

DEL MINERAL AL METAL BRILLANTE: NUEVAS MIRADAS A LA EXTRACCIÓN Y REFINACIÓN DEL ANTIMONIO

*FROM ORE TO SHINING METAL: NEW PERSPECTIVES OF THE
EXTRACTION AND REFINING OF ANTIMONY*

GALAVIZ BRIONES, Lorena ¹

CARRILLO PEDROZA, Francisco Raúl ¹

SORIA AGUILAR, María De Jesús ¹

GARCÍA GUERRA AGUILAR, Josefina ¹

GONZÁLEZ ANAYA, Juan Antonio ²

RESUMEN

El antimonio, reconocido como un metal crítico estratégico, desempeña un papel fundamental en la fabricación de retardantes de llama, baterías de plomo-ácido, microcondensadores y diversos componentes electrónicos. Su principal fuente mineral es la estibina (Sb_2S_3), un sulfuro que tradicionalmente se procesa mediante rutas pirometalúrgicas convencionales. El método más difundido es la tostación oxidante, proceso eficiente para concentrar y transformar el mineral, pero asociado a un elevado impacto ambiental. Durante la tostación se generan emisiones significativas de dióxido de azufre (SO_2), además de residuos peligrosos que pueden contener arsénico y otros metales potencialmente tóxicos. Esta revisión analiza críticamente las tecnologías actuales de extracción, comparando los métodos tradicionales con enfoques innovadores basados en los principios de la química verde. Se presta especial atención a los procesos hidrometalúrgicos emergentes que emplean agentes lixiviantes más sostenibles, como ácidos orgánicos o soluciones de cloruro férrico, capaces de disolver selectivamente la estibina a temperatura ambiente; alternativas que reducen la formación de gases tóxicos y permiten obtener antimonio de alta pureza en solución, facilitando etapas posteriores de recuperación. Se examinan técnicas como la electrorrefinación utilizando electrolitos limpios, lo que evita el uso de fundentes agresivos y disminuye el consumo energético global del proceso. El análisis comparativo indica que, aunque la tostación continúa dominando la industria, la hidrometalurgia verde ofrece un potencial significativo para mitigar la huella ecológica del sector. No obstante, persisten desafíos relacionados con la escalabilidad industrial, la optimización cinética y el control preciso del pH y del potencial redox. Se concluye que el futuro del antimonio dependerá de procesos híbridos y modelos de economía circular orientados al reciclaje eficiente.

1. Facultad de Metalurgia,
Universidad Autónoma de
Coahuila. Monclova, Coahuila,
México.

2. Unidad Académica de Ciencias
de la Tierra, Universidad
Autónoma de Zacatecas.
Zacatecas, Zacatecas, México.

Correspondencia
lorenagalaviz@uadec.edu.mx
<https://orcid.org/0009-0008-1220-5755>
Fecha de recepción
6 de noviembre de 2025.
Fecha de aceptación
12 de marzo de 2026.

Palabras clave: antimonio; estibina; pirometalurgia; hidrometalurgia; química verde; extracción.

ABSTRACT

Antimony, recognized as a strategic critical metal, plays a fundamental role in the manufacture of flame retardants, lead–acid batteries, microcapacitors, and various electronic components. Its main mineral source is stibnite (Sb_2S_3), a sulfide traditionally processed through conventional pyrometallurgical routes. The most widespread method is oxidative roasting, an efficient process for concentrating and transforming the ore, but one associated with significant environmental impact. During roasting, substantial emissions of sulfur dioxide (SO_2) are generated, along with hazardous residues that may contain arsenic and other potentially toxic metals. This review critically examines current extraction technologies, comparing traditional methods with innovative approaches based on green chemistry principles. Special attention is given to emerging hydrometallurgical processes that employ more sustainable leaching agents, such as organic acids or ferric chloride solutions, capable of selectively dissolving stibnite at room temperature. These alternatives reduce the formation of toxic gases and enable the recovery of high-purity antimony in solution, facilitating subsequent processing stages. Advanced techniques such as electrorefining using clean electrolytes are also discussed, as they avoid the use of aggressive fluxes and decrease overall energy consumption. Comparative analysis indicates that although roasting continues to dominate industry due to its high productivity and technological maturity, green hydrometallurgy offers significant potential to reduce the sector's ecological footprint. Nevertheless, challenges remain regarding industrial scalability, kinetic optimization, and precise control of pH and redox potential. The future of antimony metallurgy will likely depend on hybrid processing schemes and circular economy strategies aimed at efficient electronic waste recycling and sustainable resource management practices.

