

TECNOLOGÍA ULTRASÓNICA PARA INCREMENTAR LA EFICIENCIA EN LA RECUPERACIÓN DE MINERALES: SÍNTESIS DE AVANCES RECIENTES

ULTRASONIC TECHNOLOGY TO INCREASE MINERAL RECOVERY EFFICIENCY: A SYNTHESIS OF RECENT ADVANCES

MORONES SILLAS, Jesús Alberto¹

LÓPEZ SAUCEDO, Felipe De Jesús²

CARRILLO PEDROZA, Francisco Raúl¹

RESUMEN

La tecnología ultrasónica ha emergido como una herramienta de intensificación con potencial para mejorar la eficiencia en el procesamiento de minerales, particularmente en procesos de concentración como la flotación por espuma. El ultrasonido induce efectos fisicoquímicos (cavitación acústica, flujo acústico, generación de microburbujas y modificación de reactivos) que permiten limpiar superficies minerales, mejorar la dispersión de reactivos y optimizar la interacción partícula-burbuja. Esta revisión sistemática sintetiza los avances científicos publicados entre 2017 y 2025 sobre la aplicación de esta tecnología en la recuperación de mineral Chen et al., 2024). Se analizan los fundamentos fisicoquímicos, los parámetros operativos críticos y las principales aplicaciones reportadas en distintos tipos de minerales y residuos complejos. Los hallazgos indican que el ultrasonido ofrece mejoras documentadas en recuperación y ley de concentrados, con beneficios adicionales en la reducción del consumo de reactivos y en la sostenibilidad ambiental del procesamiento. Se concluye que constituye una alternativa viable para la modernización de la industria minera, aunque su implementación a escala industrial requiere un control riguroso de los parámetros operativos y estudios adicionales de escalamiento.

Palabras clave: tecnología ultrasónica; procesamiento de minerales; cavitación acústica; flotación por espuma; intensificación de procesos.

ABSTRACT

Ultrasonic technology has emerged as an intensification tool with the potential to improve efficiency in mineral processing, particularly in concentration

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

2. Escuela Superior de Ingeniería
"Lic. Adolfo López Mateos",
Universidad Autónoma de
Coahuila. Nueva Rosita,
Coahuila, México.

Correspondencia:
moronesj@uadec.edu.mx
<https://orcid.org/0009-0004-1996-3859>

Fecha de recepción
2 de diciembre de 2025.

Fecha de aceptación
7 de junio de 2026.

processes such as froth flotation. Ultrasound induces physicochemical effects (acoustic cavitation, acoustic streaming, microbubble generation, and reagent modification) that enable the cleaning of mineral surfaces, the improvement of reagent dispersion, and the optimization of particle-bubble interaction. This systematic review synthesizes scientific advances published between 2017 and 2025 on the application of this technology in mineral recovery. The physicochemical fundamentals, critical operating parameters, and main applications reported in different types of ores and complex residues are analyzed. The findings indicate that ultrasound offers documented improvements in recovery and concentrate grade, with additional benefits in reducing reagent consumption and in the environmental sustainability of processing. It is concluded that it constitutes a viable alternative for the modernization of the mining industry, although its implementation at an industrial scale requires rigorous control of operating parameters and further scaling studies.

Keywords: ultrasonic technology; mineral processing; froth flotation; acoustic cavitation; process intensification.

INTRODUCCIÓN

La industria minera enfrenta desafíos continuos para mejorar la eficiencia en la recuperación de minerales valiosos, al tiempo que reduce el impacto ambiental y los costos operativos. En este contexto, la tecnología ultrasónica ha emergido como una herramienta prometedora para incrementar la eficiencia de los procesos de separación mineral, en particular en la flotación por espuma (X. Zhang et al., 2024). El ultrasonido, definido como ondas sonoras con frecuencias superiores a 20 kHz, genera efectos físicos únicos cuando se aplica a sistemas líquidos, entre ellos la cavitación acústica, el flujo acústico y los efectos térmicos localizados (Yin et al., 2024).

La aplicación del ultrasonido en el procesamiento de minerales se basa en varios mecanismos que pueden mejorar significativamente la eficiencia de la separación. La cavitación acústica es el fenómeno más relevante y consiste en la formación, el crecimiento y el colapso violento de microburbujas en el medio líquido debido a las variaciones de presión generadas por las ondas ultrasónicas (Chen et al., 2024). Este proceso genera fuerzas mecánicas intensas, temperaturas y presiones localmente elevadas, así como radicales



libres, todos los cuales pueden modificar las propiedades superficiales de los minerales y mejorar la interacción partícula-burbuja en la flotación (Jiang et al., 2024).

Por tanto, el objetivo de esta revisión es sintetizar los avances recientes (2017–2025) en la aplicación de la tecnología ultrasónica para el procesamiento de minerales, con énfasis en la flotación por espuma. Se analizan los mecanismos fisicoquímicos involucrados, los parámetros operativos óptimos y las aplicaciones reportadas en diversas matrices minerales, con el fin de evaluar la viabilidad de esta tecnología como alternativa para la modernización sostenible de la industria minera.

1.1 EVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA ULTRASÓNICA

En la figura 1 se muestran las etapas históricas de la evolución de la tecnología ultrasónica en el procesamiento de minerales.

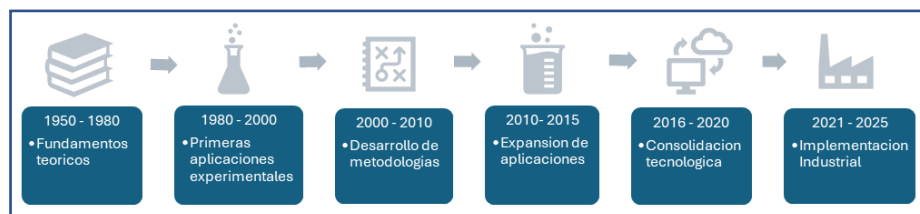


Figura 1. Etapas de la evolución de la tecnología ultrasónica. Elaboración propia.

