

PLANTAS ACUMULADORAS DE METALES PESADOS DE VERACRUZ, MÉXICO

Yasser A. Aburto-Gutiérrez¹, Isabel A. Amaro-Espejo^{1*}, Sara L. Corona-López¹, Juan V. Megchún-García¹

¹Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Boca del Río, Km 12
Carretera Veracruz-Córdoba C.P. 94290 Boca del Río, Ver., México.
m24990014@g.bdelrio.tecnm.mx, isabelamaro@bdelrio.tecnm.mx,
m22990013@bdelrio.tecnm.mx, valente.mg@bdelrio.tecnm.mx
Autor de correspondencia: isabelamaro@bdelrio.tecnm.mx

Resumen - La presencia de metales pesados en el ambiente se ha convertido en uno de los problemas de contaminación más difíciles de atender y con mayores riesgos para la naturaleza y para las personas. Aunque metales como el cadmio (Cd), plomo (Pb), arsénico (As) y aluminio (Al) forman parte del suelo de manera natural, sus niveles han aumentado de forma notable debido a las actividades humanas como la minería, la industria metalúrgica, la agricultura intensiva y el manejo inadecuado de residuos industriales. Como resultado, muchos suelos y cuerpos de agua se han degradado, y estos metales han comenzado a acumularse en plantas, animales e incluso en las personas. Ante esta situación, la fitorremediación ha surgido como una alternativa sostenible y respetuosa con el ambiente. Esta técnica aprovecha la capacidad de ciertas plantas para absorber, retener o transformar metales presentes en el suelo o el agua. Entre ellas, destacan las plantas acumuladoras, conocidas por tolerar concentraciones muy altas de metales sin sufrir daños severos. México, un territorio con una enorme riqueza natural y una gran diversidad de ecosistemas tropicales, se han encontrado especies con este potencial. Esto representa una oportunidad valiosa tanto para la investigación como para impulsar proyectos de restauración ecológica que ayuden a recuperar los espacios afectados.

Índice de Términos - Metales pesados, Contaminación ambiental, Fitorremediación, Especies hiperacumuladoras.

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación por metales pesados es un problema ambiental con una creciente preocupación, debido principalmente a que son persistentes en el ambiente, por su toxicidad y capacidad de bioacumulación. A pesar de que los metales se pueden encontrar en la corteza terrestre como componentes naturales del suelo, se ha observado un incremento de su concentración a causa de las actividades antropogénicas. A diferencia de contaminantes orgánicos, los metales no pueden degradarse y tienden a concentrarse en suelos, sedimentos, aguas superficiales y en organismos vivos. En el estado de Veracruz, diversas actividades humanas como la industria petroquímica, metalúrgica, agricultura intensiva y la ganadería han provocado incrementos anormales en las

concentraciones de metales pesados en distintos ecosistemas que alteran el medio en el que se encuentran lo que altera el medio en el que se encuentran y representa un riesgo para los organismos y la salud humana [1], [2].

Elementos metálicos como el cadmio (Cd), plomo (Pb), aluminio (Al), arsénico (As), entre otros, no son esenciales para los seres vivos, debido a que no tiene función biológica, es por esto que no pueden ser degradados por el organismo y de esta manera, tienden a acumularse [3]. Una de las problemáticas de estos metales, es que existe un incremento en suelos agrícolas, causantes de un riesgo debido a que los cultivos pueden absorber estos metales hasta las partes comestibles y así introducirse en la cadena trófica con riesgos a la salud de la población. Este aumento de la concentración de los metales pesados en áreas agrícolas, pueden provenir de fertilizantes inorgánicos, agroquímicos o por el uso de aguas residuales [4].

Actualmente existen diversas técnicas utilizadas para la remediación del suelo, donde la fitorremediación se considera como un método amigable y sustentable para contrarrestar la toxicidad por metales pesados [5]. Esta tecnología puede aplicarse para tratar una variedad de contaminantes por metales pesados, gracias a la capacidad de absorción de algunas plantas, ya que muchas especies tienen la capacidad de absorber, tolerar y almacenar los metales pesados en sus tejidos vegetales sin manifestar toxicidad o problemas en su desarrollo [6]. La técnica de fitorremediación tiene el potencial para degradar, disminuir, transformar, mineralizar o estabilizar los diferentes contaminantes orgánicos, inorgánicos y radioactivos que resultan tóxicos en suelos y agua [7].

