

# MINERALOGÍA APLICADA A LA DEFINICIÓN DEL TIPO DE REFRACTARIEDAD EN LA MINA DE ORO EL ZANCUDO, TITIRIBÍ, ANTIOQUIA

Gallego, A. N.<sup>1</sup>; Zapata, D. M.<sup>2</sup>; Márquez, M. A.<sup>2</sup>

## RESUMEN

Las características físicas y químicas que le imprimen cierto grado de refractariedad al depósito de la mina de oro El Zancudo, fueron determinadas, planteando algunas bases iniciales sobre los problemas que podrían presentarse en el momento de desarrollarse un sistema convencional de beneficio. Los principales minerales de mena encontrados son, arsenopirita, pirita y en menor proporción, esfalerita, tetraedrita, boulangerita y galena y en un porcentaje menor de 1%, calcopirita, jamesonita, pirrotita y oro. Como minerales pertenecientes a la ganga se encuentra cuarzo, carbonatos y minerales arcillosos, como sericita y saussurita. Alrededor del 80% de los granos de oro se encuentran por debajo de 30µm, adicionalmente, el oro se presenta principalmente como pequeñas inclusiones (<10µm) en pirita (36%) y arsenopirita (6,3%), lo cual implica problemas liberación durante la molienda, requiriendo algún tipo de pretratamiento antes de la cianuración; de otro lado, la presencia de plata en los granos de oro (~ 28 Wt.%), puede hacer que se generen capas de sulfuro de plata secundarios, convirtiéndose en una barrera impermeable al cianuro. La presencia de minerales tales como arsenopirita y la pirita, pueden generar problemas durante la cianuración debido a la formación de diferentes compuestos de azufre y arsénico que consumen tanto oxígeno como cianuro y, por otro lado, la pirrotita, aunque se encuentra en poca cantidad, puede formar compuestos que se adsorben sobre la superficie del oro; todos estos factores hacen que la velocidad de disolución se vea disminuida. Finalmente, la sericita, puede generar un efecto preg-robbing, disminuyendo la eficiencia del proceso de cianuración.

**Palabras clave:** Refractariedad, mineralogía aplicada, oro, sulfuros, El Zancudo.

## APPLIED MINERALOGY TO THE DEFINITION OF THE TYPE OF REFRACTORINESS IN EL ZANCUDO GOLD MINE, ANTIOQUIA, COLOMBIA

### ABSTRACT

The physic and chemistry characteristics that give to the El Zancudo gold mine certain degree of refractoriness, were determined, regarding some initial bases about the problems that could occur at the moment of developing a conventional benefit system. The main metallic minerals found are arsenopyrite, pyrite and in smaller proportions sphalerite, tetrahedrite, boulangerite, galena, chalcopyrite, jamesonite, pyrrhotite and gold. Around 80% of the grains of gold are less than 30µm size, additionally, gold appears principally as small inclusions (<10µm) in pyrite (36%) and arsenopyrite (6,3%), which involve problems of liberation in the grinding process, requiring some type of pretreatment before cyanuration processes; on the other hand, the existence of silver within the gold grains (28 Wt.%), it could generate secondary silver sulfur coating and it becomes in a impermeable barrier for the cyanide. The existence of minerals like arsenopyrite and the pyrite can generate problems during the cyaniding due to the formation of different sulfur and arsenic composes which consume both oxygen and cyanide; all these factors cause that the velocity of dissolution be diminished. Finally, the sericite can generate a preg-robbing effect, diminishing the efficiency of the cyaniding process.

**Key words:** Refractoriness, Applied mineralogy, Gold, Sulphides, El Zancudo.

<sup>1</sup> Grupo GMA, Departamento de Geociencias, Universidad de Shimane, Japón. <sup>1</sup>s049214@matsu.shimane-u.ac.jp - albanurygallego@yahoo.com

<sup>2</sup> Grupo GMA, Escuela de Materiales, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

## INTRODUCCIÓN

Colombia ha sido históricamente un país productor de oro y este metal se ha convertido en uno de los productos generadores de divisas, por lo cual ocupa un importante lugar en el desarrollo de la economía del país (Ingeominas, 1987).

La refractariedad de los depósitos de oro es uno de los problemas que comúnmente debe enfrentarse durante un proceso de beneficio. Una mena de oro puede ser considerada como refractaria debido a su dificultad para ser tratada efectivamente mediante métodos convencionales como la trituración, molienda, separación gravimétrica, flotación y cianuración y, como consecuencia de esto, se obtienen bajas recuperaciones o consumos de cianuro elevados, comparados con una operación convencional de cianuración (Marsden & House, 1992).

El problema de la refractariedad en menas de sulfuros para extracción de oro es bien conocido y documentado a nivel mundial (Cabri, 1987; Hutchins *et al.*, 1987; Barr *et al.*, 1987; Gasparrini, 1993; Marsden & House, 1992; Chen *et al.*, 2002). En Colombia se considera común que los depósitos de oro filoniano muestren al menos cierto grado de refractariedad, lo que afecta la extracción de este metal (Gaviria, 1998). En el caso de la Mina El Zancudo, la condición de refractariedad es documentada en reportes de antiguas explotaciones (Restrepo 1888; Pérez & Ramírez, 1998), a pesar de esto, es evidente el desconocimiento de información técnica que aporte datos de interés encaminados a optimizar el proceso de extracción.

Con el fin de hacer posible una implementación de un proceso de beneficio eficiente y una recuperación óptima de este mineral, se hace necesaria la implementación de herramientas tales como la mineralogía aplicada, que permitan obtener un conocimiento detallado del depósito. En los estudios de minería, la mineralogía aplicada ha venido tomando fuerza, pues por medio de ésta ha sido posible dar solución a diferentes problemas de recuperación, a través de su intervención en procesos como planeamiento, optimización y monitoreo mineros (Cabri, 1987). En este punto la caracterización mineralógica puede intervenir como una herramienta útil para asistir el proceso de recuperación, además de servir como un puente de comunicación y mejor entendimiento entre los profesionales que laboran en los departamentos de geología y minería (Gasparrini, 1993).

