

USO DE ONDAS ULTRASÓNICAS (OU) PARA MEJORAR LOS ÍNDICES EN EL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ORO

ALEJANDRA NAIDA HERNÁNDEZ MARTÍNEZ¹, MARCELA FIGUEREDO, EDUARDO MÉRIDA LA O, MISAEL PÉREZ PÉREZ, JOSÉ CASTELLANOS, JOSÉ ANTONIO ALONSO, ILEANA CABRERA, AYLIN DE LA CRUZ, ISIS HERNÁNDEZ, ISMARI SALGADO

Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica

Correo: (1) nayda@cipimm.minem.cu

RESUMEN

El elevado precio del oro en el mercado mundial impone un desarrollo impetuoso de procesos para la recuperación del metal, desde las menas más sencillas hasta las más complejas y refractarias, siempre teniendo en cuenta indicadores técnicos y económicos que pueden limitar su implementación, tales como el consumo de cianuro (por su elevado costo) y el grado de liberación del oro, que a veces requiere de una molienda muy fina (es una etapa con cierto grado de complejidad y su operación es costosa). En la actualidad se han desarrollado nuevas técnicas que permiten mejorar los índices de extracción de oro en menas refractarias, de cinética lenta, que requieren un elevado grado de molienda, con oro finamente diseminado en la matriz mineral u ocluido en las especies mineralógicas como los sulfuros y la materia carbonosa.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el empleo de OU en el procesamiento de una mena aurífera en la que el oro se encuentra finamente diseminado en la matriz mineral, la cinética de disolución es lenta y requiere un grado de molienda alto (90 % bajo 0,074 mm) para obtener altas recuperación del metal (95,5%).

Se realizó una síntesis bibliográfica y se experimentó la cianuración del mineral en a escala de laboratorio con variaciones del grado de molienda, la concentración de cianuro y la intensidad de las ondas. Se obtuvieron resultados alentadores, con los que se logran altos niveles de extracción.

Los resultados teóricos y prácticos obtenidos arrojaron perspectivas de desarrollo de este procedimiento en soluciones técnicas de la Metalurgia Extractiva del oro. El uso de OU en la lixiviación por cianuración de dos muestras produjo un efecto significativo en la extracción de oro, ya que mejoró la cinética de disolución con recuperación de 98,2 % a 98,8 %, el grado de molienda de 70 % bajo 0,074 mm y la concentración de CN- de 1 g/L, superiores a los obtenidos sin OU con igual y mayor grado de molienda (90 % bajo 0,074 mm) e igual y mayor concentración de CN- (2 g/L). El nivel máximo de extracción de oro se obtuvo en las pruebas sin empleo de OU, de 95,5%.

Se recomienda profundizar en la determinación de los mejores parámetros de lixiviación, grado de molienda y comportamiento de las impurezas, con atención a indicadores técnico económicos y a la influencia de otros parámetros como la presión, viscosidad, intensidad del ultrasonido, el uso de carbón para evitar el efecto *pregrobbing* y el uso total o parcial de aire en el proceso de cianuración. Igualmente, se recomienda determinar las características de las pulpas cianuradas desde el punto de vista de separación de fases y el comportamiento en las etapas siguientes a la disolución del oro.

ABSTRACT

The elevated price of gold in the International Market imposes an impetuous development of processes to the recovery of the metal, from the simplest ore to the most complex and refractory one, taking always into account technical and economical indicators which could limit its putting into effect, such as: the consume of cyanide (due to its high price), the liberation degree of gold that sometimes requires a fine milling (it is a stage with certain degree of complexity and its operation is expensive). Nowadays, new techniques have been developed which permit to improve the gold extraction indexes in refractory ores of slow kinetic, that request a high degree of milling, with a tiny-disseminated gold on the mineral matrix or occluded in mineralogical phases such as sulfides and carbonaceous material.

The aim of this work was to evaluate the use of Ultrasonic Waves (UW) in the processing of an auriferous ore in which the gold is tiny- disseminated in the mineral matrix, the kinetic of dissolution is slow and requires a high milling degree (90 per cent under 0,074mm) to obtain a high recovery of the metal (95,5 per cent).

A bibliographic resume was made and the leaching with cyanide was experimented on the mineral, at the laboratory scale, changing the milling degree, the cyanide concentration and the waves intensity, obtaining encouraging results which make possible to reach high levels of extraction. Theoretical and practical outcomes acquired threw expectations of development of this technique in technical solutions of the Extractive Metallurgy of gold:

The practice of using Ultrasonic Waves in the leaching with cyanide of 2 patterns produced an important effect in the extraction of gold, improving the kinetic of dissolution, recovering 98,2%-98,8%, the milling degree of 70% under 0,074mm and the concentration of cyanide of 1g/L, higher in rank than the obtained ones without Ultrasonic Waves with the same and bigger milling degree (90% under 0,074mm) and equal and major concentration of cyanide (2 g/L), being the highest level of extraction of gold on the proofs, without using UW of (95,5%).

It is recommended to deepen in the determination of the best parameters of leaching with cyanide, the milling degree and the behavior of the impurities, taking into account technical- economical indicators, as well as the influence of other parameters such as the pressure, the viscosity, the intensity of the ultrasound, the use of carbon to avoid the *pregrobbing*; and the total or partial use of air in the process of leaching, as well as determine the characteristics of the leached pulps, from the point of view of the separation of phases and the behavior of the phases that follow the gold dissolution.

INTRODUCCIÓN

El empleo de ondas ultrasónicas en los procesos industriales se ha incrementado durante los últimos años. El estudio de sus efectos en la química de los procesos se está desarrollando a gran velocidad en áreas de la investigación entre las que se cuentan la emulsificación, homogeneización, desaglomeración, sonoquímica, aceleración de reacciones químicas, rotura de moléculas complejas, cristalización, filtración, desgasificación, cribado, limpieza, separación, pulido, soldaduras, recubrimientos y mediciones, entre otras. Algunos procesos aún no han sido introducidos en la industria y permanecen a escala de laboratorio, por lo que no han sido comercialmente desarrollados, a pesar de esto, representan un campo prometedor de aplicación que no se ha explotado suficientemente. Los efectos del ultrasonido se derivan fundamentalmente de cavitaciones acústicas producto de los colapsos de burbujas en líquidos, que provocan una enorme concentración de energía, debido a la conversión de energía cinética del movimiento del líquido en calentamiento de los contenidos de las burbujas. Las altas temperaturas y presiones locales, combinadas con el extraordinariamente rápido enfriamiento provocan un medio único para producir reacciones químicas bajo condiciones extremas (Lippolis *et al.*, 2003).

