

XLIV

**Optimización de la gestión
de reactivos químicos y su
impacto en la seguridad
toxicológica del circuito
de flotación: Una revisión
narrativa**

Miguel Grimaldo Venegas Elias

Optimización de la gestión de reactivos químicos y su impacto en la seguridad toxicológica del circuito de flotación: Una revisión narrativa

Miguel Grimaldo Venegas Elias

RESUMEN

El presente capítulo de revisión narrativa analiza la optimización de la gestión de reactivos químicos en los circuitos de flotación minera y su impacto directo en la seguridad toxicológica del personal operativo y el entorno. A pesar de que la eficiencia metalúrgica es el objetivo principal del proceso, la diversidad química de colectores, espumantes y modificadores conlleva riesgos inherentes de toxicidad, exposición crónica y degradación ambiental. A través de un análisis crítico de la literatura actual, este estudio examina la transición tecnológica hacia sistemas de dosificación automatizada y el uso emergente de reactivos de base biológica bajo el paradigma de la "química verde". Se discute cómo una gestión proactiva, alineada con protocolos internacionales de seguridad como el Sistema Globalmente Armonizado (GHS) y una interpretación rigurosa de las Fichas de Datos de Seguridad (SDS), permite mitigar los peligros ocupacionales. Se concluye que la integración de la ingeniería de procesos con estándares de higiene industrial es fundamental para minimizar derrames, mejorar la precisión dosimétrica y avanzar hacia un modelo de "cero impacto". Finalmente, se identifican brechas de conocimiento en estudios toxicológicos a largo plazo, subrayando la necesidad de continuar investigando para asegurar que la innovación tecnológica no comprometa la integridad de la salud humana en las operaciones mineras del siglo XXI.

Palabras clave: Flotación de minerales, seguridad toxicológica, gestión de reactivos, optimización de procesos, higiene industrial.

INTRODUCCIÓN

La industria minera contemporánea desempeña un papel fundamental en la economía global, siendo el proceso de flotación por espuma la técnica predominante para la concentración de minerales sulfurados y otros recursos metálicos. Este procedimiento metalúrgico depende intrínsecamente de la adición controlada de una compleja diversidad de reactivos químicos, clasificados principalmente como colectores, espumantes y modificadores, los cuales alteran las propiedades superficiales de las partículas para permitir su separación selectiva. Si bien la eficiencia en la recuperación mineral es el objetivo operativo primario, la vasta gama de compuestos químicos empleados introduce desafíos significativos que trascienden el rendimiento técnico del proceso.

La problemática central radica en los riesgos inherentes asociados con la toxicidad, la reactividad y el potencial de exposición crónica a los que se ve expuesto el personal operativo en las plantas concentradoras. Muchos de los agentes químicos utilizados en la flotación presentan perfiles de riesgo que incluyen irritación dérmica, toxicidad sistémica por inhalación de aerosoles y efectos a largo plazo derivados de la exposición acumulativa. La manipulación de estas sustancias, a menudo en condiciones ambientales de alta variabilidad y en circuitos de gran escala, incrementa la probabilidad de fugas, derrames y contacto accidental. Esta situación se agrava cuando las instalaciones carecen de sistemas de contención adecuados o protocolos de vigilancia epidemiológica rigurosos, convirtiendo a los entornos de flotación en áreas críticas dentro de la higiene industrial.

Ante este escenario, resulta imperativa la justificación de este estudio: la necesidad crítica de alinear estrictamente la optimización operativa —enfocada en la precisión de la dosificación y la eficiencia metalúrgica— con los estándares globales de seguridad química y salud ocupacional. La optimización no debe entenderse únicamente como la maximización del beneficio económico mediante la reducción del consumo de reactivos, sino como un enfoque holístico que busca minimizar la huella química en el circuito. Al reducir la carga química mediante procesos de automatización y dosificación inteligente, se disminuye simultáneamente el riesgo toxicológico para el trabajador, estableciendo una sinergia necesaria entre la sostenibilidad operativa y la protección humana.

El objetivo general del presente artículo es evaluar las mejores prácticas actuales en la gestión de reactivos químicos en el circuito de flotación, analizando específicamente

su correlación con la seguridad toxicológica. A través de una revisión narrativa, se examinarán las estrategias emergentes, como la implementación de la "química verde" y el uso de tecnologías de control digital, para determinar cómo estas innovaciones contribuyen a mitigar los riesgos ocupacionales, promoviendo entornos mineros más seguros, eficientes y alineados con las regulaciones internacionales vigentes en materia de salud y medio ambiente.