El objeto de este trabajo es realizar la caracterización mineralógica detallada de los socavones Alberto, Porvenir

Alto, Castaño e Independencia de la mina El Zancudo, buscando determinar las características físicas y químicas que le imprimen cierto grado de refractariedad al depósito y plantear algunas bases iniciales sobre los problemas que podrían presentarse en el momento de desarrollarse un sistema convencional de beneficio.

## GENERALIDADES

### *Ubicación*

La mina de oro El Zancudo está ubicada al norte del municipio de Titiribí, Antioquia, en las estribaciones de la cordillera central, al este del río Cauca (FIGURA 1). En esta se reconocen diferentes socavones en los corregimientos de Sitio viejo, Otra Mina y la vereda El Zancudo (Gallego & Zapata, 2003).

## MATERIALES Y MÉTODOS ANALÍTICOS

Se elaboraron 28 secciones delgadas pulidas y 3 secciones delgadas, en el laboratorio de Ingeominas (Bogotá) y en el laboratorio de preparación de minerales de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, respectivamente, a las cuales se les hizo estudios petrográficos con microscopio óptico, marca Leitz, Laborolux 11POL, de luz plana polarizada, con los modos de luz reflejada (MOLR) y transmitida (MOLT). Posteriormente se hicieron análisis microquímicos en muestras metalizadas con grafito, utilizando detector de estado sólido para rayos X característicos (EDX) con un voltaje de 30kV y un tiempo de colecta de dos minutos; finalmente se hicieron algunos difractogramas de rayos X de las muestras, con el fin de corroborar minerales y establecer, de una forma cualitativa, las proporciones entre las fases presentes. Estos análisis fueron realizados por el Laboratorio de Física del Plasma de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, utilizando un microscopio electrónico de barrido (ESEM/EDX), marca Philips y un difractómetro Bruker AXS de Siemens, configuración Bragg-Bretano, con monocromador de grafito, utilizando el programa TOPAZ y la base de datos PDF2 para el análisis de los datos.

Las muestras analizadas fueron tomadas de los socavones Alberto Inferior (1261 msnm), Porvenir Alto (1188 msnm), El Castaño (1152 msnm) e Independencia (912 msnm). La selección de estos tres socavones, se hizo buscando tener un control topográfico de la zona de interés e incluir las dos estructuras mineralizadas principales que se reconocen en la zona. Ya dentro de los socavones, se buscó que el muestreo fuera representativo de las diferentes vetas, en las que se observó una buena



FIGURA 1. Mapa de ubicación del municipio de Titiribí.

distribución espacial y la mayor cantidad y variedad posible de sulfuros, que presentaran asociaciones y características diferentes, para tener así un cubrimiento amplio de los minerales existentes en el depósito.

## RESULTADOS

### *Caracterización mineralógica*

Como resultado de la fase de descripción microscópica se identificaron como minerales pertenecientes a la mena: arsenopirita (52%), pirita (33%), esfalerita (8%), tetraedrita (2%), boulangerita (2%), galena (2%) y calcopirita, jamesonita, pirrotita y oro, en un porcentaje menor de 1%. Como minerales pertenecientes a la ganga se encuentra

cuarzo, carbonatos y minerales arcillosos, como sericita y saussurita.

Dentro de las características más importantes de estos minerales podemos mencionar:

Los cristales de arsenopirita en su mayoría no sobrepasan 100 $\mu$ m, siendo común la presencia de cristales con poros y bordes muy corroídos. Los cristales de pirita varían en un amplio rango de tamaños, desde 3 $\mu$ m hasta 2,5mm; algunos cristales presentan texturas cataclásticas, hábitos framboidales, predominando cristales subedrales; es característico, en la mayoría de los granos, la presencia de abundantes poros.

La esfalerita se presenta en tamaños que varían desde  $6\mu\text{m}$  hasta  $5\text{mm}$ , donde la mayor cantidad de granos presenta medidas promedio entre  $100\mu\text{m}$  –  $400\mu\text{m}$ ; es muy común la presencia de exsoluciones de calcopirita, las cuales se presentan como gotículas de tamaños muy finos, que no sobrepasan  $15\mu\text{m}$ , en una textura *disease* típica (Ramdohr, 1980). La tetraedrita se presenta en tamaños variables, entre  $6\text{mm}$  y  $1,5\text{mm}$ , en promedio alrededor de  $400\mu\text{m}$  y se encuentra especialmente asociada con galena y boulangerita.

La boulangerita fue observada con tamaños que no sobrepasan las  $300\mu\text{m}$ , comúnmente presenta texturas esqueléticas y su principal asociación es con arsenopirita. La galena se puede observar en cristales que alcanzan hasta  $1\text{mm}$ ; en general es notable una coexistencia muy marcada con la tetraedrita y la boulangerita. La forma de presentación de la calcopirita es como cristales anedrales, de contornos muy redondeados, generalmente en forma de glóbulos de tamaños muy finos ( $<10\mu\text{m}$ ) incluidas en esfalerita, caracterizando una típica textura *disease*. La pirrotita, la mayoría de las veces, se presenta como

glóbulos, cuyos tamaños son menores  $20\mu\text{m}$ , encontrándose siempre como inclusiones en cristales subedrales a euedrales de arsenopirita. La jamesonita se encuentra en tamaños variables de hasta de  $250\mu\text{m}$ , como cristales subedrales, también a lo largo de fracturas o como inclusiones principalmente en la tetraedrita

#### Microquímica.

A partir de los espectros característicos, obtenidos de los análisis microquímicos realizados, se puede observar que sulfuros tales como la arsenopirita, pirita, galena, calcopirita y pirrotita, presentan espectros típicos, sin mostrar ningún elemento en solución sólida. En el caso de la esfalerita (FIGURA 2), se presentan cantidades considerables de Fe (en promedio 8 Wt.%).