Los procesos de recuperación de oro desde sus menas se basan en la alta densidad del oro con respecto a la ganga y en su solubilidad en soluciones diluidas de cianuros alcalinos. Una cantidad significativa de oro puede estar íntimamente asociada con sulfuros y/o arseniuros y finalmente diseminado en su estructura como ocusión, por lo cual recibe el nombre de *mineral refractario*. Estos minerales contienen cuarzo como ganga principal y sulfuros tales como piritita, arsenopiritita y pirrotita, además de materia carbonosa en la cual muchas veces el oro se encuentra químicamente asociado (Benavides y Rojo, 2002).

El oro en el cuarzo puede ser liberado mecánicamente, mientras que el que se encuentra asociado a sulfuros o al material carbonoso, se dificulta su liberación por cualquier tipo de método mecánico convencional.

La mayoría de las veces, la cianuración de estos minerales requiere largos periodos de lixiviación y, desafortunadamente, bajas recuperaciones de oro. La presencia de materia carbonosa produce la adsorción del oro disuelto durante la cianuración, por lo que estos minerales no responden a la cianuración directa y es necesario concentrarlos para descomponer los sulfuros y la materia carbonosa liberando el oro para su lixiviación. Para esto se emplea la tostación, la oxidación acuosa o la oxidación biológica. La materia carbonosa se descompone parcialmente o no se descompone en estos procesos de oxidación. Por esta razón es removida durante la flotación de los sulfuros o pasivada durante la lixiviación de oro, por lo que se produce una pérdida inevitable del oro asociado a la materia carbonosa. De igual manera, las menas que contienen oro en forma de teluros se disuelven lentamente, lo que produce efectos semejantes a los refractarios en el tiempo y recuperación del metal (Benavides y Rojo, 2002).

El empleo de ondas ultrasónicas (OU) se puede concebir como pretratamiento a la cianuración o usarse durante la misma. Al igual que la biolixiviación, de una u otra manera facilita la conversión de los compuestos presentes que acompañan al

oro en las especies refractarias, de manera que resulte menos complicada la liberación de las partículas metálicas de oro, para luego entrar en contacto íntimo con la solución cianurada.

En particular, la aplicación de ultrasonido de alta frecuencia en fluidos no homogéneos, como gases, líquidos con partículas en suspensión, gotas o burbujas, representa un campo prometedor de aplicación. Recientes estudios muestran su uso en áreas como la emulsificación, homogeneización, desaglomeración, sonoquímica, aceleración de reacciones químicas, rotura de moléculas complejas, cristalización, filtración, desgasificación, cribado, limpieza y separación, entre otras (Benavides y Rojo, 2002).

Los efectos producidos por este proceso son causados por el fenómeno de cavitación acústica que se produce en los sistemas líquido - sólidos, en los que genera alta energía, de ahí su aplicación en muchos procesos de la industria minero - metalúrgica, en particular en la Metalurgia Extractiva de los minerales de oro.

Entre los objetivos de este proyecto está el estudio del tratamiento ultrasónico como una vía de mejora a los procesos de lixiviación con carbón CIP o CIL empleados en la recuperación de oro de minerales auríferos, para aumentar su eficiencia sin variar las condiciones de operación, basado fundamentalmente en la experiencia internacional y en la del CIPIMM en relación con el empleo de ondas ultrasónicas en el proceso de extracción de oro (Cianuración con CIP y Flotación de oro laminar), así como facilitar la elución de oro de céticas que se generan carbones cargados basado en las condiciones energéticas (Hernández, 2005, 2008).

Aspectos teóricos

El ultrasonido es una vibración mecánica que se transmite a través de un medio físico. Es orientado, registrado y medido en Hertz (Hz), con ayuda de un aparato creado para este fin. Es la parte del espectro del sonido (aproximadamente 16 Hz) que esta fuera del rango normal del oído humano (Cuadro 1).

Cuadro 1. Rangos de sonido.

Infrasónica	Sónica o audible	Ultrasónica
1 - 16 Hz	16-20 KHz	20 KHz a más

Las ventajas de su aplicación en materiales se deben a que presenta las siguientes características:

- Se propagan en todos los medios elásticos donde existan fracciones de materia (átomos o moléculas capaces de vibrar).
- La intensidad de vibración depende de la separación interpartículas.
- Permite la detección y caracterización de discontinuidades por su alta capacidad de penetración.
- Alta velocidad de transmisión de energía sonora a través del medio acuoso.
- Mínima dispersión y absorción de energía de la onda ultrasónica.

El ultrasonido de alta densidad (US) produce un efecto químico o fenómeno conocido como *cavitación acústica*, en el cual existe una creación, expansión y destrucción de burbujas pequeñas cuando un líquido se está irradiando con US. Este fenómeno genera temperaturas altas y presiones en los puntos definidos dentro del líquido. El líquido circundante enfría rápidamente estas partes del medio, por eso una gruta del tamaño de unas micras desaparece en menos de 1/1000000 de segundos. La temperatura de cavitación varía hasta 10000 K, más frecuentemente en el rango de 4500 a 5500 K.

Para el éxito de la aplicación del US, se debe tener en cuenta cómo influyen en el proceso determinados factores tales como la frecuencia, el solvente, la temperatura, la aplicación de gases, la presión externa y la intensidad del ultrasonido. En la Figura 1 se muestra un ejemplo de esto.

Un aumento de la frecuencia lleva al descenso de la producción e intensidad de cavitación en los líquidos. El cambio de frecuencia del ultrasonido puede cambiar las rutas de reacciones químicas con participación de metales e influir en las propiedades de los catalizadores (Pt, Pd) si el cambio se realiza durante su producción. La implosión calienta los gases dentro de la cavidad a 5500 OC y produce un desplazamiento del líquido a 400 km/h. Ambos efectos contribuyen a la reacción química (Figura 2).

