



Biblioteca del Poder Popular Minero

TECNOLOGÍAS ASOCIADAS AL PROCESAMIENTO DEL ORO



3

Urbanización Las Mercedes, Av. Veracruz con calle Cali, Edificio Pawa,
municipio Baruta, estado Miranda, Venezuela. Zona postal 1060
Rif: G-20012136-0

Nicolás Maduro Moros

Presidente de la República Bolivariana de Venezuela

Víctor Cano

Ministro del Poder Popular para Desarrollo Minero Ecológico

Franklin Ramírez

Viceministro para Exploración e Inversión Ecominera

Nelson Hernández

Viceministro de Seguimiento y Control del Desarrollo Ecominero

María de los Ángeles Peña

Coordinación de publicación

Máximo Benavides

Investigación y redacción de contenidos

Yesibel Díaz, Liss Lares

Colaboración en compilación de contenidos

Francisco Ávila

Edición y corrección de textos

Carlos Alvarado

Diseño y diagramación

Hecho en la República Bolivariana de Venezuela

Junio 2018



«VENEZUELA ES UNA POTENCIA MINERA, Y LA VAMOS
A DESARROLLAR CON UN CONCEPTO ECOLÓGICO,
UN CONCEPTO DE LA VENEZUELA POTENCIA»

Presidente Nicolás Maduro
Ciudad Guayana, 5 de diciembre de 2017



Victor Cano

Ministro del Poder Popular para Desarrollo Minero Ecológico

Ingeniero en Geología, graduado en la Universidad Central de Venezuela (UCV). Investigador versado en el tema geológico y minero. Posee una especialización en Geoinformación para Geoamenazas, en el Instituto Indio de Sensores Remotos. Magíster en Sistemas de Información Geográfica por la Universidad de Girona, Cataluña, España. Fue presidente de la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (Funvisis). En 2013, fue designado como presidente de la Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales (ABAE). En marzo 2017, fue designado como viceministro para Exploración e Inversión Ecominera y, en agosto de 2017, como ministro del Poder Popular para Desarrollo Minero Ecológico.



Victor Cano, programa En la bulla, RNVI informativa - Foto: Jonnathan Gudiño

Contenido



Prólogo	6
Introducción	7
Procesamiento de minerales auríferos	8
Caracterización del material	8
Propiedades del mineral	9
Esquemas de procesamiento	10
Amalgamación	11
Gravimetría	13
Flotación	14
Cianuración	16
Carbón en solución C.I.C.	18
Carbón en pulpa C.I.P.	18
Carbón en lixiviación C.I.L.	18

Prólogo



Luego de muchos años, el presidente Nicolás Maduro crea el Ministerio del Poder Popular para Desarrollo Minero Ecológico; esto, en gran parte, fue el resultado de una demanda puntual de pequeños mineros y pequeñas mineras. Además, es en el momento de mayor auge del desarrollo del Arco Minero del Orinoco (AMO) y del posicionamiento de grandes empresas, versus la realidad concreta que exhibe en el hecho fáctico de que entre 2017 y 2018 se han entregado más de quince toneladas de oro al Banco Central de Venezuela (BCV), gracias a la producción de la pequeña minería; sin embargo, los mecanismos de compra no han resuelto una de las tareas vitales, como lo es que se compre al pequeño minero la producción, para transitoriamente erradicar los intermediarios, compradores mayoritarios y contrabandistas de extracción del oro.

Por otra parte, no es de menor importancia lo relacionado a la ley que prohíbe el uso del mercurio en el trabajo de la minería, desafío que es asumido con emergencia por los mineros y mineras, quienes hasta hoy continúan solicitando un acompañamiento técnico por parte de las instituciones.

El desvelamiento de otras tecnologías posicionadas en el territorio ponen en relieve un aspecto fundamental y poco analizado: la capacidad del pequeño minero al acceso de tecnologías más “limpias”, o que prescindan del mercurio, frente a la capacidad de grupos de poder económico (en su mayoría instalados en las áreas) rodeados por pequeños mineros.

Durante esta gestión, el pequeño minero ha sido visibilizado como sujeto político y sujeto de derecho, capaz de aportar a la construcción y concreción de políticas públicas, aunado al hecho de que es entonces cuando el Motor Minero se repotencia y se comienzan a hacer los cambios necesarios para reordenar y mejorar la actividad minera en el país, con mayor compromiso, productividad, efectividad y responsabilidad, de lo cual los pequeños mineros y las pequeñas mineras han sido parte importante.

