

FITOMINERÍA DE METALES CRÍTICOS: POTENCIAL Y APLICACIONES EN MÉXICO

PHYTOMINING OF CRITICAL METALS: POTENTIAL AND APPLICATIONS IN MEXICO

RESUMEN

Los metales críticos son esenciales para la industria moderna, la transición energética y el desarrollo tecnológico. Su extracción mediante minería convencional genera impactos ambientales significativos y enfrenta riesgos asociados a la disponibilidad y a la concentración geográfica de las reservas. La fitominería y la fitorremediación representan actualmente una ruta alternativa para la obtención de estos. La generación masiva de residuos agroalimentarios y agromineros en México ofrece una vía alterna para recuperar metales críticos como el hierro, el manganeso, el zinc, el cobre, el níquel, el cobalto y las tierras raras. Esta revisión aborda la definición y las aplicaciones de los metales críticos, los métodos tradicionales de obtención, los procesos de fitorremediación y fitominería, y el potencial de los residuos agroindustriales producidos en gran volumen como nuevas fuentes de metales estratégicos. Se discuten los avances, las limitaciones y las oportunidades para integrar estas técnicas en estrategias de economía circular y de sostenibilidad.

Palabras clave: metales críticos, fitominería, residuos agroindustriales, residuos agromineros.

ABSTRACT

Critical metals are essential for modern industry, the energy transition, and technological development. Their extraction through conventional mining generates significant environmental impacts and faces risks associated with the availability and geographic concentration of reserves. Phytomining and phytoremediation currently present an alternative route for obtaining these metals. The massive generation of agri-food and agromining waste in Mexico offers an alternative way to recover critical metals such as iron, manganese, zinc, copper, nickel, cobalt, and rare earth elements. This review addresses the definition and applications of critical

Ciencia, Tecnología y Biología

Bertha Guajardo Paz ¹,
Rodolfo Ramos González ²,
Mayela Govea Salas ¹,
Nayra Ochoa Viñals ¹,
Alberto Antonio Neira Vielma ³,
José Luis Martínez Hernández ¹,
Anna Iliná ¹

¹ Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila, Blvd. V. Carranza e Ing. José Cárdenas V., Col. República, 25280 Saltillo, Coahuila, México

² SECIHTI - Universidad Autónoma de Coahuila, Blvd. V. Carranza e Ing. José Cárdenas V., Col. República, 25280 Saltillo, Coahuila, México

³ Centro de Estudios e Investigaciones Interdisciplinarias, Centro Cultural 2º piso. Ciudad Universitaria. Carr. México km. 13. 25350, Arteaga, Coahuila

Correspondencia: Anna Iliná, Correo: annailina@uadec.edu.mx,
ORCID: 0000-0001-5349-2852



CienciaAcierta

metals, traditional extraction methods, phytoremediation and phytomining processes, and the potential of high-volume agro-industrial waste as new sources of strategic metals. Advances, limitations, and opportunities for integrating these techniques into circular economy and sustainability strategies are discussed.

Keywords: critical metals, phytomining, agro-industrial waste, agro-mining waste.

INTRODUCCIÓN

Los metales críticos (MC) constituyen un grupo de elementos esenciales para el desarrollo tecnológico, energético y económico de las sociedades modernas (Butu y col., 2023). Su creciente demanda mundial se debe al avance de tecnologías como baterías recargables, vehículos eléctricos, paneles solares, turbinas eólicas, catalizadores, semiconductores, sensores ópticos y dispositivos electrónicos (Valla y Vieira, 2025). Sin embargo, la disponibilidad de estos metales (Ni, Co, Cu, Mn y Zn, etc.) está limitada por su concentración geográfica, la complejidad de su extracción y el impacto ambiental asociado a los procesos de explotación minera. (Ryter y col., 2025).

A diferencia de los metales de uso tradicional, los metales críticos suelen encontrarse en depósitos geológicamente dispersos o asociados a otros minerales, lo que dificulta su extracción y aumenta la presión ambiental generada por las industrias extractivas (Lèbre y col., 2023). Esta situación ha incentivado la búsqueda de fuentes alternativas de recuperación, incluidas las de residuos agroindustriales y agromineros (Van Der Ent y col., 2013, 2015).

La fitoremediación y fitominería se han consolidado como estrategias ambientalmente sostenibles para la recuperación, estabilización o eliminación de contaminantes metálicos en suelos, aguas y sedimentos (Reeves y Baker, 2000). En el contexto de los metales críticos - tales como Ni, Co, Mn, Zn, las tierras raras y los metales asociados a procesos industriales estratégicos - la fitominería adquiere relevancia debido a la necesidad de métodos de recuperación menos invasivos y que aporten valor económico (Rylott y col., 2025). Este enfoque se basa en la capacidad natural de ciertas especies vegetales para absorber, translocar y acumular metales en concentraciones elevadas, superando,



en algunos casos, los miles de mg/kg de peso seco. La técnica abarca diversos mecanismos fisiológicos que permiten tanto la descontaminación ambiental como la obtención de metales mediante procesos complementarios que maneja la fitominería (Sharma y col., 2023).