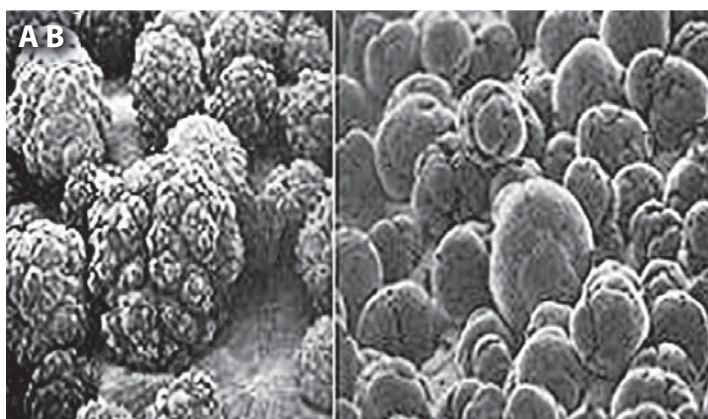


Figura 1. Superficie metálica alterada por ultrasonido. A: Polvo de Ni antes de la irradiación de US. El polvo está cubierto por una capa cristalina no reactiva. B: Polvo de Ni después de la irradiación de US. La capa se va y queda expuesta la superficie del polvo de Ni, que desarrolla su reactividad.

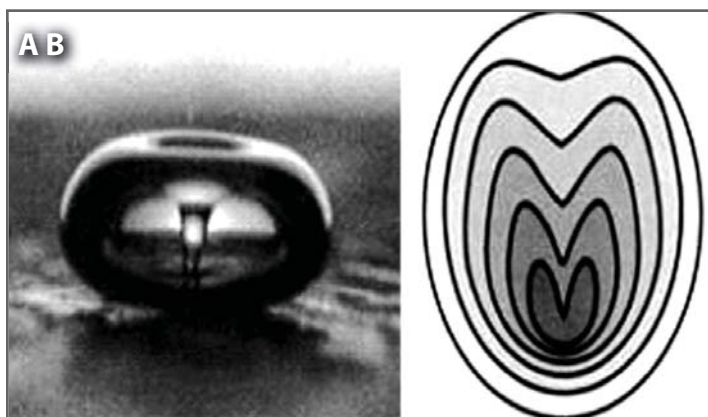


Figura 2. Fotografía (A) y esquema (B) de implosión cavitacional en un líquido irradiado con US.

La cavitación produce efectos considerablemente menores en líquidos viscosos o estos con tensiones superficiales más altas.

En cuanto a la temperatura, un aumento de la misma permite llevar a cabo la cavitación a intensidades acústicas más bajas, a consecuencia del aumento de la presión de vapor del solvente con el aumento de la temperatura. Las temperaturas más bajas causan una viscosidad más alta, que hace que la formación de la burbuja sea más difícil.

Si se aplican gases (pocos o bien solubles en el solvente), la intensidad de cavitación disminuye, debido a la formación de un gran número de núcleos adicionales en el sistema.

El aumento de la presión externa lleva al aumento de la intensidad de destrucción de burbujas de cavitación. Los efectos del US en este caso son más rápidos y más violentos, en comparación con la presión normal.

El aumento de la intensidad del OU fortalece los efectos producidos, y favorece la formación de los sólidos iónicos estratiformes y las reacciones de intercalación.

El tratamiento ultrasonoro se utiliza muy a menudo para activar metales. Es un método relativamente simple en el que, durante la acción del ultrasonido, se forman nuevas superficies que son afectadas posteriormente por los agentes de la solución. El ultrasonido limpia la superficie de las impurezas mecánicas, óxidos y otros. Como resultado, se aumenta el área de superficie y se disminuye el área de las partículas metálicas.

La selectividad del proceso ultrasónico podría deberse al efecto de limpieza de la cavitación ultrasónica sobre las partículas en tratamiento, lo que puede hacerlas más reactivas a los tratamientos superficiales propios de la flotación. De todas formas, para determinar esto es necesario realizar una investigación que busque los mejores reactivos para el acondicionamiento ultrasónico.

Los efectos de la acción ultrasónica tienen influencia en la cinética de las reacciones en presencia de catalizadores. Además, pueden ocurrir reacciones que no tienen lugar en ausencia del ultrasonido, como sucede con la interacción entre Cu o Ni metálico y ligandos azometínicos.

En la síntesis de sulfuros másicos a través del ultrasonido en medio acuoso, el colapso implosivo de las burbujas de cavitación para generar especies H^+ por la disociación del agua, debido a la interacción directa con un precursor de azufre puede generar H_2S , el cual reacciona con el metal presente en la solución (como el molibdeno o el níquel) para generar el sulfuro correspondiente.

El mecanismo de acción del ultrasonido a las superficies metálicas ocurre, en primer lugar, cuando el flujo acústico (movimiento del líquido inducido por la onda sonora) realiza una conversión del sonido a la energía cinética, y no representa un efecto cavitacional.

La formación de cavidades asimétricas sobre la superficie metálica es un resultado directo de la destrucción de burbujas de corta duración cerca de la superficie. Como resultado de la cavitación, tiene lugar la deformación de la superficie, junto con la fragmentación y reducción del tamaño de partículas que aparecen.

Existen numerosos criterios acerca de cómo la radiación sónica puede romper los enlaces químicos. Todas las teorías que dan explicación a este fenómeno coinciden en que el evento principal en la sonoquímica es la creación, crecimiento y ruptura de una burbuja que se forma en el líquido (Kharisor, 1999).

El primer enigma es cómo una burbuja puede formarse, considerando el hecho que las fuerzas necesarias para separar las moléculas de agua a una distancia de dos radios de Van Der Waals, requerirán una potencia de 105 W/cm². Es bien conocido que en un baño sónico, con un poder de 0,3 W/cm², el agua se convierte en peróxido de hidrógeno. Diferentes explicaciones manifiestan que la existencia de partículas inadvertidas, o burbujas de gas, que disminuyen las fuerzas intermoleculares y permiten la creación de las burbujas (Lippolis *et al.*, 2003).

La segunda fase es el crecimiento de la burbuja, que ocurre a través de la difusión de vapor del soluto al volumen de la burbuja. La tercera fase es la ruptura de la burbuja, que sucede cuando la burbuja alcanza su tamaño máximo. Según el mecanismo, estas implosiones provocan un aumento de la temperatura local de hasta 5000 K y las presiones a unos cientos de atmósferas y causan las condiciones extremas que provocan la ruptura de enlaces químicos.

Se ha demostrado que de la sonificación se obtienen partículas amorfas del orden de los 5 a 20 nanómetros. La causa de la amorficidad de los productos se relaciona con la velocidad de enfriamiento muy alta ($\geq 10^{11}$ K/sec), que se produce durante la ruptura de la burbuja, la cual no permite a los productos reorganizarse y cristalizar. Estas velocidades de enfriamiento tan altas son el resultado de la ruptura rápida, que dura menos de un nanosegundo.