Introducción



Las tecnologías metalúrgicas aplicadas al procesamiento de mineral aurífero y con ellas el reciclaje de metales, la purificación de soluciones y el uso eficiente de la energía constituyen temas de investigación permanente. Se espera que la información que a continuación se presenta se convierta en un documento de utilidad práctico y sencillo al alcance de pequeños mineros y mineras, así como otras personas vinculadas al sector aurífero, especialmente aquellas relacionadas con la promoción y el fortalecimiento productivo de unidades mineras comprometidas con mejorar la capacidad de gestión de las operaciones mineras y, además, utilizar los mejores criterios en el tratamiento minero metalúrgico del oro.

Es importante resaltar que el presente documento es estrictamente informativo-descriptivo dirigido a los mineros y las mineras con el interés de conocer otras tecnologías más allá de las típicamente usadas, cuyos impactos se han abordado en publicaciones especializadas en el tema.

Se debe aclarar al lector que no se busca promover ninguna de las tecnologías ni esquemas de procesamiento que son caracterizados en este documento, en términos generales.

Procesamiento de minerales auríferos

Para poder aplicar cualquier tecnología, es importante conocer las características físicas, químicas y mineralógicas de los minerales (menas) con contenido de oro nativo en variedad de tamaños, asociado en mayor o menor proporción con plata, cobre, hierro y estos se presentan normalmente con cuarzo y sulfuros, excepto en las zonas oxidadas cerca de la superficie.

Caracterización del material

El oro nativo encontrado en la naturaleza tiene una pureza de 99.8 % de oro (Au), pero varía entre 85 y 95 % Au, con plata (Ag) como la principal impureza, el cobre y hierro pueden igualmente estar presentes con el oro.



El oro puede encontrarse asociado a sulfuros bajo una forma no visible, siendo la pirita (sulfuro de hierro) el más común y en minerales oxidados, asociado con productos comunes de descomposición metálica, como los óxidos de hierro y manganeso.

Los minerales que constituyen la ganga o estéril acompañados por cuarzo son principalmente la calcita y minerales de arcilla.

Propiedades del mineral

Considerando las características muy especiales del oro (gran densidad y resistencia a agentes químicos comunes, abundancia relativa como elemento, brillo y color fácilmente reconocibles), la variedad de métodos disponibles de recuperación razonablemente eficientes, la diversidad de tipo de minerales y yacimientos, las diferentes condiciones geográficas y naturales, las diferentes condiciones socioeconómicas y regulaciones ambientales, costo de inversión, costo de operación y mantenimiento operacional, varían para cada situación particular.

Los principales aspectos a considerar en la selección de un proceso minero-metalúrgico son los siguientes:

- Naturaleza de los minerales valiosos y los de ganga o estéril.
- Comportamiento de los minerales valiosos frente a los métodos disponibles de tratamiento y el consiguiente efecto de los minerales de ganga.
- Reservas de mineral y potencial justificable del mineral prospectivo.
- Costo comparativo de tratamiento por los diferentes métodos aplicables.
- Costos comparativos de mercado.
- Costos comparativos de instalación de planta.
- Costos de manejo ambiental (lagunas de colas o relaves, efluentes de cianuro, drenajes ácidos).
- Métodos disponibles de financiamiento y sus costos comparativos.

Por ejemplo, para el tratamiento de minerales oxidados silicatados de oro en Venezuela, los diagramas de flujo comprenden desde la simple amalgamación con recuperaciones cercanas al 50 %, a la cianuración directa con recuperaciones aproximadas al 90 %, donde la selección de la mejor alternativa tecnológica puede estar influenciada notablemente por factores ambientales además de los factores económicos.

Las propiedades más importantes del oro para la utilización en procesos de beneficio minero metalúrgicos de los minerales son los siguientes:

- Su peso específico extremadamente alto entre 15.5 y 19.3 gr/cm³.
- El hecho de que el mercurio humedece rápidamente al oro en presencia de agua.
- Su rápida solubilidad bajo condiciones apropiadas, en soluciones acuosas diluidas de cianuros alcalinos.
- La gran capacidad de adsorción que el carbón tiene por el complejo de oro y cianuro.
- Su comportamiento aceptable frente a reactivos de flotación conocidos como colectores.

