
Prof. Dr. Rafael Felipe Ratke
Prof. Dr. Raphael Reis da Silva
Prof. Dr. Renato Jaqueto Goes
Prof. Dr. Ricardo Alves de Araújo (*In Memoriam*)
Profa. Dra. Sylvana Karla da Silva de Lemos Santos
Prof. Dr. Tayronne de Almeida Rodrigues
Prof. Dr. Ugur Azizoglu
Prof. Dr. Wéverson Lima Fonseca
Prof. MSc. Wesclen Vilar Nogueira
Profa. Dra. Yilan Fung Boix
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme

Institución

OAB/PB
Mun. Faxinal Soturno e Tupanciretã
UO (Cuba)
IF SUDESTE MG
Facultad de Medicina (Cuba)
ISCM (Cuba)
UFESSPA
UEA
UNEMAT
UFV
AJES
UFGD
UEMS
IFPA
UNICENTRO
IFMT
UFMG
URCA
ISEPAM-FAETEC
IFG
UEMS
UFF
(Colômbia)
UNAM (Peru)
IFRR
UCG (México)
Rede Municipal de Niterói (RJ)
UNMSM (Peru)
UFMT
SED Mato Grosso do Sul
UEMA
IFPR
Tec-NM (México)
Consultório em Santa Maria
UFJF
UEG
FAQ
UNAM (Peru)
SEDUC/PA
IFB
IFPA
UNIPAMPA
IFB
UO (Cuba)
UFMS
UFPI
UFG
UEMA
IFB
Sec. Mun. de Educação, Cultura e Tecnologia de Araripe
Universidade Kayseri, Türkiye
UFPI
FURG
UO (Cuba)
UFT

Consejo Científico Técnico
- Esp. Joacir Mário Zuffo Júnior
- Esp. Maurício Amormino Júnior
- Lda. Rosalina Eufrausino Lustosa Zuffo

Hoja de catálogo

Catalogación en la publicación
Elaborada por Bibliotecaria Janaina Ramos – CRB-8/9166

I62

Investigaciones biológicas, agrícolas y ambientales de México - Volumen II / Organização de Leandris Argente-Martínez, Ofelda Peñuelas-Rubio, Jaime Garatuza-Payán. – Nova Xavantina-MT: Pantanal, 2025. 250p. ; il.

Libro en PDF

ISBN 978-65-85756-56-3

DOI <https://doi.org/10.46420/9786585756563>

1. Ciencia. 2. Innovación tecnológica. I. Argente-Martínez, Leandris (Organizador). II. Peñuelas-Rubio, Ofelda (Organizador). III. Garatuza-Payán, Jaime (Organizador). IV. Título.

CDD 500

Índice para catálogo sistemático

I. Ciencia



Nuestros libros electrónicos son gratuitos y se permite el acceso público, la descarga y el intercambio, pero solicitamos que se dé el debido crédito a Pantanal Editora y también a los organizadores y autores. Sin embargo, no se permite el uso de libros electrónicos con fines comerciales, salvo autorización expresa de los autores y acuerdo de Pantanal Editora.

Pantanal Editora

Rua Abaete, 83, Sala B, Centro. CEP: 78690-000.
Nova Xavantina – Mato Grosso – Brasil.
Telefone (66) 99682-4165 (Whatsapp).
<https://www.editorapantanal.com.br>
contato@editorapantanal.com.br

Prólogo

El presente libro se titula: “**Investigaciones Biológicas, Agrícolas y Ambientales de México, Volumen II**”. Ha sido conformado por un grupo de estudios experimentales y de extensión, enfocados la generación de nuevos conocimientos.

El libro está conformado por tres sesiones. La primera: “**Investigaciones biológicas**” agrupa trabajos con microorganismos promotores del desarrollo, estudio de potencial antifúngico y antagonistas de microorganismos y extractos vegetales. La segunda sesión: **Investigaciones agrícolas**” aglutina el quehacer científico para la producción de hortalizas y cereales, principalmente en condiciones experimentales de campo abierto. Estas investigaciones contribuyen a la seguridad y soberanía alimentaria nacional y a la mitigación de impactos de condiciones edafoclimáticas estresantes. La tercera sección “**Investigaciones ambientales**” confirma la importancia de cereales adaptables a condiciones climáticas desfavorables. Además otro de los trabajos aborda del uso de los manglares para la funcionalidad y estabilidad de ecosistemas costeros. En esta sección también se presenta una contribución que enfatiza en la importancia de la actividad fúngica en el saneamiento de suelos ante la presencia de metales pesados.

Se agradece a todos los autores de los respectivos capítulos, en su mayoría investigadores nacionales de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (**SECIHTI**) adscritos a diferentes centros de Educación Superior de los Estados Unidos Mexicanos. Gracias a su quehacer científico generan productos que, en medios como este, amplían las capacidades y posibilidades de acceso universal al conocimiento. Un reconocimiento especial a los miembros del Cuerpo Académico Consolidado **ITVAYA-CA-3, del Tecnológico Nacional de México, Campus Valle del Yaqui**, por su contribución a las tres secciones aquí agrupadas.

Los autores

Resumen

Prólogo.....	4
Ciencias biológicas	7
Capítulo 1.....	8
Uso de microorganismos promotores del desarrollo del maíz (DK-4050) bajo régimen de riego deficitario controlado	8
Capítulo 2.....	20
Caracterización fitoquímica preliminar y actividad antifúngica <i>in vitro</i> de <i>Parkinsonia aculeata</i> sobre <i>Fusarium</i> del maíz	20
Capítulo 3.....	28
Efectos de <i>Enterobacter cloacae</i> y <i>Priestia megaterium</i> en la absorción de agua y germinación de de frijol	28
Capítulo 4.....	40
Caracterización Biofísica de autohidrolizados de calamar gigante (<i>Dosidicus gigas</i>) mediante dispersión de rayos X de ángulo pequeño.....	40
Capítulo 5.....	49
Evaluación de la calidad de yogur con pitaya (<i>Stenocereus thurberi</i>) elaborado con una combinación de lactobacilos	49
Capítulo 6.....	61
Extracto del wereke (<i>Ibervillea sonora</i>) como antagonista de <i>Fusarium</i> spp	61
Ciencias agrícolas	73
Capítulo 7.....	74
Optimización del cultivo de trigo cristalino mediante el uso de enmiendas (yeso agrícola) para mejorar la calidad del grano	74
Capítulo 8.....	81
Índices de vegetación derivados de imágenes digitales para el análisis de la fenología y el desarrollo del cultivo de trigo	81
Capítulo 9.....	87
Efecto de diferentes estrategias de fertilización orgánica en el crecimiento de plántulas de Chile Piquín (<i>Capsicum annuum</i> var. <i>aviculare</i>) bajo condiciones protegidas	87
Capítulo 10	97
Evaluación de híbridos de maíz cultivados en suelo en condiciones de salinidad	97
Capítulo 11	107
Efectos del QuitoMax® en la germinación de plántulas de tomate de las variedades Amalia y Claudia en condiciones semicontroladas	107
Capítulo 12	122
Tratamiento a la semilla de maíz y su efecto en la calidad fisiológica en dos condiciones de almacenamiento	122
Capítulo 13	133

Aceites esenciales y caldos minerales como tratamineto pregerminativo en semilla de maíz	133
Capítulo 14	144
Productividad de melón Zacapa con diferentes densidades de siembra en Michoacán.....	144
Ciencias ambientales	156
Capítulo 15	157
Triticale: una opción sustentable para forraje bajo condiciones agroecológicas en el sur de Sonora	157
Capítulo 16	162
Caracterización ambiental multi-hábitat de islas artificiales, para la gestión de sitios de anidación de aves acuáticas en Bahía del Tóbari, Sonora, México	162
Capítulo 17	200
Importancia del aislamiento de hongos en suelos contaminados con metales pesados para biorremediación y biotecnología ambiental	200
Capítulo 18	219
Políticas desarticuladas sobre cuencas, manglares y pesca: impactos regionales y respuestas comunitarias desde El Topón, Pijijiapan, Chiapas.....	219
Índice	248
Editores.....	249

Ciencias biológicas



Importancia del aislamiento de hongos en suelos contaminados con metales pesados para biorremediación y biotecnología ambiental

Recibido em: 29/04/2025

Aprobado em: 01/05/2025

 10.46420/9786585756563cap17

Oscar Abraham Flores-Amaro 

Francisco Javier Avelar-González 

Pamela Romo-Rodríguez* 

INTRODUCCIÓN

La contaminación por metales pesados es un problema ambiental y de salud pública de gran relevancia en México y en muchas partes del mundo (Osuna-Martínez et al., 2021). Estos elementos, debido a su toxicidad y persistencia en el medio ambiente, representan un desafío considerable para la gestión de residuos generados por actividades industriales, mineras y agrícolas (Gamba; Rojas, 2024). Entre los metales pesados más preocupantes en el contexto mexicano se encuentran el plomo (Pb), el arsénico (As) y el cromo (Cr), que están estrechamente relacionados con actividades humanas que han contribuido a su acumulación en suelos, cuerpos de agua y organismos vivos (Covarrubias; Cabriales, 2017).