El tamaño estimado de la burbuja varía de 10 a unos cientos de micras. Además de la región dentro de la burbuja (fase gaseosa) donde ocurre la reacción, existe una segunda región de gran importancia, la región interfacial que rodea la burbuja que colapsa. Su anchura es calculada en 200 nm, y la temperatura alcanzada después de la ruptura es de 1900 K. Las reacciones sonoquímicas de compuestos no volátiles como las sales ocurrirán en esta región. En este caso, las reacciones sonoquímicas ocurren en la fase líquida. Los productos son nanopartículas amorfas o cristalinas que dependen de la temperatura en la región del anillo donde la reacción tiene lugar.

Sobre la base de los resultados de la búsqueda bibliográfica, es posible señalar que el empleo de OU puede facilitar el alcance de niveles de recuperación de metales por encima de los de la operación normal, así como otros procesos de la Metalurgia Extractiva, debido a la propiedad que tiene la vibración mecánica de transmitirse a través de un medio físico y de causar efectos entre los que se encuentra la reducción del tamaño de las partículas.

Desde el punto de vista de la implementación, esta técnica existe a escala industrial, con mucha versatilidad en las operaciones que se realizan.

Generalmente, las frecuencias de ondas ultrasónicas son del orden de 25 kHz. Se han desarrollado equipos con capacidad de cientos de m³/h. En la Figura 3 se presenta una vista del UIP 16000, un modelo industrial (Hernández, 2005, 2008).



Figura 3. UIP 16000, el procesador ultrasónico más poderoso del mundo: 16000 watts de potencia para procesamiento de volúmenes grandes en procesos para homogeneizar, dispersar o desaglomerar. Diseñado para trabajar en clusters de tres o más unidades.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales utilizados

1. Muestras de menas auríferas, denominadas M1 y M2, ambas de mineral de oro finamente diseminado.
2. Papel de filtro.
3. Recipientes para envasar las muestras.
4. Óxido de calcio.
5. Cianuro de sodio.
6. Indicador para valorar cianuro.
7. Solución buffer.

Equipos empleados

1. Procesador ultrasónico.
2. Baño ultrasónico.
3. Phímetro.
4. Estufa.
5. Bomba de vacío.
6. Pipeta de 5ml, aforada con pera.
7. Bureta de cristal ámbar.
8. Erlenmeyer.
9. Balanza técnica de precisión ± 50 g.
10. Frasco lavador, vaso de precipitado.
11. Balas magnéticas.
12. Probetas graduadas.
13. Agitador magnético.
14. Agitador mecánico.

Métodos

- Caracterización de las muestras y preparación de las pulpas:

Caracterización de las muestras:

Las muestras M1 y M2 fueron caracterizadas mediante Análisis Químico (AQ), Análisis Mineralógico (AM) y Análisis Granulométrico (AG).

Se determinó además la densidad real por el método del picnómetro. Se reportó para M1 $\rho = 2,65 \text{ t/m}^3$ y para M2 $\rho = 2,63 \text{ t/m}^3$.

Para el Análisis Químico (AQ) se determinó la composición química mediante el método de docimasia para el oro y la plata; el ST la sílice por método gravimétrico, el As por digestión ácida y el resto de los componentes por el método de fusión con metaborato de sodio.

El Análisis Mineralógico (AM) se realizó mediante el empleo del método de Difracción de Rayos X (DRX) en las fracciones más finas de las dos muestras (- 0,074 mm y - 0,063 mm), previamente clasificadas.

La composición cuantitativa de las fases se determinó a partir de la composición química de los materiales asociada a la composición cualitativa de las fases.

El análisis granulométrico se realizó empleando el procedimiento establecido en el Manual de Procedimientos del Departamento de Investigaciones Tecnológicas, con la muestra molida a - 1 mm.

Preparación de las pulpas:

La preparación de la pulpa se realizó en un molino de bola con una relación peso de 14,5 kg de Bolas/kg de mineral seco, con un 50 % de sólido. Se obtuvieron pulpas a diferentes tiempos de molienda, según el procedimiento que muestra la Figura 4.

Una vez pesado el retenido, por diferencia de peso se determina el porcentaje bajo 0,074 mm (malla 200) y el tiempo de molienda que se requiere en cada prueba.

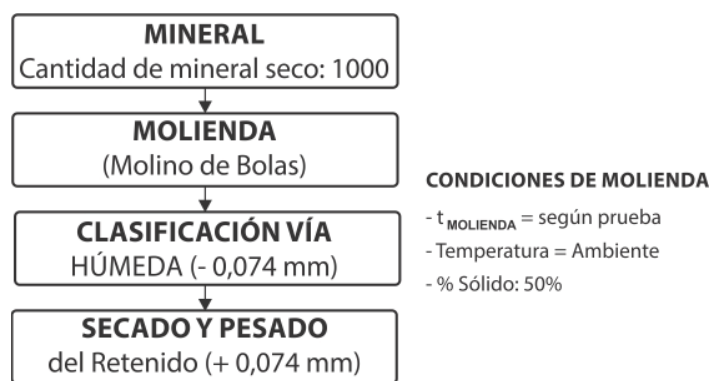


Figura 4. Procedimiento estándar para la preparación de las pulpas.

La carga de bolas en el molino se distribuyó, según el procedimiento, de la siguiente forma (Tabla I):

Tabla I. Distribución de la carga de bolas en el molino.

Diámetro de bolas (mm)	Peso (kg)	% en Peso
40	1,0	7,1
30	5,6	38,5
25	3,0	20,8
20	4,9	33,6
TOTAL	14,5	100

Ensayos de cianuración

Los ensayos de cianuración (lixiviación con cianuro) se realizaron en reactores del tipo botella, que constituyen pruebas standard que emplean las condiciones más severas para obtener la máxima recuperación posible en la mena ensayada; y en reactores tipo tanque agitado con y sin el empleo de ondas ultrasónicas para determinar el efecto de las mismas en la lixiviación. Las ondas ultrasónicas se suministraron por dos vías:

- Con el equipo generador de ondas tipo electrodo, introducido en el seno de la pulpa.
- Con un equipo de baño ultrasónico, en el que se sumerge el reactor con la pulpa contenida.