De acuerdo a los análisis obtenidos en las sulfosales, se determinó que estas fases corresponden básicamente a sulfosales de Pb, As, Sb, Ag y Cu, definidas, como tetraedrita (FIGURA 3), boulangerita (FIGURA 4) y jamesonita (FIGURA 5). Además de éstas, se

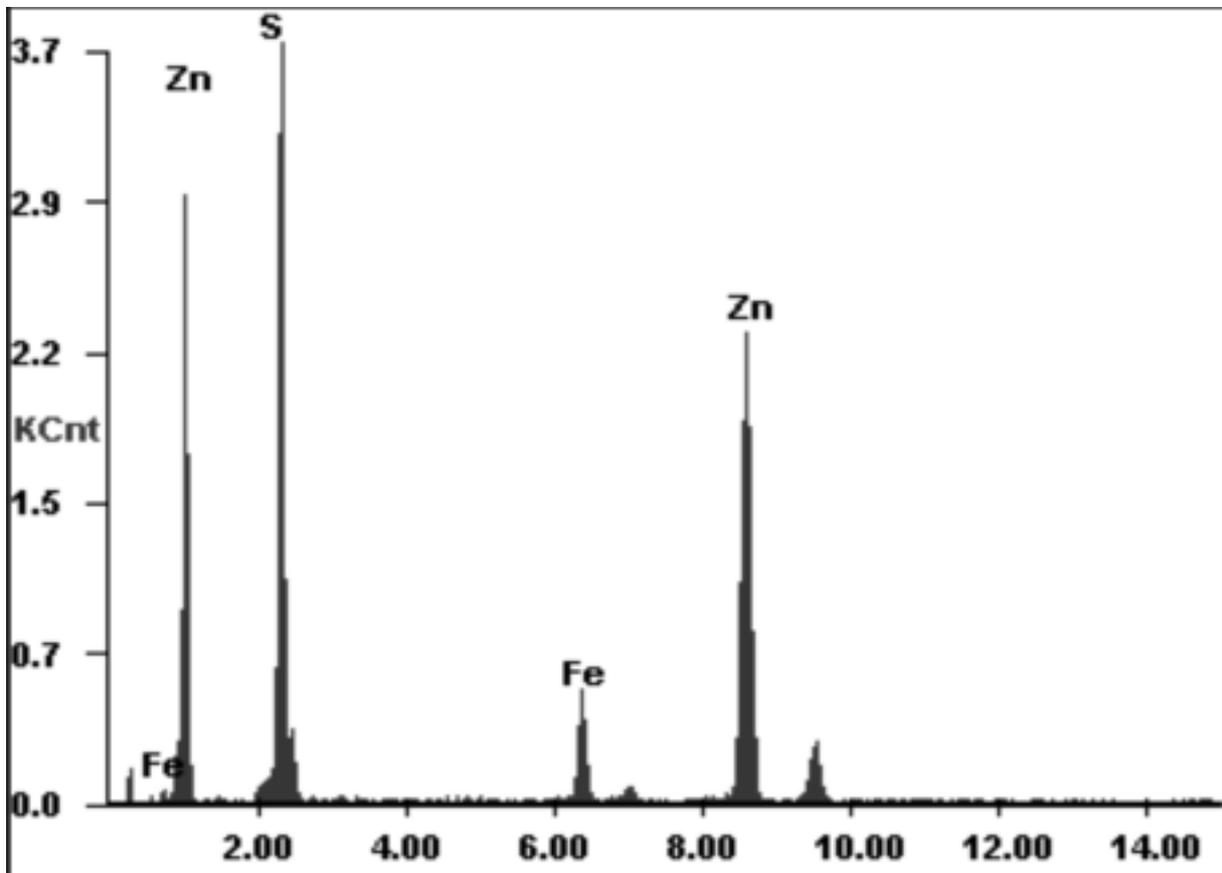


FIGURA 2. Espectro característico de esfalerita.

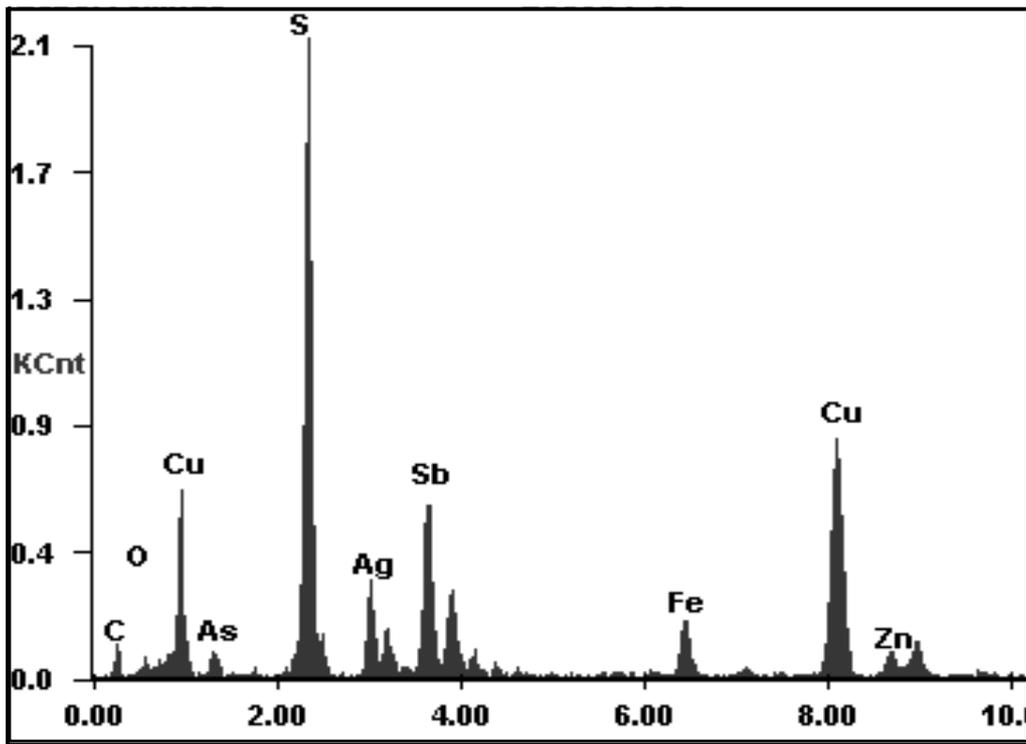


FIGURA 3. Espectro característico de tetradrita.

