

Artículo de Revisión

**TECNOLOGÍAS PARA LA OBTENCIÓN DE SULFATO DE
MANGANESO A PARTIR DE MINERALES ADAPTADAS AL
CONTEXTO CUBANO**

**TECHNOLOGIES FOR OBTAINING MANGANESE SULFATE FROM
MINERALS ADAPTED TO THE CUBAN CONTEXT**

Lisandra Guevara Orozco^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-9940-9425>

Nicole Vieira Ribalta¹ <https://orcid.org/0009-0008-0732-7299>

Néstor Ley Chong¹ <https://orcid.org/0000-0001-5575-246X>

¹ Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química y Farmacia, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Febrero 23; Revisado: Marzo 10, 2026; Aceptado: Marzo 24, 2026

RESUMEN

Introducción:

El sulfato de manganeso ($MnSO_4$) es un compuesto de alto valor comercial, fundamental en la producción de fertilizantes agrícolas. En Cuba, existe disponibilidad de minerales manganésíferos, así como una creciente necesidad de desarrollar insumos nacionales para el sector agroindustrial.

Objetivo:

Comparar las principales rutas tecnológicas para la producción de $MnSO_4$ a partir de minerales, evaluando su posible adaptación al contexto cubano.

Materiales y Métodos:

Se realizó una revisión bibliográfica en bases de datos como *ScienceDirect* y Google Académico, utilizando métodos de análisis-síntesis e inducción-deducción para procesar la información sobre minerales, procesos metalúrgicos y variables operacionales.

Resultados y Discusión:

Se identificó que la pirolusita (MnO_2) es el mineral oxidado más relevante y abundante en los yacimientos cubanos. El análisis comparativo de las rutas tecnológicas demostró que la hidrometalurgia, mediante lixiviación ácida con agentes reductores, es la más prometedora por su alta eficiencia, selectividad, menores requerimientos energéticos y



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

* Autor para la correspondencia: Lisandra Guevara, Email: lgorozco@uclv.edu.cu



flexibilidad para escalas pequeñas y medianas. Se analizaron las variables críticas del proceso y diversos agentes reductores. El uso de reductores orgánicos como el aserrín, disponible localmente como subproductos agroindustriales, emerge como una alternativa económica y ambientalmente atractiva para el país.

Conclusiones:

La ruta hidrometalúrgica, utilizando agentes reductores de origen nacional, constituye la alternativa tecnológica más viable para la producción de sulfato de manganeso en Cuba, permitiendo el aprovechamiento de los recursos minerales propios y fomentando un desarrollo industrial sostenible.

Palabras clave agente reductor; hidrometalurgia; lixiviación; pirolusita; sulfato de manganeso.

ABSTRACT

Introduction:

Manganese sulfate ($MnSO_4$) is a compound of high commercial value, essential for the production of agricultural fertilizers. In Cuba, there is availability of manganese-bearing minerals, as well as a growing need to develop domestic inputs for the agro-industrial sector.

Objective:

To analyze the main technological routes for producing $MnSO_4$ from minerals, and evaluate their possible adaptation to the Cuban context.

Materials and Methods:

A bibliographic review was conducted using databases such as ScienceDirect and google scholar. Analysis–synthesis and induction–deduction methods were applied to process information on minerals, metallurgical processes, and operational variables.

Results and Discussion:

Pyrolusite was identified as the most relevant oxidized mineral and is abundant in Cuban deposits. A comparative analysis of technological routes showed that hydrometallurgy, through acid leaching with reducing agents, is the most promising alternative due to its high efficiency, selectivity, lower energy requirements, and flexibility for small and medium scales. Critical process variables and various reducing agents were analyzed. The use of organic reductants, such as sawdust available locally as an agro-industrial by-product, emerges as an economically and environmentally attractive alternative.

Conclusions:

The hydrometallurgical route, using reducing agents of national origin, represents the most viable technological alternative for manganese sulfate production in Cuba, enabling the use of national mineral resources and promoting sustainable industrial development.

Keywords: reducing agent; hydrometallurgy; leaching; pyrolusite; manganese sulfate.