METODOLOGÍA

Para garantizar la rigurosidad científica de esta revisión narrativa, se ha diseñado un protocolo metodológico sistemático que permite identificar, seleccionar y analizar la literatura más relevante sobre la optimización de reactivos químicos y su impacto en la seguridad toxicológica en la minería. La estructura metodológica sigue las recomendaciones para revisiones narrativas de alta calidad, asegurando un alcance exhaustivo en el ámbito de la ingeniería de procesos y la salud ocupacional.

Estrategia de búsqueda

La búsqueda de información se realizó de manera exhaustiva en bases de datos de alto impacto académico, incluyendo Scopus, Web of Science, PubMed y el motor de búsqueda especializado Google Scholar. La estrategia de búsqueda empleó una combinación de descriptores booleanos ("AND", "OR") orientados a términos clave como "froth flotation", "reagent management", "toxicological safety", "occupational health" y "process optimization". En plataformas como Scopus y Web of Science, se priorizaron consultas en los títulos, resúmenes y palabras clave para filtrar estudios centrados exclusivamente en la metalurgia extractiva y los riesgos químicos. Asimismo, se realizó una búsqueda de literatura gris mediante informes técnicos de organizaciones internacionales dedicadas a la seguridad minera.

Criterios de inclusión y exclusión

Para mantener la vigencia y relevancia del contenido, se establecieron criterios estrictos. Se incluyeron artículos científicos, revisiones sistemáticas, capítulos de libros y guías de seguridad industrial publicados durante el periodo 2016-2026. Este marco temporal permite capturar la transición tecnológica hacia la digitalización y el uso de reactivos menos peligrosos en la última década. Se priorizaron publicaciones en inglés y español debido a su prevalencia en la investigación minera global. Se excluyeron

estudios que no abordaran específicamente el circuito de flotación, aquellos que se limitaran a la síntesis química básica sin aplicación operativa, y documentos de opinión sin respaldo técnico o empírico.

Proceso de selección

El proceso de tamizaje se ejecutó mediante un enfoque de tres etapas. Primero, se realizó una lectura exploratoria de los títulos y resúmenes para descartar estudios duplicados o fuera de alcance. En la segunda fase, se evaluó el texto completo de los artículos seleccionados, priorizando aquellos que integraban de manera explícita la relación entre la eficiencia metalúrgica (optimización de dosis) y los perfiles toxicológicos de los reactivos. Finalmente, se extrajeron datos cualitativos sobre metodologías de control, medidas de mitigación y hallazgos epidemiológicos. Este método de selección garantiza que la síntesis presentada en los resultados y discusión esté sustentada en evidencia que conecta directamente la ingeniería de procesos con la protección de la salud del trabajador, siguiendo las directrices de buenas prácticas en la revisión de literatura especializada.

RESULTADOS

Los resultados de la presente revisión evidencian una interdependencia crítica entre la naturaleza química de los reactivos de flotación y los protocolos de seguridad industrial. La caracterización de los reactivos más comunes revela una disparidad en sus perfiles de riesgo: mientras que los colectores como los xantatos presentan riesgos de toxicidad aguda y liberación de vapores, los modificadores de pH (ácidos y bases fuertes) representan riesgos significativos de quemaduras químicas y daños oculares. Asimismo, los espumantes orgánicos, aunque menos tóxicos en dosis pequeñas, pueden presentar bioacumulación, mientras que agentes depresores y polímeros sintéticos requieren un manejo estricto debido a su estabilidad ambiental.

Estrategias de optimización

La literatura actual destaca tres pilares fundamentales para la optimización del circuito. Primero, la implementación de sistemas de dosificación automatizada y control inteligente ha permitido reducir el consumo excesivo de reactivos. Mediante el uso de sensores en línea y algoritmos de control predictivo, es posible ajustar la dosificación en tiempo real según la ley de cabeza del mineral, minimizando los

residuos químicos y la exposición innecesaria del personal. Segundo, la industria muestra una tendencia acelerada hacia la "Química Verde". El desarrollo de reactivos de base biológica y biodegradables, derivados de subproductos agrícolas (como lípidos y derivados proteicos), está sustituyendo progresivamente a los reactivos sintéticos tradicionales, reduciendo la carga de compuestos persistentes en las colas de flotación. Finalmente, la gestión de inventarios y almacenamiento se ha consolidado bajo estándares internacionales. La estandarización de las Fichas de Datos de Seguridad (SDS) y la correcta señalización conforme al Sistema Globalmente Armonizado (GHS) son condiciones sine qua non para prevenir incidentes mayores durante el almacenamiento masivo.