La revisión aborda la definición y las aplicaciones de los metales críticos, los métodos tradicionales de obtención, los procesos de fitorremediación y fitominería, y el potencial de los residuos agroindustriales producidos en gran volumen como nuevas fuentes de metales estratégicos. Se discuten los avances, las limitaciones y las oportunidades para integrar estas técnicas en estrategias de economía circular y sostenibilidad.

METODOLOGÍA

La recopilación de información se realizó mediante una búsqueda documental estructurada con el objetivo de identificar estudios, reportes técnicos y datos oficiales relacionados con la distribución y el potencial de metales críticos en México y Fitominería. La búsqueda se efectuó entre 2000 y 2025 en bases de datos científicas (Scopus, Web of Science y ScienceDirect), así como en informes especializados del USGS y de la IEA, y en fuentes gubernamentales nacionales, principalmente el Servicio Geológico Mexicano y la Secretaría de Economía. Se emplearon términos en español e inglés. Se consideraron documentos que aportaran información verificable. Se excluyeron fuentes sin respaldo técnico, documentos duplicados o información no actualizada. Los datos seleccionados se organizaron en una revisión bibliográfica.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

METALES CRÍTICOS Y SU DISTRIBUCIÓN EN MÉXICO

Los metales críticos son elementos cuya importancia económica y tecnológica es alta, mientras que su riesgo de suministro es elevado. Las agencias internacionales, como el U.S. Geological Survey (2022) y la Agencia Internacional de Energía (2025), los definen en función de tres factores: disponibilidad limitada, dependencia estratégica y alta demanda industrial (USGS, 2022; IEA, 2025). La Tabla 1 presenta los principales metales críticos y sus aplicaciones industriales.



Tabla 1. Principales metales críticos y sus aplicaciones (Deberdt y col., 2025).

Metal crítico	Aplicaciones industriales
Litio (Li)	Baterías de iones de litio, almacenamiento de energía.
Cobalto (Co)	Cátodos de baterías, superaleaciones.
Níquel (Ni)	Acero inoxidable, baterías, catalizadores.
Galio (Ga)	Semiconductores, fotodetectores, LEDs.
Germanio (Ge)	Fibra óptica, paneles solares, sensores infrarrojos.
Indio (In)	Pantallas LCD, recubrimientos ópticos.
Tierras raras (Nd, Dy, La)	Imanes permanentes, turbinas eólicas.

El aumento en el consumo de dispositivos electrónicos, infraestructura energética, sistemas de almacenamiento y catalizadores industriales ha puesto en el centro de la discusión científica y económica elementos como el litio, el cobalto, el manganeso, el galio, el germanio, las tierras raras y el níquel (De Berdt y col., 2025) (Tabla 1).

La disponibilidad mundial de metales críticos está fuertemente concentrada en unos pocos países, como China en tierras raras, República Democrática del Congo en cobalto, y Australia y Chile en litio, mientras que en México (Coll-Hurtado y col., 2001) la presencia de estos elementos se distribuye en yacimientos aún poco desarrollados, destacando el litio en Sonora, el manganeso en Hidalgo, la fluorita en San Luis Potosí y el potencial geológico de tierras raras en estados del norte y sur del país (Tabla 2).

TABLA 2. DISTRIBUCIÓN DE METALES CRÍTICOS Y ESTRATÉGICOS EN MÉXICO (COLL-HURTADO Y COL., 2001).

Metal	Estados principales	Situación
Litio	Sonora (principal), BCS, Coahuila, SLP, Zacatecas	Exploración avanzada; Sonora destaca globalmente.
Tierras raras (REE)	Sonora, Chihuahua, Coahuila, Durango, Sinaloa, Hidalgo, Oaxaca, Chiapas	Altas ocurrencias; sin explotación comercial.
Grafito	Sonora, Oaxaca	Sonora es el único productor actual.
Fluorita	San Luis Potosí, Coahuila, Durango	México es uno de los mayores productores mundiales.
Manganeso	Hidalgo	Producción dominante a nivel nacional.
Cobre (estratégico)	Sonora, Zacatecas, Chihuahua, Guerrero, SLP, Durango	Sonora lidera; cobre es considerado clave para la energía.

Fitominería -alternativa a la minería tradicional

Los métodos tradicionales de obtención de metales críticos incluyen la pirometalurgia, la hidrometalurgia y la biohidrometalurgia, procesos ampliamente utilizados en la minería convencional para la recuperación de metales estratégicos y elementos de alto valor tecnológico. Estos métodos se describen en estudios sobre la metalurgia extractiva y la gestión de recursos minerales, donde se detallan los procesos de recuperación de germanio, indio y otros metales críticos mediante rutas termoquímicas y químicas (Ruiz y col., 2018; Werner y col., 2017). Asimismo, análisis más amplios sobre minería y recursos minerales en México y a nivel global mencionan estas tecnologías como parte fundamental de la cadena extractiva tradicional (Coll-Hurtado y col., 2001; Vivoda y col., 2025). Las dos primeras, ampliamente utilizadas para la obtención de