Keywords: antimony; stibnite; pyrometallurgy; hydrometallurgy; green chemistry; extraction.



INTRODUCCIÓN

El antimonio (Sb) constituye un metal estratégico en la economía moderna debido a su amplia aplicación en retardantes de llama, aleaciones para baterías de plomo-ácido y dispositivos semiconductores, sectores que concentran la mayor parte del consumo mundial (Anderson, 2022; Álvarez Pelegry y Blanco Álvarez, 2023). Su importancia económica y tecnológica ha motivado que la Comisión Europea (2020) lo clasifique como material crítico, destacando la vulnerabilidad de su cadena de suministro y la elevada concentración geográfica de su producción. Estudios recientes han profundizado en la fragilidad de esta cadena y en la necesidad de fortalecer su resiliencia mediante innovación tecnológica y diversificación de fuentes (Van den Brink y col., 2022; Zhang y col., 2023).

El principal mineral portador de antimonio es la estibina (Sb_2S_3), cuyo procesamiento industrial se ha basado tradicionalmente en la tostación oxidante, una ruta pirometalúrgica eficiente para la conversión del sulfuro a óxidos (Deng y col., 2020). Sin embargo, este método genera emisiones de SO_2 y vapores de Sb_2O_3 , asociados a riesgos ambientales y ocupacionales significativos (Li y col., 2021; Martínez y Delgado, 2022). Tales impactos han impulsado la búsqueda de alternativas más limpias, alineadas con los principios de la química verde propuestos por Anastas y Warner (1998), orientadas a minimizar la generación de sustancias peligrosas. Desde el punto de vista mineralógico, la estibina presenta un hábito cristalino prismático y un característico brillo metálico, como se observa en la Figura 1, propiedades que influyen directamente en su comportamiento fisicoquímico durante los procesos de tostación y lixiviación (Jova Geology, 2014).



Figura 1. Representación del mineral de antimonio (Jova Geology, 2014).

En este contexto, las tecnologías hidrometalúrgicas han cobrado relevancia como opciones técnicamente viables y ambientalmente preferibles, al emplear lixiviantes menos agresivos y condiciones moderadas de operación que favorecen una mayor selectividad y control del proceso (Chen y col., 2021; Zhang y col., 2023). Desde una perspectiva científica y técnica, resulta indispensable evaluar comparativamente estas rutas para determinar su factibilidad industrial, su desempeño cinético y su impacto ambiental. Social y económicamente, la adopción de procesos más sostenibles puede reducir riesgos a la salud, cumplir regulaciones ambientales más estrictas y fortalecer la competitividad del sector.

El objetivo de este trabajo es analizar críticamente el estado del arte en la extracción y refinación del antimonio, comparando los métodos pirometalúrgicos convencionales con las alternativas hidrometalúrgicas emergentes, a fin de identificar oportunidades para una metalurgia más eficiente, limpia y alineada con un modelo de economía circular.

METODOLOGÍA

El presente estudio se desarrolló bajo el enfoque de revisión sistemática narrativa, orientada al análisis comparativo de tecnologías de extracción y refinación de antimonio. La investigación se realizó en México durante el periodo enero–diciembre de 2025. El diseño metodológico se estructuró en concordancia con el objetivo del trabajo, consistente en evaluar críticamente métodos pirometalúrgicos convencionales y alternativas hidrometalúrgicas emergentes bajo criterios de eficiencia metalúrgica y sostenibilidad ambiental.

La estrategia de búsqueda bibliográfica se ejecutó en bases de datos científicas arbitradas de alto impacto (Scopus, Web of Science y ScienceDirect). Se emplearon combinaciones booleanas de términos como “*antimony extraction*”, “*stibnite roasting*”, “*hydrometallurgical leaching*” y “*green metallurgy*”.

Siguiendo la metodología de revisiones sistemáticas descrita por Chen y col. (2021) y ampliada en estudios posteriores (Zhang y col., 2023; Fernández y col., 2024), se establecieron criterios de inclusión y exclusión para garantizar

rigor científico. Se priorizaron publicaciones del periodo 2019–2024, asegurando que al menos 40 % de las referencias correspondieran a los últimos cinco años.