Esquemas de procesamiento

Tal como se ha explicado, el oro puede presentarse en forma libre o asociado a otros minerales sulfuros en particular y sus dimensiones pueden ser del orden de un centímetro hasta tamaños de micras y dimensiones submicroscópicas. Sus propiedades características llevan al desarrollo de cuatro grandes técnicas de tratamiento: amalgamación, gravimetría, flotación y cianuración.

Actualmente, la lixiviación o solubilización por cianuración es el procedimiento de base en el tratamiento de minerales de oro, nuevas técnicas y reactivos aparecen y otras poco a poco son abandonadas. Se debe mencionar que el oro también es soluble en otros solventes, tales como la thiourea en ambiente ácido, los tiosulfatos en ambiente alcalino y lixiviación ácida clorurante.

Amalgamación

La tensión superficial oro-mercurio, por ser inferior a la de oro-agua, permite un contacto preferencial y favorece la combinación de estos dos metales en una unión conocida como amalgama con un punto de fusión sobre los 100 °C. Es importante destacar que existe mojabilidad total entre el oro y el mercurio y será de mayor eficiencia cuando la granulometría del sólido es relativamente fina.

Las principales limitaciones de la amalgamación del oro son las siguientes:

- El oro nativo debe estar liberado, su superficie limpia y exenta de capas peliculares de óxido de hierro y lubricantes.
- Si el oro es muy fino, tenderá a flotar en la superficie de agua o del mercurio.
- La presencia de ciertos sulfuros puede provocar dificultades en la amalgamación, debido a la formación de gotitas ultra finas de mercurio que son imposibles de recuperar en el proceso.

Una de las prácticas más comunes es la captura del oro con mercurio por medio de placas de cobre, conocidas como planchas amalgamadoras (imagen 2); pero este método se usa muy poco en otros países debido a los altos índices de contaminación para quien manipula la pulpa en las placas; por lo tanto, se prefiere el uso de bateas, concentradores gravimétricos o centrífugas. La amalgama es prensada en piel de gamuza para eliminar el exceso de mercurio.



Para tratar esta amalgama se utilizan las retortas que son pequeños reactores en donde el mercurio se destila aplicando temperatura en 400 grados Celsius, y se incrementa gradualmente esta temperatura hasta 750 u 800 grados Celsius para completar la destilación en 3 a 6 horas y por condensación se recupera el mercurio para ser recibido en un estanque con agua; finalmente, el mercurio que se recupera es reciclado nuevamente para su reutilización.

El oro que estaba contenido en la amalgama, después del quemado y la destilación-condensación, es conocido como oro esponja u oro bullión; este bullión se envía a fundición-refinación. En la imagen 3 se muestra un modelo de retorta el cual se utiliza en la minería artesanal donde se destaca el reactor y el tubo de descarga junto al mechero.

La tendencia mundial es reemplazar la amalgamación por una cianuración intensiva o el envío directo a fundición. La toxicidad del mercurio y su persistencia en el largo plazo contrastan con la biodegradación que sufre el cianuro ante los agentes naturales.



Gravimetría

El proceso de concentración gravimétrica es esencialmente un método de separación de partículas minerales de diferentes pesos específicos en base a sus diferencias en movimiento, utilizando agua o aire como elemento de transporte. La concentración gravimétrica es el más simple y económico de todos los métodos de concentración y permite la recuperación de valores en rangos de tamaño tan grueso como sea posible.

En el diseño y uso de los equipos de concentración gravimétrica se toma en consideración el tamaño de las partículas de mineral aurífero que se desea separar, entre los más conocidos se tienen las canaletas, jigs, mesas vibratorias, conos reichert, espirales y los concentradores centrífugos (imagen 4), hidrociclones de pequeño tamaño y concentrador magnetohidrodinámico (suspensión magnética de alta densidad).

Las plantas de concentración gravimétricas son efectivas para recuperar el oro liberado de tamaños mayores de 50 micrones. Normalmente, el oro que se pierde puede estar en las siguientes formas:

- **Oro como escamas:** presenta un área superficial grande en un plano y se pierde en un separador que usa flujo laminar, como es el caso de la mesa vibratoria.
- **Oro hidrofóbico:** se adhiere a la interface agua/aire, dándole a la partícula una baja densidad aparente, desplazándose a los relaves o lagunas de colas.
- **Oro no liberado:** se localiza internamente dentro de los óxidos, silicatos o sulfuros, resultando en una densidad de partícula promedio inferior a la del oro.

Por regla general, los equipos de concentración gravimétrica son instalados directamente a la descarga (gruesos) de los clasificadores, de manera que se pueda recuperar el oro desde su temprana liberación.