Los metales pesados son elementos químicos de alta densidad y toxicidad que pueden bioacumularse en organismos vivos y biomagnificarse a lo largo de la cadena trófica (Sonone et al., 2020). Su liberación en el ambiente se debe principalmente a actividades antropogénicas que han contribuido a su dispersión y acumulación en distintos ecosistemas (Häder et al., 2020). En México, una de las fuentes más relevantes de contaminación por Pb es la actividad minera, particularmente en estados como Zacatecas y Chihuahua, donde se han reportado altos niveles de Pb en suelos y cuerpos de agua cercanos a minas activas y abandonadas (Briseño-Bugarín et al., 2024). En el caso del As, su presencia en el ambiente está relacionada con la minería y con la disolución de minerales arsenicales en fuentes de agua subterránea (Taneja et al., 2023). Estados como Durango y Guanajuato han registrado niveles preocupantes de As en agua potable, superando los límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) (Talamantes, 2024). Por su parte, el Cr es un contaminante frecuente en zonas industriales dedicadas al curtido de pieles y a la galvanoplastia, como es el caso de Guanajuato, donde se han reportado

* Autor correspondiente: pamela.rr@pabellon.tecnm.mx

descargas de efluentes con alto contenido de cromo hexavalente (Cr^{6+}), una de las formas más tóxicas de este metal, con impactos negativos en la calidad del agua y los suelos agrícolas (Jee et al., 2024).

La persistencia de los metales pesados en el ambiente se debe a que no pueden degradarse, sino que se acumulan en suelos, sedimentos y cuerpos de agua (Singh y Steinnes, 2020). Su toxicidad varía según la concentración, la forma química y el tiempo de exposición, afectando tanto a los ecosistemas como a la salud humana (Mittra et al., 2022). El Pb tiende a unirse a partículas del suelo, lo que limita su movilidad, aunque puede ser absorbido por las plantas e ingresar en la cadena alimenticia (Bouida et al., 2022). El As, por su parte, puede presentarse en formas orgánicas e inorgánicas, siendo estas últimas más tóxicas y móviles en el agua subterránea, dependiendo del pH y de la presencia de otros compuestos (Raju, 2022). El cromo trivalente (Cr^{3+}) es menos tóxico, mientras que el Cr^{6+} es altamente soluble y carcinógeno (Hussain et al., 2025).

Los efectos de estos metales en la salud humana son preocupantes. La exposición al Pb afecta el sistema nervioso central, especialmente en niños, causando retraso en el desarrollo cognitivo y daño neurológico irreversible (Shvachiy et al., 2020). En el caso del As, su exposición prolongada puede provocar arsenicismo, que se manifiesta con lesiones cutáneas, daño hepático y cáncer de piel y vejiga (Gupta, 2022). Se han registrado casos de intoxicación crónica por As debido al consumo de agua contaminada (Kumar et al., 2021). El Cr^{6+} es un potente carcinógeno que afecta principalmente el sistema respiratorio cuando se inhala, provocando mutaciones genéticas y cáncer de pulmón (Álvarez et al., 2021).

Dado el impacto negativo de los metales pesados en los ecosistemas y en la salud humana, es necesario implementar estrategias de remediación que permitan reducir su toxicidad y mitigar su presencia en el ambiente. Existen métodos fisicoquímicos ampliamente utilizados para este propósito, como la precipitación química, la adsorción con materiales sintéticos, el intercambio iónico y la filtración por membranas (Pathak et al., 2024). Aunque estas técnicas pueden ser efectivas, a menudo presentan altos costos operativos y generan residuos secundarios que requieren un manejo adecuado (Rafique et al., 2022).

Frente a estas limitaciones, la biorremediación ha surgido como una alternativa biotecnológica para la descontaminación de suelos y cuerpos de agua impactados por metales pesados (Rahman y Singh, 2020). Este enfoque se basa en el uso de microorganismos y plantas para inmovilizar, transformar o reducir la toxicidad de los contaminantes (Xia et al., 2020; Li et al., 2022). Una de las principales ventajas de la biorremediación es que puede aplicarse *in situ*, evitando el transporte de suelos contaminados y reduciendo los costos asociados a los procesos de remediación tradicionales (Sales da Silva et al., 2020). Además, los microorganismos utilizados en biorremediación pueden ser autóctonos del sitio contaminado, lo que les confiere una mayor resistencia a las condiciones ambientales adversas (Bala et al., 2022).

Sin embargo, la biorremediación también presenta ciertas limitaciones. A diferencia de otros compuestos orgánicos, los metales pesados no pueden ser degradados, por lo que las estrategias

biológicas se centran en su inmovilización, bioadsorción o transformación en formas menos tóxicas (Priya et al., 2022; Flores-Amaro et al., 2024). La eficiencia del proceso depende de múltiples factores, como el pH, la temperatura y la concentración de los contaminantes (Schlögl et al., 2023). No obstante, investigaciones recientes han demostrado que ciertos hongos y bacterias poseen una gran capacidad para adsorber y reducir metales pesados, transformándolos en compuestos menos dañinos (Priya et al., 2022). Por ejemplo, el hongo *Aspergillus niger* ha mostrado una notable capacidad de bioadsorción de Pb y Cr en efluentes industriales, lo que sugiere su potencial aplicación en la biorremediación de sitios contaminados (Qadir et al., 2022).

El aislamiento de microorganismos autóctonos de suelos contaminados es una estrategia clave para la mejora de los procesos de biorremediación. Los microorganismos que han evolucionado en ambientes con alta concentración de metales pesados han desarrollado mecanismos de resistencia que les permiten sobrevivir y adaptarse a estas condiciones extremas (Wani et al., 2022). La identificación y selección de estas cepas es fundamental para optimizar su aplicación en la biorremediación de suelos y aguas contaminadas.

Entre los microorganismos con potencial biotecnológico se encuentran bacterias del género *Pseudomonas*, capaces de reducir Cr^{6+} a su forma menos tóxica, y hongos como *Penicillium*, que inmovilizan arsénico mediante procesos de biomineralización (Chandra; Banik, 2021; Shi et al., 2023). El estudio de estas especies no solo es relevante para la biorremediación, sino también para el desarrollo de aplicaciones en la producción de enzimas resistentes a metales, la generación de nanopartículas y la recuperación de metales valiosos a partir de desechos industriales mediante bio-minería.

En México, diversas investigaciones han identificado cepas bacterianas altamente resistentes a Pb y Cr en suelos contaminados, lo que abre nuevas posibilidades para la implementación de tecnologías de biorremediación adaptadas a las condiciones locales (Guzmán-Moreno et al., 2022; Martínez-Aldape et al., 2024). Estos avances destacan la importancia del aislamiento y caracterización de microorganismos como un paso esencial en el diseño de estrategias efectivas para la recuperación de ambientes impactados por metales pesados.

MATERIAL Y MÉTODOS

Revisión bibliográfica

Para la fundamentación teórica del presente capítulo, se llevó a cabo una revisión bibliográfica enfocada en la identificación de investigaciones relevantes sobre el aislamiento de hongos en ambientes contaminados con metales pesados y su potencial biotecnológico en procesos de biorremediación. La búsqueda de información se realizó entre los meses de enero y marzo de 2025, utilizando la base de datos de Google Scholar.

Se emplearon combinaciones de palabras clave en inglés y español, tales como: “fungal bioremediation”, “heavy metal-resistant fungi”, “mycoremediation of arsenic”, “lead detoxification by

fungi”, “chromium tolerance in *Aspergillus*”, “hongos resistentes a metales pesados” y “biorremediación microbiana de suelos contaminados”. Se establecieron como criterios de inclusión artículos originales, revisiones sistemáticas y capítulos de libro publicados entre 2010 y 2025, con especial atención en estudios que reportaran casos de aislamiento fúngico en suelos contaminados con Pb, As y Cr.

Los documentos seleccionados fueron evaluados con base en su pertinencia temática, rigor metodológico y relevancia para el contexto de aplicación en México y América Latina. Además, se priorizó la inclusión de investigaciones que abordaran tanto los mecanismos fisiológicos de resistencia como las aplicaciones tecnológicas de los hongos en procesos de remediación ambiental. Esta revisión bibliográfica permitió establecer el estado del arte y justificar la importancia de realizar aislamientos dirigidos desde entornos contaminados para su posterior aplicación biotecnológica.

Aislamiento de hongos en suelos contaminados

Con el fin de ejemplificar la factibilidad del aislamiento de hongos con potencial biotecnológico desde ambientes contaminados, se desarrolló un estudio de caso en suelos impactados por minería en el municipio de Concepción del Oro, Zacatecas, México. Esta región presenta antecedentes de contaminación por As y Pb derivados de actividades extractivas intensivas, lo que la convierte en un sitio representativo para el muestreo de microorganismos adaptados a condiciones extremas.

