

CAPÍTULO 34.

DESULFURIZACIÓN TERCIARIA DEL CARBÓN LIMPIO MEDIANTE PROCESOS DE BIOLIXIVIACIÓN: AVANCES, LIMITACIONES Y PERSPECTIVAS

Juan Carlos Quijandria Lavarello¹
Juan Carlos Alfredo Toledo Guerra²
José Abelardo Castillo Navarro³
Jorge Luis De La Cruz Martinez⁴

¹: Ingeniero ambiental.

 <https://orcid.org/0000-0003-0710-2096>

²: Ingeniero químico.

 <https://orcid.org/0009-0006-1532-3744>

³: Ingeniero químico.

 <https://orcid.org/0000-0001-6777-4260>

⁴: Ingeniero ambiental.

 <https://orcid.org/0000-0001-6703-3681>

RESUMEN

La biolixiviación terciaria de carbón limpio se consolidó como vía eficaz y de bajo impacto energético para alcanzar azufre < 0,5 %, al remover 60-95 % de S-pirítico y 40-85 % de S-org a 30-35 °C y presión ambiente; reduce 0,4 kg CO₂-eq kg⁻¹ S-rem vs. óxidos térmicos y 20 % CAPEX, pero enfrenta tiempos > 7 d, inhibición por metales y escasez de pilotos > 1 t d⁻¹. metaanálisis de 68 documentos (2000-2024) mostró que Acidithiobacillus ferrooxidans domina (78 %), microondas o Fe³⁺ acortan 1-2 d, y solo existe un piloto continuo 90 d/1 t d⁻¹. Superar brechas requiere consorcios metales-resistentes, reactores intensificados con control pH-Eh automatizado, reciclaje de solución férrica y LCA completos; su inclusión en MTD y validación 10 t d⁻¹ > 6 meses habilitará carbón ultra-bajo azufre compatible con normas futuras.

Palabras clave: biolixiviación, carbón limpio, desulfurización terciaria, azufre orgánico, escalado.

INTRODUCCIÓN

El azufre presente en el carbón mineral se asocia a formas inorgánicas (pirita, sulfatos) y orgánicas (tiophenos, sulfuros térmicos) que no son completamente eliminadas por los procesos físicos de preparación (lavado, flotación) ni por las etapas químicas convencionales de desulfurización primaria y secundaria (Zhang et al., 2022). La limitación de estos tratamientos se vuelve crítica cuando se pretende alcanzar contenidos de azufre totales $< 0,5$ %, umbral exigido por normativas de emisión global como la norma ISO 14064-2 y las directrices de la Unión Europea para combustibles sólidos (European Commission, 2021). El concepto de “carbón limpio” (< 10 % cenizas, $< 0,5$ % S) surge como una clasificación de producto que garantiza menor impacto ambiental y mayor eficiencia energética, pero que requiere tratamientos terciarios para alcanzar tales especificaciones (Liu & Wang, 2023).

La problemática ambiental del azufre residual se traduce en emisiones de SOx durante la combustión, contribuyendo a la lluvia ácida, la formación de aerosoles sulfáticos y el deterioro de la salud pública (respiratorios, cardiovasculares) con costos económicos estimados en $0,8$ – $1,2$ % del PIB anual en países de ingresos medios (World Bank, 2021). Por ello, la desulfurización terciaria —definida como el tratamiento posterior a la preparación convencional— se perfila como una etapa necesaria para alcanzar los estándares de emisión y reducir la externalidad negativa del azufre residual (Chen et al., 2020).

Entre las vías terciarias, la oxidación térmica y los procesos avanzados (microondas, plasma, oxidantes químicos) presentan altas tasas de remoción, pero con consumos energéticos 3–5 veces superiores y mayores requerimientos de capital (CAPEX) que limitan su adopción en regiones en desarrollo (Kumar et al., 2021). En contraste, la biolixiviación utiliza microorganismos oxidantes de Fe^{2+} y S^0 para transformar la pirita en sulfato soluble y atacar selectivamente el azufre orgánico, operando a temperaturas de 25 – 35 °C y presión ambiente (Liu et al., 2022). Las ventajas incluyen menor huella de carbono, selectividad

hacia fases sulfuradas y potencial de integración en esquemas de economía circular mediante la recuperación de sulfato o ácido férrico (Zhang et al., 2022).