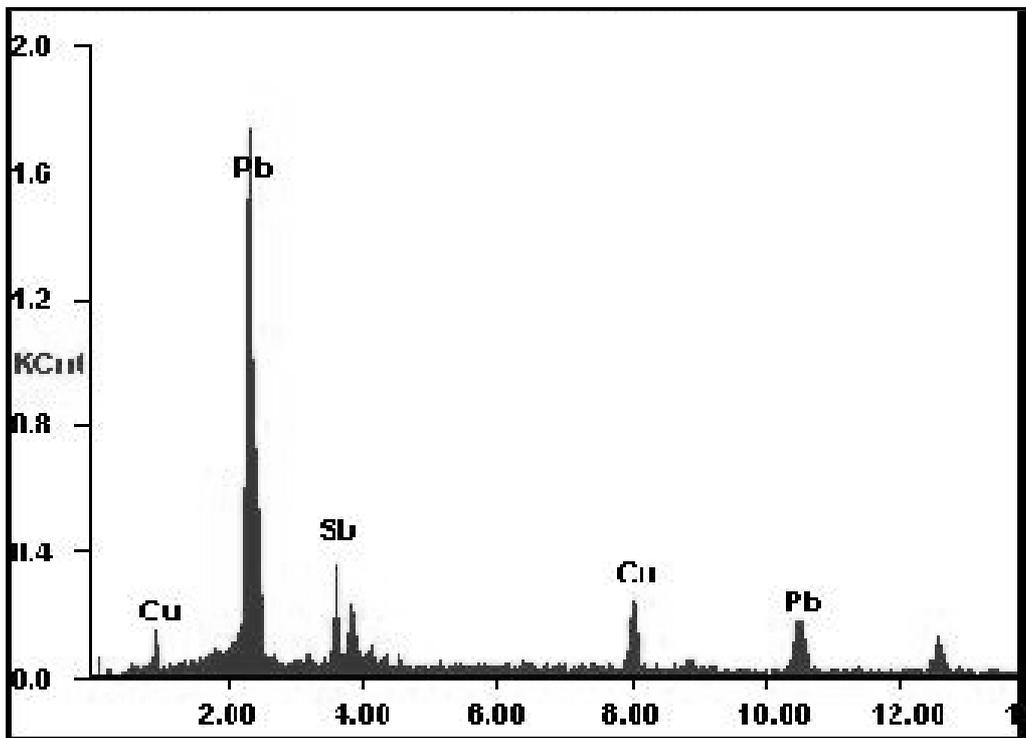


FIGURA 4. Espectro característico de Boulangerita.

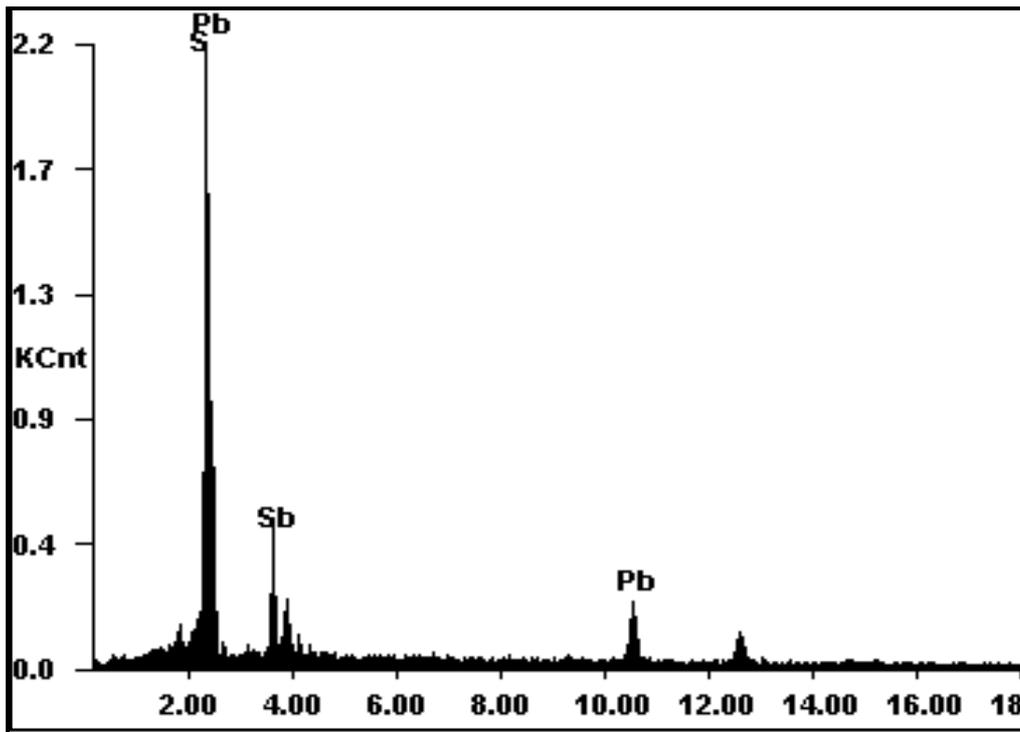


FIGURA 5. Espectro característico de jamesonita.