Seguridad toxicológica y salud ocupacional

El análisis toxicológico identifica tres vías principales de exposición: dérmica, inhalación e ingestión accidental. La literatura señala que la inhalación de vapores o neblinas (procedentes de espumantes y colectores volátiles) es la vía más frecuente en entornos confinados o de ventilación deficiente. El contacto dérmico con reactivos líquidos durante el mantenimiento de las bombas de dosificación representa un riesgo crónico de dermatitis por contacto y sensibilización.

Los impactos identificados en la salud ocupacional incluyen, además de afecciones respiratorias y dermatológicas, reportes sobre el potencial efecto crónico en órganos diana derivado de la exposición a largo plazo a diversos coadyuvantes químicos. La integración de la higiene industrial, mediante la jerarquía de controles —priorizando la eliminación y sustitución sobre los equipos de protección personal (EPP)—, se establece como la estrategia más efectiva para mitigar estos riesgos, asegurando que la optimización operativa sea, ante todo, un ejercicio de protección de la salud humana en la cadena productiva.

DISCUSIÓN

La convergencia entre la eficiencia metalúrgica y la seguridad toxicológica constituye el núcleo de la discusión contemporánea en el procesamiento de minerales. La evidencia revisada sugiere que existe una correlación operativa-toxicológica directa: una dosificación precisa, mediada por tecnologías de control avanzado, no solo optimiza la recuperación de valores metálicos, sino que actúa como un control de ingeniería crítico. Al reducir la cantidad de reactivos superfluos en el circuito, se mitiga intrínsecamente

la probabilidad de derrames accidentales, se limita la exposición del personal durante la manipulación de bombas y se reduce la concentración de subproductos peligrosos en los relaves. Como señalan Wills y Finch (2016), la eficiencia en la flotación es un equilibrio de fuerzas; sin embargo, este equilibrio debe incluir ahora la variable de carga tóxica ambiental.

No obstante, la implementación de estas mejoras enfrenta desafíos multidimensionales. En los entornos mineros tradicionales, las barreras técnicas —como la falta de infraestructura de automatización en plantas antiguas— se entrelazan con limitaciones económicas, dado que la inversión inicial en sistemas de dosificación inteligente suele ser elevada. A esto se suma una barrera cultural persistente: la resistencia al cambio de fórmulas de reactivos probadas por décadas, incluso cuando existen alternativas más seguras. La adopción de la "Química Verde" a menudo se percibe como una amenaza a la estabilidad del proceso metalúrgico, a pesar de que los estudios sugieren que la eficiencia puede mantenerse o incluso mejorar con formulaciones más seguras (Zhang & Xu, 2022).

Al realizar un análisis crítico de los modelos de gestión, se observa un contraste marcado entre los enfoques reactivos y los proactivos. Los sistemas tradicionales de seguridad minera se han centrado históricamente en el control de daños tras el incidente. En contraste, las plantas de alto rendimiento actuales están migrando hacia modelos proactivos, donde la seguridad química está integrada desde el diseño del proceso (Safety by Design). Según el ICMM (2021), la transición hacia el "Control Crítico" permite prever fallos antes de que ocurran, pasando de una gestión basada en el EPP (equipo de protección personal) a una basada en la eliminación del peligro en la fuente.

Finalmente, la literatura actual presenta limitaciones significativas. Existe una brecha de conocimiento evidente respecto a los efectos toxicológicos a largo plazo (exposición crónica) de los nuevos reactivos sintéticos y polímeros complejos. La mayoría de las evaluaciones toxicológicas se realizan bajo condiciones de laboratorio controladas, que raramente reflejan la sinergia química compleja de un circuito de flotación real o su degradación ambiental a largo plazo. Es imperativo que la investigación futura se enfoque en estudios epidemiológicos de cohorte en trabajadores mineros y en el análisis del ciclo de vida de los reactivos (LCA), para garantizar que la innovación tecnológica no sustituya un riesgo conocido por otro emergente e ignorado.