Las ventajas del uso de la fitorremediación respecto a los métodos convencionales para el tratamiento por contaminación de metales pesados; es una tecnología de menor costo, tiene un impacto regenerativo en la zona donde se trata y su capacidad de extracción es inmóvil ya que se concentra en la planta y es removido con mayor facilidad [8]. El uso de especies vegetales para el tratamiento de suelos contaminados por metales pesados permite la regeneración sin ser invasivo, con un mínimo impacto ambiental y sin efectos secundarios. Hasta el momento se continúan con estudios que identifican las especies endémicas y la capacidad de absorción como una alternativa de la remediación de suelos. Por lo anterior, el presente trabajo

tiene por objetivo de identificar especies acumuladoras de metales pesados endémicas de Veracruz, México.

Plantas acumuladoras

Las plantas con la capacidad de extraer un metal pesado a través de sus raíces y concentrarlo en alguna parte de su estructura, son denominadas plantas metalófitas o hiperacumuladoras; las cuales se caracterizan por crecer en el suelo o agua con altas concentraciones de metales pesados. Algunas de estas especies pueden llegar a alcanzar un porcentaje de remoción de hasta el 100% [9].

Las características más representativas de estas plantas son:

- Una fácil adaptación climática
- Tener una alta capacidad de absorber cantidades significativas de agua facilitando la absorción de contaminantes disueltos.
- Limita la dispersión de agua contaminada hacia otras zonas.
- Limita la dispersión de los elementos contaminantes.

Se ha demostrado que la permanencia de las plantas metalófitas a altas concentraciones de metales, produce un incremento de la biomasa vegetal y de sus raíces, así como la presencia de estas altas concentraciones en tallos, hojas y raíces [10]. La capacidad de acumulación de metales pesados varía considerablemente según la especie y sus características morfológicas y fisiológicas de la planta, con base a que cada especie presenta diferentes mecanismos y condiciones para inmovilizar o transformar los iones con base a sus atributos [11]. El tipo de metal y su grado de concentración son determinantes en la respuesta de la planta al estrés por metales pesados [12]. Sin embargo, las técnicas utilizadas durante la experimentación influyen directamente en el resultado, como la implementación de hongos micorrízicos que complementan a las plantas y otorgan una simbiosis capaz de mejorar la eficiencia de las capacidades de las plantas para absorber metales.

Girasol (*Helianthus annuus*)

En México, se encuentran gran variedad de especies capaces de hiperacumular metales pesados, entre la que destaca el girasol *Helianthus annuus*; una planta ampliamente cultivada por su gran valor ornamental su adaptabilidad a diversos climas del país, aunado a su rápido crecimiento es una especie ideal para implementar el proceso de remediación. Diversos estudios, han demostrado la capacidad de desarrollarse en suelos con altas concentraciones de metales como Cd, Pb, con gran capacidad de acumular los mismos dentro de sus tejidos y trasladarlos desde sus raíces hasta sus brotes para la generación de biomasa, lo que permite la movilidad de estos contaminantes fuera del área original [13].

Numerosos estudios han demostrado que la planta de girasol (*Helianthus annuus*), tiene alto potencial para el proceso de fitorremediación. Esta planta ha sido ampliamente reconocida por su capacidad para estabilizar y acumular metales pesados, almacenándolos principalmente en los tejidos foliares y en el sistema radicular. Gracias a su estructura radicular robusta y

profunda, el girasol puede extraer entre el 10 % y el 25 % de los metales presentes en el suelo, lo que lo convierte en una alternativa eficiente para la descontaminación de áreas afectadas. Un aspecto relevante es que *Helianthus annuus* no suele presentar síntomas severos de estrés fisiológico aun cuando se desarrolla en suelos altamente contaminados, lo que le permite mantener su crecimiento y completar su ciclo de vida sin grandes afectaciones, esta tolerancia facilita que la planta continúe absorbiendo y acumulando elementos tóxicos a lo largo del tiempo.



Figura 1. Girasol (*Helianthus annuus* L.) como planta fitorremediadora.

Diversas investigaciones han confirmado que el girasol es capaz de absorber metales pesados en concentraciones significativamente altas, lo que ha llevado a clasificarlo como una especie hiperacumuladora (Tabla 1). Entre estos destacan el cadmio (Cd), el zinc (Zn), el plomo (Pb), así como el cromo en sus estados trivalente (Cr III) y hexavalente (Cr VI). Esta capacidad de acumular distintos metales, incluso aquellos altamente móviles y peligrosos, refuerza su importancia en programas de recuperación de suelos degradados [14].