Los criterios de inclusión fueron:

- (i) Estudios con datos experimentales verificables
- (ii) Descripción detallada de condiciones operativas
- (iii) Reporte de eficiencia de recuperación de Sb
- (iv) Evaluación energética o ambiental del proceso.

CLASIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS MÉTODOS

Las tecnologías identificadas se agruparon en dos categorías principales: pirometalurgia e hidrometalurgia, con subclasificación en convencionales y emergentes o verdes.

Para cada estudio se extrajeron las siguientes variables técnicas:

- Eficiencia de extracción (% de recuperación de Sb).
- Condiciones operativas (temperatura, presión, pH y concentración de reactivos).
- Consumo energético.
- Impacto ambiental.
- Nivel de Madurez Tecnológica (TRL 1–9).

La clasificación tecnológica se fundamentó en reportes recientes sobre procesamiento de estibina (Deng y col., 2020; Li y col., 2021; Zhang y col., 2023). Cuando múltiples autores respaldaron una misma tendencia tecnológica, la literatura se organizó en orden cronológico (Deng y col., 2020; Li y col., 2021; Zhang y col., 2023).

DESARROLLO

MÉTODOS PIROMETALÚRGICOS

La pirometalurgia constituye la ruta industrial tradicional para la extracción de antimonio a partir de estibina (Sb_2S_3). En esta revisión se analizaron estudios experimentales e industriales que describen los procesos de tostación oxidante, reducción carbotérmica y fusión reductora, evaluando variables como temperatura de operación, tiempo de residencia, atmósfera de reacción, consumo energético y eficiencia de recuperación metálica.

La tostación oxidante se desarrolla típicamente en hornos de reverbero o de lecho fluidizado, operando en un rango de temperatura de 800–1000 °C bajo atmósfera controlada de aire u oxígeno. Anderson (2022) reporta que la oxidación de la estibina genera Sb_2O_3 como producto intermedio y libera SO_2 gaseoso, cuya concentración depende del flujo de aire y del contenido de azufre en el mineral. Estudios previos demostraron que incrementos en la temperatura favorecen la cinética de oxidación, pero también aumentan las pérdidas por volatilización de Sb_2O_3 (Deng y col., 2020; Li y col., 2021).

Posteriormente, el óxido de antimonio obtenido puede ser sometido a reducción carbotérmica en hornos eléctricos o de cuba. En esta etapa, el Sb_2O_3 se mezcla con carbón o coque metalúrgico como agente reductor y se calienta a temperaturas entre 1000 y 1200 °C. Martínez y Delgado (2022) indican que la eficiencia de recuperación puede alcanzar valores superiores al 90 %, dependiendo del tamaño de partícula, pureza del concentrado y control atmosférico.

Algunos estudios han evaluado modificaciones del proceso tradicional para mejorar la captura de emisiones y la eficiencia térmica. Zhang y col. (2024a, 2024b) describen mejoras en sistemas de condensación de vapores de Sb_2O_3 y tecnologías de recuperación de calor residual, reduciendo el consumo energético específico del proceso.

Diversos autores coinciden en que el principal desafío ambiental de la pirometalurgia radica en la emisión de dióxido de azufre y la generación de escorias con metales pesados (Deng y col., 2020; Martínez y Delgado, 2022; Zhang y col., 2023). Cuando múltiples investigaciones respaldaron estos impactos, la literatura se organizó en orden cronológico para su análisis



comparativo (Deng y col., 2020; Li y col., 2021; Zhang y col., 2023). Desde el punto de vista tecnológico, estos procesos presentan un Nivel de Madurez Tecnológica (TRL) de 8–9, al tratarse de tecnologías comercialmente consolidadas a escala industrial. Sin embargo, su elevada demanda energética y huella ambiental han impulsado el desarrollo de alternativas hidrometalúrgicas consideradas más sostenibles (Zhang y col., 2023).

La Figura 2 presenta un esquema general del procesamiento pirometalúrgico del antimonio, incluyendo las etapas de tostación oxidante y reducción carbotérmica. Este esquema permite visualizar la transformación secuencial de Sb_2S_3 a Sb_2O_3 y finalmente a Sb metálico, así como los puntos críticos de generación de emisiones.