1. INTRODUCCIÓN

El sulfato de manganeso es un compuesto inorgánico sólido de color rosa pálido y fórmula química $MnSO_4$. Posee un elevado valor comercial debido a la diversidad de aplicaciones

que presenta en diferentes sectores industriales. Se emplea como excipiente en la fabricación de tintes, tintas, purpurina y piensos para peces, así como en la industria textil para mejorar la intensidad y durabilidad del color de los materiales. En el ámbito médico se utiliza como suplemento mineral para el tratamiento de determinados tipos de anemia, mientras que en metalurgia forma parte de las fundiciones y se emplea para la eliminación del azufre del hierro. Además, actúa como agente oxidante en reacciones químicas, es componente de pilas y acumuladores, se usa en el tratamiento de aguas residuales y en la industria cerámica para la preparación de masas de porcelana y fabricación de vidrio (Fernández, 2020). No obstante, su principal aplicación se encuentra en la industria de los fertilizantes, donde se utiliza para prevenir deficiencias de manganeso en los cultivos, debido a su alto contenido de Mn, elevada solubilidad, máxima biodisponibilidad y bajo costo por unidad de manganeso bioaprovechable (Fernández et al., 2022).

En la producción contemporánea de sulfato de manganeso (MnSO_4), coexisten rutas tecnológicas tradicionales basadas en el procesamiento de minerales manganíferos y enfoques emergentes que valoran residuos industriales ricos en manganeso. En el ámbito metalúrgico, el MnSO_4 se obtiene predominantemente por procesos, en los que los minerales de manganeso, incluidos carbonatos y óxidos de bajo grado, se someten a procesos químicos y físicos de extracción del metal del mineral, seguidos de etapas de purificación y cristalización para obtener soluciones de Mn^{2+} de alta pureza (Baba et al., 2014). Métodos modernos incorporan agentes extractantes como solventes o saponificantes para mejorar la selectividad y la recuperación de Mn^{2+} frente a impurezas como Ca^{2+} y Mg^{2+} , alcanzando recuperaciones cercanas al 99 % para aplicaciones de grado batería (Li et al., 2026). Por otro lado, la intensificación de las políticas de economía circular ha impulsado investigaciones sobre la recuperación de MnSO_4 desde residuos generados en la producción de manganeso metálico electrolítico (Yaoyu et al., 2026), escorias o residuos metalúrgicos y efluentes industriales que contienen Mn^{2+} (Torres, 2021).

Los enfoques metalúrgicos resultan particularmente relevantes cuando se dispone de yacimientos minerales con contenidos apreciables de manganeso, ya que permiten transformar directamente las menas en materias primas aptas para su posterior conversión química en sulfato de manganeso, constituyendo una vía tecnológicamente viable y económicamente atractiva (Guevara, 2025).

En Cuba, la disponibilidad de minerales de manganeso y la necesidad de fortalecer la producción nacional de fertilizantes micronutrientes constituyen una oportunidad para el desarrollo de tecnologías propias orientadas a la obtención de sulfato de manganeso (Fernández, 2025). Sin embargo, la información científica relacionada con la aplicación de estas tecnologías en el contexto nacional es limitada, lo que justifica la realización de una revisión que integre el estado del arte internacional con las condiciones técnicas, económicas y ambientales del país. En correspondencia con lo anterior, el objetivo de este trabajo es comparar las principales rutas tecnológicas para la producción de MnSO_4 a partir de minerales, evaluando su posible adaptación al contexto cubano.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cualitativo de tipo documental, fundamentado en la recopilación y análisis de información científica sobre tecnologías

para la obtención de sulfato de manganeso a partir de minerales. Se emplearon los métodos teóricos de análisis-síntesis, inducción-deducción e histórico-lógico. La búsqueda bibliográfica se realizó en bases de datos como Google Académico, *ScienceDirect* y *Scopus*, así como en repositorios de tesis y libros especializados, priorizando documentos con rigor científico publicados en los últimos 15 años. La información se organizó en cuatro ejes temáticos: caracterización de los minerales manganesíferos (con énfasis en la pirolusita cubana), descripción de las rutas tecnológicas, análisis de la etapa de lixiviación y sus variables, y una evaluación comparativa de la factibilidad técnico-económica y ambiental en el contexto cubano.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. *Minerales manganesíferos*