El muestreo se realizó en puntos con presencia visible de residuos mineros, recolectando suelo superficial (hasta 10 cm de profundidad) en condiciones estériles, utilizando guantes, espátulas de acero inoxidable y bolsas tipo Whirl-Pak®. Las muestras fueron transportadas en frío (4 °C) al laboratorio para su procesamiento en un plazo no mayor a 24 horas, a fin de preservar la viabilidad microbiana.

Para el aislamiento de hongos, se emplearon dos enfoques complementarios: siembra directa de suelo sobre medio PDA (Potato Dextrose Agar) suplementado con antibióticos (ampicilina y estreptomicina), y siembra por dilución (hasta 10^{-3}) para favorecer el crecimiento de cepas dispersas o minoritarias. Las placas fueron incubadas a 28 °C durante 5 a 7 días en condiciones de oscuridad parcial. Las colonias fúngicas con morfologías diferenciables fueron seleccionadas y purificadas mediante repique sucesivo en medio PDA estéril.

Las cepas aisladas fueron posteriormente cultivadas en placas para la obtención de estructuras reproductivas (conidias) y su posterior preservación a corto plazo en refrigeración. La identificación preliminar se basó en características macroscópicas (color, textura, velocidad de crecimiento) y microscópicas (forma de esporas, hifas, conidióforos), observadas mediante microscopía óptica a 40x y 100x.

Esta metodología permitió obtener un conjunto representativo de cepas fúngicas autóctonas de suelos contaminados, con potencial de ser evaluadas en estudios posteriores para su aplicación en la biorremediación de metales pesados.

RESULTADOS

Estrategias de aislamiento de hongos en ambientes contaminados con metales pesados

La recuperación de suelos contaminados con metales pesados mediante biorremediación requiere un enfoque basado en la selección de microorganismos con alta tolerancia y capacidad de transformación de estos contaminantes (Rahman; Singh, 2020). Para ello, el uso de técnicas microbiológicas básicas es un paso esencial que permite el aislamiento, la caracterización y la evaluación de cepas fúngicas resistentes a metales como Pb, As y Cr (Haripersad, 2022; Maqsood et al., 2022). Métodos como el cultivo en medios selectivos, la observación morfológica y la identificación bioquímica y molecular son fundamentales para determinar la viabilidad y adaptabilidad de los hongos en entornos contaminados (Senanayake et al., 2020). Estas técnicas proporcionan información clave sobre su crecimiento, metabolismo y mecanismos de resistencia, aspectos imprescindibles antes de su aplicación en estrategias de biorremediación a gran escala (Sarker et al., 2023).

Los hongos desempeñan un papel crucial en la degradación de compuestos tóxicos y la estabilización de contaminantes en el suelo (Tomer et al., 2021). En ambientes contaminados, la diversidad fúngica puede verse reducida debido a la toxicidad de los metales pesados; sin embargo, ciertas especies han desarrollado estrategias de resistencia que incluyen la bioadsorción, biomineralización y transformación en compuestos menos tóxicos (Abd et al., 2023) (Figura. 1).

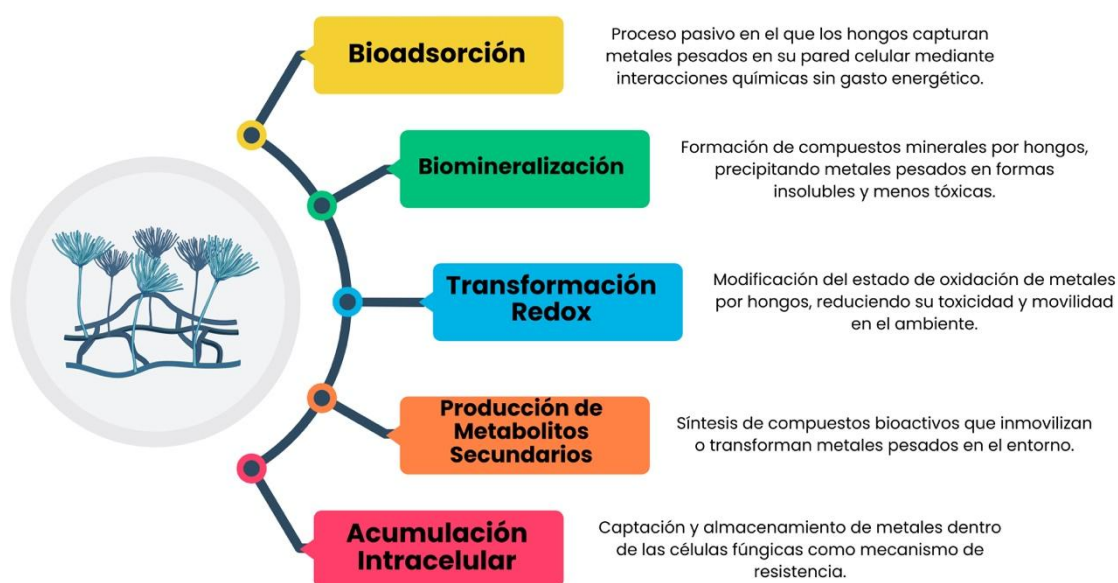


Figura 1. Mecanismos de resistencia de los hongos a metales pesados. Esquema ilustrativo que muestra los principales mecanismos de resistencia utilizados por los hongos para enfrentar la contaminación por metales pesados. Fuente: los autores.

En estudios realizados se ha identificado la presencia de hongos del género *Aspergillus*, *Penicillium* y *Trichoderma* en suelos contaminados con metales pesados (El-Mahdy et al., 2021; Maldaner et al., 2021). Estos microorganismos han mostrado una notable capacidad para acumular y transformar cationes

metálicos a través de la producción de metabolitos secundarios y la modificación de la química del suelo (Elhamouly et al., 2022). Investigaciones en otras partes del mundo han confirmado que *A. niger* puede inmovilizar Pb y Cr mediante la secreción de ácidos orgánicos que precipitan los metales en formas menos solubles, lo que contribuye a la reducción de su movilidad en el suelo (Shan et al., 2021; He et al., 2022). El As, debido a su elevada toxicidad y movilidad en ambientes acuáticos y terrestres, representa un reto mayor para la biorremediación (Kumar et al., 2020a). Sin embargo, se ha observado que algunos hongos poseen mecanismos específicos para reducir la biodisponibilidad de este elemento, formando complejos con compuestos orgánicos del suelo o promoviendo su transformación mediante reacciones redox (Zhang et al., 2024). En regiones mineras de Guanajuato y Durango, estudios han reportado la presencia de hongos resistentes al As, lo que sugiere su potencial en la remediación de sitios contaminados (Pérez, 2020).

Tabla 1. Comparación de métodos de aislamiento de hongos resistentes a metales pesados. Fuente: los autores.

Método de aislamiento	Principio del método	Ventajas	Limitaciones
Siembra en medios selectivos con metales	Uso de medios con concentraciones controladas de metales pesados.	Permite seleccionar hongos con resistencia específica.	Puede excluir especies sensibles que también podrían ser útiles en biorremediación.
Cultivo en medios enriquecidos con sales metálicas	Crecimiento en presencia de concentraciones graduales de metales pesados.	Evalúa la tolerancia progresiva de los hongos.	Requiere tiempos de incubación prolongados.
Técnica de enriquecimiento en cultivos líquidos	Adaptación de hongos a ambientes con metales en solución.	Simula condiciones reales de exposición a metales en agua.	Difícil recuperación de colonias puras para identificación.
Aislamiento a partir de biofilms fúngicos	Selección de hongos que forman estructuras multicelulares resistentes a metales.	Útil para hongos con alta tolerancia a contaminación severa.	Puede no ser efectivo para hongos unicelulares.

Para el aislamiento de hongos en suelos contaminados con metales pesados, es fundamental establecer una estrategia de muestreo que permita obtener una representación adecuada de la diversidad microbiana presente en el sitio de estudio. La selección de sitios de muestreo debe considerar factores como la proximidad a fuentes de contaminación, la variabilidad en la concentración de metales y las

características fisicoquímicas del suelo (NOM-021, 2000). En regiones con actividad minera intensiva, han sido objeto de estudios que buscan caracterizar la microbiota del suelo en función de la concentración de metales pesados. Para la recolección de muestras, se recomienda la obtención de suelos superficiales y a diferentes profundidades, evitando la contaminación cruzada entre las muestras. El transporte y almacenamiento de las muestras deben realizarse en condiciones estériles y a temperaturas controladas para preservar la viabilidad de los microorganismos (NOM-021, 2000).