El desarrollo de la tecnología ultrasónica aplicada a procesos industriales y mineros se dio entre las décadas de 1950 y 1980. Durante este período, los estudios pioneros de Plesset (1949) y Noltingk y Neppiras (1950) establecieron los fundamentos de la dinámica de burbujas de cavitación y sus efectos mecánicos en líquidos; Jaffe et al. (1954) desarrollaron los transductores piezoeléctricos de zirconato-titanato de plomo que permitieron la generación controlada de ultrasonido de alta potencia; y diversos investigadores iniciaron las primeras aplicaciones industriales del ultrasonido en procesamiento químico y detección no destructiva de fallas. Posteriormente, entre 1980 y 2000, la atención se dirigió al sector minero, donde Celik (1989) realizó los primeros estudios sobre el efecto del ultrasonido en la flotación de galena y carbón, Djendova y Mehandjiski (1992) investigaron el acondicionamiento acústico de colectores y espumantes en menas sulfuradas, y Aldrich y Feng (1999) evaluaron el preacondicionamiento ultrasónico de pulpas de sulfuros. Durante este período también se desarrollaron los primeros modelos matemáticos de cavitación en pulpas minerales. Ya para el intervalo de 2000

a 2010 se logró una caracterización sistemática de los parámetros ultrasónicos en flotación (Ozkan y Kuyumcu, 2006), junto con los primeros diseños de equipos ultrasónicos específicos para aplicaciones mineras (Ozkan y Kuyumcu, 2007).

Durante el período comprendido entre 2010 y 2015, estos avances se tradujeron en aplicaciones exitosas en minerales no metálicos, óxidos de hierro y menas sulfuradas complejas, así como en el desarrollo de celdas de flotación equipadas con transductores ultrasónicos para el tratamiento simultáneo de pulpas (Cilek & Ozgen, 2010; Donskol et al., 2012; Gurpinar et al., 2013; Ozkan, 2012). En este lapso, Cilek y Ozgen (2009) demostraron que el ultrasonido mejora significativamente la selectividad de separación en celdas mecánicas, aplicándolo a sistemas barita-calcopirita; Donskol et al. (2012) emplearon el tratamiento ultrasónico en beneficio de finos de hematita/goethita, logrando una reducción del contenido de sílice; Gurpinar et al. (2004) evaluaron el efecto del preacondicionamiento ultrasónico en la flotación de calcita, barita y cuarzo, estableciendo las condiciones óptimas de potencia y tiempo para cada matriz; y Ozkan (2012) diseñó celdas de flotación equipadas con baños ultrasónicos para el tratamiento simultáneo de lodos de carbón, documentando mejoras en la recuperación de materia combustible. Luego, entre 2016 y 2017, se profundizó en el ámbito experimental con modelos de generación de microburbujas y de comportamiento termodinámico de la cavitación orientados a la flotación (Mao et al., 2019; Zhou et al., 2009).

De 2018 a 2020, la investigación se amplió a estudios aplicados en petróleo, aceites y residuos, y se iniciaron las primeras evaluaciones del uso simultáneo del ultrasonido en las etapas de flotación primaria y de limpieza en procesos de cobre y otros minerales (Altun et al., 2009; Hassanzadeh et al., 2020; Videla et al., 2016). En los años siguientes, de 2021 a 2024, se observó un incremento notable de trabajos piloto y de campo, con aplicaciones en reciclaje de residuos de placas de circuito impreso (WPCBs), intensificación en potasa y validaciones cuantitativas que demostraron mejoras en liberación y recuperaciones aumentadas (X. Zhang et al., 2024; Zhou et al., 2025). Finalmente, entre 2024 y 2025, la madurez del campo quedó reflejada en revisiones sistemáticas que sintetizan los parámetros operativos y mecanismos, acompañadas de demostraciones concretas de viabilidad comercial (H. Zhang et al., 2024; Yin et al., 2024).



1.2 MECANISMOS FISICOQUÍMICOS

Comprender los fenómenos fisicoquímicos inducidos por el ultrasonido resulta fundamental para interpretar de manera rigurosa los efectos observados en la flotación de minerales y, en consecuencia, para establecer las condiciones operativas que maximicen la recuperación. Dado que parte del objetivo de esta revisión es analizar los fundamentos fisicoquímicos que sustentan la efectividad del ultrasonido en el procesamiento de minerales, resulta imperativo describir en detalle los mecanismos interrelacionados mediante los cuales las ondas de alta frecuencia modifican el comportamiento de la pulpa y de las superficies minerales. Estos mecanismos no operan de forma aislada, sino que actúan sinérgicamente durante el tratamiento acústico, condicionando variables críticas como la hidrofobicidad de las partículas, la distribución de reactivos y la eficiencia de la adhesión partícula-burbuja. A continuación, se describen los cuatro mecanismos principales que fundamentan la intensificación ultrasónica en la flotación por espuma.

1.2.1 Cavitación acústica

Es el fenómeno más relevante y consiste en la formación, crecimiento y colapso violento de microburbujas o cavidades en el seno del líquido, originado por los ciclos de compresión y rarefacción de las ondas ultrasónicas. Durante el colapso, se generan condiciones extremas localizadas: presiones de hasta 1000 atm y temperaturas de varios miles de grados Celsius, en escalas de microsegundos, que producen ondas de choque intensas y microchorros hidrodinámicos. Estos efectos mecánicos son capaces de fragmentar agregados minerales, disgregar partículas adheridas y remover capas de óxidos, silicatos u otras impurezas que recubren la superficie del mineral, exponiendo así sitios activos frescos para la interacción con los colectores. Adicionalmente, la cavitación induce la formación de radicales libres (por ejemplo, $\cdot\text{OH}$ y $\cdot\text{H}$ a partir de la homólisis del agua), los cuales pueden modificar la química de superficie y el potencial zeta de las partículas, favoreciendo o inhibiendo selectivamente la adsorción de reactivos según el sistema mineral (Chen et al., 2024). En la figura 2 se ilustra esquemáticamente la creación y el colapso implosivo de estas cavidades, lo que genera presiones locales capaces de alterar la morfología superficial de las partículas.