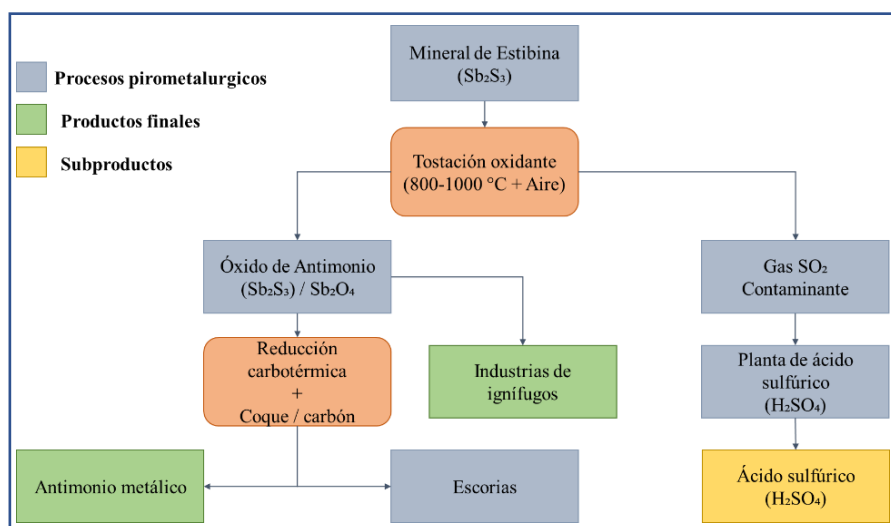


Figura 2. Esquema de procesamiento pirometalúrgico de antimonio vía tostación y reducción carbotérmica. Elaboración propia con base en Anderson (2022) y Deng y col. (2020).

MÉTODOS HIDROMETALÚRGICOS

La hidrometalurgia ha emergido como alternativa tecnológica a los procesos pirometalúrgicos tradicionales debido a su menor consumo energético y potencial reducción de emisiones gaseosas (SO_2). En esta revisión se analizaron estudios experimentales enfocados en la lixiviación selectiva de estibina (Sb_2S_3) y concentrados secundarios, evaluando variables como tipo de agente lixivante, concentración de reactivos, pH, temperatura, relación sólida/líquido, tiempo de residencia, cinética de disolución y eficiencia de recuperación metálica.



Las rutas hidrometalúrgicas identificadas se clasificaron en tres grupos principales: lixiviación alcalina sulfurosa, lixiviación en medio clorurado y lixiviación con sistemas ácidos u orgánicos.

La lixiviación alcalina con sulfuros (Na_2S – NaOH) es una de las rutas más estudiadas. Li y col. (2021) describen que la estibina se disuelve formando complejos tiosulfurados solubles bajo condiciones de $\text{pH} > 12$ y temperaturas entre 60 y 90 °C.

Las variables operativas críticas reportadas incluyen:

- Concentración de Na_2S (50–150 g/L).
- pH del sistema (12–14).
- Temperatura (60–90 °C).
- Relación sólido/líquido (1:5 a 1:10).
- Tiempo de lixiviación (1–6 h).

Chen y col. (2021) evaluaron sistemas clorurados empleando HCl o soluciones mixtas con NaCl, favoreciendo la formación de complejos SbCl_4^- en medio ácido. Estos sistemas operan a temperaturas moderadas (25–80 °C) y permiten mayores velocidades de disolución, aunque presentan riesgos de corrosión y generación de efluentes ácidos.

Investigaciones posteriores han explorado lixiviantes orgánicos y sistemas más sostenibles, incluyendo ácidos orgánicos débiles y agentes complejantes biodegradables. Zhang y col. (2023) reportan recuperaciones superiores al 85 % bajo condiciones suaves (<80 °C), con menor generación de subproductos tóxicos. Cuando múltiples estudios respaldaron la mejora ambiental de estas tecnologías, se organizaron en orden cronológico (Li y col., 2021; Chen y col., 2021; Zhang y col., 2023).

En términos cinéticos, varios autores coinciden en que el proceso de disolución de Sb_2S_3 se ajusta frecuentemente al modelo de núcleo decreciente controlado por difusión a través de la capa de productos (Li y col., 2021; Zhang y col., 2023). Las energías de activación reportadas oscilan entre 25 y 45 kJ/mol, lo que sugiere control mixto químico-difusional dependiendo del sistema lixiviante.



