

Figura 7-C

FIGURA 7 A, B y C. Curvas granulométricas de frecuencias (a) y sumatoria (b) correspondientes a las fracciones dispersas de las muestras Az-6, Az-12 y Az-14.

## BIBLIOGRAFÍA

- ARRIOTUA, M.I.: *Análisis cuantitativo y cualitativo por difracción de polvos cristalinos*, Escuela de Cristalografía de GEC, 1996, pp.99-112.
- BRINDLEY, G.W. y G. BROWN: *Crystal Structures of Clay Minerals and their X-ray Identification: Monograph No.5*, Mineralogical Society, London, 1980, 320 pp.
- DATSKO, J.: *Materials Selection for Design Manufacturing Theory and Practice*, New York, Editorial Marcel Dekker, 1997, 376 pp.
- DEHLINGER, U. y A. KOCHENDORFER: *Linienverbreiterung von verformten Metallen*, Z. Krist.(A), 101, 1939, pp. 134-141.
- GLEGG, W.: *Crystal structure*, Editorial Oxford University Press, Oxford, 1998, 840 pp.
- GRIFFEN, D. T.: *Silicate crystal chemistry*, Editorial: McGraw-Hill, New York, 1997, 647 pp.
- GRIM, R.E.: *The history of the development of clay mineralogy*, Clays and Clay Minerals 36, 1988, pp. 424-434.
- HOWARD, S.A. y PRESTON, K. D.: "Profile fitting of powder diffraction patterns", cap.8 en *Modern powders diffraction*, Bish and Post Eds.; "The Mineralogical Society of America", *Reviews in Mineralogy*, vol. 20, Washington, DC., 1997, pp.1, 2-13.
- HINCLEY, D.N.: "Variability in 'crystallinity' values among the kaolin deposits of the coastal plain of Georgia and South Carolina", en *Clays and Clay Minerals*, Pergamon Press, Oxford, 11, 1963, pp. 229-235.
- KRAUSKOPF, K.B.: *Introduction to geochemistry*, Editorial: McGraw-Hill, New York, 1995, 647 pp.
- KOCHENDORFER, A.: *Die Bestimmung von Teilchengrossen und Gitterverzerrungen in kristallinen Stoffen aus der Breite der Röntgenlinien*, Z. Krist(A) 105, 1944, pp. 393-408.
- MURRAY, H.H., y S.C. LYONS: "Degree of crystal perfection of caolinite", en *Clays and Clay Minerals*, 4, 1956, pp. 31-40.
- QUINTANA PUCHOL, R.: "Untersuchungen zur Phasenanalyse der nichtkarbinatischen Anteile von Mergel sowie von Kaolinen der Region Cienfuegos in Mittelcuba", Tesis Doctoral, Universidad de Greifswald, 1980, 187 pp.
- \_\_\_\_\_: "Metodología de investigación de lateritas con alto contenido de minerales arcillosos", en Reporte de Investigación del Instituto de Geología y Paleontología, Academia de Ciencias de Cuba, La Habana, No. 1, 1984, 15 pp.
- \_\_\_\_\_: "Determinación de la distribución granulométrica de las fracciones <50 μm mediante un método analítico de valoración de los datos experimentales del proceso de sedimentación", en *Revista Cubana de Química*, vol. 1, no. 4, 1985 pp. 53-57.
- STOCH, L. y W. SIKORA: "Okreslenie stopnia uporządkowania struktury mineralow grupy kaolinitu", en *Spaw. Z Pos. Komisji Naukowych Oddz, PAN w Krakowie Lipiec-Grudzien*, 1966, pp. 651-654.
- TSIRELSON, V. G., et al.: *Electron density and bonding incrystal: Principles, theory, and X-ray diffraction experiments in solid-state physics and chemistry*, Institute of Physics Publication, Bristol (UK), 1996, 517 pp.