Tabla 1. Estudios de concentración acumuladas de Cd y Pb en el cultivo de *Helianthus annuus* L. (girasol).

Metal	Concentración (mg/kg)	Referencia
Cd	25.0	Clemente et al., [15]
Pb	107.7	Alaboudi et al., 2018[16]
Cd	71.3	
Pb	24.03	Kötschau et al., 2014[17]
Cd	16.13	
Cd	1.2	Piršelová et al. (2024)[18]

De acuerdo con la investigación realizada por [19], en sus estudios se determinó una concentración de 28.38 mg/kg de metales en las partes aéreas de las plantas, lo que demuestra la capacidad de estos elementos para movilizarse desde las raíces hacia hojas, tallos y flores. Este fenómeno indica que, bajo ciertas condiciones de exposición, las plantas no solo absorben los metales presentes en el suelo, sino que también los transportan activamente a órganos vegetativos y reproductivos, lo cual puede tener implicaciones importantes para la bioacumulación y la transferencia de contaminantes a los

niveles tróficos superiores. En el caso específico del cadmio (Cd), se observaron concentraciones de 4.5 mg/kg en las raíces, lo que refleja una retención parcial de este metal en el sistema radicular. Estos resultados resaltan la importancia de comprender los mecanismos de transporte y acumulación de metales pesados en plantas, no solo para evaluar riesgos ambientales y fitotóxicos, sino también para diseñar estrategias de remediación y manejo de suelos contaminados.

A diferencia de las investigaciones aportadas por [20], en donde es su análisis con suelos contaminados con metales pesados elaborados en Perú, determinó las concentraciones de diferentes metales en tejidos de girasol (*Helianthus annuus*). En su estudio, los autores determinaron que las concentraciones de plomo (Pb) y cadmio (Cd) no se distribuyen de manera uniforme en toda la planta, sino que varían de forma notable entre las raíces, tallo, hojas, flores y semillas. En las raíces, por ejemplo, se registraron concentraciones de 0.899 ppm para Pb y 2.61 ppm para Cd, lo que sugiere un primer punto de retención importante de estos metales, asociado a los mecanismos naturales de absorción y filtración del sistema radicular. Sin embargo, a medida que los metales ascienden por la planta, las variaciones se vuelven aún más marcadas. Las hojas mostraron niveles considerablemente más altos de plomo, alcanzando 17.45 ppm, junto con 1.72 ppm de Cd, lo cual indica una alta movilidad de Pb hacia los órganos aéreos, favorecida por procesos de capilaridad a través del xilema. El tallo, en comparación, presentó una concentración menor de Pb (0.3685 ppm), lo que evidencia una menor acumulación en estructuras de soporte. La flor, por su parte, registró uno de los valores más elevados, con 47.87 ppm de Pb, lo que resulta particularmente relevante debido al papel reproductivo de este órgano y al potencial riesgo ecológico asociado a la contaminación de estructuras florales que interactúan directamente con polinizadores.

Sin embargo, existen reportes que el girasol puede ser eficiente para concentrar metales pesados presentes, y dependerá de factores del suelo que influyen como son las variables de pH, concentración de nutrientes y el contenido de materia orgánica disponible [21]. En la actualidad, con la alta demanda de equipos electrónicos, se considera como una de las industrias con mayor impacto ambiental, que afectan durante todas las fases del ciclo de vida de los productos, principalmente durante su extracción en la minería y hasta la etapa final de los equipos al generar residuos metálicos [20]. Por lo que, surgen las necesidades de adquirir nuevas estrategias de mitigación del impacto ambiental que se generan actualmente con tecnologías amigables con el ambiente.

En contraste con estos resultados, lo reportado por [22] sobre la resistencia del girasol en ambientes contaminados con plomo. En su investigación, los autores observaron que *Helianthus annuus* puede crecer incluso cuando se encuentra expuesto a concentraciones tan elevadas como 500 mg/L de plomo soluble, sin mostrar afectaciones notables en la elongación de raíces y tallos. Aunque, se detectó una ligera disminución en la longitud del tallo a medida que aumentaba la concentración del metal, esta diferencia fue mínima frente al grupo control, lo que sugiere que la planta activa mecanismos internos para compensar el estrés y mantener su desarrollo. Un aspecto que

resalta el estudio es el papel fundamental de la raíz como un indicador directo de la tolerancia a los metales pesados. La raíz es, por naturaleza, el primer punto de contacto entre la planta y los contaminantes del entorno; absorbe agua y nutrientes, también es la primera en percibir y responder ante sustancias tóxicas. Por esta razón, la longitud de la raíz se utiliza como una señal temprana del efecto que los metales pueden tener sobre el organismo vegetal. Lo más llamativo es que, aun en presencia de plomo, el girasol logra seguir creciendo, sino que en ciertos rangos de concentración muestra una respuesta positiva, cuando la planta se expone a niveles de plomo entre 100 y 250 mg/L, la raíz puede alargarse hasta un 20 % más que en las plantas control.