El manganeso se encuentra en aproximadamente 300 minerales diferentes, de los cuales solo una docena poseen importancia comercial (Fernández, 2020). En la naturaleza, este elemento se presenta en depósitos primarios fundamentalmente como óxidos, carbonatos y, en menor medida, como silicatos. Entre estos, los óxidos y carbonatos constituyen las materias primas más empleadas para la obtención de sales de manganeso, incluyendo el sulfato de manganeso. En la tabla 1 se resumen los principales minerales de manganeso reportados en Baba et al. (2014), junto con sus fórmulas químicas y composiciones aproximadas.

De acuerdo con la tabla anterior, el empleo de la pirolusita constituye la opción más adecuada para la obtención de sulfato de manganeso en Cuba. Sus principales yacimientos se encuentran en la región oriental del país y, de manera más aislada, en el centro (Guevara, 2025). En la figura 1 se muestran dichos yacimientos.

Tabla 1. Principales minerales de manganeso

<i>Minerales</i>	<i>Fórmula química</i>	<i>% Mn</i>
Braunita	$2\text{Mn}_2\text{O}_3\text{MnSiO}_3$	66,60
Criptomelana	$\text{KMn}_8\text{O}_{16}$	59,80
Hausmannita	Mn_3O_4	72,00
Jacobsita	MnFe_2O_4	21,00
Manganita	$\text{Mn}_2\text{O}_3\text{H}_2\text{O}$	62,50
Psilomelana	$n\text{MnO}_3\text{MnO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	45-50
Pirolusita	$\text{MnO}_2\text{-}\beta$	62-63
Rodonita	MnCO_3	41,9
Rodococita	MnCO_3	47,80

En la actualidad, a nivel mundial, el manganeso se extrae principalmente de la rodococita y la pirolusita (Zeng et al., 2022). En el caso específico de Cuba, la selección del mineral más adecuado para la producción de sulfato de manganeso viene determinada por dos factores fundamentales: su disponibilidad en el territorio nacional y la facilidad de procesamiento. En la tabla 2 se presenta un resumen comparativo de ambos parámetros para los minerales considerados.



Figura 1. Principales yacimientos y manifestaciones de pirolusita conocidos en Cuba (Elaboración propia)

Tabla 2. Disponibilidad y facilidad de procesamiento de los minerales de manganeso

<i>Mineral</i>	<i>Disponibilidad en Cuba</i>	<i>Facilidad de procesamiento</i>	<i>Consideraciones para el procesamiento</i>	<i>Fuente</i>
Pirolusita	Alta	Moderada	Requiere un agente reductor y son económicamente viable.	(Guevara, 2025)
Rodocrosita	Baja (rara)	Directa (lixiviación simple)	Se disuelve fácilmente en ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄) pero su disponibilidad muy limitada en Cuba la hace económicamente inviable.	(Zeng et al., 2022)

Esta disponibilidad de recursos minerales constituye una base favorable para el desarrollo de procesos a nivel nacional. La coincidencia entre el tipo de mineral predominante en Cuba y los más estudiados a nivel internacional sugiere que gran parte de las rutas tecnológicas descritas podrían ser potencialmente adaptables al contexto nacional, siempre que se consideren las condiciones económicas, energéticas y ambientales del país. No obstante, el procesamiento de la pirolusita requiere etapas de reducción previa o en caliente para su lixiviación, lo que implica un consumo energético significativo que deberá ser evaluado en futuros estudios de factibilidad.

3.2. Tecnologías para la obtención de sulfato de manganeso a partir de minerales

Se identificaron tres rutas metalúrgicas fundamentales para la obtención de sulfato de manganeso: pirometalurgia, hidrometalurgia y biometalurgia (biolixiviación).

3.2.1. Proceso pirometalúrgico

Los procesos pirometalúrgicos comprenden etapas de tostación y fundición a temperaturas superiores a 1500 °C, con el empleo de agentes reductores como coque o carbón (Gutiérrez, 2012); (Wang et al., 2024). Aunque estas tecnologías permiten la obtención de manganeso metálico o intermedios concentrados, presentan elevados

requerimientos energéticos y generan emisiones significativas (Gutiérrez, 2012).