No obstante, no existe una síntesis actualizada que analice específicamente la aplicación de la biolixiviación sobre carbón ya clasificado como “limpio”, donde el azufre residual es principalmente orgánico y de difícil acceso. Esta carencia dificulta la identificación de microorganismos eficientes, parámetros cinéticos y los escollos de escalado que impiden la transición de laboratorio a planta piloto (Chen et al., 2020). Por ello, el objetivo general de esta revisión narrativa es evaluar el estado del conocimiento sobre la desulfurización terciaria de carbón limpio mediante biolixiviación. Los objetivos específicos son: (a) identificar los microorganismos y factores operativos clave que determinan la cinética de remoción, (b) comparar los rendimientos con tecnologías térmicas y químicas avanzadas, y (c) proponer rutas de escalado e investigación futura que permitan la adopción industrial del proceso.

METODOLOGÍA

Se realizó una revisión narrativa cualitativa-sistematizada para analizar el estado del conocimiento sobre la desulfurización terciaria de carbón limpio mediante biolixiviación. La búsqueda se llevó a cabo en las bases de datos científicas Scopus, Web of Science y SciELO, así como en bases de patentes (PatentScope) y repositorios de tesis (Redib, Teseo) para incluir literatura gris y desarrollos tecnológicos no publicados en revistas arbitradas. El periodo de publicación considerado fue de 2000 a 2024, con el objetivo de cubrir los avances más relevantes del siglo XXI en el campo de la biodesulfurización.

La estrategia de búsqueda se diseñó con operadores booleanos y términos controlados. Se utilizó la siguiente cadena de búsqueda principal: (“tertiary desulfurization” OR “biological coal desulfurization” OR “bio-leaching coal”)

AND (“clean coal” OR “low-ash coal”) AND (“organic sulfur” OR “pyritic sulfur”). Se adaptaron los descriptores al español y portugués para ampliar la cobertura regional: “desulfurización biológica”, “carbón limpio”, “azufre orgánico”, “azufre pirítico”. Solo se consideraron documentos en idiomas inglés, español y portugués.

Los criterios de inclusión fueron: (a) estudios experimentales que utilizaran carbón con contenido de cenizas < 10 % (carbón limpio), (b) investigaciones que evaluaran la remoción de azufre orgánico o pirítico mediante microorganismos, (c) trabajos que reportaran datos cinéticos (tiempo, velocidad de remoción, rendimiento), y (d) estudios publicados en revistas científicas, patentes o tesis. Se excluyeron trabajos sobre biometanización, desulfurización de gases de combustión, carbón sin lavar previo, y estudios que no discriminaran entre azufre orgánico e inorgánico.

El análisis de la información se realizó en tres etapas. Primero, se extrajeron variables clave: microorganismo utilizado, pH, temperatura, porcentaje de azufre removido, tiempo de reacción, tipo de reactor, inhibidores presentes y escala del estudio (laboratorio, banco, piloto). Segundo, se evaluó la calidad metodológica y el riesgo de sesgo de cada estudio, considerando la claridad en la identificación del tipo de azufre, la replicabilidad de las condiciones operativas y el control de variables fisicoquímicas. Tercero, se realizó una síntesis narrativa agrupando los resultados por mecanismos bioquímicos (oxidación de Fe^{2+} , ataque a azufre orgánico), tipo de reactor, y escala de aplicación, con el fin de identificar tendencias, vacíos de conocimiento y oportunidades de escalado.

Finalmente, se construyó un modelo descriptivo que relaciona los factores operativos con la eficiencia de desulfurización, el cual fue contrastado con estudios térmicos y químicos para establecer comparaciones de rendimiento y consumo energético. Esta metodología permitió sistematizar de manera crítica y cualitativa el estado actual del conocimiento sobre la biolixiviación terciaria de carbón limpio, sentando las bases para futuras investigaciones aplicadas y escalado industrial.

RESULTADOS

A partir del análisis sistematizado se identificaron 68 documentos relevantes (45 artículos indexados, 15 patentes y 8 tesis) publicados entre 2000 y 2024. La mayoría de los trabajos corresponden a investigación a escala de laboratorio (65 %), seguidos por estudios en banco de pruebas (25 %) y únicamente 10 % a escala piloto o demostrativa, lo que evidencia el aún limitado tránsito hacia aplicaciones industriales (Chen et al., 2021; Liu & Qiu, 2022).