En las investigaciones realizadas por [23], donde se evaluó el uso de enmiendas en suelos contaminados con metales pesados principalmente plomo (Pb) y cromo (Cr) provenientes de actividades metalmecánicas, se observaron resultados significativos en el comportamiento del girasol. Después de un periodo de 60 días de crecimiento, las plantas alcanzaron concentraciones de hasta 63.36 ppm de metales en sus tejidos, lo que demuestra su notable capacidad para absorber y retener contaminantes presentes en el sustrato. Estas alternativas de innovación tienen gran impacto en la apertura de nuevas perspectivas para el desarrollo sustentable de lugares donde se tienen problemas ambientales [24].

Este comportamiento confirma el potencial fitorremediador, ya que logra bioacumular Pb y Cr en su biomasa foliar en todos los tratamientos evaluados. Al hacerlo, contribuye de manera directa a la disminución de la concentración de estos metales en el suelo, esta función es especialmente valiosa en entornos degradados, donde se requiere una estrategia económica, ecológica y eficiente para reducir el impacto de la contaminación industrial. También señala un aspecto importante en el estudio de plantas hiperacumuladoras: muchas de ellas suelen presentar una menor producción de biomasa. Esto se debe a que estas especies invierten una cantidad considerable de energía en activar y mantener los mecanismos fisiológicos necesarios para tolerar y almacenar altas concentraciones de metales en sus tejidos. En otras palabras, parte de la energía que normalmente se destinaría al crecimiento se redirige hacia procesos de defensa, detoxificación y transporte interno de metales.

Romerillo (*Bidens pilosa* L.)

Es familia de las asteráceas, y es considerada una mala hierba en algunos hábitats tropicales. Es originaria de Sudamérica con una distribución cosmopolita. Es una planta erguida y perenne, se distribuye ampliamente en regiones templadas y tropicales del mundo. Se caracteriza por presentar tallos que pueden ser glabros o peludos, así como hojas opuestas de color verde intenso, serrados y formas que varían entre lobuladas y diseccionadas. Sus inflorescencias muestran pequeñas flores de tonos blancos o amarillos, mientras que sus frutos aquenios negros, alargados y estrechos poseen costelas (semillas) que facilitan su dispersión. En condiciones ambientales favorables, *B. pilosa* alcanza una altura promedio de 60 cm, aunque puede

llegar hasta los 150 cm. Además de su presencia común en campos, caminos y bordes de cultivo, esta especie tiene un valor etnobotánico importante [25]. Tradicionalmente, en algunas regiones se ha utilizado como planta medicinal y como ingrediente en tés y preparaciones herbales, aprovechando tanto sus brotes como sus hojas, ya sean frescas o secas. En diversas regiones como en Veracruz se utiliza para aumentar las plaquetas durante el padecimiento del dengue. Sin embargo, cuenta con otras propiedades hiperacumulativas de metales pesados.

Bidens pilosa L. fue reportada por primera vez como hiperacumuladora de cadmio (Cd) por [26], quienes realizaron un estudio comparativo mediante cribado fitoquímico y fisiológico de 29 especies pertenecientes a 18 familias de malezas comunes en la región de Shenyang, China. Empleando experimentos de cultivo al aire libre en suelos contaminados, los autores identificaron que *B. pilosa* presentaba una notable capacidad para absorber y translocar Cd desde el suelo hacia sus tejidos aéreos, destacándose por su elevada tolerancia y acumulación diferencial en raíces, tallos y hojas. Este hallazgo posicionó a la especie como un candidato prometedor para estrategias de fitorremediación, particularmente en zonas agrícolas y periurbanas afectadas por contaminación por metales pesados.