En todos los casos se emplearon diferentes condiciones de lixiviación que pueden mejorar la eficiencia de extracción de oro en cada muestra, tales como mayor grado de molienda y mayor concentración de cianuro.

El procesador ultrasónico trabaja a una amplitud de 30 %, en un tiempo de 12 h, con una pausa de 2 s. El mismo se detiene al tomar las muestras. La medida de amplitud leída en el procesador ultrasónico se correlaciona con la intensidad que es el parámetro de onda evaluado con el baño.

Procedimiento realizado

Las pulpas preparadas se cianuran teniendo en cuenta la concentración a añadir y se agitan durante media hora. Inmediatamente luego de encender el equipo generador de ondas ultrasónicas, comienza la prueba.

Transcurrida media hora, se toman muestras para análisis químico y para determinar pH y concentración de cianuro. El volumen extraído se repone con agua.

En caso de que se necesite se adiciona la cantidad de cianuro por reposición. Si el pH es menor que 10,5, se debe adicionar la cal necesaria. El mismo proceso se realiza a la hora, a las dos horas, a las cuatro horas, a las seis horas, a las ocho horas y a las 12 horas.

Al concluir la prueba se filtra la pulpa, se mide el volumen y se toma una muestra para análisis. El sólido obtenido se pesa y se calcula la cantidad de agua necesaria para realizar los tres lavados correspondientes. Se lava el sólido, se mide el volumen filtrado y se recoge una muestra para análisis.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de las muestras y preparación de las pulpas

Análisis Químico (AQ):

Los resultados de la composición química de las muestras M1 y M2 se presentan en la Tabla II.

Tabla II. Caracterización química de las muestras M1 y M2.

Muestra	(g/t)		(%)								
	Au	Ag	St	Cu	Pb	Zn	Sb	Fe	Ca	As	SiO ₂
M1	6,23	<5,0	0,2	1,1*10 ⁻²	0,067	2,3*10 ⁻²	<1*10 ⁻³	2,91	1,34	1,7*10 ⁻³	79,4
M2	6,5	<5,0	0,18	1*10 ⁻²	<0,19	1*10 ⁻²	<1*10 ⁻³	2,06	1,25	<1*10 ⁻³	77,8

En la Tabla II se observan en ambas muestras contenidos de oro considerados industriales, por lo que se justifica el procesamiento de las menas mediante la tecnología de lixiviación con cianuro por agitación. Los contenidos de elementos tales como Cu, Fe, Zn, As y Sb son muy bajos, lo cual es favorable al proceso de cianuración, ya que éstos metales son cianicidas (consumidores de cianuro) y cuando se presentan en grandes cantidades influyen muy negativamente en la recuperación del oro y en la economía del proceso.

Es posible observar además que ambas muestras presentan contenidos similares de los componentes útiles.

Análisis Mineralógico (AM)

Los registros obtenidos permitieron identificar la composición sustancial de las muestras, en las cuales se evidencian los máximos de difracción del cuarzo como fase mayoritaria, seguida de la presencia de feldespatos. Esto se pudo observar con la aparición de los máximos de difracción fundamentales, cuyas distancias interplanares ($d = 3,18 \text{ \AA}, 4,02 \text{ \AA}, 3,76 \text{ \AA}$) corresponden a la plagioclasa sódica (variedad albita). Con reflexiones menos intensas se encuentra la ortoclasa potásica (variedad adularia), que presenta sus máximos de difracción en valores de distancia interplanar de $d = 3,32 \text{ \AA}, 3,23 \text{ \AA}$ y $3,78 \text{ \AA}$ (Figuras 5 a 10).

En las muestras se evidencia la presencia de piroxenos de tipo augita, cuyos principales máximos de difracción se encuentran interferidos por la presencia de los feldespatos identificados, aunque es recomendable corroborarlo con el empleo de otra técnica analítica complementaria como la Microscopía Óptica. Se identificaron las fases de arcillas clorita, hidromica y sericita, así como otros minerales minoritarios, entre los que se encuentran la calcita, material amorfo y escasamente piritita.

El análisis cuantitativo de la fase mayoritaria se realizó a partir de la determinación de la reflexión más intensa de cada una de las muestras y de la muestra patrón de cuarzo. En la Tabla III se presenta la composición cuantitativa del cuarzo obtenida a partir de las reflexiones del análisis por DRX en las diferentes fracciones granulométricas de cada muestra.

Tabla III. Determinación semi cuantitativa del cuarzo por DRX.

Muestra	M1 (+ 0,075 mm)	M2 (-1 + 0,075 mm)	M1 (- 0,075mm)	M2 (- 0,075mm)	M1 (- 0,063 mm)	M2 (- 0,063 mm)
Contenido de cuarzo (%)	52	39	23	30	26	

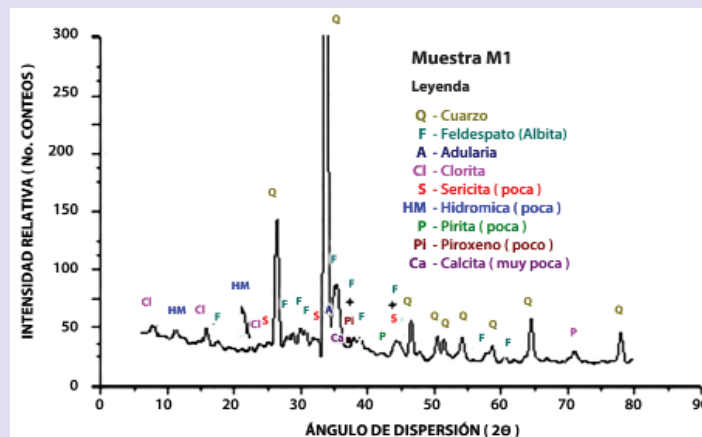


Figura 5. Diffractograma de la muestra de partida M1.

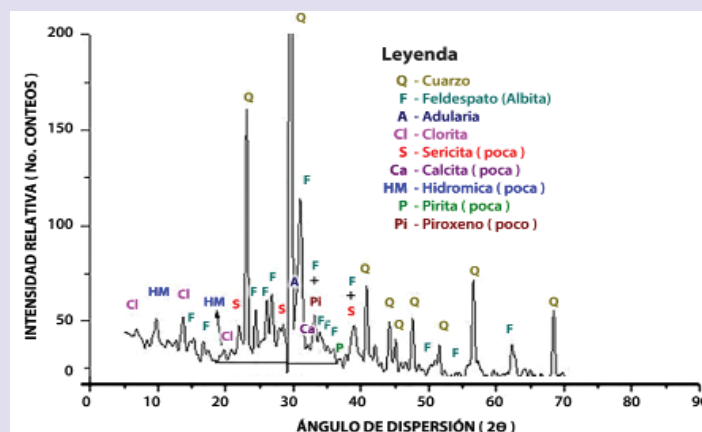


Figura 6. Diffractograma de la muestra de partida M2.