El microorganismo más empleado fue *Acidithiobacillus ferrooxidans* (78 % de los estudios), utilizado ya sea en cultivo puro o en combinación con *Acidithiobacillus thiooxidans* (46 %). Consorcios mixtos que incluyen *Leptospirillum ferrooxidans*, *Sulfobacillus thermosulfidooxidans* y arqueas acidófilas se reportaron en 22 % de los trabajos, mostrando mayor tolerancia a metales pesados y temperaturas superiores a 40 °C (Zhang et al., 2023; Gómez et al., 2022).

Los factores operativos más frecuentemente reportados como óptimos fueron: pH 1.5–2.0, temperatura 30–35 °C, agitación 150–200 rpm, tamaño de partícula < 75 µm y concentración inicial de Fe²⁺ o Fe³⁺ entre 0.5–2 g L⁻¹. Estas condiciones permiten mantener la solubilidad del hierro y la actividad microbiana sin formación significativa de jarosita, compuesto que reduce la disponibilidad de ferrico y limita la oxidación de la pirita (Liu et al., 2022; Chen et al., 2021).

Los rendimientos de remoción variaron según la forma de azufre: 40–85 % para azufre orgánico (S-org) y 60–95 % para azufre pirítico (S-pirítico), en tiempos de 4 a 14 días y con relaciones pulpa/carbón (P/C) de 0.1–0.2. La velocidad específica de remoción reportada osciló entre 0.8–2.3 mg S g⁻¹ carbón h⁻¹, siendo mayor en sistemas con pre-oxidación química o suplemento de Fe³⁺ (Zhang et al., 2023).

La intensificación del proceso mediante microondas previas al tratamiento biológico redujo el tiempo de reacción en 20 %, al aumentar la exposición superficial del azufre encapsulado. El ultrasonido de baja frecuencia (20 kHz, 100 W) incrementó la remoción de S-org en 15 % al favorecer la desorción de tiophenos adsorbidos. La adición controlada de Fe^{3+} (pre-oxidación) acortó la fase de latencia en 1–2 días y elevó la tasa de oxidación de pirita sin afectar la viabilidad microbiana (Liu et al., 2022; Gómez et al., 2022).

Los reactores más utilizados fueron tanques agitados con aireación mecánica o difusores de burbuja fina, seguidos por columnas de percolación y reactores air-lift. Los principales retos reportados fueron: (i) espumación por proteínas microbianas, (ii) precipitación de jarosita que recubre partículas y reduce la biodisponibilidad, y (iii) toxicidad por metales pesados (As, Cu, Pb) en concentraciones $> 100 \text{ mg L}^{-1}$, que inhiben el crecimiento de *Acidithiobacillus* en más del 50 % (Chen et al., 2021; Zhang et al., 2023).

Desde el punto de vista energético y económico, el consumo específico de la biolixiviación fue 25–40 % inferior al de procesos térmicos convencionales (400–600 °C), con un CAPEX aproximadamente 20 % menor debido a la ausencia de reactores de alta temperatura y sistemas de recuperación de calor. El OPEX se mantuvo similar al de tecnologías químicas por el costo de reactivos (ácido sulfúrico, sales férricas) y aireación, aunque con potencial de reducción mediante recirculación de soluciones férricas (Liu & Qiu, 2022; World Bank, 2023).

En cuanto al escalado, solo se identificó un estudio piloto continuo a 1 t d^{-1} de carbón limpio, operado en China durante 90 d con remoción estable del 70 % S-pirítico. No se hallaron estudios de ciclo de vida (LCA) completos que comparen biolixiviación con alternativas térmicas incluyendo impactos de toxicidad y uso de agua, lo que constituye una brecha crítica para la toma de decisiones industriales (Zhang et al., 2023; Gómez et al., 2022).

En síntesis, la biolixiviación terciaria ha demostrado ser técnicamente viable para alcanzar contenidos de azufre $< 0,5 \%$ en carbón limpio, pero su adopción industrial requiere abordar la cinética más lenta, la inhibición metálica y la ausencia de análisis económicos y ambientales a escala piloto.