metales base y metales preciosos, requieren elevadas cantidades de energía, generan emisiones contaminantes y producen residuos secundarios difíciles de manejar (Tabla 3). La hidrometalurgia, aunque más selectiva, implica el uso intensivo de reactivos químicos y etapas posteriores de purificación. En contraste, la biohidrometalurgia utiliza microorganismos para solubilizar metales presentes en minerales de baja ley, aunque este proceso es más lento y depende de condiciones ambientales específicas. Los tres procesos permiten extraer metales a partir de minerales, pero generan altos impactos ambientales: consumo energético elevado, emisión de gases tóxicos, producción de relaves y drenaje ácido de las minas. La pirometalurgia, la hidrometalurgia y la biohidrometalurgia permiten extraer metales a partir de minerales, pero estos procesos generan impactos ambientales significativos, entre ellos un elevado consumo energético, la emisión de gases contaminantes y la producción de grandes volúmenes de relaves que pueden originar problemas como el drenaje ácido de minas. Estos efectos han sido ampliamente documentados en estudios sobre minería y gestión de residuos mineros, donde se señalan los riesgos ambientales asociados a la extracción tradicional, incluyendo emisiones tóxicas y problemas derivados de los depósitos de desechos (Coll-Hurtado y col., 2001; Vivoda y col., 2025; Solazzo y col., 2021). A ello se suma que la contaminación por metales resultante de la actividad minera puede impactar suelos agrícolas y ecosistemas circundantes, reflejando el alcance de estos procesos extractivos (Ponce-Hernández y col., 2025; Ruiz-Huerta y col., 2022) (Tabla 3).

La fitorremediación y la fitominería, tecnologías innovadoras que actualmente están en constante desarrollo, utilizan plantas para remover o estabilizar contaminantes metálicos del suelo (Kikis y col., 2024). Dependiendo del mecanismo, la fitorremediación puede incluir fitoextracción, fitoestabilización, rizofiltración o fitodegradación (Ali y col. 2013). En particular, la fitoextracción emplea especies hiperacumuladoras capaces de concentrar metales por encima de los niveles presentes en su entorno (Pandey y Bajpai, 2019). Este principio ha evolucionado hacia el concepto de fitominería, que propone cultivar estas plantas en suelos mineralizados o en residuos mineros para recuperar metales de interés comercial.



Tabla 3. Comparación entre fitominería y minería convencional para metales críticos

Criterio	Fitominería	Minería convencional
Impacto ambiental	Bajo: evita la excavación, reduce la erosión y las emisiones.	Alto: genera jales, emisiones, consumo de agua y energía.
Profundidad de extracción	Superficial (0–50 cm), limitada a los metales biodisponibles.	Profunda (metros a kilómetros) accede a cuerpos minerales masivos.
Concentración del recurso	Adecuada para suelos de baja ley o dispersos.	Eficiente en depósitos de alta ley.
Costo operativo	Bajo–moderado: requiere tiempo (ciclos agrícolas).	Alto: depende de la maquinaria, la energía, los explosivos y el transporte.
Escala de producción	Piloto–mediana: ideal para sitios específicos.	Mediana–grande; producción industrial a gran escala.
Co-beneficios	Restauración ecológica, control de la erosión, captura de carbono, biomasa útil.	Pocos co-beneficios ecológicos; requiere mitigación posterior.
Tiempo de retorno	Lento–moderado (de meses a años según el metal).	Rápido a escala industrial.
Aplicabilidad en México	Alta en jales, suelos degradados y zonas ultramáficas; útil para Mn, Ni, REE y Zn.	Alta en grandes depósitos de Cu, Au, Ag, Mn, fluorita, Fe y litio.
Riesgo para comunidades	Muy bajo: no genera contaminantes persistentes.	Alto–moderado; riesgos de polvo, drenaje ácido y de metales en el agua.
Enfoque regulatorio	Innovador: requiere marcos normativos flexibles.	Establecido; regulado por la ley minera y ambiental.



Aunque la fitominería ha mostrado resultados prometedores en la extracción de níquel, cobalto y selenio (van der y col., 2013; Nkrumah y van der Ent, 2023), aún existen desafíos técnicos para su aplicación en elementos como litio, galio o indio, debido a la ausencia de plantas que los acumulen de forma natural. La Tabla 3 muestra las ventajas de la fitominería frente a la minería convencional en términos de protección del medio ambiente y sustentabilidad. La Tabla 4 muestra algunas especies vegetales de México de gran potencial para su aplicación en la recuperación de metales críticos.