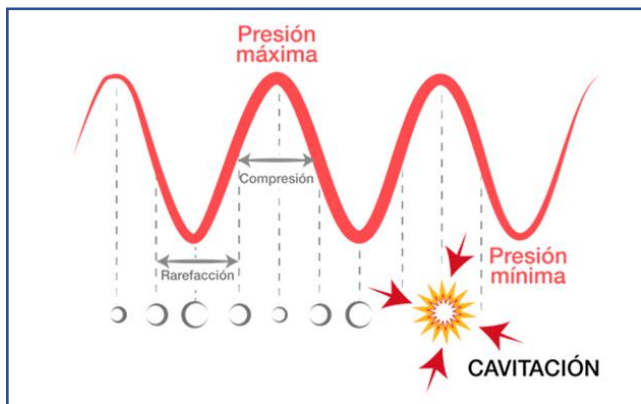


Figura 2. Cavitación ultrasónica.
Adaptada de H. Zhang et al. (2024).

1.2.2 Generación de microburbujas

El campo acústico sostenido produce poblaciones estables de microburbujas con diámetros entre 1 y 100 μm , significativamente menores que los de las burbujas convencionales generadas por sistemas de aireación mecánica. La reducción del tamaño de las burbujas conlleva un aumento considerable de la superficie interfacial gas-líquido disponible para el transporte de partículas hidrofóbicas hacia el espumadero. Asimismo, las microburbujas ultrasónicas exhiben un mayor tiempo de residencia en la pulpa, una menor velocidad de ascenso y una distribución más homogénea en el volumen de flotación, lo que incrementa la probabilidad de colisiones eficientes con partículas de grano fino y ultrafino (fracciones que, de otro modo, serían difíciles de recuperar mediante flotación convencional). La estabilidad de estas microburbujas depende de la frecuencia y la potencia aplicadas, lo que constituye uno de los parámetros operativos críticos que determinan el desempeño del proceso (Jiang et al., 2024).

1.2.3 Flujo acústico

Las ondas ultrasónicas generan corrientes estacionarias de largo alcance, conocidas como flujo acústico, que inducen una microconvección intensa en la pulpa. Este fenómeno mejora sustancialmente la mezcla del sistema, reduce el espesor de las capas límite hidrodinámicas que rodean tanto a las partículas minerales como a las burbujas, y promueve el contacto efectivo entre ambas fases. Al disminuir las resistencias hidrodinámicas, el flujo acústico facilita las etapas de aproximación, colisión y adhesión partícula-burbuja, lo que



incrementa la eficiencia global de la colección. Este mecanismo resulta particularmente relevante en pulpas de alta densidad o en sistemas con partículas de alta masa específica, donde la agitación mecánica convencional es insuficiente para mantener una suspensión homogénea sin generar turbulencias destructivas que rompan agregados ya formados (Chen et al., 2022).

1.2.4 Modificación de reactivos

El ultrasonido ejerce efectos directos sobre la fase líquida reactiva y mejora la eficiencia de los colectores, espumantes y modificadores. En el caso de colectores oleosos insolubles o de baja solubilidad, como el queroseno, el aceite de pino o los ácidos grasos, la cavitación acústica promueve su emulsificación, reduciendo el tamaño de las gotas a valores de entre 1 y 2 μm y aumentando la superficie de contacto disponible para la adsorción sobre el mineral. Asimismo, el tratamiento ultrasónico puede reducir el tamaño de partícula de reactivos sólidos (como activadores o depresores), acelerar la disolución de sales y, en algunos casos, inducir reacciones químicas que generan especies más activas o selectivas. La consecuencia directa es la reducción de la dosis requerida de reactivos, documentada en hasta un 40 % en algunos sistemas, junto con el mejoramiento de la selectividad de separación entre minerales de valor y ganga (Gungoren et al., 2017).

En conjunto, estos cuatro mecanismos configuran un marco de intensificación multifactorial: la cavitación limpia y activa las superficies, las microburbujas aumentan la eficiencia de transporte, el flujo acústico optimiza la hidrodinámica de contacto, y la modificación de reactivos reduce costos y mejora la selectividad. Comprender su interacción sinérgica resulta indispensable para interpretar los resultados experimentales revisados en la sección de desarrollo y discusión, así como para justificar la selección de los parámetros operativos —frecuencia, potencia, tiempo y configuración del equipo— que se examinan en ese apartado.

METODOLOGÍA

El presente trabajo corresponde a una revisión sistemática de la literatura científica (Snyder, 2019), orientada a sintetizar, analizar y evaluar críticamente los avances experimentales publicados entre 2017 y 2025 sobre la aplicación de la tecnología ultrasónica en la recuperación de minerales mediante



flotación. La estrategia metodológica se estructuró en cuatro fases secuenciales: (i) formulación de la pregunta de investigación y definición de criterios de elegibilidad; (ii) búsqueda y selección de la información; (iii) extracción y clasificación de datos; y (iv) síntesis crítica y evaluación de la calidad de la evidencia.

2.1 CRITERIOS DE ELEGIBILIDAD Y SELECCIÓN

Para garantizar la reproducibilidad y la rigurosidad del proceso, se establecieron criterios de inclusión y exclusión explícitos antes de iniciar la búsqueda. Los criterios de inclusión fueron: (a) artículos originales y revisiones publicados en revistas científicas indexadas con arbitraje por pares; (b) estudios que reportaran datos experimentales cuantitativos sobre la recuperación de minerales, la ley de concentrados o el consumo de reactivos con y sin tratamiento ultrasónico; (c) publicaciones en inglés o español; (d) disponibilidad del texto completo; y (e) periodo de publicación comprendido entre 2017 y 2025. Los criterios de exclusión fueron: (i) trabajos no arbitrados, tesis de grado o posgrado, resúmenes de congresos sin texto completo, capítulos de libro y patentes; (ii) estudios centrados exclusivamente en aplicaciones biomédicas, de limpieza de superficies o de síntesis de materiales sin relación directa con la flotación mineral; (iii) artículos cuyos datos experimentales no permitieran discriminar el efecto específico del ultrasonido del resto de variables operativas; y (iv) publicaciones duplicadas o con datos redundantes reportados en estudios previos del mismo grupo de investigación.