A continuación la Tabla 1 se resume comparativamente los principales métodos hidrometalúrgicos evaluados, destacando ventajas operativas y limitaciones técnicas asociadas a cada sistema lixivante.

Tabla 2. Evaluación comparativa de métodos hidrometalúrgicos para la lixiviación de antimonio. Elaboración propia con base en Chen y col. (2021), Li y col. (2021), Ye y col. (2016) y Zhang y col. (2023).

Método	Agente	Ventaja principal	Limitación clave
Alcalina	Na_2S	Selectividad para minerales complejos	Generación H_2S
Haluros	Cl^-/Br^-	Cinética rápida	Alta corrosividad
Ác. Orgánicos	Ác. Cítrico/ oxálico	Bajo impacto ambiental	Cinética lenta
Agentes quelantes	EDTA	Alta selectividad	Costo elevado

Como se observa en la Tabla 1, los sistemas alcalinos presentan alta selectividad, aunque con riesgos de generación de H_2S , mientras que los sistemas basados en ácidos orgánicos ofrecen menor impacto ambiental, pero con cinéticas más lentas.

MÉTODOS DE PURIFICACIÓN Y REFINACIÓN

Una vez obtenidas las soluciones enriquecidas con antimonio mediante lixiviación, se analizaron técnicas orientadas a la recuperación y purificación del metal, considerando pureza final, eficiencia del proceso y viabilidad ambiental.

La cementación consiste en la precipitación del antimonio mediante la adición de un metal más reactivo, como zinc o hierro, favoreciendo su reducción y separación en fase sólida. Es un método simple y de bajo costo, aunque el producto obtenido suele requerir etapas posteriores de refinación debido a su menor pureza.

La electro-obtención (EO) y la electro-refinación (ER) constituyen los principales métodos para obtener antimonio de alta pureza (>99.5 %). En la EO el metal se deposita directamente desde la solución lixiviada, mientras que en la ER se refina un ánodo impuro para producir un cátodo de mayor pureza. Los

fundamentos de estos procesos han sido documentados por López y col. (2019). Investigaciones recientes han propuesto electrolitos más benignos que sustituyen sistemas tradicionales basados en fluoruros o cloruros ácidos, reduciendo riesgos ambientales (Fernández y col., 2023; Zhang, B. y col., 2024; Zhang, W. y col., 2024).

MÉTODOS DE APOYO Y CARACTERIZACIÓN

Para complementar la evaluación de las rutas de extracción y refinación, se consideraron herramientas de análisis ambiental y técnicas instrumentales de caracterización. El análisis de ciclo de vida (ACV) se utilizó como herramienta comparativa para estimar el impacto ambiental global de las diferentes tecnologías, integrando indicadores como consumo energético y emisiones asociadas (Martínez y Delgado, 2022).

Asimismo, los estudios revisados emplearon técnicas como Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), Difracción de Rayos X (XRD) y Espectroscopía Fotoelectrónica de Rayos X (XPS) para evaluar fases cristalinas, morfología y estados de oxidación del antimonio, permitiendo interpretar mecanismos de reacción y calidad del producto final.

DISCUSIÓN

El análisis sistemático de la literatura permitió identificar las principales tendencias tecnológicas en la metalurgia del antimonio, evidenciando una transición progresiva desde procesos convencionales de alta intensidad energética hacia alternativas con menor impacto ambiental. A partir de la información recopilada, se realizó una comparación técnica considerando eficiencia de recuperación, consumo energético, impacto ambiental y nivel de madurez tecnológica.

EVALUACIÓN COMPARATIVA DE TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES VS ALTERNATIVAS VERDES

La metalurgia del antimonio se ha estructurado históricamente en dos grandes enfoques: procesos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos.

Los métodos pirometalúrgicos presentan ventajas en términos de escalabilidad industrial y procesamiento de minerales de alta ley, alcanzando niveles de madurez tecnológica (TRL 8–9). Sin embargo, diversos estudios reportan elevados consumos energéticos y emisiones significativas de SO_2 asociadas a la tostación oxidante (Deng y col., 2020; Martínez y Delgado, 2022; Zhang y col., 2023). Estos factores limitan su sostenibilidad ambiental y aumentan los costos asociados al control de emisiones.