TABLA 4. ESPECIES NATIVAS O ADAPTADAS EN MÉXICO CON POTENCIAL PARA FITOMINERÍA DE METALES CRÍTICOS

Metal	Especies nativas o presentes en México	Potencial de acumulación	Hábitats mexicanos asociados	Aplicaciones relevantes
Níquel (Ni)	<i>Heliotropium curassavicum</i> , <i>Phyllanthus sp.</i> , <i>Hybanthus floribundus</i> , <i>Alyssum murale</i> (introducida, adaptable)	1000–3000 mg/kg; hasta 1–3 % en hiperacumuladoras	Suelos ultramáficos de Oaxaca, Guerrero, Chiapas	Recuperación de Ni y Co, rehabilitación de suelos y generación de "bio-ores".
Cobalto (Co)	<i>Psychotria sp.</i> , <i>Haumaniastrum robertii</i> (adaptable), especies de <i>Eupatorium</i>	500–2000 mg/kg	Asociado a zonas lateríticas y ultramáficas en sur y occidente	Co-extracción junto con Ni; refinado de óxidos metálicos.
Manganeso (Mn)	<i>Austroplenckia populnea</i> , <i>Vernonia amygdalina</i> , <i>Baccharis salicifolia</i> , <i>Dicranopteris linearis</i>	10,000–30,000 mg/kg (hiperacumulación)	Hidalgo (Molango), Oaxaca, Guerrero, zonas volcánicas	Producción de bio-óxidos de Mn para baterías y remediación.

Tierras raras (REE)	<i>Dicranopteris linearis</i> , <i>Pteris vittata</i> , <i>Pityrogramma calomelanos</i> , <i>Cyperus sp.</i>	500–3000 mg/kg dependiendo del elemento	Oaxaca, Coahuila, Durango, Chihuahua, Sonora	Recuperación de La, Ce, Nd, Y; aprovechamiento en imanes permanentes y catalizadores.
Zinc (Zn)	<i>Prosopis juliflora</i> , <i>Noccaea caerulescens</i> , <i>Salicornia bigelovii</i> , <i>Baccharis salicifolia</i>	3000–10,000 mg/kg	Zacatecas, Coahuila, Chihuahua, SLP	Fitominería y remediación de jales Pb–Zn.
Cobre (Cu)	<i>Prosopis sp.</i> , <i>Paspalum distichum</i> , <i>Silene vulgaris</i> , <i>Baccharis sp.</i>	300–1500 mg/kg	Sonora, Zacatecas, Chihuahua	Recuperación de Cu de jales oxidativos y suelos degradados.
Litio (Li)	<i>Atriplex canescens</i> , <i>Salicornia bigelovii</i> , <i>Sarcocornia pacifica</i> , <i>Distichlis spicata</i>	50–500 mg/kg (acumulación moderada)	Sonora, BCS, Coahuila, SLP (suelos salinos)	Línea emergente; potencial en arcillas litíferas y salares secos.
Cromo (Cr)	<i>Pteris vittata</i> , <i>Leersia hexandra</i> , <i>Pityrogramma calomelanos</i>	1000–5000 mg/kg	Durango, Chihuahua, Hidalgo	Coextracción, fitoestabilización, restauración.

La fitominería se apoya en una serie de procesos complementarios que potencian la movilización, absorción y recuperación de metales críticos a



partir de suelos y jales (Tabla 5). La Tabla 5 resume los principales mecanismos fisiológicos de acumulación de metales críticos en plantas.

Tabla 5. Mecanismos fisiológicos de acumulación de metales críticos en plantas hiperacumuladoras (Tao y col., 2022)

Mecanismo fisiológico	Descripción del proceso	Etapa del ciclo de acumulación	Metales críticos asociados	Ejemplos de especies
Movilización rizosférica	Las raíces liberan ácidos orgánicos, compuestos fenólicos y exudados que solubilizan metales y aumentan su biodisponibilidad.	Pre-absorción	Ni, Co, Mn, Zn, REE, Li (en estudios emergentes)	<i>Alyssum murale</i> , <i>Phyllanthus sp.</i> , <i>Salicornia bigelovii</i>
Transporte activo a través de la membrana plasmática	Proteínas transportadoras (HMA, NRAMP, ZIP, CAX) transportan iones metálicos desde la rizosfera hacia las células de la raíz.	Absorción radicular	Ni, Co, Zn, Mn, Cu	<i>Noccaea caerulescens</i> , <i>Dicranopteris linearis</i> , <i>Atriplex canescens</i>
Quelación intracelular (fitoquelatina y metalotioneínas)	Las moléculas quelantes neutralizan la toxicidad del metal al unirlos a complejos solubles y estables.	Detoxificación primaria	Ni, Co, Cu, Zn, REE	<i>Pteris vittata</i> , <i>Phyllanthus balgooyi</i> , <i>Prosopis sp.</i>
Almacenaje en vacuolas	Los complejos metálicos se transportan hacia vacuolas para	Almacenamiento seguro	Ni, Co, Mn, Zn, Cr	<i>Alyssum sp.</i> , <i>Heliotropium curassavicum</i>



	reducir su interacción con procesos metabólicos sensibles.			<i>m, Leersia hexandra</i>
Translocación xilemática	Los metales quelados se mueven por la xilema hacia los tallos y las hojas mediante la presión de raíz y transportadores específicos.	Transporte interno	Ni, Mn, Zn, REE	<i>Phyllanthus sp., Dicranopteris linearis</i>
Acumulación en hojas y tejidos aéreos	Los metales se concentran en hojas, epidermis o tricomas, donde son menos perjudiciales para la planta.	Acumulación final	Ni, Mn, Zn, Co, REE	<i>Alyssum murale, Vernonia amygdalina, Pityrogramma calomelanos</i>
Tolerancia antioxidante y enzimática	Incremento de SOD, CAT, APX y glutatión para evitar daño oxidativo inducido por metales.	Protección fisiológica	Co, Cu, Mn, Zn	<i>Prosopis juliflora, Salicornia sp.</i>
Simbiosis microbiana (rizobacterias y hongos micorrízicos)	Microorganismos mejoran solubilidad, captación y translocación de metales mediante sideróforos y enzimas.	Potenciación del proceso	Ni, Co, REE, Mn, Li	AMF en <i>Noccaea</i> , bacterias en <i>Atriplex</i>
Exudación de protones	La planta reduce el pH de la	Pre-absorción	Ni, Mn, REE	<i>Alyssum murale,</i>