2.2 ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA Y FLUJO DE SELECCIÓN

Se consultaron las bases de datos especializadas ScienceDirect, Scopus, Web of Science, mdpi Journals, IOPscience y Google Scholar. Se empleó una combinación de términos clave en inglés y español agrupados en cuatro dimensiones: tecnología (*ultrasonic technology*, tecnología ultrasónica), proceso (*mineral flotation*, flotación de minerales), mecanismo (*acoustic cavitation*, cavitación acústica, *microbubbles*) e indicador de desempeño (*mineral recovery*, recuperación de minerales). La búsqueda se complementó con la revisión de las listas de referencias de los artículos incluidos (*snowballing*) para identificar estudios adicionales.

El proceso de selección se documentó siguiendo un esquema tipo PRISMA (Page et al., 2021). Inicialmente se identificaron registros en las bases de datos



consultadas. Tras eliminar duplicados, se realizó un tamizaje de títulos y resúmenes, excluyendo los registros que no cumplían los criterios de elegibilidad temática. Los artículos restantes se sometieron a lectura del texto completo, de los cuales se excluyeron los que carecían de datos cuantitativos comparativos de recuperación con y sin ultrasonido, los que no especificaban parámetros operativos del equipo ultrasónico, y los que correspondían a aplicaciones fuera del ámbito de la flotación mineral. Finalmente, el corpus de análisis quedó conformado por 24 artículos de revistas arbitradas, publicados entre 2017 y 2025.

2.3 EXTRACCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE DATOS

Una vez seleccionados los 24 artículos, se realizó una lectura crítica orientada a extraer la información necesaria para responder cada uno de los propósitos de la revisión. Los datos se organizaron en tres matrices analíticas: (a) Mecanismos, donde se registraron las evidencias reportadas sobre cavitación acústica, flujo acústico, generación de microburbujas y modificación de reactivos, así como su interacción sinérgica; (b) Parámetros operativos, donde se sistematizaron los rangos de frecuencia, potencia, tiempo y configuración de equipo asociados a las mayores recuperaciones documentadas; y (c) Matrices minerales, donde se clasificaron las aplicaciones según el tipo de mineral o residuo procesado (sulfuros, óxidos, materiales de desecho, etc.) y las condiciones particulares de cada sistema. De cada estudio se extrajeron, además, los resultados cuantitativos de recuperación y de ley, junto con las comparaciones con procesos convencionales sin ultrasonido.

De los 24 artículos incluidos en el corpus, doce fueron seleccionados para análisis detallado en la sección de Desarrollo y Discusión, dado que presentaban datos experimentales cuantitativos comparativos (recuperación, ley o consumo de reactivos con y sin tratamiento ultrasónico) que permitieron evaluar de manera cruzada la efectividad de la tecnología. Los artículos restantes se emplearon como soporte contextual en las secciones de Introducción, Mecanismos Fisicoquímicos y Conclusiones.

2.4 SÍNTESIS Y EVALUACIÓN CRÍTICA

La información extraída se integró mediante un análisis temático que permitió identificar patrones, tendencias y vacíos en la literatura. Los hallazgos se agruparon por tipo de mineral, mecanismo predominante y rango de parámetros óptimos, lo que permitió evaluar de manera cruzada la

reproducibilidad de los resultados y las condiciones en las que la tecnología ultrasónica demuestra mayor efectividad. Finalmente, se elaboró una narrativa crítica que discute el estado actual de la tecnología, sus beneficios documentados en términos de recuperación y sostenibilidad, y los desafíos técnicos y de escalamiento que aún limitan su implementación industrial.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

La integración de la tecnología ultrasónica en el procesamiento de minerales representa un avance significativo para superar las limitaciones e ineficiencias de la flotación convencional. Fundamentalmente, la aplicación de esta energía modifica la fisicoquímica del sistema mediante la cavitación y las fuerzas de radiación acústica, fenómenos que actúan de manera sinérgica para limpiar las superficies de las partículas, aumentar los sitios activos y optimizar la dispersión de los reactivos en la pulpa. A partir de estos principios operativos, diversas investigaciones recientes han evaluado y cuantificado el impacto de estas ondas en una amplia variedad de matrices minerales, lo que ha consolidado su viabilidad industrial.

X. Zhang et al. (2024) analizaron la flotación mineral mejorada por ultrasonido en una amplia gama de materias primas, que incluyen carbón, cuarzo, galena y materiales de desecho, destacando que su eficacia se fundamenta en la generación de ondas ultrasónicas y en los efectos de la cavitación y las fuerzas de radiación acústica. Estos autores señalan que esta tecnología limpia las superficies minerales de impurezas, aumenta los sitios activos y optimiza la dispersión de los reactivos químicos. En concordancia con este mecanismo de limpieza superficial, Yin et al. (2023) demostraron en su estudio sobre cuarzo y siderita de grano fino que la cavitación ultrasónica aplicada a 200 W durante 0.5 minutos logra eliminar eficazmente el recubrimiento no selectivo de partículas finas de siderita y precipitados de CaCO_3 . Según sus cálculos y análisis de superficie, esta acción mecánica directa incrementa los sitios activos disponibles para la activación, elevando la recuperación de cuarzo de un 38.79 % en condiciones convencionales (sin ultrasonido) a un 58.38 % con el tratamiento ultrasónico, lo que representa un incremento de aproximadamente 19.6 % atribuible exclusivamente al efecto de la cavitación acústica.



Además de los cambios morfológicos en la fase sólida, la eficiencia de los reactivos colectores se ve potenciada de manera drástica por la energía acústica. Jiang et al. (2024) investigaron este fenómeno en la flotación del grafito de escamas mediante la preparación de una emulsión de queroseno modificada con un disruptor de ultrasonido a 300 W durante tres minutos. Sus resultados destacan que el tratamiento fragmenta el queroseno en microgotas de entre 1 a 2 μm , mejorando su dispersión y estabilidad en la solución acuosa. Esta optimización permitió una interacción más efectiva con la superficie del mineral, logrando un 90 % de recuperación con una dosificación de solo 6 mg/L de queroseno modificado, lo que representa una reducción del 40 % en su consumo frente a los 10 mg/L requeridos sin el tratamiento acústico.