# Caracterización mineralógica y química de desechos mineros derivados de yacimientos de tipo skarn y epitermal en el Estado de Hidalgo, México

## Minerological and Chemical Characterization of Mining Wastes Derived from Skarn and Epithermal Deposits in Hidalgo State, Mexico

R. Moreno Tovar<sup>1</sup>  
M. Yta<sup>2</sup>  
M. Viladevall Solé<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México.  
<sup>2</sup> Consejo de Recursos Minerales, Pachuca, Hidalgo, México.  
<sup>3</sup> Departamento de Geoquímica, Facultad de Geología, Universidad de Barcelona.

**RESUMEN:** Los desechos mineros derivados del yacimiento de tipo skarn cálcico de paragénesis Zn-Pb-Ag(Cu) se localizan al noroeste del Estado de Hidalgo, a 95 km de la Ciudad de Pachuca, los de tipo epitermal de metales preciosos de paragénesis Ag-Au(Pb-Zn) se sitúan en la ciudad del mismo nombre.

La mineralogía reconocida en los desechos mineros de tipo skarn está compuesta por pirita, marcasita, pirrotita, calcopirita, galena, esfalerita, magnetita y minerales transparentes de textura acicular típica derivada de metasomatismo. La de tipo epitermal es sencilla, contiene escasa pirita, magnetita, hematita, esfalerita y titanita asociadas a calcita, silicatos y abundante cuarzo. El contenido de elementos mayores es contrastante entre ambos tipos de desechos mineros, el CaO y FeO es más alto en los de tipo skarn, reflejo de los calcosilicatos, mientras que el alto contenido de SiO<sub>2</sub> caracteriza a los de tipo epitermal. Los contenidos elementos traza en ppm también son contrastantes como el arsénico (14000 a 38000), zinc (3850 a 31800), plomo (1480 a 16154), antimonio (350 a 3000) y wolframio (120 a 330), mientras que en el tipo epitermal no alcanzan la centena de ppm excepto zinc, plomo y manganeso. La mineralogía simple, escasa pirita y bajo oxidación en el tipo epitermal, permiten interpretar un bajo drenaje ácido, su alto contenido en sílice y bajo en elementos traza lo sitúan como material para la industria del vidrio y cerámica. A pesar de la compleja mineralogía del tipo skarn, los valores altos en elementos traza, plomo, y zinc son importantes para su retratamiento metalúrgico.

**Palabras claves:** Desechos mineros, medio ambiente, contaminación ambiental, metalurgia, yacimientos de skarn, yacimientos epitermales, mineralogía, geoquímica ambiental.

**ABSTRACT:** Mining wastes derived from Zn-Pb-Ag (Cu) paragenesis calcareous skarn deposits are located at NW Hidalgo State to 95 km from Pachuca City, and those of epithermal type of precious metals from Ag-Au- (Pb-Zn) paragenesis are placed in the same city.

The known mineralogy of these mining wastes of skarn type is composed by pyrite, marcasite, pirrotite, chalcopyrite, galena, sphalerite, magnetite and translucent minerals with typical acicular texture derived from metasomatism. Those of epithermal type is simple, having rarely pyrite, magnetite, hematite, sphalerite and titanite, associated to calcite, silicates and abundant quartz. The contents of major elements is contractive between both types of mining wastes, CaO and FeO are higher in the skarn type, reflecting calcosilicates, whereas the high content of SiO<sub>2</sub> characterize epithermal type. The contents of trace elements in ppm are also contractive like arsenic (14000 to 38000), zinc (3850 to 31800), lead (1480 to 16154), antimony (350 to 3000) and wolfram (120 to 330), whereas epithermal type does not reach the ppm hundred except zinc, lead and manganese. The simple mineralogy, rarely pyrite and low oxidation in the epithermal type permit to interpret a low acid drainage, its high content of silica and low content of trace elements situated it as a material for glass and ceramic industry. Without taking into account the complex mineralogy of skarn type, the high values of trace elements, lead and zinc are important for its metallurgical re-treatment.

**Keys words:** Mining waste, environment, environmental pollution, metallurgy, skarn deposits, epithermal deposits, mineralogy, environmental geochemistry.