3.2.2. Proceso biometalúrgico o biolixiviación

La biolixiviación se ha estudiado como una alternativa ambientalmente amigable para la solubilización de metales a partir de minerales de baja ley. Diversos microorganismos, tanto aerobios como anaerobios, pueden participar en la oxidación o reducción de compuestos de manganeso, facilitando su paso a solución (Baba et al., 2014); (Tezyapar et al., 2023).

3.2.3. Proceso hidrometalúrgico

La hidrometalurgia constituye la ruta más ampliamente reportada para la extracción de numerosos metales (Maltrana & Morales, 2025). En el caso del sulfato de manganeso, la mayoría de los estudios se centran en la lixiviación ácida con ácido sulfúrico, frecuentemente combinada con agentes reductores para favorecer la disolución del Mn (4+) a Mn (2+) (Wang et al., 2017); (Torres, 2021); (Guevara, 2025).

Con el fin de establecer una base comparativa que permita identificar la alternativa más viable para su implementación en Cuba, la tabla 3 sintetiza los aspectos fundamentales de cada método.

Tabla 3. Comparación de métodos metalúrgicos para la obtención de sulfato de manganeso

<i>Método</i>	<i>Principio fundamental</i>	<i>Aplicación principal en la obtención de MnSO₄</i>	<i>Ventajas clave</i>	<i>Fuente</i>
Pirometalúrgico	Reducción a altas temperaturas en hornos.	Produce una escoria o aleación que luego se lixivía.	Alto rendimiento para grandes volúmenes de mineral.	(Baba et al., 2014)
Hidrometalúrgico	Lixiviación química en medio acuoso mediante la utilización de ácidos	Vía directa para obtener soluciones de MnSO ₄ de alta pureza.	Alta selectividad y pureza del producto final.	(Deng et al., 2019); (Yan et al., 2025)
Biometalúrgico	Acción de microorganismos para solubilizar el metal.	Lixiviación de minerales de baja ley para obtener soluciones de MnSO ₄ .	Bajo costo operativo y energético, más ecológico.	(Baba et al., 2014); (Tezyapar et al., 2023).

De acuerdo con lo anterior, la técnica pirometalúrgica resulta menos atractiva para la producción directa de sulfato de manganeso, ya que requiere etapas adicionales de disolución y purificación. En el contexto cubano, estas limitaciones energéticas y ambientales reducen considerablemente la viabilidad de esta ruta. Por su parte, la biolixiviación representa una línea interesante de investigación a largo plazo, aunque su

aplicación inmediata podría resultar limitada frente a procesos hidrometalúrgicos convencionales. En cuanto a la hidrometalúrgica, los trabajos realizados por Wen et al., (2023), reportan recuperaciones superiores al 80 % bajo condiciones moderadas de temperatura y concentración de ácido. Esta combinación de alta eficiencia, relativa simplicidad operativa y flexibilidad convierte a la hidrometalurgia en la opción más prometedora para aplicaciones a pequeña y mediana escala.

3.3. Estudio del proceso hidrometalúrgico para la obtención del sulfato de manganeso

El proceso hidrometalúrgico para la obtención del sulfato de manganeso consiste en una secuencia de operaciones unitarias orientadas a la extracción y recuperación del metal de interés (Guevara, 2025). En la figura 2 se presenta el diagrama de bloques general correspondiente a dicho proceso.