La versatilidad de estos mecanismos resulta fundamental al abordar matrices minerales complejas y procesos de reciclaje. Chen et al. (2024) introdujeron un pretratamiento ultrasónico en el procesamiento de un residuo ultrafino de lixiviación oxidativa de sulfuro de zinc, logrando aumentar significativamente la liberación completa del azufre elemental en un 20.91 % y de la plumbojarosita en un 38.53 %. Al ampliar las diferencias superficiales entre ambas fases, los autores lograron mejorar sustancialmente la separación por flotación, incrementando la ley y recuperación de azufre en el concentrado en 11.63 % y 9.10 %, y elevando en un 8.72 % y un 9.50 %, respectivamente, las recuperaciones de plomo y plata en los relaves, respectivamente. De manera paralela, en el ámbito del reciclaje electrónico, Chen et al. (2023) abordaron la recuperación de metales a partir de residuos de placas de circuito impreso (WPCB) mediante un proceso de flotación inversa asistido por ultrasonido. Su metodología demostró que el ultrasonido promueve la eliminación de resinas epóxicas adheridas a las fibras de vidrio, reduce la aglomeración de partículas y aumenta la hidrofobicidad de los componentes no metálicos. Como resultado, los investigadores lograron un incremento del 7.20 % en la recuperación total de metales, destacando mejoras específicas del 4.82 % en cobre, 15.41 % en aluminio y 5.58 % en zinc, lo que evidencia que esta técnica es una ruta ambientalmente sostenible para el reciclaje de WPCB.

Finalmente, la eficiencia global del proceso depende intrínsecamente del diseño experimental, de la configuración del equipo y del control de las frecuencias emitidas. En las configuraciones de laboratorio, el uso de ondas ultrasónicas a 42 kHz constituye una especificación operativa altamente eficaz para garantizar una dispersión inicial adecuada y una cavitación estable en las celdas de prueba. Zhou et al. (2023) profundizaron en estas variables al

comparar el uso de ultrasonidos de tipo bocina (20 kHz) y de tipo baño (40 kHz) durante el preacondicionamiento de pulpa de concentrado de grafito en escamas. Los autores revelaron que el ultrasonido de tipo bocina es significativamente más eficaz, logrando un aumento del 7 % en la recuperación de carbono al facilitar la liberación de ganga incrustada, mientras que el equipo de baño solo alcanzó un incremento del 2 %. En conjunto, la literatura consolida a esta tecnología como una alternativa más eficiente y sostenible que los métodos convencionales, capaz de incrementar la tasa de recuperación de concentrado en aproximadamente un 10 %, aunque Zhou et al. (2025) advierten que un tratamiento excesivamente prolongado puede provocar una fragmentación perjudicial de las partículas, lo que afecta negativamente la flotación.

3.1 DEPENDENCIA DEL SISTEMA MINERAL EN LA FLOTACIÓN POR ESPUMA

La efectividad del tratamiento ultrasónico como intensificador de la flotación no es universal; depende de manera decisiva de las características intrínsecas del sistema mineral a procesar. La interacción entre las ondas acústicas y la matriz sólido-líquido varía según la naturaleza química de las superficies, la distribución granulométrica y la complejidad textural del mineral, lo que exige una caracterización previa para predecir la respuesta al tratamiento en el circuito de flotación.

3.1.1 Mineralogía y susceptibilidad superficial

Los minerales con superficies más susceptibles a modificación físico-química (particularmente los sulfuros metálicos) muestran una respuesta significativamente mayor en flotación que los minerales refractarios o silicatados. Esto se debe a que la cavitación acústica genera sitios activos y frescos en superficies sulfhídricas, lo que facilita la adsorción selectiva de colectores de tipo xantato o ditiofosfato. En contraste, minerales oxidados como el cuarzo o la siderita requieren condiciones de flotación más específicas, en las que el ultrasonido actúa principalmente para eliminar recubrimientos no selectivos de óxidos o precipitados de carbonato cálcico que inhiben la adsorción de activadores. Los estudios sobre sistemas carbonosos han demostrado que el tratamiento ultrasónico reduce el contenido de funcionalidades oxigenadas hidrofílicas en la superficie del carbón, mejorando su hidrofobicidad y, por ende, su flotabilidad (Barma et al., 2019), lo que confirma que el beneficio del tratamiento está condicionado por la



química superficial específica de cada fase mineral y no por un efecto genérico indiscriminado.

3.1.2 Granulometría y eficiencia de captación

Las partículas del rango de 10 a 100 μm muestran la mejor respuesta al tratamiento ultrasónico en cuanto a recuperación por flotación. Por debajo de 10 μm , las fracciones ultrafinas tienden a formar agregados por fuerzas de van der Waals o a adherirse de manera ineficiente a burbujas convencionales debido a la baja energía cinética de colisión. El ultrasonido mejora la dispersión de estas fracciones y genera microburbujas de 1 a 100 μm que incrementan la probabilidad de adhesión selectiva. Por encima de 100 μm , el efecto del ultrasonido se reduce porque las fuerzas de inercia de las partículas gruesas dificultan su transporte por el flujo acústico, y la cavitación puede resultar insuficiente para modificar la química de la superficie en volúmenes mayores. En el caso particular del grafito fino, se ha comprobado que la ultrasonificación promueve la formación de nanoburbujas de cavidad que actúan como puentes de transporte para partículas de pequeño diámetro, lo que incrementa la recuperación de fracciones que de otro modo se perderían en los relaves (Li et al., 2020). Esta dependencia granulométrica explica por qué la tecnología ha mostrado resultados particularmente favorables en el procesamiento de minerales de grafito en escamas y en relaves ultrafinos, donde la fracción fina constituye el principal desafío de la flotación convencional.