## INTRODUCCIÓN

La contaminación de la atmósfera, los suelos, los acuíferos, así como la acumulación de grandes volúmenes de desechos industriales y municipales es, entre otros, un problema que día a día se agudiza por el indiscriminado uso y necesidad de recursos naturales renovables y no renovables. Estos últimos constituyen el tema que nos ocupa por representar un gran problema desde su depósito hasta su almacenamiento posterior al proceso de industrialización, y cuyos residuos genera principalmente la industria minera. La minería es una de las actividades económicas de mayor tradición en México y data desde hace cinco siglos.

Recientemente, en México se han desarrollado condiciones de seguridad jurídica y reglas claras por medio de acciones en materia de protección ambiental (SEDESOL, 1994). Estas acciones comprenden proyectos enmarcados en el Convenio de Concertación en Materia Ecológica para la Industria Minera Nacional, entre las cuales se pueden citar las normas oficiales mexicanas que establecen:

- Niveles máximos permisibles de emisiones a la atmósfera de partículas y bióxido de azufre en el beneficio de minerales metálicos no ferrosos (cobre, zinc).
- Selección, proyecto, construcción y operación de presas de desechos mineros.
- Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos recepto-

res, provenientes de la industria de extracción y beneficio de materiales metálicos, entre otras.

Los desechos mineros no son solamente desechos contaminantes, también pueden constituir reservas de materiales con contenidos de elementos metálicos y no metálicos técnicamente susceptibles de ser recuperados con beneficio económico. Su tratamiento permite contribuir a la remediación del impacto ecológico negativo que constituyen por sí mismos, ya que estos desechos mineros contienen elementos químicos que se consideran nocivos pero que al mismo tiempo pueden estar en cantidades económicas como plomo, zinc, cobre, plata, cadmio y, en mínimas cantidades, oro.

Este estudio pretende optimizar y sistematizar un método de caracterización para un proceso de recuperación metalúrgica, o bien la determinación de su posible utilización como material industrial alterno.

## METODOLOGÍA DE ESTUDIO

Para este trabajo, se escogieron dos tipos de desechos mineros de los yacimientos más comunes en México, que son los que han generado el mayor volumen en el país. El primero es de tipo *skarn* Zn-Pb-Ag(Cu) en Zimapán, Hidalgo, y el segundo es de tipo *epitermal* de metales preciosos bajos en sulfuros Ag-Au(Pb-Zn) en Pachuca Hidalgo (Figura. 1).