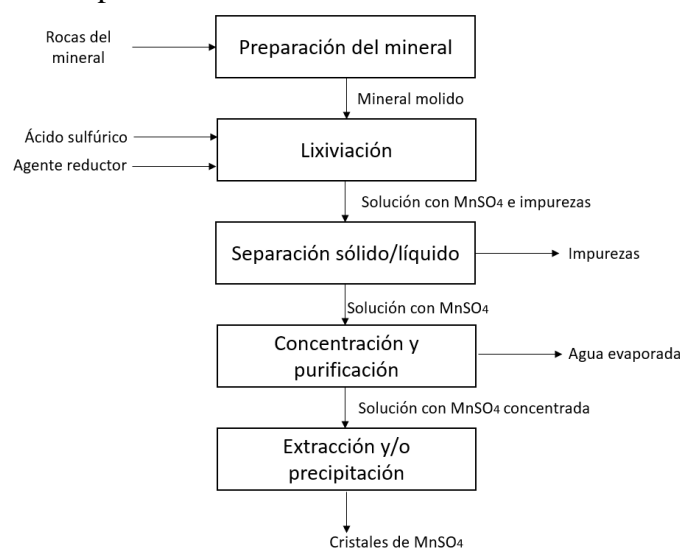


Figura 2. Diagrama de bloques de la lixiviación. (Elaboración propia)

3.3.1. Consideraciones sobre la etapa de la lixiviación

La lixiviación es una operación unitaria que permite la separación de componentes minerales mediante la disolución parcial o total de un sólido para extraer compuestos metálicos presentes en él. En este caso, se trata de una lixiviación química, donde ocurre una reacción entre el compuesto metálico del sólido y el reactivo lixivante (Baba et al., 2014). Para minerales de manganeso, la lixiviación ácida con ácido sulfúrico disuelve el manganeso transformándolo en sulfato de manganeso soluble (Wen et al., 2023). Debido a que el dióxido de manganeso es estable en condiciones oxidantes, tanto en medios ácidos como alcalinos, su extracción requiere condiciones reductoras (Liu et al., 2022).

3.3.2. Variables operacionales

El proceso de lixiviación es complejo, controlado simultáneamente por fenómenos químicos, cinéticos y de transferencia de masa. En este contexto, la correcta selección de las variables operacionales y de sus rangos de estudio resulta fundamental para identificar los factores que ejercen mayor influencia sobre la eficiencia del proceso (Lombana et al., 2018). Con base en antecedentes reportados en la literatura especializada y en consideraciones termodinámicas y cinéticas, se seleccionaron siete variables

independientes, las cuales se describen a continuación.

3.3.2.1. Concentración de ácido sulfúrico ($c(H_2SO_4)$)

La concentración de ácido sulfúrico es un factor de control fundamental en la lixiviación de minerales de manganeso. Su incremento acelera la cinética y mejora la eficiencia de extracción de manganeso, aunque su valor óptimo dependerá del tipo de mineral y del control de las demás variables operacionales (Wang et al., 2017); (Wen et al., 2023).

3.3.2.2. Temperatura (T)

La temperatura es una variable crítica durante el proceso de lixiviación, debido a que, si aumenta la temperatura, aumenta velocidad de lixiviación (Lombana et al., 2018).

3.3.2.3. Tiempo (t)

El tiempo determina el grado de reacción y conversión. Incrementos de tiempo aumentan la extracción hasta alcanzarse equilibrio cinético (Lombana et al., 2018).

3.3.2.4. Relación sólido-líquido (L/S)

La relación sólido-líquido condiciona la disponibilidad de ácido por unidad de masa mineral, lo que afecta la concentración final de manganeso en solución, la viscosidad de la pulpa y la eficiencia del contacto sólido-reactivo. Una alta carga de sólidos reduce el ácido disponible, limitando la cinética de disolución y la recuperación final. Por ello, es fundamental determinar mediante pruebas el consumo de reactivos para establecer la máxima carga de sólidos que no comprometa la extracción (Lombana et al., 2018).

3.3.2.5. Velocidad de agitación

La velocidad de agitación reduce el espesor de la capa límite de difusión, mejorando el transporte de iones hacia la superficie mineral. Para minimizar la resistencia externa a la transferencia de masa, debe operarse en el régimen donde la cinética química superficial es la etapa controlante. Sin embargo, valores excesivos incrementan el consumo energético, el desgaste mecánico y el riesgo de atrición de partículas, afectando la eficiencia del proceso (Lombana et al., 2018).

3.3.2.6. Tamaño de partícula del mineral

La reducción de tamaño aumenta el área superficial y mejora la velocidad de lixiviación (Lombana et al., 2018).