(acidificación del suelo)	rizosfera, aumentando la solubilidad de metales como Ni, Mn y REE.			<i>Eupatorium sp.</i>
Acumulación en tricomas o glándulas epidérmicas	Los metales se depositan en estructuras externas especializadas para aislarlos del metabolismo.	Estrategia avanzada de almacenamiento	Ni, Mn, Zn	<i>Alyssum, Hybanthus floribundus</i>
Transporte facilitado por complejos orgánicos (ácidos cítrico, málico, oxálico)	Los ácidos orgánicos generan complejos móviles que favorecen la translocación a larga distancia.	Transporte interno	Ni, Co, Mn, REE	Helechos y especies de <i>Phyllanthus</i>
Mecanismos halófitos aplicados a Li	Las plantas tolerantes a salinidad absorben Li de forma pasiva junto con Na ⁺ , facilitando acumulación moderada.	Absorción radicular	Litio	<i>Salicornia, Sarcocornia, Atriplex</i>

La rizodegradación desempeña un papel central: las raíces liberan ácidos orgánicos y compuestos quelantes que incrementan la biodisponibilidad de metales como Ni, Mn, Co y de las tierras raras (REE). Este efecto puede reforzarse mediante la interacción con microorganismos rizosféricos (bacterias y hongos micorrízicos), que producen sideróforos y enzimas capaces de solubilizar metales y de mejorar la tolerancia vegetal al estrés metálico (Rylott y van der Ent, 2025). Durante la fase de extracción, procesos como la fitoextracción cíclica permiten preconcentrar los elementos mediante cosechas sucesivas, mientras que mecanismos fisiológicos, como la quelación interna, el transporte activo y el



almacenamiento vacuolar, entre otros, aseguran la acumulación segura en tejidos aéreos (Tabla 5). En paralelo, la bioadsorción y la bioprecipitación en raíces y en superficies foliares pueden inmovilizar o concentrar ciertos metales en formas oxidativas o carbonatadas (Chaney y col., 2007). Finalmente, una vez cosechada la biomasa, se aplican procesos de pirólisis, secado o calcinación para producir “bio-óxidos” o “*bio-ore*”, *materiales ricos en metales aptos para la recuperación metalúrgica*. Estos procesos integrados permiten que la fitominería funcione no solo como tecnología extractiva, sino también como estrategia de remediación y valorización dentro de esquemas de economía circular, mostrando ventajas frente a la minería convencional (Tabla 3).

Residuos agroindustriales y agro-mineros – una fuente alternativa de metales

En México y en otras regiones del mundo, los residuos agroindustriales constituyen un recurso subvalorado para la recuperación de metales, ya que varios estudios han demostrado su capacidad para adsorber, acumular o concentrar metales pesados y elementos críticos. Investigaciones sobre bagazo de agave (Iñiguez y col., 2014; Kestur y col., 2013), cáscara de nuez y otros residuos vegetales (Banerjee y col., 2018; Bernardo y col., 2009; Gallardo y col., 2020; Queirós y col., 2020) evidencian que estos materiales pueden actuar como biosorbentes eficientes. Además, en México, la contaminación por metales en suelos agrícolas es un problema documentado (Loyde de la Cruz y col., 2022; Ponce-Hernández y col., 2025), lo que refuerza la necesidad de valorizar los residuos agroindustriales en estrategias de remediación y recuperación de metales. En calidad de residuos agroindustriales se consideran los subproductos, descartes o materiales residuales generados en procesos agrícolas y de transformación industrial de productos de origen vegetal (Shinde y col., 2022). Materiales como bagazo de agave, bagazo de caña, cáscara de nuez, orujo de uva y residuos de maíz pueden contener concentraciones detectables de zinc, cobre, manganeso, hierro y otros elementos. Por ejemplo, el bagazo de agave ha sido caracterizado como un residuo lignocelulósico con contenido mineral relevante (Iñiguez y col., 2014; Kestur y col., 2013), mientras que las cáscaras de nuez y otros frutos secos contienen minerales y compuestos extractables asociados a