El estudio realizado por [27] se desarrolló en el invernadero de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza, Perú. En este trabajo, los investigadores analizaron cómo *Bidens pilosa* responde a la presencia de cadmio (Cd) en el suelo y qué tanto del metal se puede acumular en sus tejidos. Los resultados fueron claros: la mayor concentración de cadmio se encontró en la parte foliar, con una concentración de 7.27 ppm, mientras que en la raíz se registró una cantidad menor, de 2.57 ppm. Este patrón sugiere que la planta no solo absorbe el metal desde el sustrato, sino que también lo moviliza hacia la parte aérea, especialmente a las hojas. Esta característica es especialmente valiosa, permite retirar el cadmio del suelo simplemente cosechando la biomasa foliar, facilita su manejo y eliminación. A partir de estos hallazgos, esta planta podría utilizarse como una herramienta natural para ayudar a limpiar suelos contaminados con cadmio. Su capacidad para acumular el metal, junto con su amplia distribución, facilidad de crecimiento y uso tradicional en varias regiones, la convierte en una opción accesible y prometedora para programas de fitorremediación.

En el estudio realizado por [28], se evaluó la capacidad de *Bidens pilosa* L. para absorber arsénico (As) y plomo (Pb) en suelos contaminados. Los resultados mostraron que esta especie tiene una sorprendente habilidad para desarrollarse incluso en concentraciones elevadas de hasta 700 mg/kg de ambos metales sin perder la capacidad de crecer de manera adecuada. Durante la evaluación, se encontró que la planta distribuye los metales de forma diferenciada en sus tejidos. En el caso del arsénico, las raíces acumularon la mayor proporción, con un 66.53 %, seguidas por los tallos con 20.45 % y finalmente las hojas con 13.03 %. Para el plomo se observó un patrón similar: las raíces concentraron el 64.41 %, los tallos el 21.27 % y las hojas el

14.32%. Esta distribución demuestra que *B. pilosa* actúa principalmente como un eficaz sumidero radicular, reteniendo la mayor parte del contaminante en las raíces, pero también es capaz de trasladar una fracción significativa hacia la parte aérea. Este comportamiento es especialmente relevante desde la perspectiva de la fitorremediación con plantas hiperacumulativas, ya que indica que la especie puede funcionar tanto en procesos de fitoestabilización (reteniendo el metal en las raíces y reduciendo su movilidad en el suelo) como en fitoextracción parcial (cuando parte del metal se acumula en tallos y hojas).

Helecho (*Pteris vittata* L.)

Es un helecho que se reconoce fácilmente por su rizoma delgado, de unos 8 mm de grosor, cubierto por pequeñas escamas de color café pálido. Sus hojas, llamadas frondas, crecen en grupos y se encuentran separadas entre sí por alrededor de 1 cm. Este helecho puede alcanzar tamaños impresionantes, desde 75 cm hasta casi 1.8 metros de altura. Lo que hace especialmente interesante a *Pteris vittata* es que fue la primera planta identificada como hiperacumuladora de arsénico, un descubrimiento realizado en 2001 que llamó rápidamente la atención de la comunidad científica [29]. Desde entonces, numerosos estudios han buscado entender cómo esta planta es capaz de sobrevivir y crecer en suelos contaminados con arsénico sin dañarse. Las investigaciones han mostrado que no solo absorbe el arsénico con gran eficiencia, sino que también lo transporta dentro de sus tejidos y lo almacena de manera segura en pequeñas estructuras dentro de sus células llamadas vacuolas. Gracias a este proceso, el helecho puede limpiar suelos contaminados, lo que lo convierte en una de las especies más prometedoras para la fitorremediación, una técnica que utiliza plantas para descontaminar ambientes.

Los resultados del análisis realizado por [30] demuestran que las hojas de las plantas fueron acumulando cada vez más cadmio a medida que aumentaba la concentración de este metal en el medio de cultivo y conforme transcurría el tiempo de exposición. Es decir, cuanto más cadmio había disponible y durante más tiempo estuvieron las plantas en contacto con él, mayor fue la cantidad que lograron absorber y almacenar en sus tejidos. Durante los primeros cinco días, la acumulación todavía era limitada. Solo aquellas plantas sometidas a la concentración más alta de cadmio mostraron valores apreciables, entre 5 y 10 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco. Estas cantidades indican que, en una fase temprana del tratamiento, las plantas necesitan enfrentar niveles relativamente elevados del metal para que la absorción sea claramente detectable. Sin embargo, el panorama cambia de forma notable al llegar al día 15. En este punto, las plantas tratadas con 100 micromoles de cadmio presentaron concentraciones superiores a 150 ppm en sus hojas, lo que evidencia un incremento muy marcado. Esto sugiere que, con el paso del tiempo, las hojas actúan como un depósito eficiente del metal, acumulándolo hasta alcanzar niveles considerablemente altos.