3.3.2.7. Concentración del agente reductor

El uso de reductores mejora la eficiencia de la lixiviación (Wen et al., 2023), es por ello que, en estos casos la concentración del reductor y la relación reductora/mineral se convierte en variable adicional a optimizar. Hasta la fecha, se han explorado diversos reductores para la reducción de Mn (4+), como los basados en carbono, azufre e hidrógeno, reductores a base de metales y otros. También se han estudiado compuestos orgánicos y biomasa (Liu et al., 2022).

En la tabla 4 se muestra un resumen de los diferentes agentes reductores identificados en la literatura y las condiciones típicas de las demás variables operacionales para garantizar

la mayor recuperación del Mn.

Tabla 4. Comparación de diferentes agentes reductores

<i>Agente reductor</i>	<i>Condiciones típicas</i>	<i>Recuperación de Mn (%)</i>	<i>Calidad del MnSO₄</i>	<i>Observaciones técnicas</i>	<i>Fuente</i>
Hierro metálico (Fe ⁰)	c(H ₂ SO ₄): 1–2 mol/L, T: 70–90 °C, t: 60–180 min, Relación sólido/líquido: 1:5–1:10	90–98 %	Solución con Mn ²⁺ > 95 % pureza tras purificación; presencia de Fe ²⁺ significativa	Requiere etapa posterior de eliminación de hierro (precipitación como Fe(OH) ₃)	(Moro et al., 2021)
Fe ²⁺ reciclable (FeSO ₄)	c(H ₂ SO ₄): 1–2 mol/L, T: 80–95 °C, Control de potencial redox, Sistema de regeneración	92–97 %	Alta pureza tras regeneración controlada; bajo residuo sólido	Proceso más complejo pero sostenible; menor consumo neto de hierro	(Wang et al., 2023)
Dióxido de azufre (SO ₂)	c(H ₂ SO ₄): 1–2 mol/L, T: 60–80 °C, Inyección continua de gas, pH < 1	90–95 %	Buena pureza; bajo contenido metálico secundario	Requiere sistema cerrado y control de gases	(Deng et al., 2019)
Ácido oxálico	c(H ₂ SO ₄): 0.5–1.5 M, T: 60–80 °C, Relación molar MnO ₂ :oxalato ≈ 1:1	95–99 %	Alta pureza (>98 % MnSO ₄ en solución); mínima contaminación metálica	Produce CO ₂ ; reactivo costoso	(Sahoo et al., 2001)
Aserrín pretratado	c(H ₂ SO ₄): 1–2 mol/L, T: 80–95 °C, t: 120–240 min, Tamaño de partícula < 75 μm	85–96 %	MnSO ₄ con baja contaminación metálica; requiere filtración eficiente	Cinética más lenta; requiere molienda o pirolización previa	(Sun et al., 2017)
Bagazo de caña	Tostación: 400–600 °C Lixiviación: c(H ₂ SO ₄):1–2	88–95 %	Buena pureza tras separación de cenizas; bajo	Etapa térmica adicional aumenta consumo	(Wang et al., 2017)

	mol/L, T: 80–90 °C, t: 90–180 min		hierro	energético	
Sacarosa (azúcar)	c(H ₂ SO ₄): 1–1,5 mol/L, T: 80–90 °C, t: 90–180 min	90–98 %	Alta pureza; bajo residuo metálico	Proceso limpio; costo mayor que biomasa residual	(Wang et al., 2017)

Tras el análisis comparativo de los agentes reductores reportados en la tabla 4, el aserrín constituye la alternativa técnicamente más adecuada para la lixiviación de minerales de manganeso en el contexto cubano. Su eficacia se respalda en recuperaciones superiores al 90 % de manganeso cuando se somete a un pretratamiento térmico apropiado. No obstante, su implementación local requiere ajustes experimentales —tipo de madera, granulometría, temperatura y tiempo de pretratamiento— para optimizar la cinética de reacción con los minerales cubanos. Desde el punto de vista operacional, el aserrín presenta ventajas sobre otros reductores orgánicos como la melaza: su disponibilidad descentralizada y estable en regiones madereras del país reduce riesgos de desabastecimiento, y su naturaleza residual permite incorporarlo a un esquema de economía circular.