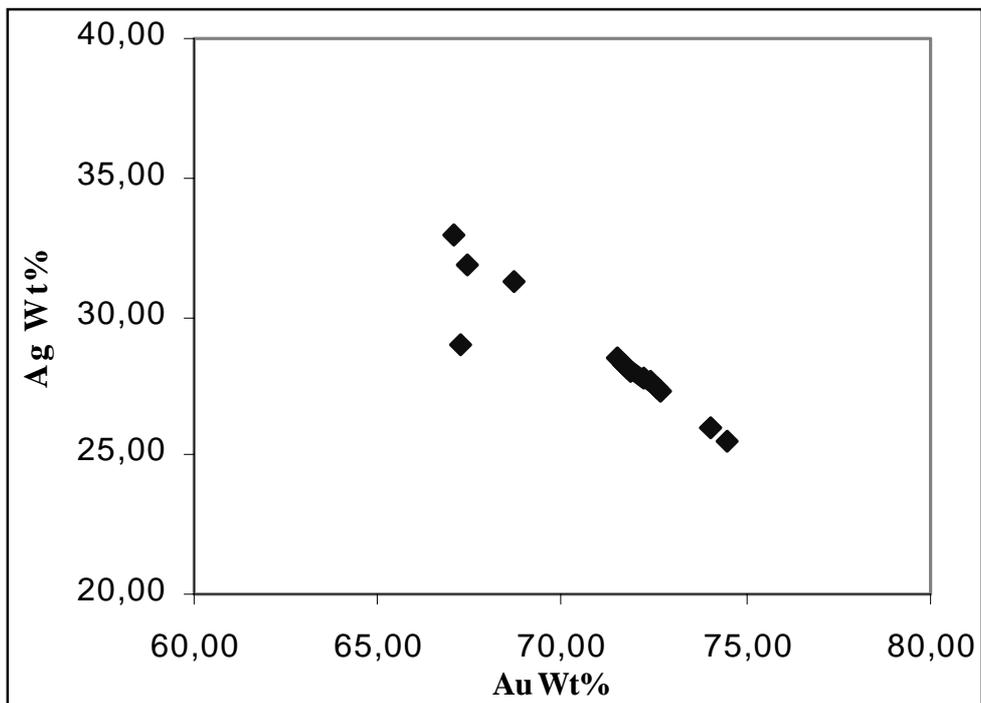


FIGURA 6. Relación Au/Ag para los granos de oro.

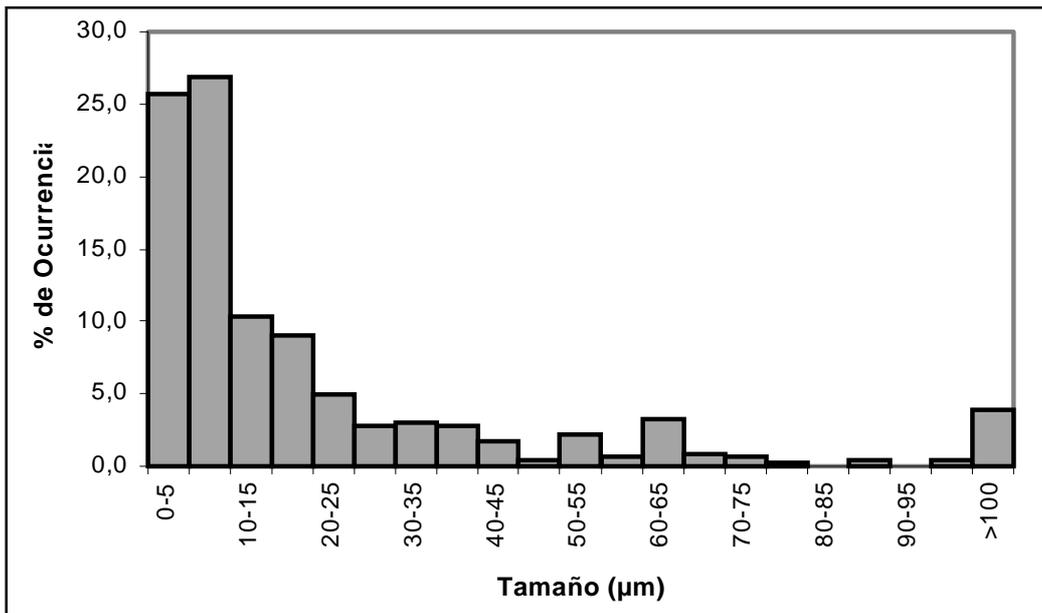


FIGURA 7. Distribución de tamaños de los granos de oro.

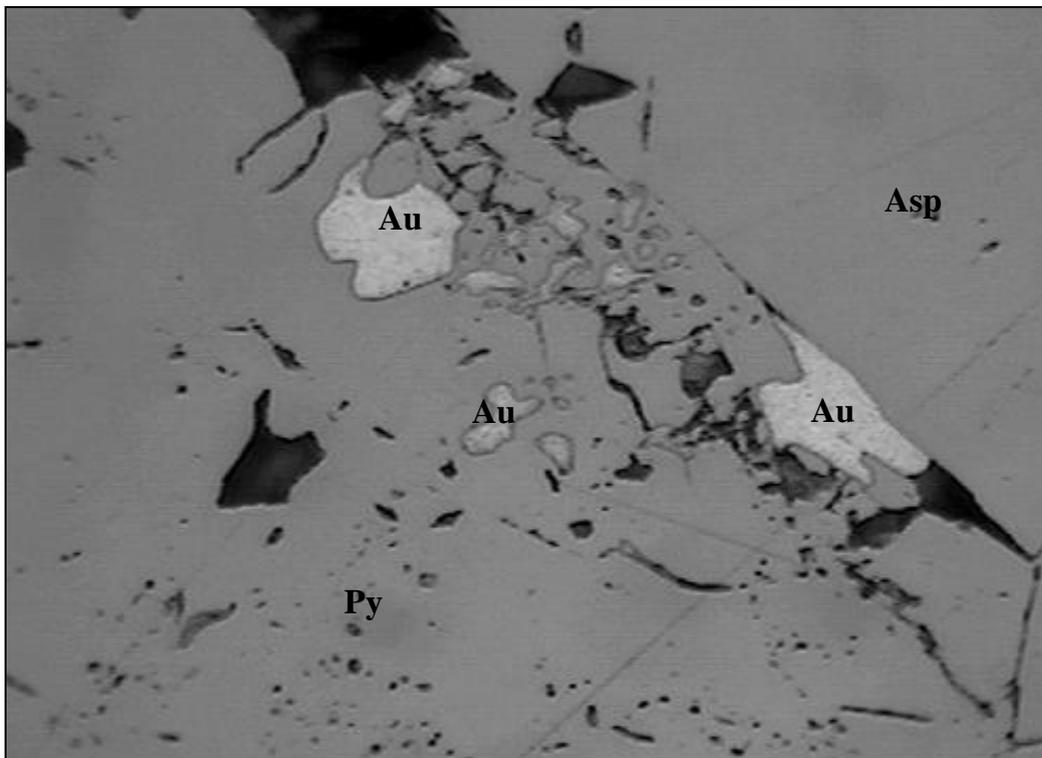


FIGURA 8. Granos de oro incluidos en pirita, asociados a fracturas e intercrecidos con arsenopirita.