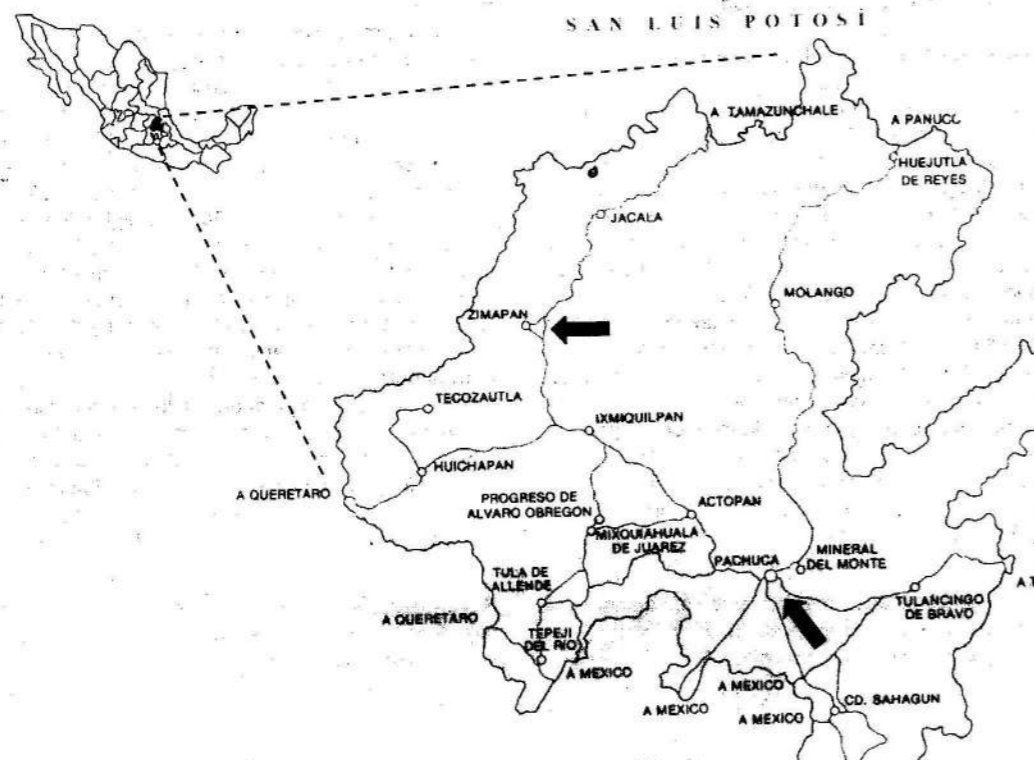


FIGURA 1. Plano de localización de los distritos mineros de Zimapán y Pachuca-Real del Monte, Hidalgo.

Se trabajaron 24 muestras: 16 de desecho minero de yacimiento tipo *skarn* y 8 de tipo *epitermal*, representativas de diferentes niveles de los depósitos de desechos mineros. Estas fueron colectadas aleatoriamente para determinar por una parte sus características mineralógicas, texturales y químicas, y por otra parte optimizar la metodología.

Por medio de la microscopía óptica de polarización (luz transmitida), se realizó la observación de la estructura interna de los granos transparentes (no metálicos) y su relación textural con los granos opacos (metálicos) en resina. Con esta misma técnica, pero con luz reflejada se definió la mineralogía metálica y su relación con los minerales transparentes en secciones pulidas.

Para los análisis químicos, se obtuvieron el mismo número de muestras, y se realizaron en dos etapas, la primera por elementos mayores en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, y la segunda por elementos menores en la Universidad de Barcelona.

## DESECHOS MINEROS

Un desecho minero es derivado de un material denominado mineral el cual consta de mena (agregado de minerales susceptible de ser minado y beneficiado con un rendimiento económico), y de ganga (minerales con elementos sin valor económico aparente). Estos desechos mineros son el resultado de la trituración y de los procesos metalúrgicos (amalgamación, flotación, cianuración, etc.) a los cuales se sometió el mineral y del cual se han recuperado cantidades económicas de elementos como plata, plomo, zinc, cobre, oro, principalmente cuando se trata de depósitos polimetálicos.

La granulometría de los desechos mineros es controlada por la finura de la molienda que es aplicada para liberar la mena de la ganga. La mayor parte de los desechos mineros caen en el rango de tamaño de clasificación de partícula, usada en geología para areniscas (2-0.06 mm o 2 000-63  $\mu$ m) o limolitas (0.06-0.004 mm o 63-4  $\mu$ m) (Jambor, 1994). Estos siempre contienen pequeñas cantidades de elementos económicos, dado que los granos que conforman los desechos mineros están compuestos de fases minerales de tamaño variable que pudieron no haber sido atacados por los reactivos y que por la molienda no se logró la liberación de los minerales contenedores de los elementos económicos.

## IMPACTO DE UN DESECHO MINERO

El impacto de tipo ambiental que causan los desechos mineros es a nivel local primordialmente, ya que contienen sustancias (reactivos) que han sido utilizadas para el tratamiento metalúrgico de recuperación y elementos en estado soluble liberados del mineral (a partir de sulfuros, sulfosales, carbonatos y óxidos, entre otros).