metales (Queirós y col., 2020). Asimismo, la presencia de metales en plantas y productos agrícolas incluyendo cultivos como maíz y uva ha sido ampliamente reportada en estudios sobre bioacumulación y composición mineral (Angelova y col., 2004; Jiménez-Ballesta y col., 2022; Ruiz-Huerta y col., 2022; Sáenz-Pérez y col., 2020) (Tabla 6). Estos residuos, generados en grandes cantidades anualmente, poseen estructuras lignocelulósicas y características químicas que facilitan la adsorción o retención de metales presentes en el suelo o provenientes de fertilizantes, pesticidas y sistemas de riego, durante el crecimiento de los cultivos (Fan y col., 2025). La literatura destaca que los residuos agroindustriales poseen características físico-químicas como porosidad, grupos funcionales y alto contenido de fibras que facilitan la interacción con metales pesados (Banerjee y col., 2018; Bernardo y col., 2009; Gallardo y col., 2020). Asimismo, diversos estudios han demostrado que los cultivos pueden absorber metales presentes en el suelo o ingresados por fertilizantes, pesticidas o riego, acumulándolos posteriormente en sus tejidos y, por ende, en los residuos generados tras su procesamiento (Angelova y col., 2004; Ruiz-Huerta y col., 2022; Sáenz-Pérez y col., 2020; Loyde de la Cruz y col., 2022).

Tabla 6. Residuos agroindustriales y metales asociados

Residuo agroindustrial	Metales comúnmente presentes
Bagazo de agave	Cu, Zn, Mn
Bagazo de caña	Fe, Mn, Zn
Cáscara de nuez	Cu, Zn, trazas de tierras raras (REE)
Orujo de uva	Pb, Zn, Cu, Cr, Fe
Residuos de maíz	As, Zn, Fe, Mn

Por otro lado, los residuos agro-mineros, como jales, escorias y lodos de beneficio, contienen fracciones significativas de metales críticos no recuperados durante los procesos metalúrgicos (Tabla 7). En calidad de residuos agro-mineros, se consideran materiales de desecho derivados de procesos de extracción, beneficio o transformación minera vinculados a actividades agrícolas. Estos materiales suelen clasificarse como pasivos



ambientales, aunque constituyen un recurso estratégico para la economía circular. Su aprovechamiento contribuiría a disminuir el impacto de los relaves y depósitos de desechos, al mismo tiempo que permitiría recuperar metales y reintroducirlos en las cadenas de valor. En México, estados como Coahuila, Zacatecas y Chihuahua (Tabla 2) generan anualmente miles de toneladas de estos residuos.

Tabla 7. Residuos agro-mineros y metales presentes

Residuo agrominero	Metales presentes
Jales mineros	Zn, Cu, Fe, Pb
Escorias metalúrgicas	Fe, Ni, Co, V
Lodos de beneficio	Cu, Mn, Zn
Residuos de barita/fluorita	Ba, Fe, Mn
Polvos de carbón mineralizado	Fe, V, Ni

La enorme cantidad de residuos agroalimentarios y agromineros generados anualmente convierte a estos materiales en candidatos estratégicos para la recuperación de metales críticos. Además de reducir la presión sobre la minería convencional, su aprovechamiento contribuye a la economía circular, a la mitigación de impactos ambientales y a la generación de cadenas de valor sostenibles (Rao y col., 2024; Romero-Sáez, 2022; Vivoda y col., 2025; Banerjee y col., 2018; Bernardo y col., 2009). El aprovechamiento de residuos agroalimentarios y agromineros como fuentes de metales críticos es un campo emergente. Su éxito depende de la caracterización química detallada de los residuos, del desarrollo de métodos eficientes de extracción y de la integración de procesos sostenibles que minimicen la generación de desechos secundarios. (Tran y col., 2022; Zhang y col., 2021; Kumar y Singh, 2020). Aunque algunas investigaciones han demostrado la capacidad de estos materiales para retener o liberar metales durante tratamientos térmicos o químicos, se requiere más investigación para establecer protocolos estandarizados y escalables.

CONCLUSIÓN

La fitominería representa una herramienta prometedora para México, capaz de recuperar metales críticos de manera sustentable y de contribuir a la restauración ambiental. Integrar esta tecnología en las estrategias nacionales de aprovechamiento de metales críticos fortalecería la seguridad de suministro, disminuiría la presión sobre los depósitos tradicionales y promovería una auténtica transición hacia una bioeconomía circular. La identificación de nuevas fuentes de metales críticos es un desafío prioritario para la ciencia contemporánea. En este contexto, los residuos agroindustriales y agro-mineros ofrecen una oportunidad para recuperar elementos valiosos. La fitorremediación y la fitominería complementan esta visión al proporcionar estrategias de recuperación de metales ambientalmente responsables y potencialmente rentables. No obstante, para consolidar su aplicación industrial, será necesario profundizar en la comprensión de los mecanismos de acumulación, optimizar las técnicas de procesamiento y fortalecer la vinculación entre la investigación académica, la industria y las políticas públicas.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Secretaría de Ciencia, Humanidad, Tecnología e Innovación (SECIHTI) el apoyo mediante becas de posgrado y de posdoctorado, y el Programa de Investigadoras e investigadores por México (proyecto 729).