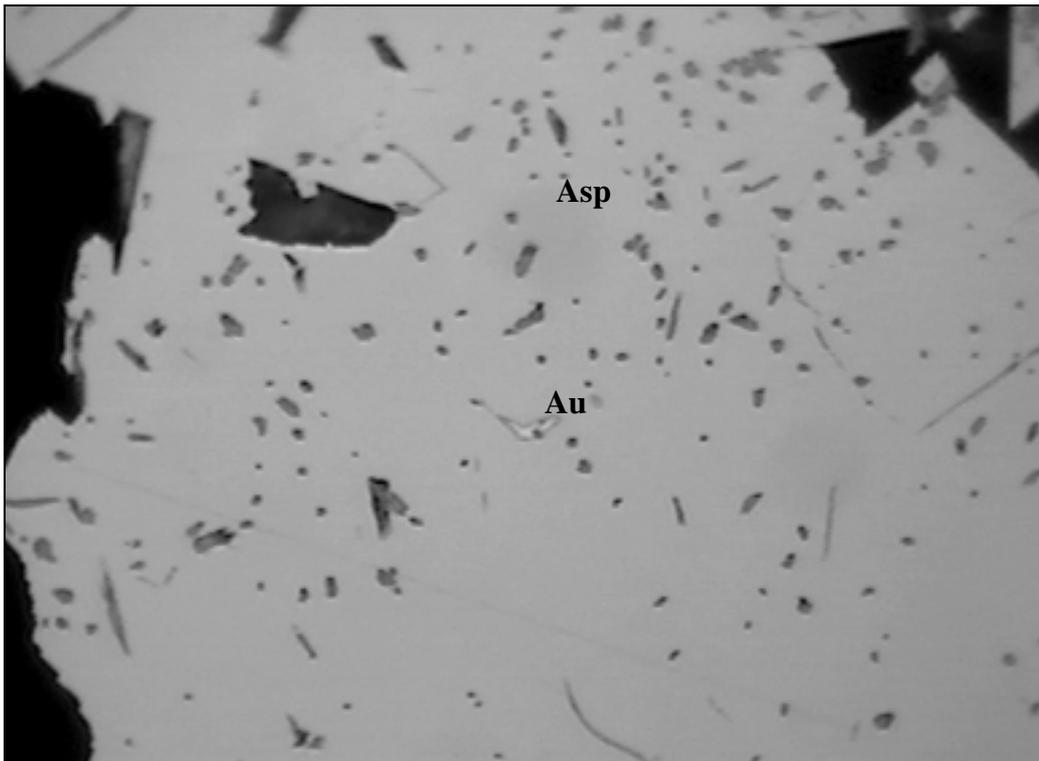


FIGURA 9. Granos de oro incluidos en arsenopirita.

encontraron una serie de fases minerales donde los elementos constituyentes comunes son Pb, As y S y con proporciones variables de Fe, Cu, Ag y Sb, siendo estas fases definidas como sulfosales pertenecientes a una serie de reemplazamiento con aumentos en el contenido de Pb.

Para los granos de oro se obtuvo la relación Au/Ag con base en los análisis microquímicos realizados por medio de SEM/EDX. La FIGURA 6 muestra la relación entre el porcentaje en peso de Au y el porcentaje en peso Ag. En él se puede observar que la relación Au/Ag es en promedio de 72/28. De acuerdo al contenido de plata, el oro encontrado puede ser clasificado como electrum bajo en plata.

#### ***Granulometría y asociaciones del oro.***

La FIGURA 7 muestra la distribución de tamaños a partir de su diámetro, donde se puede observar que:

- ◆ El 80% de los granos de oro es menor de 30 $\mu$ m, mientras que el 96% presenta tamaños por debajo de 70 $\mu$ m.

- ◆ El 27% de los granos varía entre 5 $\mu$ m y 10 $\mu$ m y un 26% se encuentra por debajo de 5 $\mu$ m.

Los granos de oro se presentan asociados a otros minerales, principalmente como pequeñas inclusiones en pirita (50%) (FIGURA 8) y arsenopirita (9%) (FIGURA 9) o intercrecidos con otras fases (22%) y, en menor proporción, rellenando fracturas en otros minerales (9%); adicionalmente, el oro también se encuentra como inclusiones en esfalerita (5%), galena (1.7%) y tetraedrita (~1%).

Con el fin de mostrar la relación entre los tamaños de los granos de oro y sus asociaciones, se elaboró el siguiente diagrama (FIGURA 10):

De este histograma se puede constatar que los granos de oro con tamaños menores a 10 $\mu$ m se encuentran principalmente incluidos en pirita (36%) y en arsenopirita (6,3%); en menor proporción, se presentan intercrecidos con otros minerales (5,2%) y rellenando fracturas (3,5%).