Dichas sustancias, que se encuentran en las presas o embalses, se percolan y asocian a elementos que pueden ser nocivos para la salud, tales como: plomo, arsénico, cadmio, níquel, antimonio, entre otros, en estado soluble o no, y por ende producen la contaminación del agua (ríos, lagunas, norias, acuíferos, etc.). Esta agua es consumida por la población (riego), sea por medio de ingestión de vegetales, semillas o frutas regadas con esta; por el consumo de carne de ganado que ha pastado en ese tipo de ambiente, o bien, simplemente, por beber el agua. Estos son algunos de los factores y acciones más comunes que se realizan en zonas aledañas a minas y presas de desechos mineros.

Un estudio para caracterizar la mineralogía del desecho minero, implica la determinación de elementos nocivos (contaminantes), que puedan ser reemplazados o controlados en su uso. Paralelamente a lo anterior, surge la definición del potencial económico de esos desechos para un nuevo proceso de recuperación metalúrgica, o bien la determinación de su posible utilización como material industrial alterno. Ej.: Los desechos mineros que contienen un gran porcentaje de sílice, podrían tener una aplicación como abrasivos, o como material de construcción, y los que contienen silicatos originados por metamorfismo de contacto podrían tener aplicación en la industria de la cerámica y refractaria.

Si consideramos los grandes volúmenes de desechos mineros producidos por la industria minera en el país, es factible que algunos de ellos puedan contener valores económicos en cobre, plomo, zinc, plata y oro. Por lo que su caracterización podría ser de interés económico al conocer la concentración de los elementos, la mineralogía y las relaciones texturales bajo las cuales se presentan las fases minerales. Puede proponerse un adecuado retratamiento para recuperarlos y su resultado podría ser de rendimiento económico importante.

## ORIGEN DE LOS DESECHOS MINEROS EN MÉXICO

En México, los yacimientos económicos se encuentran distribuidos a través del país bajo un patrón de franjas metálicas de dirección NW-SE (Figura 2), subparalelas a la paleotrinchera de México.

De manera general, son tres los tipos de yacimientos que han generado el gran volumen de desechos mineros depositados en la franjas. Estas incluyen yacimientos relacionados al magmatismo tardi-laramídico (base del terciario): los tipo pórfido de paragénesis Cu-Mo y los de tipo *skarn* de paragénesis Zn-Pb-Ag(Cu); los epitermales relacionados a vulcanismo terciario post-laramídico (etapa de cuencas y sierras) de paragénesis Pb-Zn-Ag y Au-Ag. Estos tipos de yacimientos se pueden encontrar superpuestos por la migración de los arcos magmático-volcánicos hacia el Este, con rápida regresión hacia el Oeste (Damon *et al.*, 1981; Yta, 1992).