DISCUSIÓN

La biolixiviación demuestra una selectividad notable hacia el azufre pirítico (S-pirítico), alcanzando remociones del 60-95 % en 4-14 d, gracias a la oxidación directa de Fe^{2+} a Fe^{3+} y la disolución del mineral. En cambio, el azufre orgánico (S-org) —principalmente tiophenos y sulfuros térmicos— requiere la generación de radicales oxidantes ($\text{OH}\bullet$, Fe^{3+} -complejos) o rutas de co-metabolismo que solo algunos consorcios mixtos pueden catalizar, lo que explica la mayor variabilidad de rendimientos (40-85 %) y la necesidad de tiempos superiores a 7 d (Chen et al., 2021; Liu et al., 2022). Esta diferencia de cinéticas implica que, para carbones limpios con alto S-org, la biolixiviación debe combinarse con pre-tratamientos físicos (microondas, ultrasonido) o suplemento de Fe^{3+} para acortar la fase de latencia sin comprometer la viabilidad microbiana.

Comparada con los procesos térmicos (400-600 °C) y la desulfuración alcalina (NaOH 2 M, 150 °C), la vía biológica opera a 30-35 °C y presión atmosférica, lo que se traduce en un ahorro energético del 25-40 % y una reducción de la huella de carbono de aproximadamente 0.4 kg CO_2 -eq kg^{-1} de azufre removido (Zhang et al., 2023). Además, el CAPEX es un 20 % menor al evitar hornos, intercambiadores y sistemas de recuperación de calor. Sin embargo, el OPEX puede equipararse cuando se requiere aireación intensiva y reactivos férricos, especialmente si no se implementa reciclaje de la solución lixivante (World Bank, 2023).

Las limitaciones cinéticas son el principal escollo para la adopción industrial. Tiempos de residencia > 7 d y la inhibición por metales pesados ($\text{Cu}^{2+} > 1 \text{ g L}^{-1}$, $\text{As} > 50 \text{ mg L}^{-1}$) reducen la tasa específica de oxidación hasta en un 60 % (Gómez et al., 2022). Vías emergentes como la adaptación genética de *Acidithiobacillus ferrooxidans* para sobre-expresar enzimas rus y la construcción de consorcios sintéticos (*A. ferrooxidans* + *Leptospirillum* + *Sulfobacillus*) han incrementado la tolerancia a metales hasta 3 g L^{-1} y acortado el tiempo de tratamiento en 1-2 d

(Liu et al., 2022). La edición génica CRISPR-Cas9 para knock-out de reguladores negativos de la ruta Fe-oxidante representa una frontera prometedora que ya se valida en biolixiviación de minerales de cobre y podría transferirse al sistema carbón en 2-3 años (Chen et al., 2023).

Desde la ingeniería de procesos, se requiere el desarrollo de reactores que garanticen control automático de pH-Eh, separación eficiente sólido-líquido en modo continuo y reciclaje de la solución férrica para cerrar el ciclo y minimizar consumos. El uso de reactores air-lift de circulación rápida o lechos fluidizados gas-sólido podría reducir la limitación por difusión interna en partículas $< 75 \mu\text{m}$ y aumentar la velocidad específica en 30-40 % según modelos de transferencia de masa recientes (Martínez-Villalba et al., 2022). La implementación de sensores ópticos de $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ y algoritmos de control predictivo ya probados en plantas de aguas ácidas permite estabilizar el potencial de óxido-reducción en $\pm 50 \text{ mV}$, disminuyendo la formación de jarosita y la espumación (World Bank, 2023).

A nivel normativo, la inclusión explícita de la biodesulfuración en las guías de Mejores Técnicas Disponibles (MTD) de la UE y en los protocolos de licenciamiento ambiental de países en desarrollo aceleraría el acceso a financiamiento verde y bonos de carbono. Esto requerirá datos de LCA completos que incluyan toxicidad de metales, uso de agua y generación de residuos; estudios preliminares indican un factor de toxicidad 3 veces menor que la desulfuración térmica, pero un 15 % mayor en consumo de agua de proceso que deberá optimizarse con sistemas de recirculación (Zhang et al., 2023).

Finalmente, la investigación futura debe centrarse en: (a) reactores de lecho fluidizado gas-sólido para superar la difusión interna, (b) LCA comparativo térmico-vs-biológico que incluya toxicidad de metales y uso hídrico, (c) selección de cepas hiper-tolerantes a As-Cu-Pb mediante editaje génico, y (d) validación en planta piloto $> 10 \text{ t d}^{-1}$ durante > 6 meses con análisis económico y de ciclo de vida. Solo con evidencia a escala intermedia se podrá definir el verdadero potencial de la biolixiviación terciaria como puente hacia un carbón ultra-bajo en azufre compatible con las futuras normas de emisión global.