#### **DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES**

A partir de los resultados anteriormente presentados se puede concluir que el depósito de la mina de oro El

Zancudo es caracterizado como refractario desde el punto de vista tanto físico como químico. De acuerdo con lo expresado por Vaughan (2004) y Gasparrini (1993), menas de oro presentando altos niveles de inclusiones finas en sulfuros (por debajo de  $10\mu\text{m}$ ), pueden ser consideradas como refractarias, el cual es el caso de la mena de El Zancudo, donde la refractariedad física se evidencia debido a que la gran mayoría de los granos de oro (60%), se encuentran como inclusiones finas ( $< 10\mu\text{m}$ ) en pirita y arsenopirita, los cuales son considerados como minerales poco reactivos al cianuro (Gasparrini, 1993, Marsden & House, 1992). De esta forma, se requeriría de condiciones más agresivas para la liberación del oro a partir de su matriz sulfurosa, como es el caso de alternativas mediante tratamiento oxidante, tal como tostación, oxidación biológica o por presión, entre otras, posibilitando de esta forma que éste sea alcanzado por las soluciones lixiviantes, minimizando los costos que implicaría otra alternativas que sería, para el caso, un alto grado de molienda para llegar a exponer físicamente los granos de oro. De otro lado, ha sido reportado que los contenidos de plata en los granos de oro (en promedio 28 Wt.% en el mineral de El Zancudo), pueden hacer que durante (dependiendo del tiempo de residencia del mineral en el proceso) o después de la operación de molienda se genere una capa de sulfuro de plata secundario, convirtiéndose en una barrera

impermeable al cianuro (Gasparrini, 1993). Se ha reportado que estas capas pueden ser de varias micras de espesor y que pueden atraer a otras partículas más finas, ya sea de sulfuros o silicatos, aumentando la impermeabilidad de éstas; además, en el caso de que partículas muy finas de silicatos se adhieran, pueden hacer que la partícula de oro tome un carácter no metálico, lo cual afectaría su separación durante un eventual proceso de flotación, al alterar sus propiedades superficiales (Gasparrini, 1993).

Desde el punto de vista químico, la presencia de minerales consumidores de oxígeno y cianuro también contribuyen a la refractariedad de la mena. Sulfosales tales como la tetraedrita, boulangerita y jamesonita son reconocidas como fases cianicidas (Marsden & House, 1992 y Gasparrini, 1993); de igual forma, las sulfosales de antimonio pueden reaccionar con el cianuro para formar compuestos complejos que retardan o previenen la disolución del oro, debido a la formación de tioantimonitos y azufre, los cuales pueden adsorberse sobre la superficie del oro, inhibiendo su disolución (Gasparrini 1993). La arsenopirita, el mineral más abundante de la mena, a pesar de ser un mineral muy estable en soluciones de cianuro (Gasparrini, 1993), puede formar arsenatos ( $\text{AsO}_3^-$ ), compitiendo con el cianuro por el oxígeno disponible en el sistema (Tuovinen *et al.*, 1994), neutralizándolo a

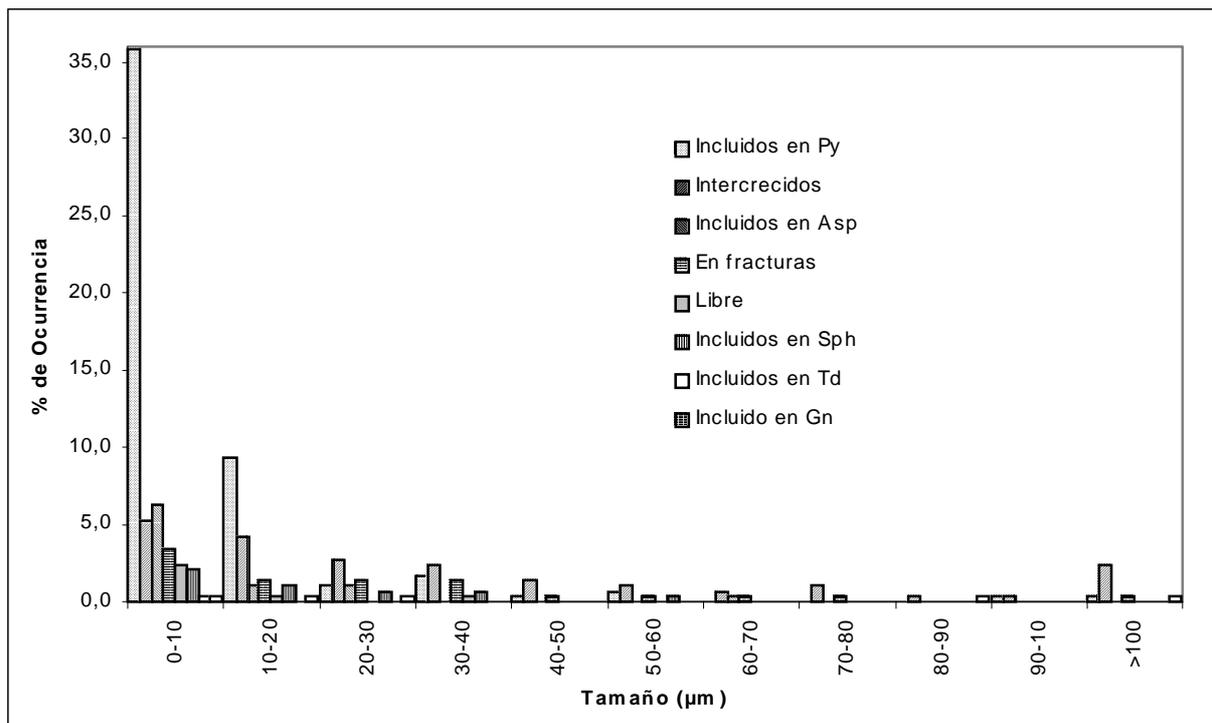


FIGURA 10. Relación entre tamaños y asociaciones de los granos de oro

través de la formación de sulfato ferroso y disminuyendo la velocidad de disolución del proceso. La pirita es un mineral con un alto potencial de reducción estándar y en consecuencia no reacciona fuertemente bajo las condiciones típicas de oxidación en un proceso de lixiviación con cianuro (MMS, 1999), a pesar de que se presenta en proporciones considerables en el depósito, no es considerada como un mineral que pueda ocasionar inconvenientes a este nivel en el proceso. La pirrotita, aunque se presenta en pequeñas proporciones en el depósito, es uno de los sulfuros más reactivos en soluciones de cianuro, consumiendo altas cantidades, tanto de cianuro como de oxígeno, produciendo iones hidroxil que pueden ser adsorbidos sobre la superficie del oro, reduciendo su tasa de disolución (Marsden & House 1992).