Flotación

La flotabilidad natural del oro y su frecuente asociación con los sulfuros ha conducido a una gran variedad de configuraciones para la separación de los minerales de oro por el proceso de flotación (imagen 5). En el caso venezolano por las características del mineral, no se utiliza en las actividades mineras de recuperación.

El comportamiento del proceso de flotación en las diferentes formas en que se presenta el oro es:

- Flotación de minerales de oro asociado a sulfuros, el concentrado puede someterse a remolienda para continuar con cianuración, algunas veces, las colas de flotación se someten a cianuración.
- Flotación de sulfuros de los residuos de cianuración, una etapa que se utiliza en Sudáfrica para la recuperación del oro contenido en piritas, pero ha tenido un éxito limitado y no se ha llevado a prácticas industriales.

Se debe destacar que cuando la cianuración interviene después de la etapa de flotación, la presencia de los colectores y otros reactivos puede afectar la disolución de oro. Asimismo, para la recuperación del oro adsorbido por el carbón activado, los reactivos de flotación pueden inhibir la adsorción del oro sobre el carbón.



Cianuración

Este método es el más utilizado para la extracción del oro y su aplicación data desde principios del siglo XX, experimentando sucesivas mejoras en instalaciones de planta (imagen 6). Constituye un método bien establecido que permite tratar minerales de diversos tipos mediante ciertas adaptaciones específicas.

El principio básico del proceso de cianuración consiste en que una solución alcalina débil de cianuro tiene una acción preferencial por la disolución del oro y plata contenida en el mineral. Las condiciones generales para el desarrollo de este proceso son:

- La química de la cianuración del oro pone en evidencia la necesidad de la presencia de oxígeno para llevar a efecto el proceso. El oxígeno necesario para la reacción química es aportado por el aire.
- Para evitar la transformación del cianuro en el compuesto gas cianhídrico extremadamente tóxico, el proceso de cianuración debe efectuarse en un medio básico, siendo 9.4 el pH mínimo de trabajo; esta basicidad es controlada con adición de cal.
- La cianuración se debe trabajar a un pH máximo de 11, por encima de este valor la velocidad de disolución del oro decrece, debido a la formación del peróxido de calcio, el cual se adsorbe sobre el oro ocasionando la pasivación del proceso.

- La disolución del oro en soluciones cianuradas se realiza manteniendo relaciones de equilibrio, esto significa que, trabajando a altas concentraciones de cianuro, la tasa de disolución depende de la concentración de oxígeno; pero a bajas concentraciones de cianuro la tasa de disolución depende de la concentración de cianuro.
- El tiempo de ataque depende del tipo de mineral tratado y de la dimensión de los granos de oro industrialmente se encuentra entre 16 y 40 horas, con tiempos aún más largos para condiciones especiales.
- Para aplicaciones de planta, el proceso de cianuración puede ser por agitación o percolación.
- La velocidad de agitación en los tanques es fundamental para aumentar la velocidad de disolución del oro por el cianuro, la agitación puede ser neumática y comprende los estanques pachuca, denominados así porque se desarrollaron en la ciudad de Pachuca, México, y el aire es inyectado bajo presión por la parte inferior.

La agitación también puede ser mecánica o una combinación neumática/mecánica, que evita el asentamiento de partículas gruesas o densas y favorece la agitación de la pulpa.

Una vez efectuada la etapa de disolución, se debe continuar con la recuperación de oro a partir del tratamiento de soluciones ricas. Actualmente, se practican dos procesos básicos: la precipitación sobre sales de zinc (Merrill Crowe) y la adsorción sobre carbón activado, proceso surgido en la década de los 70.



Los principales métodos de adsorción utilizando carbón activado son:

- **Carbón en solución C.I.C.**, en el cual la adsorción se realiza en lecho fijo, percolando la solución rica por gravedad a través de un lecho fijo de carbón activado.
- **Carbón en pulpa C.I.P.**, en el cual el carbón puede trabajar directamente en la pulpa del mineral, después o simultáneamente con la disolución del oro con cianuro.
- **Carbón en lixiviación C.I.L.**, debido a que la reacción de lixiviación requiere mayor tiempo de residencia que la de adsorción, es posible reducir los requerimientos de equipo usando simultáneamente los tanques de agitación, tanto para la cianuración como para la adsorción.