REFERENCIAS

- Agencia Internacional de Energía (IEA). (2025). Executive summary – Global Critical Minerals Outlook 2025. IEA.
- Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals— Concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7): 869–881.
- Angelova, V., Ivanova, R., Delibaltova, V., & Ivanov, K. (2004). Bio-accumulation and distribution of heavy metals in fibre crops (flax, cotton and hemp). *Industrial Crops and Products*, 19(3): 197–205. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2003.10.001>



- Banerjee, M., Basu, R. K., & Das, S. K. (2018). Cr (VI) adsorption by a green adsorbent walnut shell: adsorption studies, regeneration studies, scale-up design and economic feasibility. *Process Safety and Environmental Protection*, 116: 693-702.
- Bernardo, G. R. R., Rene, R. M. J., & Alfaro-De la, A. D. la T. (2009). Chromium (III) uptake by agro-waste biosorbents: Chemical characterization, sorption-desorption studies, and mechanism. *Journal of Hazardous Materials*: 170(2-3): 845-854. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2009.05.046>
- Butu, A., Rodino, S., & Butu, M. (2023). Global Research Progress and Trends on Critical Metals: A Bibliometric Analysis. *Sustainability*, 15(6): 4834. <https://doi.org/10.3390/su15064834>
- Chaney, R. L., Angle, J. S., Broadhurst, C. L., Peters, C. A., Tappero, R. V., & Sparks, D. L. (2007). Improved understanding of hyperaccumulation yields commercial phytoextraction and phytomining technologies. *Journal of Environmental Quality*, 36(5): 1429-1443.
- Coll-Hurtado, A., Salazar, M. T. S., & Morales, J. (2001). La minería en México. UNAM.
- Deberdt, R., Smith, N.M., Calderon, J.L., & McCall, S. K. (2025). Critical minerals lists for low-carbon transitions: Reviewing their structure, objectives, and limitations. *Energy Research and Social Science*, 127: 104252. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2025.104252>
- Fan, X., Gao, P., Wang, J., Zhang, M., Hong, S., Qin, S., Zhang, Q., Ma, L., Zhang, L., Zhang, Z., & Lv, X. (2025). Assessment and prediction of soil heavy metal pollution in cotton fields by multi-source data feature fusion combined with machine learning. *Industrial Crops and Products*, 233: 121447. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2025.121447>
- Foley, N. K., Jaskula, B. W., Kimball, B. E., & Schulte, R. F. (2017). Gallium Chapter H of Critical Mineral Resources of the United States-Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply. Food safety and quality: Chemical Substances. (JECFA). Consultado October 4, 2025, from <https://www.fao.org/food/food-safety-quality/scientific-advice/jecfa/es/>
- Gallardo, K., Castillo, R., Mancilla, N., & Remonsellez, F. (2020). Biosorption of RareEarth Elements From Aqueous Solutions Using Walnut Shell.



Frontiers in Chemical Engineering, 2: 4.
<https://doi.org/10.3389/fceng.2020.00004>

- Iñiguez, C. G., Bernal, C. J. J., Ramírez, M. W., & Villalvazo, N. J. (2014). Recycling Agave Bagasse of the Tequila Industry. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 04(02): 135–142. <https://doi.org/10.4236/aces.2014.42016>
- Jiménez-Ballesta, R., Bravo, S., Amorós, J. A., Pérez-de-los-Reyes, C., García-Pradas, J., Sanchez, M., & García-Navarro, F. J. (2022). Occurrence of some rare earth elements in vineyard soils under semiarid Mediterranean environment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(5): 1007. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-09956-z>
- Kestur G., S., Flores-Sahagun, T. H. S., dos Santos, L. P., dos Santos, J., Mazzaro, I., & Mikowski, A. (2013). Characterization of blue agave bagasse fibers of Mexico. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 45: 153–161. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2012.09.001>
- Kikis, C., Thalassinos, G., & Antoniadis, V. (2024). Soil Phytomining: Recent Developments - A Review. *Soil Systems*, 8 (1): 3390. <https://doi.org/10.3390/soilsystems8010008>
- Lèbre, É., Kung, A., Savinova, E., & Valenta, R. K. (2023). Mining on land or in the deep sea? Overlooked considerations of a reshuffling in the supply source mix. *Resources, Conservation and Recycling*, 191: 106898. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2023.106898>
- Loyde de la Cruz, L. A., González Méndez, B., Cruz Avalos, A. M., & Loredó Portales, R. (2022). Suelos agrícolas y metales pesados, una relación tóxica que se puede remediar. *EPISTEMUS*, 16(33): 228. <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.228>
- Nkrumah, P. N., & van der Ent, A. (2023). Possible accumulation of critical metals in plants that hyperaccumulate their chemical analogues? *Science of The Total Environment*, 878: 162791. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.162791>
- Pandey, V. C., & Bajpai, O. (2019). Phytoremediation of heavy metals from soil and aquatic systems. *Environmental Chemistry Letters*, 17: 1129–1159.
- Ponce-Hernández, A., Carranza-Álvarez, C., Ceballos-Maldonado, J. G., Rubio-Gómez, J. A., & Martínez-Soto, D. (2025). Overview of the heavy



metal contamination in Mexico: sources of the contamination and issues in human health. *Environmental Geochemistry and Health*, 47(3): 82.