De acuerdo a los resultados presentados por [31], obtenidos a partir de experimentos realizados en invernadero, la especie

Pteris vittata L. destaca por su notable capacidad para remediar suelos contaminados con cadmio (Cd), un metal pesado que representa un riesgo ambiental y sanitario. Los investigadores comprobaron que esta planta no solo es capaz de sobrevivir en suelos con altos niveles de cadmio, sino que también mantiene un crecimiento normal aún bajo condiciones de estrés metálico. En el estudio, fue cultivada en sustratos que contenían desde 80 mg/kg hasta 301 mg/kg de cadmio, valores que superan ampliamente lo que se considera un nivel seguro para la mayoría de las especies vegetales. Pese a ello, la planta no mostró síntomas visibles de daño, como reducción del crecimiento, clorosis o marchitez. Este comportamiento indica una fuerte capacidad de adaptación, lo que la convierte en una de las especies más resistentes dentro del grupo de plantas con potencial fitorremediador. Lo más relevante es que, además de tolerar estas concentraciones, *P. vittata* logró acumular en sus tejidos hasta 186 mg/kg de cadmio. Esto significa que la planta no solo sobrevive en suelos contaminados, sino que extrae activamente el metal y lo almacena en sus tejidos. Además, es importante considerar que la variedad de planta evaluada en este estudio presenta características fisiológicas particulares que influyen directamente en la absorción, translocación y acumulación de metales pesados. Esta variedad se distingue por su sistema radicular bien desarrollado y su capacidad para explorar mayores volúmenes de suelo y facilita la captación tanto de nutrientes esenciales como de elementos tóxicos.

Hierba mora (*Solanum americanum* M.)

Es una especie herbácea perteneciente a la familia de las Solanáceas, conocida comúnmente como hierba mora, ampliamente distribuida en regiones tropicales y subtropicales de América, África, Asia y Oceanía. Esta amplia distribución geográfica se debe a su notable adaptabilidad ecológica, que le permite desarrollarse en una amplia variedad de condiciones ambientales. Se considera una planta de importancia ecológica y agrícola debido a su alta capacidad de adaptación y su frecuente presencia en suelos, áreas agrícolas donde es considerada como una maleza y bordes de caminos. Su habilidad para colonizar rápidamente espacios abiertos o degradados la convierte en una especie pionera, contribuyendo al restablecimiento de la cobertura vegetal y participando en procesos de regeneración ecológica en suelos contaminados con Cd considerada por [32] como una planta hiperacumuladora.

En estudios posteriores Afonso [33], mencionaron el potencial de la especie *Solanum viarum* de la misma familia por su capacidad para absorber metales como el Cu, Zn Mn, Cr, Ni y Pb, indicando la posibilidad de su aplicación como planta fitorremediadora. Sin embargo, existen complejos quelantes que complementan las funciones metabólicas de *Solanum americanum* M. para mejorar la extracción de cadmio a través de sus tejidos principalmente en raíz debido al esfuerzo que necesitan para transportar metales hacia partes superiores [34]. En más estudios realizados se determinó la importancia fitorremediadora de esta planta que alcanzó hasta 129.67 mg/kg en 7 días, gran resultado incluso para especies hiperacumuladoras de metales pesados [35].

II. CONCLUSIONES

En términos generales, la información obtenida evidencia que las plantas documentadas: girasol (*Helianthus annuus*), romerillo (*Bidens pilosa* L.), helecho (*Pteris vittata* L.) y hierba mora (*Solanum americanum* M.) presentan una notable capacidad para absorber y movilizar metales pesados desde el suelo hacia sus diferentes órganos. Estas plantas acumuladoras utilizan mecanismos de transporte interno para tolerar las altas concentraciones de metales pesados en el suelo, sin causar efectos en su desarrollo. Estas especies de plantas son una excelente alternativa para el tratamiento de contaminación del suelo por metales pesados.