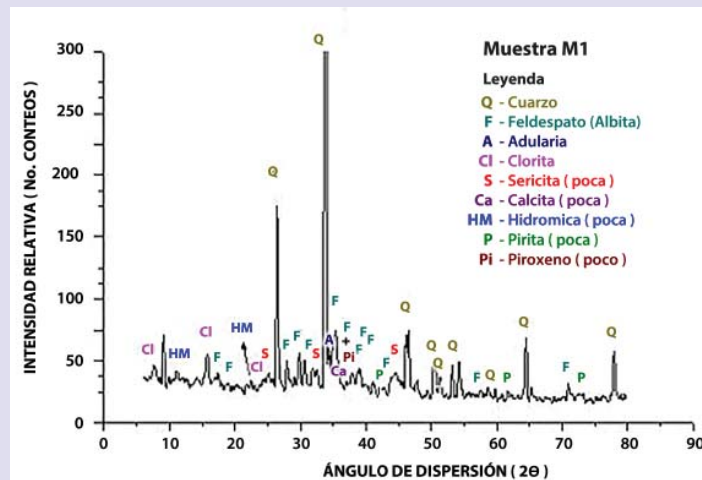


Figura 7. Diffractograma de la fracción - 0,75 mm de la muestra M1.

Tabla IV. Composición química asociada a la composición cualitativa de fases en las muestras M1 y M2.

Muestra	Contenido (%)						
	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	CaO	Na ₂ O
M1	4,8	79,4	10,0	2,1	1,6	0,9	1,5
M2	4,1	77,8	11,2	2,1	1,1	0,8	1,5

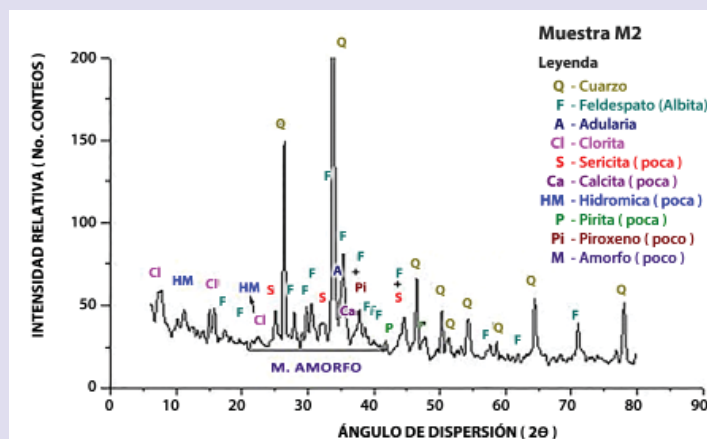


Figura 8. Diffractograma de la fracción - 0,75 mm de la muestra M2.

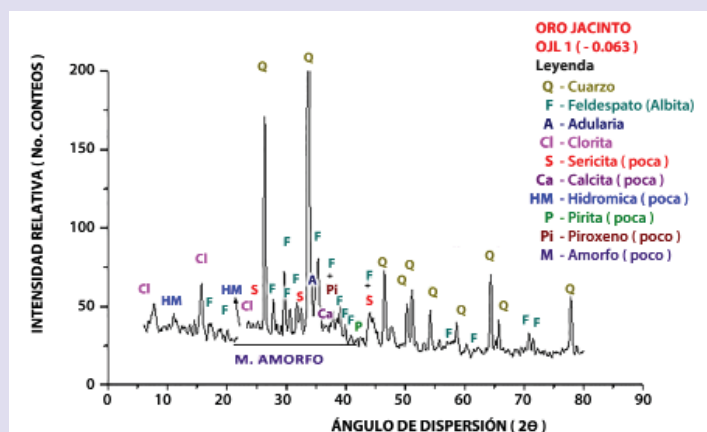


Figura 9. Diffractograma de la fracción - 0,063 mm de la muestra M1.

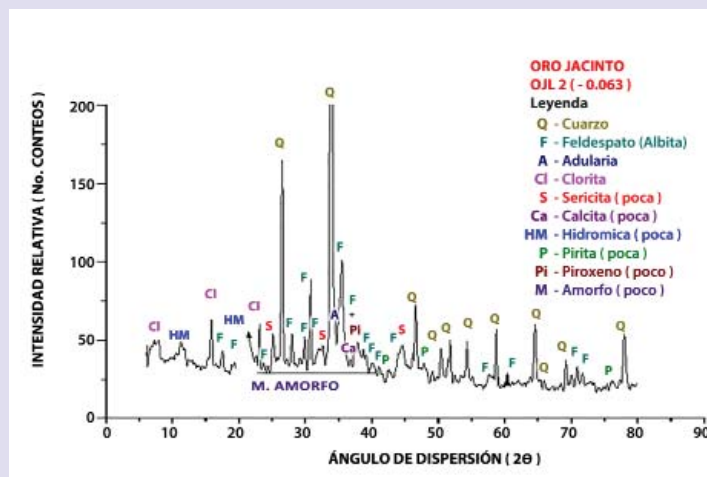


Figura 10. Diffractograma de la fracción - 0,063 mm de la muestra M2.

En los difractogramas se observa la composición cualitativa de las fases, muy similar en todas las fracciones analizadas, y la presencia cuarzo y feldespatos como fases mayoritarias.

Los resultados de la composición química de las muestras asociados a la composición cualitativa de fases, empleados para determinar la composición cuantitativa de las mismas, se muestran en la Tabla IV.

Como se aprecia, los contenidos de SiO₂ en ambas muestras coinciden con los resultados reportados por DRX de las fases mayoritarias de cuarzo y feldespato. Otro tanto sucede con el aluminio que se encuentra asociado a las hidrómicas, plagioclasas y feldespatos.

La composición sustancial mineralógica de las muestras M1 y M2 se presenta en la Tabla V.