4. CONCLUSIONES

1. El procesamiento de pirolusita mediante lixiviación ácida reductora representa la vía tecnológica más factible para la producción nacional de sulfato de manganeso, al alinearse con la disponibilidad de minerales oxidados en los yacimientos cubanos y con las capacidades técnicas locales.
2. Entre los agentes reductores evaluados, el aserrín destaca como la opción más estratégica para las condiciones de Cuba, gracias a su carácter de residuo de la industria maderera, su bajo costo y los niveles de extracción de manganeso que superan el 90 % con un pretratamiento adecuado.
3. La implementación de la ruta hidrometalúrgica con reductores orgánicos nacionales permitiría avances en la sustitución de insumos importados para la agricultura, así como una gestión más sostenible de los recursos minerales del país.

REFERENCIAS

- Baba, A. A., Ibrahim, L., Adekola, F. A., Bale, R. B., Ghosh, M. K., Sheik, A. R., Pradhan, S. R., Ayanda, O. S., & Folorunsho, I. O. (2014). Hydrometallurgical processing of manganese ores: A review. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 2(3), 230-247. <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=46366>
- Deng, L., Qu, B., Su, S., Ding, S., & Sun, W (2019). Separation of manganese from iron in the SO₂ reductive leaching iron-rich pyrolusite ore: Leaching mechanism and kinetics. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44(6), 5335–5344.

<https://doi.org/10.1007/s13369-018-3587-2>

- Fernández, R. (2020). *Diseño de una Planta Multipropósito de sulfatos en la provincia de Villa Clara* [Tesis para optar por el título de Ingeniero Químico, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba]. <https://dspace.uclv.edu.cu/server/api/core/bitstreams/b530bcd1-e332-479f-8a9b-89df77e51802/content>
- Fernández, R., Serrano, J., Ley, N., González, E., & Guevara, L. (2022). Evaluar la factibilidad económica de una planta multipropósito para la producción de sulfatos. *Tecnología Química*, 42(3), 474-486. <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v42n3/2224-6185-rtq-42-03-474.pdf>
- Fernández, D. (2025). *Propuesta de una tecnología preliminar para la producción de sulfato de manganeso*. [Tesis para optar por el título de Ingeniero Químico, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba].
- Guevara, L. (2025). *Procedimiento para conducir los procesos de obtención de fertilizantes sulfatados a través de una planta multipropósito*. [Tesis para optar por el grado de Máster en Ciencias, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba].
- Gutiérrez, M. (2012). *Lixiviación y recuperación de manganeso a partir de minerales de baja ley* [Tesis para optar por el grado de Máster en Ciencias, Universidad Autónoma Metropolitana, México]. <https://bindani.izt.uam.mx/downloads/4x51hj180?locale=en>
- Li, X., Li, X., Ma, X., Li, C., Cai, H., Zhong, H., & Wang, S. (2026). Sustainable high-purity MnSO₄·H₂O preparation for LiMn₂O₄ production: Utilizing low-grade manganese carbonate ore via saponification-free solvent extraction. *Separation and Purification Technology*, 380(Part 1), 135270. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.135270>
- Liu, Y., He, F., Ma, D., Hu, Q., & You, Z. (2022). Novel process of reduction roasting manganese ore with sulfur waste and extraction of Mn by acid leaching. *Metals*, 12, 384. <https://www.mdpi.com/2075-4701/12/3/384/pdf?version=1645607485>
- Lombana, L. M., Saavedra, A. D., & Correa, F. (2018). Variables influyentes en el proceso de lixiviación para la recuperación de metales contenidos en lodos galvánicos. *Semilleros*, 4(1), 93-104. <https://repository.uamerica.edu.co/items/6a0a7fb3-5ac1-455b-a913-5a2cae9f1268>
- Maltrana, V., & Morales, J. (2023). The use of acid leaching to recover metals from tailings: A Review. *Metals*, 13, 1862. <https://www.mdpi.com/2075-4701/13/11/1862/pdf?version=1699455771>
- Moro, K., Haubrich, F., & Martin, M. (2021). Preliminary study on the reductive leaching of manganese ores using FeSO₄/iron powder as reducing agents under room temperature. *European Journal of Engineering and Technology Research*, 6(6), 14–18. <https://eu-opensci.org/index.php/ejeng/article/view/62572/12725>
- Sahoo, R. N., Naik, P. K., & Das, S. C. (2001). Leaching of manganese from low-grade manganese ore using oxalic acid as reductant in sulphuric acid solution. *Hydrometallurgy*, 62(3), 157-163. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(01\)00196-7](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(01)00196-7)
- Sun, Y., Fu, G., & Jiang, L. (2017). Kinetic study of the leaching of low-grade manganese
-