El aislamiento de hongos resistentes a metales pesados requiere el uso de medios selectivos que contengan concentraciones controladas de Pb, As o Cr (Ceci et al., 2020; Firincã et al., 2023). Estos medios permiten favorecer el crecimiento de cepas resistentes, excluyendo aquellas que no poseen mecanismos de tolerancia (Jeyakumar et al., 2023). Uno de los enfoques más utilizados es la siembra en medios de cultivo enriquecidos con sales metálicas en concentraciones graduales. Por ejemplo, el medio de Sabouraud Dextrose Agar suplementado con acetato de plomo o dicromato de potasio ha sido empleado en estudios de aislamiento de hongos en suelos contaminados (Patra et al., 2020). La incubación se realiza bajo condiciones controladas de temperatura y humedad, promoviendo la selección de cepas capaces de tolerar concentraciones elevadas de metales pesados (Kumar; Dwivedi, 2021). El enriquecimiento de cultivos en presencia de metales pesados también permite evaluar la adaptabilidad de los hongos a condiciones de estrés químico (Liu et al., 2024). En investigaciones previas, se ha demostrado que cepas del género *Fusarium* pueden crecer en presencia de hasta 500 ppm de plomo, lo que indica un alto potencial de estas especies para aplicaciones en biorremediación (De Wet; Brink, 2021) (Tabla. 1).

Una vez aisladas, las cepas fúngicas deben ser caracterizadas para determinar sus propiedades morfológicas, bioquímicas y genéticas. La caracterización morfológica se realiza mediante la observación de estructuras reproductivas, textura y coloración de colonias en medios de cultivo (Quisbert, 2017). El análisis microscópico permite diferenciar especies en función de la morfología de sus conidios y esporangios (Estrada et al., 2025). El análisis bioquímico implica la evaluación de la capacidad de los hongos para metabolizar compuestos específicos y resistir la presencia de metales pesados (Singh et al., 2021). Se han utilizado pruebas de crecimiento en presencia de distintos iones metálicos para determinar los límites de tolerancia de cada cepa (Liaquat et al., 2020). Para la identificación molecular, se emplea la secuenciación de regiones específicas del ADN ribosomal, como los genes ITS (Internal Transcribed Spacer) (Aljanabi; Martinez, 1997; Antil et al., 2023). Esta técnica permite una identificación precisa de los hongos aislados y su clasificación filogenética. En estudios recientes el análisis molecular ha permitido identificar nuevas cepas fúngicas resistentes a cromo hexavalente en suelos impactados por la industria, lo que resalta la importancia de estas metodologías en la biotecnología ambiental (Zha et al., 2024).

Aislamiento de hongos de suelos contaminados con As y Pb

El aislamiento de hongos microscópicos en suelos contaminados con metales pesados en Concepción del Oro, Zacatecas, permitió evaluar la efectividad de las técnicas microbiológicas utilizadas y generar una colección de cepas con potencial biotecnológico. El proceso experimental incluyó la aplicación de técnicas de aislamiento, la identificación de los hongos obtenidos, el análisis de su distribución espacial y la caracterización de su diversidad.

Para establecer una metodología eficiente de aislamiento, se emplearon técnicas de cultivo en medios selectivos, lo que permitió la obtención de colonias fúngicas puras a partir de suelos contaminados. La incubación de las muestras en medios PDA condujo a un crecimiento significativo de hongos, evidenciando la presencia de una microbiota activa en ambientes impactados por metales pesados. El uso de diferentes concentraciones de antibióticos y la optimización de las condiciones de incubación permitieron reducir la presencia de bacterias contaminantes, favoreciendo la proliferación de hongos filamentosos. Se observó que el tiempo de incubación influía en la diversidad de colonias recuperadas, con un aumento en la riqueza fúngica entre los 5 y 7 días de incubación (Figura 2). Lo anterior permitió la recuperación de un número considerable de hongos en suelos contaminados, proporcionando una base sólida para su posterior identificación y análisis taxonómico.

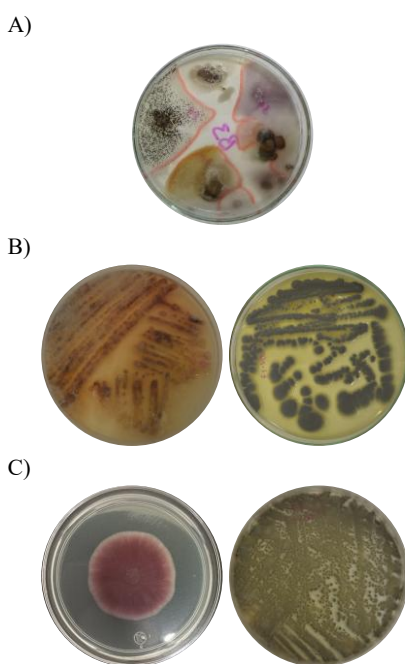


Figura 2. Proceso de aislamiento y mantenimiento de hongos a partir de suelos contaminados. La secuencia de imágenes ilustra las etapas clave en el aislamiento de hongos resistentes a metales pesados. (A) Siembra directa de suelo contaminado en medio selectivo PDA suplementado con antibióticos para favorecer el crecimiento fúngico y reducir la proliferación bacteriana. (B) Cepas fúngicas aisladas a partir de la siembra directa, cultivada mediante diluciones para su purificación. (C) Cultivos de las cepas para la obtención de conidias destinadas al mantenimiento y preservación del aislado. Fuente: los autores.

Con base en el aislamiento exitoso de hongos, se procedió a su identificación preliminar utilizando criterios morfológicos. Se registraron 57 cepas pertenecientes a 16 géneros distintos, predominando *Mucor*, *Aspergillus*, *Penicillium* y *Fusarium*. La caracterización macroscópica reveló variaciones en la textura, color y crecimiento de las colonias, lo que permitió diferenciar los aislamientos en función de sus rasgos fenotípicos. La microscopía óptica confirmó la presencia de estructuras reproductivas características de los géneros predominantes. En particular, se observaron esporangios en *Mucor*, conidióforos ramificados en *Aspergillus* y cadenas de conidios en *Penicillium*.

El análisis de la distribución de los aislamientos fúngicos en los distintos puntos de muestreo permitió identificar patrones que sugieren una relación entre la composición microbiana y el nivel de contaminación del suelo. *Aspergillus* y *Penicillium* fueron los géneros más frecuentemente aislados en varios puntos, lo que indica una alta capacidad de estos hongos para tolerar la presencia de metales pesados. En contraste, algunos géneros como *Fusarium* y *Paecilomyces* solo fueron encontrados en puntos específicos, lo que podría indicar que ciertas especies requieren condiciones ambientales particulares o poseen una tolerancia diferencial a los metales. Lo anterior dio pie a la caracterización de la diversidad microbiana, permitiendo analizar qué grupos fúngicos dominan en suelos contaminados con As y Pb.

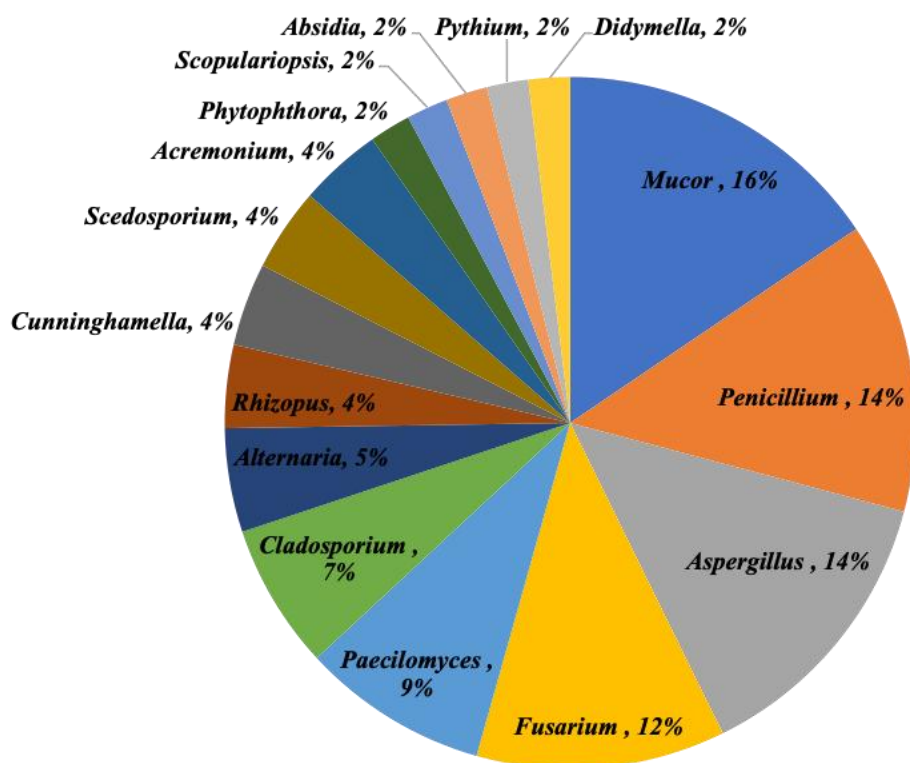


Figura 3. Porcentaje de los géneros identificados en la caracterización morfológica macro y microscópica. Fuente: los autores.