3.1.3 Asociaciones minerales y liberación

Los minerales con asociaciones complejas, inclusiones finas o texturas intercrecidas muestran los mayores beneficios en cuanto a liberación y selectividad de flotación. En estos sistemas, el ultrasonido actúa como agente de desagregación mecánica que fractura las uniones entre fases mineralógicas sin necesidad de molienda adicional, aumentando el grado de liberación y, en consecuencia, la eficiencia de la separación por flotación (Chen et al., 2024). Los residuos de lixiviación oxidativa y los materiales de desecho electrónico son ejemplos representativos en los que el pretratamiento ultrasónico amplía las diferencias superficiales entre fases valiosas y ganga, lo que mejora la separación selectiva (Zhou et al., 2023). Sin embargo, esta misma capacidad fragmentaria implica un riesgo operativo: tratamientos excesivamente prolongados pueden generar finos contraproducentes que disminuyen la recuperación al aumentar la carga de sólidos en la espuma o

promover la flotación mecánica no selectiva de ganga, lo que evidencia la necesidad de ajustar el tiempo de exposición acústica a la fragilidad de la matriz mineral específica.

3.2 OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS OPERATIVOS EN FLOTACIÓN ASISTIDA POR ULTRASONIDO

La transferencia de la tecnología ultrasónica desde el laboratorio hacia aplicaciones industriales de flotación exige un control riguroso de los parámetros operativos. La literatura revisada permite establecer ventanas óptimas para cada variable, aunque su ajuste final debe responder a las características específicas de la matriz mineral y a la etapa del circuito de flotación donde se aplica el ultrasonido, ya sea en pretratamiento, acondicionamiento de pulpa o flotación propiamente dicha.

3.2.1 Tiempo de tratamiento

Los tiempos óptimos reportados en flotación asistida por ultrasonido varían de 0.5 a 5 minutos, siendo de dos a tres minutos el rango más efectivo para la mayoría de las aplicaciones de flotación. Periodos inferiores a un minuto resultan insuficientes para inducir una cavitación estable y una limpieza superficial completa, lo que limita el efecto activador del ultrasonido. Por el contrario, tratamientos prolongados por encima de cinco minutos pueden inducir una fragmentación excesiva de las partículas, aumentar la entropía del sistema y generar finos que compiten por la superficie de las burbujas, lo que reduce la selectividad del proceso. Los ensayos sistemáticos sobre la flotación de cuarzo han establecido que, bajo condiciones de pH neutro y potencias de 120 a 300 W, la exposición acústica de diez a quince minutos maximiza la remoción de impurezas superficiales, mientras que tiempos mayores de veinte minutos no aportan beneficios adicionales e incluso pueden degradar la selectividad del proceso (Deng et al., 2024). Por tanto, el tiempo de tratamiento debe calibrarse como una función inversa de la fragilidad del mineral y de la distribución granulométrica inicial de la pulpa.

3.2.2 Potencia ultrasónica

Potencias de 100 a 300 W han demostrado ser efectivas en volúmenes de laboratorio en ensayos de flotación, con escalado proporcional para aplicaciones industriales. A potencias inferiores a 100 W, la intensidad



acústica es insuficiente para generar cavitación en pulpas minerales de alta densidad, cuyas tensiones superficiales y contenidos de sólidos amortiguan la propagación de las ondas. Por encima de 300 W, el efecto térmico localizado puede alterar la química de los reactivos, especialmente los espumantes de tipo poliglicólico, o inducir la precipitación de sales que modifican el pH de la pulpa. En flotación de carbón, se ha documentado que niveles de 30 a 60 W/L durante el acondicionamiento simultáneo reducen la dosis óptima de reactivos colectores de 120 a 125 g/t a 95 a 100 g/t, alcanzando recuperaciones de combustibles superiores al 90 % con menor consumo químico (Ozkan, 2017). Estos hallazgos delimitan una ventana segura entre la ineficiencia por baja energía y el daño por sobrepotencia.

3.2.3 Frecuencia y configuración del equipo

Las frecuencias de 20 a 40 kHz han mostrado los mejores resultados en flotación por espuma, ya que en este rango se maximiza la generación de microburbujas estables y la cavitación en las pulpas minerales. Frecuencias más bajas (20 kHz), típicas de equipos tipo bocina, generan cavitación más intensa y son particularmente eficaces para la limpieza de superficies minerales pesadas y la liberación de ganga incrustada, lo que se traduce en mayores incrementos de la recuperación de carbono en sistemas de grafito. Frecuencias más altas (40 a 80 kHz), propias de los baños ultrasónicos, producen una cavitación más suave y homogénea, orientada preferentemente a la limpieza superficial previa a la flotación y a la dispersión de reactivos, aunque con menor impacto en la generación de microburbujas de arrastre. Investigaciones comparativas en flotación de carbón han revelado que la frecuencia de 37 kHz genera mayor recuperación combustible que la de 80 kHz, debido a la mayor estabilidad de las microburbujas de cavitación generadas a longitudes de onda más largas, aunque el efecto varía según la fracción granulométrica: el incremento en la recuperación supera el 35 % en partículas gruesas, el 40 % en fracciones medias y el 25 % en finas (Ebrahimi & Karamoozian, 2020). La elección entre bocina y baño no es trivial: mientras la bocina concentra la energía en una zona focalizada, útil para el preacondicionamiento de pulpa, el baño distribuye la energía de manera más uniforme, lo que resulta preferible para el tratamiento de pequeños volúmenes de muestra o la preparación de emulsiones de colectores.

En conjunto, la optimización de estos parámetros requiere un enfoque sistémico en el que la frecuencia, la potencia y el tiempo se ajusten de manera coordinada según la mineralogía, la granulometría y el objetivo de la etapa



de flotación. Los patrones identificados en la literatura revisada sugieren que no existe una configuración universal óptima, sino que la eficiencia del proceso depende de la combinación específica que maximice la sinergia entre los cuatro mecanismos fisicoquímicos descritos anteriormente.