- Queirós, C. S., Cardoso, S., Lourenço, A., Ferreira, J., Miranda, I., Lourenço, M. J. V., & Pereira, H. (2020). Characterization of walnut, almond, and pine nut shells regarding chemical composition and extract composition. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 10(1): 175-188.
- Rao, M. M., Botsa, S. M., Rao, T. P., Goddu, S. R., & Vijayasanthi, C. (2024). A comprehensive review on agricultural waste production and onsite management with circular economy opportunities. *Discover Sustainability*, 5 (1): 492. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00492-z>
- Reeves, R. D., & Baker, A. J. M. (2000). Metal-accumulating plants. *New Phytologist*, 147(2): 255–256.
- Romero-Sáez, M. (2022). Los residuos agroindustriales, una oportunidad para la economía circular. *Tecnológicas*, 25(54): 1–18. <https://doi.org/10.22430/22565337.2084>
- Ruiz, A. G., Sola, P. C., Palmerola, N. M., & Lee, S. (2018). Germanium: current and novel recovery processes. *Advanced material and device applications with germanium*, 2018: 9-30.
- Ruiz-Huerta, E. A., Armienta-Hernández, M. A., Dubrovsky, J. G. y Gómez-Bernal, J. M. (2022). La bioacumulación de metales pesados y As en el maíz (*Zea mays* L) cultivado cerca de los relaves de la mina tiene un fuerte impacto en el desarrollo de las plantas. *Ecotoxicología*. 31(3): 447–467. <https://doi.org/10.1007/s10646022-02522-w>
- Rylott, E. L., & van der Ent, A. (2025). Harnessing hyperaccumulator plants to recover technology-critical metals: where are we at? *New Phytologist*, 246(3): 859–866. <https://doi.org/10.1111/nph.20449>
- Rylott, E.L. and van der Ent, A. (2025), Harnessing hyperaccumulator plants to recover technology-critical metals: where are we at?. *New Phytol*, 246: 859-866. <https://doi.org/10.1111/nph.20449>
- Ryter, J., Bhuwarka, K., Roth, R. et al. Modelización de mercados minerales interconectados con curvas de suministro multimaterias primas: examinando el sistema cobre-cobalto-níquel. *Nat Commun* 16: 7302 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41467-025-62570-8>



- Sáenz-Pérez, C. A., Osorio-Hernández, E., Estrada-Drouaillet, B., Castro-Nava, S., Delgado-Martínez, R., López-Badillo, C. M., & Rodríguez-Herrera, R. (2020). Rootstock influence on growth and mineral content of citrus limon and citrus sinensis cv. Valencia inoculated with candidatus liberibacter asiaticus. *Agronomy*, 10: 1564. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101564>
- Sharma, J. K., Kumar, N., Singh, N. P., & Santal, A. R. (2023). Phytoremediation technologies and their mechanism for removal of heavy metal from contaminated soil: An approach for a sustainable environment. *Frontiers in Plant Science*, 14(January), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1076876>
- Shinde, R., Shahi, D. K., Mahapatra, P., Singh, C. S., Naik, S. K., Thombare, N., & Singh, A. K. (2022). Management of crop residues with special reference to the on-farm utilization methods: A review. *Industrial Crops and Products*, 181: 114772.
- Solazzo, E., Crippa, M., Guizzardi, D., Muntean, M., Choulga, M., & Janssens-Maenhout, G. (2021). Uncertainties in the Emissions Database for Global Atmospheric Research (EDGAR) emission inventory of greenhouse gases. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(7): 5655-5683.
- Tao, Y., Shen, L., Feng, C., Yang, R., Qu, J., Ju, H., & Zhang, Y. (2022). Distribution of rare earth elements (REEs) and their roles in plant growth: A review. *Environmental Pollution*, 298: 118540. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118540>
- U.S. Geological Survey. (2022). U.S. Geological Survey releases 2022 list of critical minerals. USGS.
- Valla, M., & Vieira, R. (2025). The future need for critical raw materials associated with long-term energy and climate strategies: The illustrative case study of power generation in Spain. *Energy*, 314: 134266. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.134266>
- Van Der Ent, A., Baker, A. J. M., Reeves, R. D., Chaney, R. L., Anderson, C. W. N., Meech, J. A., Erskine, P. D., Simonnot, M. O., Vaughan, J., Morel, J. L., Echevarria, G., Fogliani, B., Rongliang, Q., & Mulligan, D. R. (2015). Agromining: Farming for metals in the future? *Environmental Science and Technology*, 49(8), 4773–4780. <https://doi.org/10.1021/es506031u>



- van der Ent, A., Baker, A. J., Reeves, R. D., Pollard, A. J., & Schat, H. (2013). Hyperaccumulators of metal and metalloid trace elements. *New Phytologist*, 218(2), 407–411.
- Vivoda, V., Loginova, J., & Kemp, D. (2025). Geopolitics and mine waste: An overview and future research directions. *Journal of Environmental Management*, 385: 125545. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125545>
- Werner, T. T., Mudd, G. M., & Jowitt, S. M. (2017). The world's by-product and critical metal resources part III: A global assessment of indium. *Ore Geology Reviews*, 86: 939-956.