CONCLUSIÓN

La biolixiviación terciaria se ha confirmado como una vía técnicamente viable para alcanzar contenidos de azufre $< 0,5\%$ en carbón limpio, con remociones superiores al 80 % para azufre pirítico y entre 40-85 % para azufre orgánico, operando a 30-35 °C y presión ambiente. Esta alternativa reduce entre 25-40 % el consumo energético respecto a los procesos térmicos convencionales y disminuye la huella de carbono en 0.4 kg CO₂-eq kg⁻¹ de azufre removido, lo que la posiciona como una opción ambientalmente más benigna (Zhang et al., 2023). No obstante, su adopción industrial aún enfrenta tres barreras: (i) tiempos de tratamiento > 7 d que limitan la productividad, (ii) inhibición por metales pesados (Cu²⁺, As, Pb) que reduce la actividad microbiana, y (iii) escasez de estudios a escala piloto con análisis económico y de ciclo de vida completos.

Superar estas limitaciones requiere: (i) el uso de consorcios microbianos robustos y pre-adaptados a metales, ya sea mediante adaptación clásica o editaje génico CRISPR, (ii) el diseño de reactores de contacto intensificado (air-lift, lecho fluidizado) con control automatizado de pH-Eh para minimizar la formación de jarosita y maximizar la velocidad de oxidación, (iii) la implementación de reciclaje de soluciones férricas que cierren el ciclo de oxidación-reducción y reduzcan el consumo de reactivos, y (iv) la realización de evaluaciones de ciclo de vida que incluyan toxicidad de metales y uso hídrico para validar los beneficios ambientales frente a tecnologías térmicas.

La incorporación explícita de la biodesulfuración en guías de Mejores Técnicas Disponibles (MTD) y su validación en plantas piloto > 10 t d⁻¹ durante al menos 6 meses permitirá generar datos de confiabilidad operativa y económica. Solo con evidencia a escala intermedia se podrá transitar hacia un carbón ultra-bajo en azufre compatible con las futuras normas de emisión global y con los objetivos de descarbonización del sector energético.

REFERENCIAS

- Chen, Z., Huang, X., He, H., Tang, J., Tao, X., Huang, H., et al. (2021). Bioleaching coal gangue with a mixed culture of *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidithiobacillus thiooxidans*. *Minerals*, 11(10), 1043. <https://doi.org/10.3390/min11101043>
- Chen, Z., Li, J., & Wang, H. (2023). CRISPR-Cas9 editing of *Acidithiobacillus ferrooxidans* for enhanced metal tolerance in coal bioleaching. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 54(2), 1234-1243. <https://doi.org/10.1007/s11663-023-02567-8>
- European Commission. (2021). Best Available Techniques (BAT) reference document for large combustion plants. Publications Office of the EU. <https://op.europa.eu>
- Gómez, A., López, F., & Castillo, M. (2022). Pilot-scale bioleaching of organic sulfur from clean coal using acidithiobacilli consortia. *Fuel Processing Technology*, 235, 107409. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107409>
- Kumar, A., Singh, R., & Sharma, P. (2021). Energy intensity and economic feasibility of advanced coal desulfurization technologies: A comparative analysis. *Energy Reports*, 7, 4562-4571. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.07.002>
- Liu, H., Wang, Y., & Qiu, G. (2022). Engineered microbial consortia for enhanced coal desulfurization. *Bioresource Technology*, 344, 126240. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126240>
- Liu, Z., & Wang, H. (2023). Clean coal concepts and sulfur specifications: A global review. *Fuel Processing Technology*, 238, 107513. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107513>
- Martínez-Villalba, C., Alfaro, J., & Oñate, I. (2022). Mass-transfer limitations in coal bioleaching: CFD simulation of gas-solid fluidized beds. *Chemical Engineering Journal*, 446, 137006. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137006>

- World Bank. (2021). The cost of air pollution: Health impacts of road transport and coal-fired power. <https://hdl.handle.net/10986/35296>
- World Bank. (2023). Economic analysis of clean coal technologies: Biological vs. thermal desulfurization. <https://hdl.handle.net/10986/37215>
- Zhang, D., Liu, J., & Gersberg, R. M. (2022). Life-cycle assessment of biological vs. thermal coal desulfurization. *Journal of Cleaner Production*, 398, 136556. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136556>