El análisis de la diversidad fúngica en suelos contaminados mostró que los géneros predominantes fueron *Aspergillus*, *Penicillium*, *Mucor* y *Fusarium*, todos ellos ampliamente reportados en la literatura por su capacidad de resistir y transformar metales pesados (Figura. 3). La abundancia relativa de estos hongos

sugiere que han desarrollado mecanismos de adaptación a la presencia de As y Pb en el suelo, lo que los convierte en candidatos prometedores para futuros estudios de biorremediación. La riqueza fúngica en los sitios muestreados indica que la microbiota del suelo puede estar desempeñando un papel clave en la mitigación de la toxicidad de los metales. Especies de *Penicillium* y *Aspergillus* han sido ampliamente reportadas como bioadsorbentes de Pb y Cr, mientras que algunos estudios han demostrado que *Mucor* puede bioacumular As en su biomasa, reduciendo así su biodisponibilidad. Con esta información, se confirma la relevancia de los hongos aislados en este estudio para futuras aplicaciones biotecnológicas en biorremediación.

Potencial biotecnológico de los hongos aislados en biorremediación

Los hongos resistentes a metales pesados han cobrado gran relevancia debido a sus múltiples funciones en sectores como la biorremediación, la síntesis de nanopartículas, la producción de enzimas industriales y la bioingeniería. Esta versatilidad los posiciona como una herramienta clave en el desarrollo de soluciones sostenibles frente a la contaminación ambiental (Figura. 4).

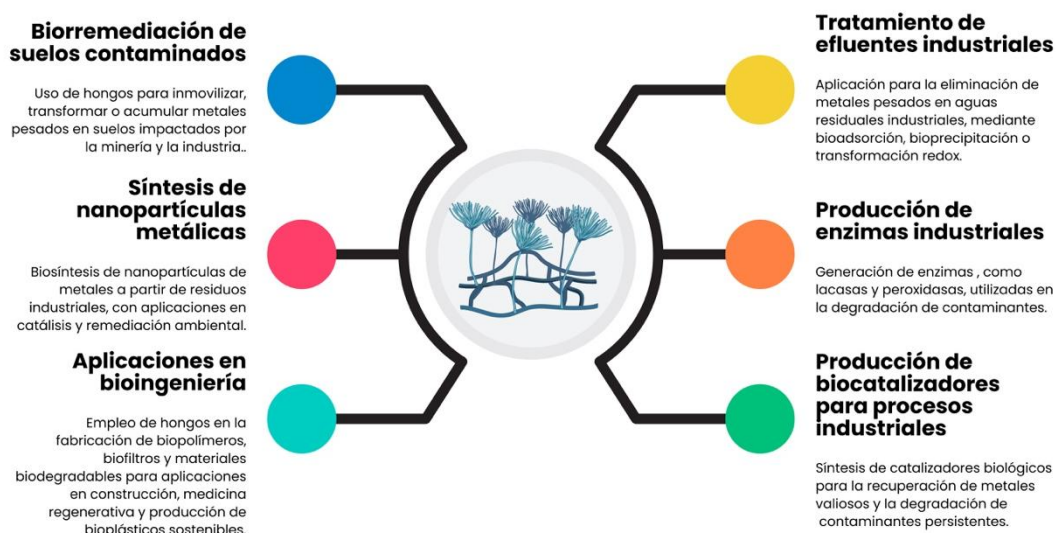


Figura 4. Aplicaciones biotecnológicas de los hongos en la industria y el medio ambiente. Esquema ilustrativo que muestra las principales aplicaciones de los hongos resistentes a metales pesados en diversos sectores. Fuente: los autores.

Los hongos tienen un papel destacado en la biorremediación de suelos y aguas contaminadas con Pb, As y Cr, gracias a su capacidad de tolerar y transformar estos metales en formas menos tóxicas (Goutam et al., 2020; Ray et al., 2023; Akimbekov et al., 2022). Este potencial se debe a mecanismos como la bioadsorción, biomineralización y transformación redox (Abd et al., 2023). La bioadsorción permite que los metales se adhieran pasivamente a la pared celular fúngica mediante interacciones físico-químicas (Sultan; Hag, 2022). Por ejemplo, *A. niger* y *Penicillium chrysogenum* han mostrado capacidad para retener Pb y Cr en concentraciones elevadas (Rigoletto et al., 2020; Xu et al., 2022; Cyriac et al., 2022). En la biomineralización, hongos como *Fusarium* transforman metales en estructuras insolubles como el

arseniato de calcio, reduciendo su toxicidad (Gadd, 2021; Chaurasia et al., 2023). Algunos hongos también ejecutan procesos redox, como la reducción del Cr^{6+} a Cr^{3+} , menos tóxico. *Trichoderma harzianum* ha demostrado esta capacidad al producir metabolitos reductores (Dwivedi, 2023; Lizardi-Jiménez et al., 2023; Hussain; Mutlag, 2021). Los estudios demuestran que especies como *Aspergillus flavus* y *Penicillium* pueden inmovilizar Pb en suelos mineros contaminados, reduciendo su movilidad mediante la formación de complejos orgánicos (El-Mahdy et al., 2021; Shan et al., 2023; Canonica et al., 2024). Además, el uso combinado de hongos y bacterias, como *Pseudomonas*, ha demostrado mayor eficiencia en la remediación de Cr (Zhang; Zhang, 2022; Kuanar et al., 2022). Más allá de la remediación, estos hongos se aplican en la síntesis de nanopartículas metálicas, como las producidas por *Aspergillus terreus* a partir de residuos industriales (Salem; Fouda, 2021; Rai et al., 2022; Nakhjiri et al., 2022). También se emplean en la producción de enzimas industriales, como las sintetizadas por *Trichoderma*, útiles en el tratamiento de efluentes y fabricación de biopolímeros (Ghosh et al., 2023; Kidwai et al., 2022).

El desarrollo de estas tecnologías requiere enfoques multidisciplinarios y el fortalecimiento de capacidades analíticas. La identificación de cepas con alta resistencia a metales y la aplicación de herramientas como la bioinformática y la ingeniería ambiental son fundamentales para escalar estas soluciones (Chen et al., 2022). Finalmente, aunque la eficacia de los hongos en biorremediación ha sido probada, su implementación enfrenta retos técnicos, regulatorios y económicos, especialmente en zonas mineras donde la contaminación por metales pesados es crítica. Superar estas barreras es clave para impulsar su adopción a nivel industrial (Medfu et al., 2020; Warhurst, 2024; Saravanan et al., 2022).

Limitaciones y avances en el aislamiento de microorganismos para biorremediación

El aislamiento y caracterización de hongos con potencial para la biorremediación es una estrategia clave en el manejo de suelos y aguas contaminadas con metales pesados. Sin embargo, este proceso enfrenta desafíos importantes tanto en condiciones de laboratorio como en la implementación a escala industrial (Tabla 2).

Uno de los principales retos en la biorremediación es la dificultad para mantener el crecimiento de microorganismos tolerantes a metales pesados bajo condiciones controladas. Aunque especies como *Fusarium* y *Aspergillus* han demostrado alta capacidad de acumulación de arsénico, su rendimiento puede verse comprometido fuera del entorno natural debido a la pérdida de presión selectiva, lo que reduce su eficiencia de bioadsorción (Chaurasia et al., 2023). Esto resalta la necesidad de optimizar medios de cultivo y protocolos de preservación para mantener la funcionalidad de los microorganismos aislados.

La identificación de especies con potencial biorremediador también representa un desafío. Las técnicas convencionales, basadas en morfología o pruebas bioquímicas, no siempre permiten distinguir entre especies relacionadas o detectar adaptaciones específicas. Herramientas moleculares como la secuenciación de regiones ITS del ADN ribosomal han mejorado la precisión taxonómica, aunque su alto

costo y los requerimientos técnicos limitan su uso en muchos laboratorios (Kashyap et al., 2020). Invertir en infraestructura analítica resulta fundamental para avanzar en biotecnología ambiental.

Tabla 2. Principales barreras en la implementación de la biorremediación y posibles soluciones. Fuente: los autores.

Barrera	Descripción	Soluciones Propuestas
Dificultad en el aislamiento y cultivo de microorganismos resistentes.	Los hongos pierden eficiencia en laboratorio por falta de presión selectiva.	Optimización de medios de cultivo y simulación de condiciones ambientales.
Alto costo de identificación molecular.	Técnicas como secuenciación de ADN son costosas y requieren infraestructura especializada.	Desarrollo de métodos de detección más accesibles y financiamiento para laboratorios ambientales.
Escalabilidad limitada de la biorremediación in situ.	Difícil aplicación a gran escala por falta de estabilidad de los microorganismos.	Desarrollo de formulaciones microbianas estables y consorcios microbianos.
Restricciones regulatorias sobre OGMs en biorremediación.	Limitaciones legales para el uso de microorganismos genéticamente modificados.	Regulaciones flexibles basadas en estudios de impacto ambiental y seguridad.
Percepción pública negativa sobre el uso de microorganismos.	Desconfianza en el uso de biotecnología para la recuperación ambiental.	Educación y divulgación científica sobre los beneficios de la biorremediación.