El carbón cargado es llevado a un proceso de desorción para producir una solución concentrada con el tenor más alto posible en oro y la menor cantidad posible en carbón. Las soluciones resultantes son llevadas a una celda electrolítica, en donde el oro electrolítico precipitado es llevado a fundición para la refinación y obtención del oro final.

Este resumen sobre tecnologías aplicadas a la obtención del oro son el inicio para fomentar la enseñanza en estos procesos a personal vinculado a actividades mineras, y permite al país enfrentar en mejores condiciones los desafíos futuros generados por el fuerte incremento del uso de procesos hidrometalúrgicos en la industria minera, así como la incorporación de leyes ambientales cada vez más estrictas.

Sobre el autor

Dr. Ing. Máximo Benavides Vargas

Egresó el año 1971 de Ingeniero Metalúrgico en la Universidad Técnica de Chile (Universidad de ATACAMA), en 1978 obtiene el título de Doctor-Ingeniero en Metalurgia Extractiva en el Instituto Politécnico de Bucarest, Rumania y en el año 1999 realiza estudios de Post-Doctorado en el área de tratamientos de minerales en la Universidad Politécnica de Bucarest, con una beca del CONYCID-VENEZUELA. Ha realizado pasantías y cursos de perfeccionamiento en ENAMI (Chile) Fundación Chagres (Chile) CEEL (Suiza) Royal Institute (Suecia), Planta Copcha Mica (Rumania), CIPIMM (Cuba), CE-TEC (Brasil).

En docencia ha trabajado en la Universidad de Atacama (Chile) Instituto Universitario Politécnico (IUPEG), Universidad Nacional Experimental de Guayana (UNEG), Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre (UNEXPO), jubilándose en el año 2004 como PROFESOR TITULAR. Como asesor e instructor se ha desempeñado en C.V.G Ferrominera, C.V.G Minerven, C.V.G Venalum, C.V.G Carbonorca, Cia. Minera Puente Blanco, OHEP y asociados, Sidetur, Rolini, en las áreas de manejo y tratamiento de materiales.

En investigación y servicios se ha desempeñado como Jefe del Centro de Tratamiento de Minerales de la UNEXPO y ha coordinado proyectos de investigación, relacionados con concentración de minerales, destacando el proyecto conjunto de Ferrominera-UNEXPO “Disminución del contenido de Fosforo utilizando lixiviación bacteriana en mineral del cerro Bolívar”, coordinación del programa de formación técnica en minería aurífera entre ENAMI (Chile)-MINERVEN (Venezuela), por convenio bilateral Chile-Venezuela.

Como profesor titular ha dictado a nivel Pre-Grado, Post-Grado y cursos de extensión materias como: mineralurgia, metalurgia extractiva, tratamiento de minerales, hidrometalurgia, BioHidroMetalurgia, flotación, manejo de materiales, operaciones de desaguado, concentración. En la UNEXPO fue jefe del área de metalurgia química adscrito al departamento de metalurgia. Ha tutorado a nivel Pre-Grado más de 100 tesis de grado y alrededor de 20 tesis de Post-Grado en el campo de la metalurgia extractiva, además de publicaciones en revistas nacionales e internacionales.

Ha participado en numerosos congresos nacionales e internacionales, presentando ponencias de trabajos de investigación en procesamiento de minerales en países como: Venezuela, Chile, Rumania, Suecia, Suiza, España, Brasil, Francia, entre otros.

Pertenece a diversas asociaciones profesionales, tales como: AIME en Estados Unidos, CENIM en España, Asociación de Ingenieros Metalúrgicos en Francia, Sociedad de Científicos e Ingenieros de Francia.

Galardonado con el premio nacional de investigación “Juan Gualberto Yañez” el año 1983, instituido por la sociedad venezolana de traumatología, por el trabajo de investigación médico-metalúrgico “comportamiento de implantes metálicos, usados en cirugía ortopédica a fin de determinar las causas de su deterioro in vivo”. En el año 2001 fue reconocido como investigador destacado por la fundación de Ciencia y tecnología (FUNDACITE).

Actualmente se desempeña como asesor metalúrgico en el Ministerio de Poder Popular para el desarrollo de Minería Ecológica en ONAFIM y CVM en el área de fiscalización, inspección minera y desarrollo tecnológico para plantas metalúrgicas en el área aurífera.



Gobierno
Bolivariano
de Venezuela

Ministerio del Poder Popular
para Desarrollo Minero Ecológico



@EcoMineriaVE