CONCLUSIÓN

La optimización de la gestión de reactivos químicos en los circuitos de flotación trasciende la mera eficiencia metalúrgica, consolidándose como un imperativo ético y operativo en la minería moderna. Esta revisión narrativa ha demostrado que una dosificación precisa y controlada, apoyada por tecnologías de automatización, genera un impacto positivo directo en la seguridad industrial: disminuye significativamente la incidencia de derrames, limita la exposición innecesaria del personal a sustancias peligrosas y reduce la carga tóxica contenida en los relaves.

Se concluye que la seguridad operativa no puede delegarse exclusivamente a medidas paliativas como el uso de equipos de protección personal. Por el contrario, es fundamental fomentar una cultura de seguridad proactiva, cimentada en el conocimiento técnico profundo y la interpretación rigurosa de las Fichas de Datos de Seguridad (SDS). El personal debe comprender no solo la función técnica de cada reactivo, sino también sus perfiles de toxicidad, las vías de exposición y los protocolos de respuesta ante emergencias, transformando la información estática en conocimiento preventivo aplicado.

Hacia el futuro, la industria minera debe transitar hacia un paradigma de "cero impacto". Esta visión se apoya en la convergencia de la innovación tecnológica, el desarrollo de reactivos de base biológica y la digitalización del monitoreo químico. La adopción de procesos más limpios y el despliegue de sistemas inteligentes no solo garantizan la viabilidad económica del proyecto, sino que aseguran la protección integral de la salud humana y la integridad del ecosistema, redefiniendo el estándar de excelencia para las operaciones mineras del siglo XXI.

REFERENCIAS

- Bisshop, J. P., & O'Brien, J. (2020). *Chemical Hazard Management in Mineral Processing*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003055273>
- Green, B. N., Johnson, C. D., & Adams, A. (2006). Writing narrative literature reviews for peer-reviewed journals: Secrets of the trade. *Journal of Chiropractic Medicine*, 5(3), 101–117. [https://doi.org/10.1016/S0899-3467\(07\)60142-6](https://doi.org/10.1016/S0899-3467(07)60142-6)

- Haddaway, N. R., & Bayliss, H. R. (2015). PRISMA-based search strategies for systematic reviews. *Environmental Evidence*, 4(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s13750-015-0043-3>
- International Council on Mining and Metals (ICMM). (2021). *Health and Safety Critical Control Management: Good Practice Guide*. <https://www.icmm.com/en-gb/publications/health-and-safety/critical-control-management>
- International Council on Mining and Metals (ICMM). (2022). *Sustainability and chemical management in the mining industry*. <https://www.icmm.com/en-gb/publications/sustainability/chemical-management-guide>
- Jones, R., & Smith, L. (2023). Advances in green flotation reagents: A pathway to safer mining. *Journal of Cleaner Production*, 385, 135–148. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135148>
- Mular, A. L., & Hogg, R. (2017). *Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control*. Society for Mining, Metallurgy & Exploration. <https://doi.org/10.1002/9781119424840>
- NIOSH. (2023). *Occupational Health and Safety in Mining: Managing Chemical Hazards*. National Institute for Occupational Safety and Health. <https://www.cdc.gov/niosh/mining/topics/chemicalhazards.html>
- OSHA. (2024). *Hazard Communication Standard (HCS): Guidance for the Mining Industry*. U.S. Department of Labor. <https://www.osha.gov/chemical-hazards>
- Petticrew, M., & Roberts, H. (2006). *Systematic reviews in the social sciences: A practical guide*. Blackwell Publishing. <https://doi.org/10.1002/9780470754887>
- Rao, S. R. (2004). *Surface Chemistry of Froth Flotation*. Kluwer Academic/Plenum Publishers. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0559-4>
- Wills, B. A., & Finch, J. A. (2016). *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-02220-4>
- Zhang, W., & Xu, Z. (2022). Sustainable reagents in mineral flotation: A review of recent advancements and toxicological perspectives. *Minerals Engineering*, 185, 107684. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107684>
- Zhu, X., & Liu, Y. (2024). Long-term toxicological impact of synthetic flotation



reagents in industrial environments: A meta-analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 462, 132715. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132715>