En cuanto a la implementación de biorremediación en campo, los principales obstáculos incluyen los costos de producción de biomasa microbiana, la necesidad de formulaciones estables y las limitaciones regulatorias. Aunque la biorremediación *in situ* ofrece ventajas sostenibles (Perez-Vazquez et al., 2024), aún se requiere desarrollo tecnológico para garantizar la viabilidad de los microorganismos bajo condiciones ambientales cambiantes. La preferencia por métodos fisicoquímicos más inmediatos también limita la adopción de estrategias microbianas.

Otro aspecto crítico es la regulación ambiental respecto al uso de organismos genéticamente modificados (OGMs). Si bien se han desarrollado cepas fúngicas con capacidad mejorada para transformar metales (Kumar et al., 2020b), su uso sigue restringido por marcos normativos (Wesseler et al., 2023). A esto se suma la percepción negativa de la sociedad hacia el empleo de microorganismos en procesos de descontaminación (Derman, 2025). Por ello, es necesario fomentar estudios de impacto y campañas de divulgación científica para aumentar la aceptación pública.

El avance de las tecnologías ómicas ha permitido una caracterización más profunda de los microorganismos presentes en suelos contaminados. La metagenómica, transcriptómica y proteómica ofrecen información sobre las capacidades genéticas y funcionales de comunidades microbianas (Singh et al., 2020), lo que facilita la selección de cepas con alto potencial biorremediador. Por ejemplo, se ha identificado mediante metagenómica la presencia de genes asociados a la reducción de cromo hexavalente (Singh et al., 2022), mientras que estudios transcriptómicos han revelado la expresión de genes implicados en la bioadsorción de plomo en cepas de *Aspergillus* (El-Mahdy et al., 2021).

Además, el desarrollo de biofilms microbianos representa una estrategia prometedora para aumentar la eficacia de la biorremediación. Estas estructuras ofrecen mayor resistencia a condiciones adversas y una capacidad mejorada de inmovilización de metales. Ensayos con biofilms de *Trichoderma* y *Bacillus* han demostrado buenos resultados en la estabilización de As en suelos contaminados (Santoyo et al., 2024).

Por último, los sistemas bioelectroquímicos emergen como una innovación atractiva para tratar aguas contaminadas con metales. Estos sistemas utilizan microorganismos electrogénicos para inducir reacciones redox que convierten metales en formas menos tóxicas, abriendo nuevas vías para una biorremediación más eficiente y adaptable (Wang et al., 2022).

CONCLUSIONES

Las evidencias presentadas en este trabajo sugieren que los ambientes contaminados con metales pesados representan nichos ecológicos relevantes para la identificación de hongos con adaptaciones fisiológicas de interés biotecnológico. A partir de la revisión teórica y del estudio de caso, se destaca que el aislamiento de cepas fúngicas autóctonas no solo es viable, sino estratégico para el desarrollo de tecnologías de biorremediación ajustadas a condiciones locales. La diversidad de géneros identificados (incluyendo *Mucor*, *Penicillium*, *Aspergillus* y *Fusarium*) sugiere que la presión selectiva ejercida por los contaminantes puede favorecer la presencia de microorganismos con mecanismos específicos de tolerancia y transformación de metales. Asimismo, la integración de metodologías tradicionales de cultivo con herramientas moleculares y enfoques ómicos abre nuevas perspectivas para mejorar la caracterización funcional de estos organismos. El aprovechamiento de este potencial requiere consolidar capacidades técnicas en laboratorios locales, establecer vínculos entre la investigación y su aplicación práctica, y fomentar una visión crítica y contextualizada sobre el papel de los hongos en la biotecnología ambiental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abd, E. M. K., et al. (2023). Toxicity of heavy metals and recent advances in their removal: A review. *Toxics*, 11(7), 580.
- Akimbekov, N. S., et al. (2022). Biotechnology of microorganisms from coal environments: From environmental remediation to energy production. *Biology*, 11(9), 1306.

- Aljanabi, S. M., & Martinez, I. (1997). Universal and rapid salt-extraction of high quality genomic DNA for PCR-based techniques. *Nucleic Acids Research*, 25(22), 4692–4693.
- Alvarez, C. C., et al. (2021). Hexavalent chromium: Regulation and health effects. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 65, 126729.
- Antil, S., et al. (2023). DNA barcoding, an effective tool for species identification: A review. *Molecular Biology Reports*, 50(1), 761–775.
- Bala, S., et al. (2022). Recent strategies for bioremediation of emerging pollutants: A review for a green and sustainable environment. *Toxics*, 10(8), 484.
- Bouida, L., et al. (2022). A review on cadmium and lead contamination: Sources, fate, mechanism, health effects and remediation methods. *Water*, 14(21), 3432.
- Briseño-Bugarín, J., et al. (2024). Lead (Pb) pollution in soil: A systematic review and meta-analysis of contamination grade and health risk in Mexico. *Environments*, 11(3), 43.
- Canonica, L., et al. (2024). Fungal arsenic tolerance and bioaccumulation: Local strains from polluted water vs. allochthonous strains. *Environments*, 11(1), 23.
- Ceci, A., et al. (2020). Fungi and arsenic: Tolerance and bioaccumulation by soil saprotrophic species. *Applied Sciences*, 10(9), 3218.
- Chandra, R., & Banik, A. (2021). Detoxification and bioconversion of arsenic and chromium. In *Nanobiotechnology* (pp. 253–270). Elsevier.
- Chaurasia, P. K., et al. (2023). Fungal assisted bio-treatment of environmental pollutants with comprehensive emphasis on noxious heavy metals: Recent updates. *Biotechnology and Bioengineering*, 120(1), 57–81.
- Chen, L., et al. (2022). Removal of heavy-metal pollutants by white rot fungi: Mechanisms, achievements, and perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 354, 131681.
- Covarrubias, S. A., & Cabriaes, J. J. P. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33, 7–21.
- Cyriac, S., et al. (2022). Biosorption of hexavalent chromium using fungal strains isolated from soil. *Kristu Jayanti Journal of Core and Applied Biology (KJCAB)*, 1–9.
- De Wet, M. M. M., & Brink, H. G. (2021). Fungi in the bioremediation of toxic effluents. In *Fungi Bio-Prospects in Sustainable Agriculture, Environment and Nano-Technology* (pp. 407–431). Academic Press.
- Derman, M. (2025). Isolation of yeasts from different fruits and students' opinion about microorganisms: Inquiry-based learning. *Research in Science and Technological Education*, 43(1), 230–250.
- Dwivedi, S. K. (2023). Fungi mediated detoxification of heavy metals: Insights on mechanisms, influencing factors and recent developments. *Journal of Water Process Engineering*, 53, 103800.

- Elhamouly, N. A., et al. (2022). The hidden power of secondary metabolites in plant-fungi interactions and sustainable phytoremediation. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1044896.
- El-Mahdy, O. M., et al. (2021). Biosorption effect of *Aspergillus niger* and *Penicillium chrysosporium* for Cd- and Pb-contaminated soil and their physiological effects on *Vicia faba* L. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(47), 67608–67631.
- Estrada, M., et al. (2025). Aislamiento e identificación de la micobiota de suelos dedicados al cultivo de tomate en Azuero. *Ciencia Agropecuaria*, (40), 100–124.
- Firincă, C., et al. (2023). Microbial removal of heavy metals from contaminated environments using metal-resistant indigenous strains. *Journal of Xenobiotics*, 14(1), 51–78.
- Flores-Amaro, O. A., et al. (2024). Characterization and evaluation of the bioremediation potential of *Rhizopus microsporus* Os4 isolated from arsenic-contaminated soil. *Water, Air, and Soil Pollution*, 235(8), 529.
- Gadd, G. M. (2021). Fungal biomineralization. *Current Biology*, 31(24), R1557–R1563.
- Gamba, L. D. F., & Rojas, M. N. (2024). Alternativas para la puesta en marcha de una planta de tratamiento de aguas residuales en una empresa de galvanotecnia. Universidad de La Salle. Facultad de Ingeniería. Ingeniería Ambiental y Sanitaria.
- Ghosh, S., et al. (2023). Filamentous fungi for sustainable remediation of pharmaceutical compounds, heavy metal and oil hydrocarbons. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11, 1106973.
- Goutam, J., et al. (2021). Fungal-mediated bioremediation of heavy metal-polluted environment. In *Microbial Rejuvenation of Polluted Environment: Volume 2* (pp. 51–76).
- Gupta, S. (2022). Effect of arsenic on human health and possible prevention. Index/AZwH \$ _oUH \$ m. [Nota: Verificar fonte e formatação]
- Guzmán-Moreno, J., et al. (2022). *Bacillus megaterium* HgT21: A promising metal multiresistant plant growth-promoting bacteria for soil bioremediation. *Microbiology Spectrum*, 10(5), e00656-22.
- Häder, D. P., et al. (2020). Anthropogenic pollution of aquatic ecosystems: Emerging problems with global implications. *Science of the Total Environment*, 713, 136586.
- Haripersad, K. (2022). Isolation, identification, and characterisation of fungi from a platinum mine. Master's thesis, University of the Witwatersrand, Johannesburg (South Africa).
- He, N., et al. (2022). Remediation of chromium, zinc, arsenic, lead and antimony contaminated acidic mine soil based on *Phanerochaete chrysosporium*-induced phosphate precipitation. *Science of the Total Environment*, 850, 157995.
- Hussain, D. F., & Mutlag, N. H. (2021). Assessment the ability of *Trichoderma harzianum* fungi in bioremediation of some of heavy metals in waste water. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 790, No. 1, p. 012087). IOP Publishing.
- Hussain, K., et al. (2025). Subject: Trophic transfer and bioaccumulation of Cr (VI) in soil–*Vicia faba* L.–aphid (*Acyrtosiphon pisum*)–ladybird (*Harmonia axyridis*) food chain: Ecotoxicological implications