En contraste, las rutas hidrometalúrgicas operan a temperaturas moderadas y permiten mayor selectividad en la disolución del antimonio, reduciendo emisiones gaseosas directas y facilitando el tratamiento de minerales complejos y residuos secundarios (Li y col., 2021; Chen y col., 2021; Zhang y col., 2023). Aunque su nivel de madurez tecnológica es inferior (TRL 3–6 en tecnologías emergentes), representan una alternativa estratégica en contextos donde la sostenibilidad y la eficiencia ambiental son prioritarias.

En conjunto, la evidencia sugiere que el desarrollo futuro de la metalurgia del antimonio tenderá a integrar principios de química verde, optimización energética y reducción de impactos ambientales.

PURIFICACIÓN Y OBTENCIÓN DEL METAL BRILLANTE

La lixiviación genera soluciones enriquecidas con antimonio que requieren etapas posteriores de purificación y reducción para obtener el metal en estado sólido. Las técnicas más relevantes incluyen la electro-obtención y la electro-refinación, consideradas esenciales para la producción de antimonio de alta pureza (>99.5 %).

Los procesos convencionales han empleado electrolitos basados en fluoruros o cloruros ácidos, ampliamente documentados por López y col. (2019). No obstante, investigaciones recientes se han orientado al desarrollo de sistemas electrolíticos más benignos, como electrolitos basados en sulfonatos alcalinos y medios libres de cianuro, con el objetivo de reducir riesgos ambientales y mejorar la seguridad operativa (Fernández y col., 2023; Zhang, B. y col., 2024; Zhang, W. y col., 2024).

Estos avances tecnológicos permiten la obtención del denominado “metal brillante” con elevada pureza y menor huella ambiental, aspecto fundamental para aplicaciones de alto valor agregado, como la industria electrónica y de semiconductores.

CONCLUSIONES

Esta revisión consolida la evidencia de que la metalurgia del antimonio se encuentra en una fase de transición crítica. Las tecnologías convencionales, aunque eficaces, son ambientalmente insostenibles. Por el contrario, las rutas hidrometalúrgicas basadas en los principios de la química verde, particularmente la lixiviación con agentes orgánicos o haluros y la electrorefinación con electrolitos benignos, demuestran un potencial enorme para reducir el impacto ambiental de la industria.

Las tendencias futuras y direcciones de investigación prioritarias deben enfocarse en:

- Escalabilidad de procesos verdes: La investigación en antimonio debe migrar de estudios a escala de laboratorio al desarrollo y optimización de procesos continuos a escala piloto, abordando desafíos de ingeniería y economía.
- Integración e híbridos: Combinar las ventajas de piro-e hidrometalurgia del antimonio en procesos híbridos (ej., una tostación suave seguida de lixiviación verde selectiva) podría ofrecer un balance óptimo entre eficiencia y sostenibilidad.
- Economía circular: Implementar estrategias para la recuperación de antimonio a partir de residuos electrónicos y baterías agotadas (minería urbana), y el reciclaje interno de lixiviantes y electrolitos para minimizar el consumo de recursos vírgenes ((Li y col., 2025)
- Evaluación cuantitativa del ciclo de vida: Es crucial realizar ACV rigurosos para cuantificar y comparar objetivamente los beneficios ambientales de las nuevas tecnologías frente a las convencionales, complementado con la reevaluación de los yacimientos de antimonio existentes en el país para actualizar su potencial y factibilidad económica bajo criterios sostenibles ((Martínez y Delgado, 2022; Chen y col., 2016).
- Desarrollo de materiales: Investigar electrodos más resistentes a la corrosión y más eficientes para permitir el uso generalizado de reactivos alternativos en la lixiviación y refinación de antimonio, reduciendo así los costos de capital y operación.

La transición hacia una metalurgia del antimonio más verde no es solo una opción tecnológica, sino una necesidad ambiental y estratégica para asegurar

el suministro responsable de este metal crítico en el marco de una economía baja en carbono y circular.