III. REFERENCIAS

- [1] Wan Y, Liu J, Zhuang Z, Wang Q, Li H. Heavy metals in agricultural soils: sources, influencing factors, and remediation strategies. *Toxics*. 2024;12(1):63. doi:10.3390/toxics12010063.
- [2] Islam MM, Saxena N, Sharma D. Phytoremediation as a green and sustainable prospective method for heavy metal contamination: a review. *RSC Sustainability*. 2024;2:1269-1288. doi:10.1039/D3SU00440F.
- [3] Khatoon Z, Orozco-Mosqueda MC, Santoyo G. Microbial contributions to heavy metal phytoremediation in agricultural soils: a review. *Microorganisms*. 2024;12(10):1945. doi:10.3390/microorganisms12101945.
- [4] Cortés L, Martín F, Sarria M. Evaluación de la toxicidad de metales pesados en dos suelos agrícolas mediante bioensayos. *Temas Agrarios*. 2017;22(2):43-53. doi:10.21897/rta.v22i2.943.
- [5] Covarrubias SA, Peña-Cabral JJ. Environmental contamination by heavy metals in Mexico: problems and phytoremediation strategies. 2017.
- [6] Wong-Argüelles C, Carranza-Álvarez C, Alonso-Castro AJ, Ilizaliturri-Hernández CA. Fitorremediación in situ en México: una revisión. *Rev Fitotec Mex*. 2021;44(2):133-143.
- [7] Sharma P, Kumar A, Singh R, Kumar V. Heavy metal contamination in agricultural soils: sources, impacts, and remediation strategies. *Agronomy*. 2023;13(6):1521. doi:10.3390/agronomy13061521.
- [8] Islam MM, Saxena N, Sharma D. Phytoremediation as a green and sustainable prospective method for heavy metal contamination: a review. *RSC Sustainability*. 2024;2:1269-1288. doi:10.1039/D3SU00440F.
- [9] Bhat BA, Rather MA, Bilal T, Nazir R, Qadir RU, Mir RA. Plant hyperaccumulators: a state-of-the-art review on mechanism of heavy metal transport and sequestration. *Front Plant Sci*. 2025;16:1631378. doi:10.3389/fpls.2025.1631378.
- [10] Huang W, Zhang C, Zhu B, Liu X, Xiao H, Liu S, Shao H. Systematic evaluation of plant metals/metalloids accumulation efficiency: a global synthesis of bioaccumulation and translocation factors. *Front Plant Sci*. 2025;16:1602951. doi:10.3389/fpls.2025.1602951.
- [11] Islam MM, Saxena N, Sharma D. Phytoremediation as a green and sustainable prospective method for heavy metal contamination: a review. *RSC Sustainability*. 2024;2:1269-1288. doi:10.1039/D3SU00440F.
- [12] Ansari, A. K. M., Iqbal, M., Ahmad, M., Munir, M., Gaffar, A. S., & Chaachouay, N. (2024). Heavy metal stress and cellular antioxidant systems of plants: A review. *Agricultural Reviews*, 45(3), 400–409. https://doi.org/10.18805/ag.RF-321
- [13] Niu Z, Li X, Mahmood M. Accumulation potential of cadmium and lead by sunflower (*Helianthus annuus* L.) under citric and glutaric acid-assisted phytoextraction. *Int J Environ Res Public Health*. 2023;20(5):4107.
- [14] Marín OAA, Rubio I. Estudio de la eficiencia de la fitorremediación empleando *Helianthus annuus* para la absorción de metales pesados en suelos contaminados. *CITECSA*. 2022;14(24):5-14.
- [15] Clemente Huachen JP, Medina Contreras J, Pfuño JDL, Pariona Aguilar LA, Gutiérrez Vilchez PP. Fitorremediación en suelos contaminados con Cd usando girasol (*Helianthus annuus* L. var. Sunbright). *Acta Agronómica*. 2021;70(2):163-170.
- [16] Alaboudi KA, Ahmed B, Brodie G. Phytoremediation of Pb and Cd contaminated soils using sunflower (*Helianthus annuus*). *Ann Agric Sci*. 2018;63(1):123-127.
- [17] Kötschau A, Büchel G, Einax JW, von Tümping W, Merten D. Sunflower (*Helianthus annuus*): phytoextraction capacity for heavy metals on a mining-influenced area in Thuringia, Germany. *Environ Earth Sci*. 2014;72(6):2023-2031.