Del estudio mineralógico se pudo constatar que la composición mineral no difiere ni cualitativa ni cuantitativamente. Se corroboran las fases identificadas por DRX, en las que el cuarzo es el mineral mayoritario, en cristales y en agregados granulares con inclusiones de minerales metálicos como pirita, calcopirita raros cristales de hematita y oro (Figuras 11 y 12).

Tabla V. Composición mineralógica (%) de las muestras M1 y M2.

Minerales presentes en las muestras	Composición Sustancial (%)	
	Muestra M1	Muestra M2
Cuarzo	53	51
Adularia + Ortoclasa	13	15
Albita	12	11
Clorita	5	4
Piroxeno	5	4
Hidromica + sericita	6	7
Material amorfo (ópalo)	3	6
Calcopirita	1	1
Calcita	2	1
Pirita	<1	<1
TOTAL	100	100



Figura 11. Cristales de cuarzo con inclusiones de oro y grano de oro libre tamaño 53X (M1, +0,074 mm).

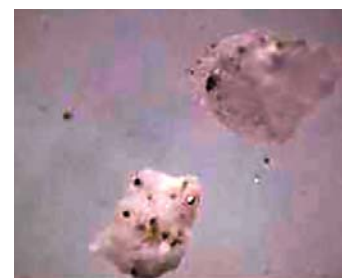


Figura 12. Agregado granular de cuarzo con inclusiones de pirita, calcopirita y oro, tamaño 26X (M2, +0,106 mm).

El feldespato se encuentra muy entrelazado con las demás fases, fundamentalmente con el cuarzo y la clorita. Esta última se encuentra como un proceso de alteración de roca propilitizada. En la Figura 13 es posible observar una mezcla de color rosado blanco y verde, con inclusiones de mineral metálico.

Se observó también la presencia de calcopirita, en forma de granos irregulares afilados en las granulometrías intermedias, como la fracción + 0,212 mm, de colores que van desde amarillo latón hasta tornasolado. Su tamaño oscila entre 0,2 y 0,074 mm (Figuras 13 y 14).



Figura 13. Agregado de feldespato, clorita y cristal de pirita oxidada (+ 0,5 mm).



Figura 14. Cristales de calcopirita alargados y puntiagudos, fracción (+ 0,212 mm).

Análisis Granulométrico

Los resultados del análisis granulométrico de las muestras M1 y M2 trituradas bajo 1 mm se reportan en las Tablas VI y VII, respectivamente.

De los resultados del análisis granulométrico, se aprecia en general que en las muestras estudiadas el oro se concentra en las fracciones superiores a 0,25 mm e inferiores a 0,074 mm.

En la muestra M1 el análisis indicó que el 45,4 % del oro se encuentra en la fracción - 1,0 + 0,25 mm y el 34 % en la fracción - 0,074 mm, mientras que en la muestra M2 el 50,5 % del oro se encuentra en la fracción - 1 + 0,25 mm y el 30 % en la fracción - 0,074 mm. Aunque la diferencia no es grande, en la muestra M1 se concentra un 4 % más de oro en la fracción más fina (- 0,074 mm) y un 5 % menos en las fracciones más gruesas (-1 + 0,5) que en la M2. La ley promedio obtenida fue de 6,33 g/t para la M1 y 6,45 g/t para M2.

Tabla VI. Resultados del análisis granulométrico de la muestra tecnológica M1.

Fracción (mm)	Rendimiento γ (%)	Au	
		Contenido β(g/t)	Recuperación en la fracción € (%)
-1+0,5	24,28	6,2	23,78
-0,5+0,25	22,53	6,35	22,60
-0,25+0,15	8,24	8,16	10,63
-0,15+0,074	10,03	6,02	9,54
-0,074	34,92	6,06	33,44
Total	100,00	6,33	100,00

Tabla VII. Resultados del análisis granulométrico de la muestra tecnológica M2.

Fracción (mm)	Rendimiento γ (%)	Au	
		Contenido β(g/t)	Recuperación en la fracción € (%)
-1+0,5	26,29	6,29	25,6
-0,5+0,25	25,74	6,24	24,9
-0,25+0,15	7,79	8,27	10,0
-0,15+0,074	9,90	6,38	9,8
-0,074	30,28	6,32	29,7
Total	100,00	6,45	100,0

Las leyes de Au obtenidas en ambas muestras por análisis directo y por fracciones fueron similares, con valores en el orden de 6,3 y 6,5 g/t respectivamente.

Preparación de pulpas

La curva de molienda resultante para la preparación de pulpas a diferentes grados de molienda en función del tiempo se presenta en la Figura 15.

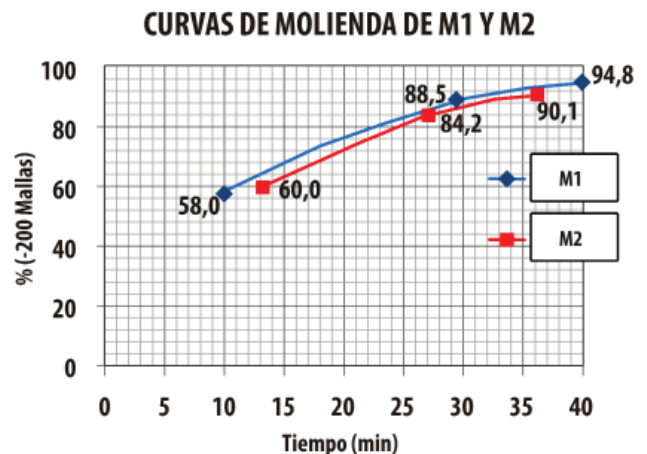


Figura 15. Curva de molienda de las muestras M1 y M2 molidas bajo 1 mm.

Tabla VIII. Resultados del análisis granulométrico de la muestra tecnológica M1.

Fracción (mm)	Grado de Molienda (% bajo 0,074mm)	C(NaCN) g/L	Consumo de NaCN (kg/t)	Consumo de cal (kg/t)	Conc. de Au (mg/L)	Ley de Au en cola (g/t)	Extracción (% Au)	
							Por sólidos	
M1 SU	1	90	1,0	1,81	2,6	4,32	0,32	95,30
	2	80	2,0	3,94	2,5	4,35	0,34	94,80
	3	90	2,0	3,99	2,5	4,27	0,32	95,05
	4	70	1,0	2,20	2,6	4,23	0,42	93,70
M2 SU	5	90	1,0	1,57	2,6	4,35	0,36	94,97
	6	80	2,0	3,30	2,5	4,45	0,32	95,26
	7	90	2,0	3,23	2,5	4,46	0,33	95,11
	8	70	1,0	1,89	2,5	3,30	0,54	91,70

Ensayos de cianuración

Fueron realizados ensayos en botella con diferentes condiciones de lixiviación que pueden mejorar la eficiencia de extracción de oro con ambas muestras; se emplearon mayor grado de molienda y mayor concentración de cianuro, todas sin utilización de OU (SU). Las condiciones y resultados de estas pruebas se presentan en la Tabla VIII.