- for agricultural ecosystems. Available at SSRN 5155775. Jee HK et al. (2024). Immobilization of manganese in solution and soil contaminated with trivalent chromium using biochars. *Applied Biological Chemistry*, 67(1), 118.
- Jeyakumar, P., et al. (2023). Trends in bioremediation of heavy metal contaminations. *Environmental Engineering Research*, 28(4).
- Kashyap, S. K., et al. (2020). Ribotyping: A tool for molecular taxonomy. In *Animal Biotechnology* (pp. 373–394). Academic Press.
- Kidwai, M. K., et al. (2022). Bioremediation potential of *Trichoderma* species for metal(loid)s. In *Bioremediation of toxic metal(loid)s* (pp. 137–152). CRC Press.
- Kuanar, A., et al. (2022). A comparative review on bioremediation of chromium by bacterial, fungal, algal and microbial consortia. *Geomicrobiology Journal*, 39(6), 515–530.
- Kumar, A., et al. (2021). Arsenic exposure in Indo Gangetic plains of Bihar causing increased cancer risk. *Scientific Reports*, 11(1), 2376.
- Kumar, M., et al. (2020a). Arsenic contamination in environment, ecotoxicological and health effects, and bioremediation strategies for its detoxification. In *Bioremediation of Industrial Waste for Environmental Safety: Volume I: Industrial Waste and Its Management* (pp. 245–264).
- Kumar, R. S., et al. (2020b). Biodegradation of environmental pollutant through pathways engineering and genetically modified organisms approaches. In *Microorganisms for Sustainable Environment and Health* (pp. 137–165). Elsevier.
- Kumar, V., & Dwivedi, S. K. (2021). Mycoremediation of heavy metals: Processes, mechanisms, and affecting factors. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(9), 10375–10412.
- Li, R., et al. (2022). Application of biochar immobilized microorganisms for pollutants removal from wastewater: A review. *Science of The Total Environment*, 837, 155563.
- Liaquat, F., et al. (2020). Evaluation of metal tolerance of fungal strains isolated from contaminated mining soil of Nanjing, China. *Biology*, 9(12), 469.
- Liu, Q., et al. (2024). Enrichment characteristics of Cd and Hg and regulation of heavy metal transporter signaling in *Pleurotus ostreatus*. *Science of The Total Environment*, 955, 176909.
- Lizardi-Jiménez, M. A., et al. (2023). The degradation of an aromatic organic compound by *Aspergillus niger* var. *tubingensis* Ed8 produces metabolites that reduce Cr(VI). *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 21(4), 473–480.
- Maldaner, J., et al. (2021). Tolerance of *Trichoderma* isolates to increasing concentrations of heavy metals. *International Journal of Environmental Studies*, 78(2), 185–197.
- Maqsood, Q., et al. (2022). Novel strategies and advancement in reducing heavy metals from the contaminated environment. *Archives of Microbiology*, 204(8), 478.
- Martínez-Aldape, P. A., et al. (2024). Bioprospection of bacterial strains from chromite process industry residues from Mexico for potential remediation. *Applied Microbiology*, 4(2), 665–681.

- Medfu, T. M., et al. (2020). Microbes used as a tool for bioremediation of heavy metal from the environment. *Cogent Food & Agriculture*, 6(1), 1783174.
- Mitra, S., et al. (2022). Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity. *Journal of King Saud University - Science*, 34(3), 101865.
- Nakhjiri, A. T., et al. (2022). Recovery of precious metals from industrial wastewater towards resource recovery and environmental sustainability: A critical review. *Desalination*, 527, 115510.
- NOM-021-RECNAT-2000. (2000). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación: México.
- Osuna-Martínez, C. C., et al. (2021). Arsenic in waters, soils, sediments, and biota from Mexico: An environmental review. *Science of The Total Environment*, 752, 142062.
- Pathak, S., et al. (2024). An overview of physical and chemical methods of heavy metal removal from wastewater. In *Heavy Metal Contamination in the Environment* (pp. 203–216).
- Patra, J. K., et al. (2020). Isolation, culture, and biochemical characterization of microbes. In *A Practical Guide to Environmental Biotechnology* (pp. 83–133).
- Pérez, M. E. L. (2020). Estudio de microorganismos resistentes a arsénico obtenidos del metagenoma de suelos del Estado de Guanajuato.
- Perez-Vazquez, A., et al. (2024). In situ and ex situ bioremediation of different persistent soil pollutants as agroecology tool. *Processes*, 12(10), 2223.
- Priya, A. K., et al. (2022). Biosorption of heavy metals by microorganisms: Evaluation of different underlying mechanisms. *Chemosphere*, 307, 135957.
- Qadir, M., et al. (2022). Comparative assessment of chromate bioremediation potential of *Pantoea conspiciua* and *Aspergillus niger*. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127314.
- Quisbert, F. P. (2017). Micología en Bolivia: un tema latente. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 8(1), 1.
- Rafique, M., et al. (2022). A review on sources of heavy metals, their toxicity and removal technique using physico-chemical processes from wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(11), 16772–16781.
- Rahman, Z., & Singh, V. P. (2020). Bioremediation of toxic heavy metals (THMs) contaminated sites: Concepts, applications and challenges. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(22), 27563–27581.
- Rai, M., et al. (2022). Industrial applications of nanomaterials produced from *Aspergillus* species. In *The Genus Aspergillus – Pathogenicity, Mycotoxin Production and Industrial Applications*. IntechOpen.
- Raju, N. J. (2022). Arsenic in the geo-environment: A review of sources, geochemical processes, toxicity and removal technologies. *Environmental Research*, 203, 111782.

- Ray, M. K., et al. (2023). Mycoremediation of heavy metals and/or metalloids in soil. In *Land Remediation and Management: Bioengineering Strategies* (pp. 161–190). Springer Nature Singapore.
- Rigoletto, M., et al. (2020). Bioremediation methods for the recovery of lead-contaminated soils: A review. *Applied Sciences*, 10(10), 3528.
- Salem, S. S., & Fouda, A. (2021). Green synthesis of metallic nanoparticles and their prospective biotechnological applications: An overview. *Biological Trace Element Research*, 199(1), 344–370.
- Sales da Silva, I. G., et al. (2020). Soil bioremediation: Overview of technologies and trends. *Energies*, 13(18), 4664.
- Santoyo, G., et al. (2024). Trichoderma and Bacillus multifunctional allies for plant growth and health in saline soils: Recent advances and future challenges. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1423980.
- Saravanan, A., et al. (2022). Removal of toxic heavy metals using genetically engineered microbes: Molecular tools, risk assessment and management strategies. *Chemosphere*, 298, 134341.
- Sarker, A., et al. (2023). Biological and green remediation of heavy metal contaminated water and soils: A state-of-the-art review. *Chemosphere*, 332, 138861.
- Schlögl, S., et al. (2023). Use of industrial residues for heavy metals immobilization in contaminated site remediation: A brief review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(2), 2313–2326.
- Senanayake, I. C., et al. (2020). Morphological approaches in studying fungi: Collection, examination, isolation, sporulation and preservation. *Mycosphere*, 11(1), 2678–2754.
- Shan, B., et al. (2021). A review on mechanism of biomineralization using microbial-induced precipitation for immobilizing lead ions. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(24), 30486–30498.
- Shan, B., et al. (2023). Microbial remediation mechanisms and applications for lead-contaminated environments. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 39(2), 38.
- Shi, Y., et al. (2023). Resistance mechanisms and remediation potential of hexavalent chromium in *Pseudomonas* sp. strain AN-B15. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 250, 114498.
- Shvachiy, L., et al. (2020). Persistent effects on cardiorespiratory and nervous systems induced by long-term lead exposure: Results from a longitudinal study. *Neurotoxicity Research*, 37, 857–870.
- Singh, A., et al. (2021). Fungal secondary metabolites for bioremediation of hazardous heavy metals. In *Recent Trends in Mycological Research: Volume 2: Environmental and Industrial Perspective* (pp. 65–98).
- Singh, B. R., & Steinnes, E. (2020). Soil and water contamination by heavy metals. In *Soil Processes and Water Quality* (pp. 233–271). CRC Press.
- Singh, D., et al. (2020). Omics (genomics, proteomics, metabolomics, etc.) tools to study the environmental microbiome and bioremediation. In *Waste to Energy: Prospects and Applications* (pp. 235–260).