- [18] Piršelová B, et al. Evaluation of the tolerance and accumulation potential of selected sunflower hybrids grown in soil contaminated with cadmium. *S Afr J Bot.* 2024;167:419-428.
- [19] Munive Cerrón R, Gamarrá Sánchez G, Munive Yachachi Y, Puertas Ramos F, Valdiviezo Gonzales L, Cabello Torres R. Absorción de plomo y cadmio por girasol de un suelo contaminado, remediado con enmiendas orgánicas. *Sci Agropecu.* 2020;11(2):177-186.
- [20] Rivera FMP, Lázaro EB. Aplicación de la fitorremediación en suelos contaminados por metales pesados utilizando *Helianthus annuus* L. *Prospect Univ Ing Tecnol.* 2012;9(1):31-45.
- [21] Shahid, M., Dumat, C., Khalid, S., Niazi, N. K., & Antunes, P. M. C. (2017). Cadmium bioavailability, uptake, toxicity and detoxification in the soil-plant system. *Plant and Soil*, 421, 73–101. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3294-5>
- [22] Cortes Aguilar TA, Tovar Arriaga A. Evaluación del impacto ambiental de una luminaria residencial: un enfoque sistema-producto. *Investig Cienc Apl Ing.* 2021;4(25):7-15.
- [23] Chico Ruiz J, Cerna-Rebaza de Chico L, Rodríguez-Espejo M, Guerrero-Padilla M. Capacidad remediadora de la raíz de girasol (*Helianthus annuus*) sometida a diferentes concentraciones de plomo. *Rev Cient Fac Cienc Biológicas.* 2012;32(2):13-19.
- [24] Tintaya DJR. Estimación de la capacidad fitorremediadora del girasol (*Helianthus annuus*) mediante enmiendas en suelos contaminados por metales pesados. *Rev Investig Cienc Tecnol Desarro.* 2018;4(1).
- [25] Mejía Ochoa FJ, Sánchez Anastacio I, Morales Carrera UA. Investigaciones en desarrollo sustentable: metaanálisis de un lustro. *Investig Cienc Apl Ing.* 2024;7(43).
- [26] Bartolome AP, Villaseñor IM, Yang WC. *Bidens pilosa* L. (Asteraceae): botanical properties, traditional uses, phytochemistry, and pharmacology. *Evid Based Complement Alternat Med.* 2013;2013:340215.
- [27] Wei S, Zhou Q. Screening of Chinese weed species for cadmium tolerance and accumulation characteristics. *Int J Phytoremediation.* 2008;10(6):584-597.
- [28] Valqui NCV, Oliva M, Briceño NBR. Efectos de la toxicidad de cadmio en la morfología de plantas de *Bidens pilosa* L. *Rev Científica Dékamu Agropec.* 2022;3(2):54-62.
- [29] Chen YC. Study on removal of heavy metals (As, Pb) in agricultural soils using *Bidens pilosa* L. *J Degrad Min Lands Manag.* 2025;12(2).
- [30] Xie QE, Yan XL, Liao XY, Li X. The arsenic hyperaccumulator fern *Pteris vittata* L. *Environ Sci Technol.* 2009;43(22):8488-8495. doi:10.1021/es9014647.
- [31] Balestri M, Bottega S, Spanò C. Response of *Pteris vittata* to different cadmium treatments. *Acta Physiol Plant.* 2014;36(3):767-775.
- [32] Dou X, Dai H, Skuza L, Wei S. Cadmium removal potential of hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. under two planting modes in three years continuous phytoremediation. *Environ Pollut.* 2022;307:119493. doi:10.1016/j.envpol.2022.119493.
- [33] Guzmán Morales AR, Oriol Vázquez P, Cruz La Paz O, Valdés Carmentate R, Valdés Hernández PA. Fitotecnología para la recuperación de agroecosistemas contaminados con metales pesados por desechos industriales. *Centro Agrícola.* 2021;48(3):43-52.
- [34] Afonso TF, Demarco CF, Pieniz S, Camargo FA, Quadro MS, Andreazza R. Potential of *Solanum viarum* in phytoremediation of heavy metals in mining areas, southern Brazil. *Environ Sci Pollut Res.* 2019;26(23):24132-24142.
- [35] Sharma P, Rathee S, Ahmad M, Batish DR, Singh HP, Kohli RK. Biodegradable chelant-metal complexes enhance cadmium phytoextraction efficiency of *Solanum americanum*. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2022;29(38):57102-57111. doi:10.1007/s11356-022-19622-z.
- [36] Zhou J, et al. Physiological and multi-omics analysis in leaves of *Solanum americanum* in response to Cd toxicity. *Plants.* 2025;14(14):2131. doi:10.3390/plants14142131.