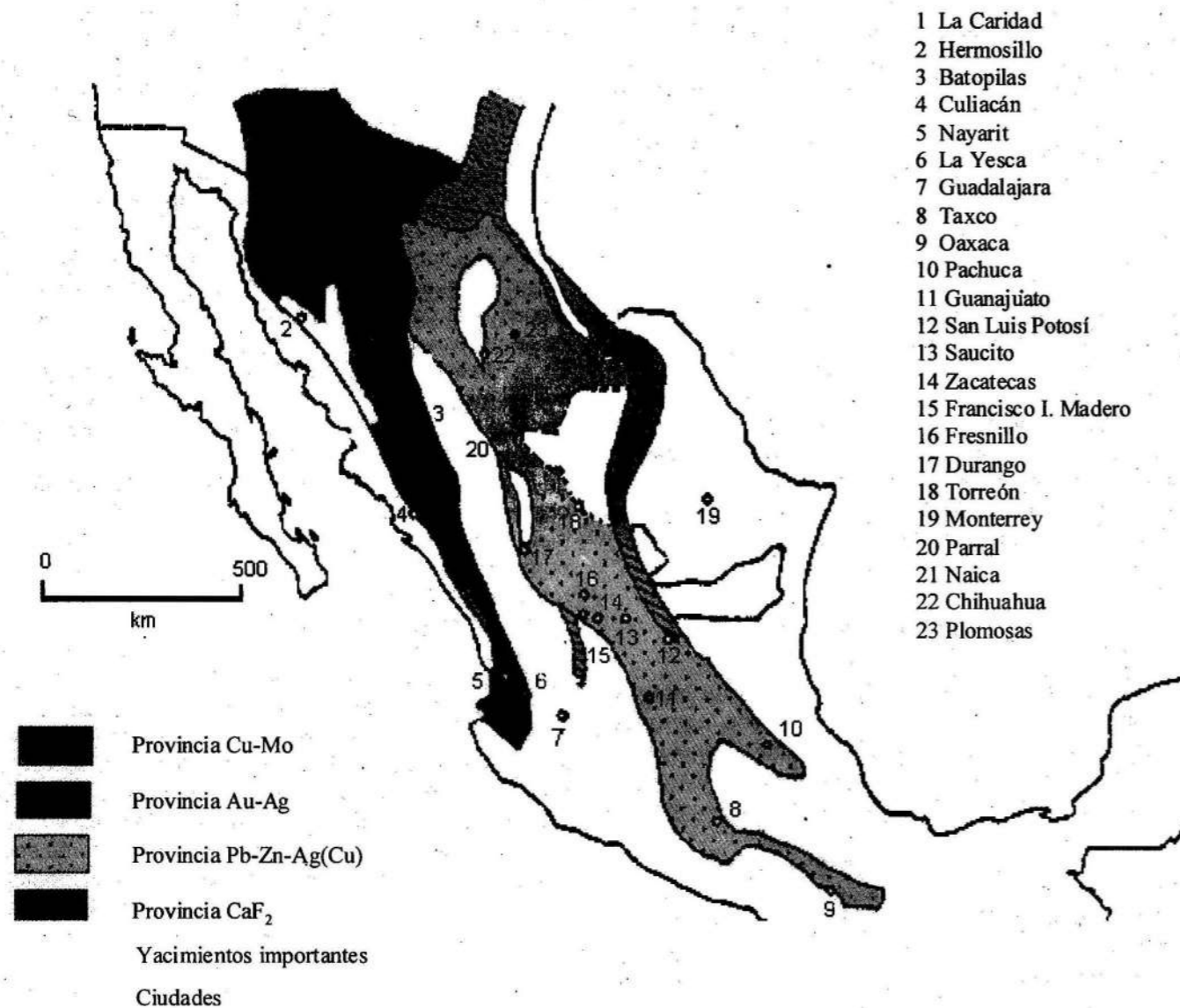


FIGURA 2. Mapa simplificado de provincias metalogénicas de México (Damon *et al.*, 1981; Yta, 1992).

Existen modelos tectónicos más sofisticados que tratan de explicar esta evolución geodinámica, y que pueden ligar los eventos magmáticos de tipo cordillerano al continente. Al fundamentar entre diferentes interpretaciones, una vergencia hacia el Este durante la fase principal de deformación laramídica, y una segunda vergencia hacia el Oeste, la cual sería responsable del magmatismo del arco, se pueden explicar las diferencias del magmatismo en relación a las edades de cada evento (Salinas, 1994).

Metalogénicamente, esto explicaría la posición subparalela de las franjas, superposición de mineralización y diferencias de paragénesis minerales en los yacimientos. Estas franjas metálicas conocidas como provincias metalogénicas se caracterizan por mineralogías específicas en sus yacimientos. De estas provincias, la correspondiente a la asociación Cu-Mo y Zn-Pb-Ag(Cu) han sido las que preferentemente han aportado los yacimientos más grandes y económicos de México.

### CARACTERÍSTICAS MEGASCÓPICAS DE LAS MUESTRAS DE DESECHOS MINEROS

#### • Tipo skarn

El desecho minero varía en coloración de gris claro-oscuro (RM40), café rojizo a rojo. Su textura en términos generales es arenosa. Se observa que la coloración más oscura (RM20), está relacionada a la proporción de minerales metálicos, la cual es más alta. Megascópicamente, los metálicos corresponden a pirita y calcopirita (RM20, RM28 y RM31). Las zonas más rojizas se caracterizan por una oxidación de tipo hematítico (RM6 y RM32), donde es muy baja o casi nula la presencia de minerales metálicos.