CONCLUSIONES

La revisión sistemática de la literatura científica publicada entre 2017 y 2025 permite concluir que la tecnología ultrasónica se ha consolidado como una herramienta de intensificación con efectividad demostrada en una amplia diversidad de matrices minerales. Los estudios analizados abarcan desde minerales metálicos y no metálicos tradicionales, como cuarzo, grafito, magnesita y dolomita, hasta sulfuros de zinc, e incluyen residuos complejos, como los provenientes de placas de circuito impreso (WPCBS) y relaves de lixiviación oxidativa. Asimismo, documentan incrementos en la recuperación por flotación que oscilan entre 2 y 40 %, dependiendo de la mineralogía y las condiciones operativas. Este periodo evidencia un tránsito claro desde investigaciones de laboratorio hacia ensayos piloto y aplicaciones de campo, particularmente en flotación por espuma, lo que valida la creciente madurez del campo en los últimos ocho años.

El análisis de los fundamentos fisicoquímicos confirma que la mejora de la eficiencia de flotación no obedece a un único fenómeno, sino a la sinergia entre cuatro mecanismos principales: la cavitación acústica, la generación de microburbujas estables (de 1 a 100 μm), el flujo acústico y la modificación de los reactivos.

Respecto a los parámetros operativos, la literatura revisada permite establecer ventanas óptimas para procesos de flotación asistida por ultrasonido: frecuencias de 20 a 40 kHz resultan las más efectivas para la generación de microburbujas y la cavitación en pulpas minerales, mientras que frecuencias superiores (40 a 80 kHz) se orientan preferentemente a la limpieza superficial; potencias de 100 a 300 W han demostrado ser efectivas para escalas de laboratorio, con escalamiento proporcional para volúmenes industriales; y tiempos de tratamiento de 2 a 3 minutos constituyen el rango más eficiente para la mayoría de las matrices, pues tratamientos prolongados pueden inducir una fragmentación contraproducente de las partículas. Asimismo, la configuración del equipo influye de manera significativa, siendo los sistemas

de tipo bocina (20 kHz) más eficaces que los baños ultrasónicos (40 kHz) para la liberación de ganga incrustada y el incremento de la recuperación de carbono en grafito.

En consecuencia, se concluye que la tecnología ultrasónica constituye una alternativa viable para la modernización sostenible de la industria minera, toda vez que ofrece beneficios simultáneos en recuperación, ley de concentrados y reducción del consumo de reactivos. Se han documentado disminuciones de hasta el 40 % en la dosificación de colectores como el queroseno. Además, esta tecnología facilita el reciclaje de residuos electrónicos y la valorización de materiales ultrafinos que, de otro modo, se perderían en relaves. No obstante, su implementación a escala industrial aún enfrenta desafíos relacionados con el control riguroso de los parámetros acústicos, la estandarización de equipos para altos volúmenes de pulpa y la necesidad de estudios adicionales de escalamiento que garanticen la reproducibilidad de los resultados obtenidos en condiciones de laboratorio y piloto.

Finalmente, el futuro desarrollo de la tecnología dependerá de la convergencia entre avances en equipos multifrecuencia, sistemas de control adaptativo y una comprensión más profunda de la interacción entre las variables acústicas y la mineralogía específica de cada sistema, lo que promete avances significativos en la optimización continua de la flotación por espuma.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Sistema Estatal de Ciencia, Humanidades, Innovación y Tecnología (SECIHTI) la beca otorgada, que permitió llevar a cabo esta investigación. Los autores también reconocen el apoyo de la Universidad Autónoma de Coahuila por las facilidades brindadas durante el desarrollo del estudio.

REFERENCIAS

- Aldrich, C., & Feng, D. (1999). Effect of ultrasonic preconditioning of pulp on the flotation of sulphide ores. *Minerals Engineering*, 12(6), 701–707. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(99\)00053-9](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(99)00053-9)
- Altun, N. E., Hwang, J., & Hicyilmaz, C. (2009). Enhancement of flotation performance of oil shale cleaning by ultrasonic treatment. *International Journal of Mineral Processing*, 91(1–2), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2008.10.003>
- Barma, S. D., Baskey, P. K., Rao, D. S., & Sahu, S. N. (2019). Ultrasonic-assisted flotation for enhancing the recovery of flaky graphite from low-grade graphite ore. *Ultrasonics Sonochemistry*, 56, 386–396. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.04.033>
- Celik, M. S. (1989). Effect of ultrasonic treatment on the floatability of coal and galena. *Separation Science and Technology*, 24(14), 1159–1166. <https://doi.org/10.1080/01496398908049894>
- Chen, C., Zhang, S., Liu, Q., Chen, L., Xian, Y., & Wang, Y. (2024). Ultrasonic pretreatment for enhancing flotation separation of elemental sulfur and silver-bearing lead minerals from an oxidative pressure leaching residue of zinc sulfide. *Minerals Engineering*, 205, Article 108495. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108495>
- Chen, L., He, J., Zhu, L., Yao, Q., Sun, Y., Guo, C., Chen, H., & Yang, B. (2023). Efficient recovery of valuable metals from waste printed circuit boards via ultrasound-enhanced flotation. *Process Safety and Environmental Protection*, 169, 869–878. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.046>
- Chen, Y., Truong, V. N. T., Bu, X., & Xie, G. (2020). A review of effects and applications of ultrasound in mineral flotation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 60, Article 104739. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104739>
- Deng, J., Luo, D., Bai, J., & Rong, K. (2024). Effect of ultrasonic pretreatment on flotation purification of quartz. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 60(3), Article 190008. <https://doi.org/10.37190/ppmp/190008>
- Djendova, S., & Mehandjiski, V. (1992). Study of the effects of acoustic vibration conditioning of collector and frother on flotation of sulphide ores. *International Journal of Mineral Processing*, 34(3), 205–217. [https://doi.org/10.1016/0301-7516\(92\)90074-7](https://doi.org/10.1016/0301-7516(92)90074-7)
- Donskoi, E., Collings, A. F., Poliakov, A., & Bruckard, W. J. (2012). Utilisation of ultrasonic treatment for upgrading of hematitic/goethitic iron ore fines. *International Journal of Mineral Processing*, 114–117, 80–92. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2012.10.005>
- Ebrahimi, H., & Karamoozian, M. (2020). Effect of ultrasonic irradiation on particle size, reagents consumption, and feed ash content in coal flotation. *International Journal of Coal Science & Technology*, 7(4), 787–795. <https://doi.org/10.1007/s40789-020-00307-2>