La presencia de minerales finos tales como sericita y sausruta, así como los productos de oxidación natural de la pirita, pueden generar películas que se adsorben sobre los granos de oro durante el proceso de cianuración, generando un fenómeno de preg-robbing, impidiendo óptimas recuperaciones (Gasparrini 1993, Yannopoulos 1991 y Marsden & House 1992); dado que la presencia de sericita y sausruta en el depósito es notable, se recomienda que estos minerales sean eliminados antes del proceso de cianuración por medio de un proceso de flotación selectiva con el fin de evitar recuperaciones bajas.

Por lo expuesto anteriormente, se puede ver que el comportamiento refractario de un depósito obedece a una serie de factores, tanto físicos como químicos, por lo que el grado de refractariedad dependerá del número y severidad de cada uno de éstos, los cuales, estudiados en conjunto, pueden proveer bases importantes para el desarrollo satisfactorio de un proceso de recuperación.

Por último, cabe anotar que el hecho de que una mena pueda ser considerada o no como refractaria, dependerá fundamentalmente del alcance del proceso en sí, por lo que las anotaciones aquí consignadas se consideran, de una forma general, para un proceso convencional de extracción.

## AGRADECIMIENTOS

A Colciencias y el proyecto “Biooxidación de sulfuros complejos, mediada por bacterias, como pretratamiento para el mejoramiento de la extracción de valiosos, vía lixiviación con cianuro de sodio; mina El Zancudo, Titiribí, Antioquia”.

A la empresa C.DI. S.A.

Al Laboratorio de Petrografía del Carbón de la Universidad Nacional, Sede Medellín

Al Laboratorio de Física del Plasma de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales.

## REFERENCIAS

Barr, D., Birak, D., McCord, T., and O'niel, G. (1987). The various forms of refractoriness in gold ores. In: Process Mineralogy VII: applications to mineral beneficiation technology and mineral exploration, with special emphasis on disseminated carbonaceous gold ores. Vassiliou, A., Hausen, D., and Carbon, D. Ed, Vol. 7. Denver.

Cabri, L. (1987). The mineralogy of precious metals: new developments and metallurgical implications. The Canadian Mineralogist, Vol. 25, pp. 1-7.

Chen, T. T., Cabri, L. J., and Dutrizac, J. (2002). Characterizing gold in refractory sulfide gold ores and residues. JOM, Vol. 54, No 12, pp. 20-25.

Gallego, A., y Zapata, D. (2003). Caracterización mineralógica como soporte para la implementación y mejoramiento del proceso de extracción de oro. Mina de oro El Zancudo, Titiribí, Antioquia. Tesis de grado. Ingeniería Geológica. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 152p.

Gasparrini, C. (1993). Gold and other precious metals: from ore to market. Springer-Verlag, Hong Kong, 400p.

Gaviria, A. (1998). Estudio de menas auríferas del occidente colombiano: influencia de las características mineralógicas en el proceso extractivo. Medellín. Trabajo de investigación (Ingeniero Químico). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, 140p.

González, H. (2000). Mapa geológico del departamento de Antioquia: geología, recursos minerales y amenazas potenciales, Escala 1:400000. INGEOMINAS. Medellín.

Grosee, E. (1926). Estudio geológico del Terciario Carbonífero de Antioquia en la parte occidental de la cordillera Central de Colombia entre el río Arma y Sacaoyal. (Ernest Vohsen Ed) Berlín: Dietrich, 374p.

Hutchins S., Brierley J., and Brierley, C. (1987). Microbial pretreatment of refractory sulfide and carbonaceous gold

ores. In: Process Mineralogy VII : applications to mineral beneficiation technology and mineral exploration, with special emphasis on disseminated carbonaceous gold ores / Vassiliou, A., Hausen, D., and Carbon, D. Ed, Vol. 7, Denver.

Marsden, J., and House, I. (1992). The chemistry of gold extraction. Vol. 2, (Ellis Horwood, Ed), United Kingdom, 420p.

Multi Mix Systems Pty Ltd. (1992). Treatment of Ores Containing Reactive Iron Sulphides. Technical Bulletin 1. Australia, 7p.

Pérez, J., Ramírez J. (1998). Biolixiviación de un mineral refractario procedente de la mina el zancudo (Titiribí, Antioquia). Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 112p.

Ingeominas. (1987). Publicaciones Geológicas Especiales del Ingeominas : Recursos Minerales de Colombia / Ingeominas, No 1. Tomo 2. Bogotá.

Ramdohr, P. (1980). The ore minerals and their intergrowths. Pergamon Press. Ed, 2 ed., Vol. 2, Berlin, 510p.

Restrepo, J. (1986). Metamorfismo en el sector norte de la cordillera Central de Colombia. Medellín. Trabajo presentado para promoción a profesor titular (Ingeniero Geólogo). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, 276p.

Restrepo, V. (1888). Estudio sobre las minas de oro y plata. Silvestre y Compañía. 2 Ed. Bogotá, 334p.

Tuovinen, O. T., Bigham, J., Hallberg, K., García, Jr. & Lindstrom, E. (1994). Oxidative dissolution of arsenopyrite by mesophilic and moderately thermophilic acidophiles. Applied. Environmental Microbiology. No 60, 7p.

Vaughan, J. P. (2004). The Process Mineralogy of Gold: The Classification of Ore Types. JOM, July. Gold process mineralogy. Part I, 12p.

Yannopoulos, J. (1991). The extractive metallurgy of gold. (Van Nostrand Reinhold. Ed.), Estados Unidos, 160p.

---

Trabajo recibido: febrero 1 de 2005

Trabajo aceptado: abril 22 de 2005