- Singh, N., et al. (2022). Metagenomic analysis of garden soil-derived microbial consortia and unveiling their metabolic potential in mitigating toxic hexavalent chromium. *Life*, 12(12), 2094.
- Sonone, S. S., et al. (2020). Water contamination by heavy metals and their toxic effect on aquaculture and human health through food chain. *Letters in Applied NanoBioScience*, 10(2), 2148–2166.
- Sultan, I., & Hag, Q. M. R. (2022). Bacterial mechanisms for remediation. In *Bioremediation of Toxic Metal(loid)s* (pp. 115–136). CRC Press.
- Talamantes, G. K. A. (2024). Desarrollo de metodologías analíticas para detectar la presencia de compuestos orgánicos y metales pesados en el agua de una zona agrícola semiárida (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Chihuahua).
- Taneja, S., et al. (2023). Soil–water interactions and arsenic enrichment in groundwater. In *Hydrogeochemistry of Aquatic Ecosystems* (pp. 97–120).
- Tomer, A., et al. (2021). Role of fungi in bioremediation and environmental sustainability. In *Mycoremediation and Environmental Sustainability: Volume 3* (pp. 187–200).
- Wang, S., et al. (2022). Bioelectrochemical systems-based metal removal and recovery from wastewater and polluted soil: Key factors, development, and perspective. *Journal of Environmental Management*, 317, 115333.
- Wani, A. K., et al. (2022). Microbial adaptation to different environmental conditions: Molecular perspective of evolved genetic and cellular systems. *Archives of Microbiology*, 204(2), 144.
- Warhurst, A. (2024). *Environmental policy in mining: Corporate strategy and planning*. Taylor & Francis.
- Wesseler, J., et al. (2023). EU regulation of genetically modified microorganisms in light of new policy developments: Possible implications for EU bioeconomy investments. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 45(2), 839–859.
- Xia, Y., et al. (2020). Inmovilización eficiente de metales pesados tóxicos en suelos agrícolas multicontaminados mediante hidrocarbón aminofuncionalizado: Rendimiento, respuesta de las plantas y mecanismos de inmovilización. *Environmental Pollution*, 261, 114217.
- Xu, J., et al. (2022). Adsorption characteristics of indigenous chromium-resistant *Aspergillus niger* strain isolated from red soil for remediation of toxic chromium in red soil environments. *Toxics*, 11(1), 31.
- Zha, S., et al. (2024). Microbial strategies for effective hexavalent chromium removal: A comprehensive review. *Chemical Engineering Journal*, 489, 151457.
- Zhang, T., & Zhang, H. (2022). Microbial consortia are needed to degrade soil pollutants. *Microorganisms*, 10(2), 261.
- Zhang, X., et al. (2024). Migration, transformation of arsenic, and pollution controlling strategies in paddy soil-rice system: A comprehensive review. *Science of The Total Environment*, 175500.

Índice

A

adaptabilidad, 158
aislamiento, 203, 205, 207

B

bicentenario, 156, 159, 160
biophysical, 40

C

cajas Bruce, 148, 151
calidad, 74, 75, 76, 78
canela, 137
capsicum annuum var. *aviculare*, 86, 88
cepas, 64, 65, 67, 68, 69

D

densidad poblacional, 150
Dosidicus gigas, 40, 41, 44, 46

E

Enterobacter cloacae, 9
extractos vegetales, 62, 69

F

fitopatología, 64
flavonoides, 21, 23
forraje
 seco, 157, 158, 159
 verde, 157, 158, 159, 160

H

híbridos, 97

I

imágenes digitales, 82
índice
 de verdor, 84
 vegetativo, 81
 de vegetación, 80
inhibición del crecimiento, 64, 66, 67
interacción, 160

M

melón, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151
micronutrientes, 75, 76

N

NDVI, 108, 113, 114, 116, 117

Q

Quitosano, 111, 113

R

rendimiento, 144, 150, 151
 de biomasa, 11, 15

S

sensorial, 52, 57
silicosulfocálcico, 137
sulfocálcico, 137

T

Thiamethoxam, 122, 123, 126
tratamiento químico, 122, 127
trigo, 81
 cristalino, 74

V

Valle del Yaqui, 97
vigor de plántula, 123

X

X-ray, 40, 41, 43, 45

Y

yeso agrícola, 74, 75, 76, 78
yogurt, 51

Z

zea mays, 19, 121
zigzag, 145, 146, 147, 150, 151
zinc, 137

Editores



Leandris Argentele-Martínez

Profesor e Investigador Titular "C" del Tecnológico Nacional de México, Campus Valle del Yaqui (ITVY). Miembro del Sistema Nacional de investigadoras e Investigadores del SECIHTI, Nivel 1. Profesor Perfil Deseable (PRODEP) de la Secretaría de Educación Pública de México, Líder del Cuerpo Académico consolidado ITVAYA-CA-3. Líneas de investigación: Fisiología Vegetal, Bioquímica, Biología Celular y Molecular en plantas y microorganismos. Doctorado en Ciencias Biotecnológicas. Desarrollo de investigaciones sobre mecanismos fisiológicos, rutas anapleróticas y mecanismos moleculares activados por los organismos durante su adaptación estreses abióticos. Uso de marcadores moleculares de tolerancia de los organismos al estrés abiótico (salinidad, sequía y calor). Manejo de técnicas de isótopos estables para el

seguimiento de reacciones bioquímicas en células y tejidos. Aplicación de técnicas experimentales univariadas y multivariadas para el procesamiento de datos. Entre sus principales proyectos, se encuentra vigente en 2022 “Aplicaciones del microbioma y el metaboloma de la *Parkinsonia aculeata* L. Sp. Pl. para la mitigación de estreses biótico y abiótico en el semidesierto y en especies de interés agrícola en México” correo electrónico para contacto: oleinismora@gmail.com



Ofelda Peñuelas Rubio

Profesor e Investigador Titular "C" del Tecnológico Nacional de México, Campus Valle del Yaqui (ITVY). Miembro del Sistema Nacional de investigadoras e Investigadores del SECIHTI, Nivel 1. Profesora con Perfil Deseable (PRODEP) de la Secretaría de Educación Pública de México, miembro del Cuerpo Académico consolidado ITVAYA-CA-3. México. Realizó dos estancias posdoctorales (Enero 2016 - Diciembre 2017) dentro del programa de Estancias Nacionales de CONACYT en el Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional unidad Sinaloa del Instituto Politécnico Nacional en el área de Ecología Molecular de la Rizósfera. Es Doctora en Ciencias especialidad

en Biotecnología. Su quehacer científico lo desarrolla en el área agrícola, principalmente en el manejo sustentable de los recursos implicados en los agroecosistemas y el aprovechamiento de la microbiota del suelo. Ha participado en colaboración con distintos grupos de investigación lo que le ha permitido participar en proyectos multidisciplinarios y en publicaciones científicas. Email para contacto: ofeperub@gmail.com



 Jaime Garatuza-Payán

Profesor e Investigador “C” del Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON). Departamento de Ciencias del Agua y del Medio Ambiente. Miembro del sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores del SECIHTI Nivel 2. Profesor perfil deseable (PROMEP). Miembro del cuerpo académico consolidado “Ciencias del Agua”. Miembro del Comité Científico del Programa Mexicano del Carbono (PMC). Miembro de la Academia Mexicana de Ciencias. Profesor-Investigador distinguido en el Instituto Tecnológico de Sonora. Entre sus principales

expertices se encuentran las líneas de investigación y generación del conocimiento: Biotecnología en sistema de producción agrícola, manejo de cuencas, hidrometeorología y cambio climático. Cuenta con más de 100 publicaciones científicas en revistas de alto factor de impacto. Email para contacto: jaime.garatuza@itson.edu.mx



Pantanal Editora

Rua Abaete, 83, Sala B, Centro. CEP: 78690-000

Nova Xavantina – Mato Grosso – Brasil

Telefone (66) 9608-6133 (Whatsapp)

<https://www.editorapantanal.com.br>

contato@editorapantanal.com.br



9786585756563