- ores by using pretreated sawdust as reductant. *Minerales*, 7(5), 83. <https://doi.org/10.3390/min7050083>
- Tezyapar, I., Kremser, K., Wagland, S. T., & Coulon, F. (2023). Biolixiviación de residuos y subproductos que contienen metales para la recuperación de recursos: una revisión. *Environ Chem Lett*, 21, 3329–3350. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01611-4>
- Torres, D. A. (2021). *Extracción de cobre y manganeso mediante procesos de lixiviación* [Tesis para optar por el grado de Doctor en Ciencias, Universidad Politécnica de Cartagena, España]. <https://repositorio.upct.es/server/api/core/bitstreams/5dfdef98-2a53-4ff4-a497-6c6772cdde28/content>
- Wang, Y., Jin, S., Lv, Y., Zhang, Y., & Su, H. (2017). Hydrometallurgical process and kinetics of leaching manganese from semi-oxidized manganese ores with Sucrose. *Minerals*, 7(2), 27. <https://doi.org/10.3390/min7020027>
- Wang, Q., Wang, S., Ma, X., Cao, Z., Di, J., Yang, J., & Zhong, H. (2023). Un proceso de lixiviación cíclica verde para la pirolusita de bajo grado a través de un reductor de Fe (II) reciclable. *Minerales*, 13(9), 1191. <https://doi.org/10.3390/min13091191>
- Wang, X., Qin, W., Li, M., Liu, X., Cheng, Y., Chen, S., & Yang, C. (2024). Mineralogía de los nódulos de manganeso de aguas profundas y avances en la tecnología de extracción de elementos valiosos de dichos nódulos. *Metals*, 14(12), 1359. <https://doi.org/10.3390/met14121359>
- Wen, J.-X., Nguyen, T. N. H., & Lee, M. S. (2023). Recovery of pure MnSO₄ by crystallization after separation of Fe(III) and Zn(II) from the reductive leaching solution of manganese dust containing Mn₃O₄. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, 59(3), 383–393. <https://doi.org/10.2298/JMMB230830033W>
- Yan, Y., Sun, S., Wei, J., Shubo, A., Xiao, F., & Tu, G. (2025). Selective recovery of manganese using Cyanex 272 for battery-grade manganese sulfate production. *Journal of Water Process Engineering*, 76, 108232. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.108232>
- Yang, Y., Liu, R., You, Y., Nong, R., Li, C., Wei, H., Luo, J., Luo, H., Yang, H., Chen, S., Shu, J., & Fang, G. (2025). Preparation of high-purity manganese sulfate using electrolytic manganese anode slime: Leaching mechanism and impurity removal rule. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 64(26), 13410–13420. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5c00793>
- Yaoyu, Y., Shuchen, S. A. S., Jing, W., Faxin, X., & Ganfeng T. (2026). Integrated magnetic separation and H₂O₂-H₂SO₄ synergistically leaching for high-purity MnSO₄ production from EMR. *Separation and Purification Technology*, 381, 135599. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.135599>
- Zeng, X., Shu, J., Chen, M., Wang, J., He, D., Wei, Y., Deng, Y., Lei, T., Liu, Z., Tan, D., & Zhang, Q. (2022). A cost-effective method for enhancing manganese leaching from rhodochrosite caused by surfactant-regulated crystal growth of CaSO₄·2H₂O. *Hydrometallurgy*, 211, 105870. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304386X2200055X>
-

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- M.Sc. Lisandra Guevara Orozco. Investigación, redacción-primera redacción, redacción-revisión y edición.
 - Estud. Nicole Vieira Ribalta. Investigación
 - Dr.C. Néstor Ley Chong. Supervisión.
-