AGRADECIMIENTOS

Lorena Galaviz Briones agradece al Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación del Estado de Coahuila (SECHITI) y a la Universidad Autónoma de Coahuila por el respaldo institucional y financiero otorgado para la realización del presente artículo de revisión desarrollado en el marco de su proyecto de tesis sobre procesos metalúrgicos sostenibles para metales estratégicos.

REFERENCIAS

- Álvarez Pelegry, E. & Blanco Álvarez, F. (Coords.). (2023). Las materias primas minerales en la transición energética y en la digitalización: El papel de la minería y la metalurgia. Madrid: Real Academia de Ingeniería de España. Disponible en: https://raing.es/pdf/eventos/las_materias_primas_minerales_raing.pdf
- Anastas, P.T. & Warner, J.C. (1998). Green chemistry: Theory and practice. Oxford: Oxford University Press. DOI: <https://doi.org/10.1093/oso/9780198506980.001.0001>
- Anderson, C.G. (2022). The metallurgy of antimony. *Chemie der Erde - Geochemistry*, 82(1): 125–126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2012.04.001>
- Chen, W., Zhang, L. & Wang, H. (2016). Alkaline leaching of antimony from stibnite concentrate: Kinetics and process optimization. *Hydrometallurgy*, 164: 118–125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hidromet.2016.06.014>
- Chen, W., Zhang, L., Wang, H. & Li, X. (2021). Lixiviación de antimonio de mineral de estibina en solución de KOH para la producción de piroantimonato de sodio: optimización sistemática y estudio cinético. *JOM: The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 73(3): 845–856. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04531-8>



- Comisión Europea (2020). Study on the critical raw materials for the EU. Luxembourg: Publications Office of the European Union. DOI: <https://data.europa.eu/doi/10.2873/11619>
- Deng, J., Li, X., Wang, Y. & Zhang, H. (2020). A review on pyrometallurgical extraction of antimony from primary resources: Current practices and evolving trends. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 41(6): 412–428. DOI: <https://doi.org/10.1080/08827508.2020.1739080>
- Jova Geology (2014). Antimonio (Antimony) mineral. Disponible en: <https://www.jovageology.com/2014/04/antimonio-antimony-mineral.html>. Fecha de consulta: 15 de noviembre de 2024.
- Li, Y., Xue, H., Taskinen, P., Jokilaakso, A., Tang, C., Jin, W., Rämä, M., Chen, Y. & Yang, S. (2021). Clean antimony production from stibnite concentrate with goethite residue co-treatment for zinc, iron, sulfur conservation. *Journal of Cleaner Production*, 315: 127847. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127847>
- Li, Y., Wang, X., Chen, H. & Zhang, K. (2025). Exploración del flujo de material de antimonio en el contexto de la transición energética: un análisis basado en escenarios. *Resources, Conservation and Recycling*, 222: 108432. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108432>
- López, C., Hernández, F. & Bravo, E. (2019). Procesos de refinación del antimonio. *Tecnología Minera*, 6(4): 33–47.
- Martínez, P. & Delgado, S. (2022). Evaluación ambiental de la extracción de antimonio. *Ingeniería Verde*, 9(2): 88–108.
- Van den Brink, S., Kleijn, R., Sprecher, B., Mancheri, N. & Tukker, A. (2022). Resilience in the antimony supply chain. *Resources, Conservation and Recycling*, 176: 106586. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106586>
- U.S. Geological Survey (2023). Mineral Commodity Summaries: Antimony. Disponible en: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/antimony-statistics-and-information>
- Ye, L., Li, X., Li, Y. & Tang, C. (2019). Environmentally friendly leaching of antimony from stibnite using citric acid as reagent. *Hydrometallurgy*, 185: 1–7. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr12030555>
- Zhang, Y., Li, H., Wang, X. & Chen, K. (2023). Ultrasound-enhanced alkaline leaching of antimony from stibnite ore: Process optimization and mechanism analysis. *Ultrasonics Sonochemistry*, 98: 106525. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106525>
- Zhang, B., Wang, S. & Chen, Y. (2024). Advances in non-cyanide electrowinning for sustainable antimony production. *Heliyon*, 10(11): e35300. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35300>

Zhang, W., Liu, H. & Santos, R.M. (2024). Sustainable approaches in antimony electrorefining: Recent developments and environmental perspectives. *REM - International Engineering Journal*, 77(2): 145–158. DOI: <https://doi.org/10.1590/0370-44672024780031>