Es posible observar que las mejores recuperaciones de oro se obtienen cuando se muele el mineral a 80 % y 90 % bajo 0,074 mm. En la muestra M2, es un poco más perceptible debido a que, como se vio en el análisis granulométrico, ésta tiene menores contenidos de oro en la fracción más fina (- 0,074 mm) y más contenido de oro en las fracciones más gruesas.

En la Tabla IX se presentan las condiciones y resultados de las pruebas con empleo de OU (COU) producidas por el generador de OU (G) y por el equipo de baño ultrasónico (B).

En todos los casos se empleó un grado de molienda de 70% bajo 0,074 mm y la concentración de NaCN de 1 g/L.

Los consumos de cianuro y de cal en todas las pruebas se correspondieron con los reportados en estudios con minerales similares.

El comportamiento obtenido en la ley de oro en cola mostró una tendencia a disminuir con la aplicación de las ondas ultrasónicas. Los mejores resultados se reportan en las pruebas realizadas con el baño ultrasónico con recuperaciones de oro del orden de hasta 98 % en las muestras estudiadas.

En la Tabla X se muestra el análisis granulométrico de las colas en los ensayos realizados con baño ultrasónico y sin ultrasonido en el reactor con agitación. Las colas de las pruebas que emplearon el generador no tienen realizado análisis granulométrico debido a que las cantidades de pulpa empleadas no eran suficientes para obtener la muestra.

Como se puede apreciar en la Tablas IX y X, existe un efecto significativo en la extracción del oro con el empleo de las ondas ultrasónicas en la lixiviación de este tipo de mena pues aún

Tabla IX. Condiciones y resultados de las pruebas de cianuración en reactores con agitación con empleo de OU.

Ensayo	Consumo de NaCN (kg/t)	Consumo de cal (kg/t)	Conc. de Au (mg/L)	Ley de Au en cola (g/t)	Extracción (% Au)
					Por sólidos
M1B 9	2,40	3,0	3,18	0,08	98,80
M1G 10	1,99	2,5	3,30	0,25	96,70
M2B 11	1,86	2,5	3,17	0,12	98,20
M2G 12	1,89	2,5	3,72	0,49	92,80

Tabla X. Resultados del Análisis granulométrico de las colas.

Muestra	M1B	M1G	M2B	M2G
Fracción (mm)	% en peso			
-1,06 + 0,074	30,25	22,53	26,75	26,70
- 0,074 + 0,045	15,78	18,81	15,39	17,28
- 0,045	53,98	58,65	57,86	56,03
Total	100,00	100,00	100,00	100,00

cuando se realizaron pruebas estándar en botella (que reportan la máxima extracción teórica en las condiciones dadas), incluso con valores más intensos de las condiciones de lixiviación, ninguna superó las extracciones obtenidas en las pruebas con empleo de las OU y el índice de consumo de cianuro fue inferior en las últimas.

Esto sugiere la posibilidad de operar con una molienda más gruesa en el procesamiento de menas auríferas en las que el oro se encuentre finamente disperso, como es el caso de los materiales ensayados, por lo que resulta interesante continuar los estudios y, sobre todo, profundizar en la determinación de los mejores parámetros de lixiviación y grado de molienda y comportamiento de las impurezas, teniendo en cuenta entonces indicadores técnico económicos.

CONCLUSIONES

- El uso de ondas ultrasónicas (OU) en la lixiviación por cianuración de las muestras M1 y M2 produce un efecto significativo en la extracción de oro, ya que se obtuvieron niveles de 98,2 % - 98,8 % de recuperación de oro, con un grado de molienda de 70 % bajo 0,074 mm y una concentración de CN- de 1 g/L, superiores a los obtenidos sin OU con igual y mayor grado de molienda (90 % bajo 0,074 mm) e igual y mayor concentración de CN- (2 g/L).
- El nivel máximo de extracción de oro en las pruebas sin empleo de OU fue de 95,5%, aún cuando se molió muy finamente.
- Se ha comprobado el efecto producido de disminución del tamaño de las partículas por la irradiación de ondas ultrasónicas, debido al fenómeno de cavitación acústica que se produce en los sistemas líquido - sólidos, en los que se genera alta energía.
- Sobre la base de los resultados de la búsqueda bibliográfica, es posible señalar que el empleo de OU facilita el alcance de niveles de recuperación de metales por encima de los de la operación normal, así como de otros procesos de la Metalurgia Extractiva, debido a la propiedad que tiene la vibración mecánica de transmitirse a través de un medio físico.

RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar las investigaciones, profundizando en la determinación de los mejores parámetros de lixiviación, grado de molienda y comportamiento de las impurezas, teniendo en cuenta entonces indicadores técnico económicos. Se debe analizar la influencia de otros parámetros como la presión, viscosidad, intensidad del ultrasonido, el uso de carbón para evitar el efecto pregrobbing, así como el uso total o parcial de aire en el proceso de cianuración con ultrasonido; y determinar las características de las pulpas cianuradas desde el punto de vista de separación de fases, así como el comportamiento en las etapas siguientes a la disolución del oro.

BIBLIOGRAFÍA

- Benavides, M. D., Rojo, J. 2002. Aplicación de ultrasonido en CIP para minerales auríferos. Venezuela: Universidad Experimental Politécnica.*
- Hernández, A. N. 2005. Ultrasonido. La Habana: CIPIMM. Inédito*
- Hernández, A. N. 2008. Aplicación de técnicas físicas para minerales de Au, Ag, Ni y Fe. La Habana: CIPIMM. Inédito*
- Kharisor, B. J. 1999. Uso de ultrasonido en procesos químicos. Rev. Ingeniería UANL. II (5): 13 – 20.*
- Lippolis, L., Guzmán, H., Uzcanga, I., Morgado, M., Urbina de Navarro, C., Scott, C. 2003. Síntesis sonoquímica de sulfuros de Ni-Mo para ser empleados como catalizadores de hidrotatamiento. Acta Microscopica, 18 (A): 1 – 5.*