- Gungoren, C., Özkan, Ş. G., & Ozdemir, O. (2017). Different approaches in the use of ultrasonic treatments in flotation. *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, 17(2), 727–735. <https://doi.org/10.5578/FMBD.57268>
- Hassani, F., Noparast, M., & Tonkaboni, S. Z. S. (2019). Enhancement of phosphate flotation by ultrasonic pretreatment. *Iranian Journal of Chemistry & Chemical Engineering*, 38(5), 251–266. <https://doi.org/10.30492/IJCCE.2019.32272>
- Hassanzadeh, A., Sajjady, S. A., Gholami, H., Amini, S., & Özkan, Ş. G. (2020). An improvement on selective separation by applying ultrasound to rougher and re-Cleaner stages of copper flotation. *Minerals*, 10(7), Article 619. <https://doi.org/10.3390/min10070619>
- Jaffe, B., Roth, R. S., & Marzullo, S. (1954). Piezoelectric properties of lead zirconate-lead titanate solid-solution ceramics. *Journal of Applied Physics*, 25(6), 809–810. <https://doi.org/10.1063/1.1721741>
- Jiang, Y., Lu, J., Xie, Y., Lin, Z., & Wang, N. (2024). The effects of ultrasound modified kerosene on the flotation of flake graphite. *Separation Science and Technology*, 59(4), 612–620. <https://doi.org/10.1080/01496395.2024.2328677>
- Li, C., Li, X., Xu, M., & Zhang, H. (2020). Effect of ultrasonication on the flotation of fine graphite particles: Nanobubbles or not? *Ultrasonics Sonochemistry*, 69, Article 105243. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105243>
- Mao, Y., Chen, Y., Bu, X., & Xie, G. (2019). Effects of 20 kHz ultrasound on coal flotation: The roles of cavitation and acoustic radiation force. *Fuel*, 256, Article 115938. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115938>
- Noltingk, B. E., & Neppiras, E. A. (1950). Cavitation produced by ultrasonics. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 63(9), 674–685. <https://doi.org/10.1088/0370-1301/63/9/305>
- Ozkan, S. G. (2012). Effects of simultaneous ultrasonic treatment on flotation of hard coal slimes. *Fuel*, 93, 576–580. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.10.032>
- Ozkan, S. G. (2017). Further investigations on simultaneous ultrasonic coal flotation. *Minerals*, 7(10): Article 177. <https://doi.org/10.3390/min7100177>
- Ozkan, S. G., & Kuyumcu, H. Z. (2006). Investigation of mechanism of ultrasound on coal flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 81(3), 201–203. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2006.07.011>
- Ozkan, S. G., & Kuyumcu, H. Z. (2007). Design of a flotation cell equipped with ultrasound transducers to enhance coal flotation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 14(5), 639–645. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2006.10.001>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., . . . Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated



guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, Article n71.
<https://doi.org/10.1136/bmj.n71>

- Plesset, M. S. (1949). The dynamics of cavitation bubbles. *Journal of Applied Mechanics*, 16(3), 277–282. <https://doi.org/10.1115/1.4009975>
- Shu, K. Q., Xu, L. H., Wu, H. Q., Wang, Z. J., Xu, Y. B., & Fang, S. (2019). Influence of ultrasound pre-treatment on ilmenite surface chemical properties and collectors' adsorption behaviour. *Ultrasonics Sonochemistry*, 57, 98–107.
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.05.017>
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–339.
<https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Ulusoy, U., & Kurşun, H. (2021). Review: Comparison of ultrasonically aided zinc beneficiation by mechanical flotation and column flotation cell. *EUREKA: Physics and Engineering*, (1), 3–13. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001608>
- Videla, A. R., Morales, R., Saint-Jean, T., Gaete, L., Vargas, Y., & Miller, J. D. (2016). Ultrasound treatment on tailings to enhance copper flotation recovery. *Minerals Engineering*, 99, 89–95. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.09.019>
- Yin, W., Ma, Y., & Wang, Y. (2023). Mechanism of ultrasonic cavitation to improve the effect of siderite on quartz flotation. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 59(3), Article 165930. <https://doi.org/10.37190/ppmp/165930>
- Yin, W., Wang, Y., Ma, Y., & Chen, K. (2024). Effects of ultrasonic treatment on the flotation behavior of magnesite and dolomite in a sodium oleate system. *Green and Smart Mining Engineering*, 1(1), 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.gsme.2024.03.002>
- Zhang, H., Du, M., Hu, H., Zhang, H., & Song, N. (2024). A review of ultrasonic treatment in mineral flotation: Mechanism and recent development. *Molecules*, 29(9), Article 1984. <https://doi.org/10.3390/molecules29091984>
- Zhang, X., Cheng, H., Xu, K., Ding, D., Wang, X., Wang, B., & Ma, Z. (2024). Ultrasonic enhancement for mineral flotation: Technology, device, and engineering applications. *Minerals*, 14(10), Article 986. <https://doi.org/10.3390/min14100986>
- Zhou, S., Tong, Z., Dong, L., Wang, H., Zhao, Y., & Duan, H. (2023). A comparative study on the influence of single and combined ultrasounds assisted flake graphite flotation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 98, Article 106551.
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106551>
- Zhou, W., Cao, W., Li, C., Peng, Y., Cui, Y., & Liuyang, D. (2025). Ultrasonic pulp conditioning-induced nanoparticles: A critical driver for sonication-assisted ultrafine smithsonite flotation. *Minerals*, 15(9), Article 927.
<https://doi.org/10.3390/min15090927>

Zhou, Z. A., Xu, Z., Finch, J. A., Masliyah, J. H., & Chow, R. S. (2009). On the role of cavitation in particle collection in flotation—A critical review. *Minerals Engineering*, 22(5), 419–433. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.12.010>