#### • Tipo epitermal

Este tipo de desecho minero presenta colores que van del crema (RM12, RM13 y RM15), al ocre claro (RM14 y RM 16), con textura de arenosa muy fina, talcosa a

arcillosa. La presencia de minerales metálicos es muy baja. El color ocre está relacionado a una oxidación de tipo limonítico.

### MICROSCOPIA ÓPTICA DE POLARIZACIÓN (LUZ TRANSMITIDA EN GRANOS EN RESINA)

#### • Tipo skarn

Seis tipos de niveles fueron caracterizados (Figura 3): el primero (RM6), presenta un mayor porcentaje de granos opacos con respecto a los granos transparentes. Con una morfología variando de anhedral (opacos) a euhedral (transparentes) y una granulometría homogénea. Se observa intercrecimiento de opacos en transparentes, los opacos presentan un alto grado de oxidación.

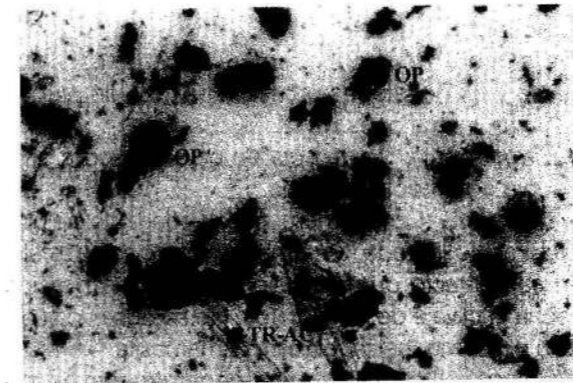


Figura 3. Fotomicrografía al MOP-LT, muestra la proporción de granos opacos (op) y transparentes (tr), con inclusiones de op en tr de textura acicular (ac), del jal de tipo skarn. Objetivo 10x, nicoles paralelos, campo horizontal de la fotografía 0.98 mm

El segundo nivel (RM20), presenta un gran contenido de opacos. Granos de morfología variando de anhedral a subhedral, la granulometría es homogénea, donde el contenido de opacos es significativamente elevado. Se observa un alto grado de liberación de transparentes y opacos. La presencia de inclusiones de opacos en transparentes es escasa. Es característica la textura de intercrecimiento intrincado de transparentes y opacos, además de inclusiones de opacos en clivajes de los transparentes.

El tercer nivel muestreado (RM28), presenta una granulometría relativamente homogénea con una morfología de granos (opacos) totalmente anhedral ligeramente dendrítica. Mientras que los transparentes son en general subhedrales caracterizados por texturas fibrosas aciculares típicas de minerales de metasomatismo. El grado de liberación es menor con respecto a la anterior muestra. Aquí se observa un grado de oxidación ligeramente mayor que en la muestra anterior. Por las características ópticas de los minerales transparentes se definen más fases minerales, en este caso se observan dos

aciculares, una verde que corresponde a posible diópsida, una transparente y una tercera anhedral que corresponde a calcita, así como granos diminutos de óxidos de hierro. Los opacos se observan liberados e incluidos sobre fracturamiento o bien totalmente encapsulados en transparentes.

El cuarto nivel muestreado (RM31), corresponde a una granulometría totalmente heterogénea. Con morfología de subanhedral a anhedral de los granos, donde persisten aunque en menor grado los granos aciculares. Escasa presencia de opacos que se encuentran tanto liberados como incluidos en los transparentes bajo la forma de encapsulamiento total o parcialmente liberados.

En el quinto nivel muestreado (RM32), se observa una morfología de granos totalmente anhedral, de granulometría relativamente homogénea. Su grado de oxidación es el más alto de los niveles analizados, la fracción más fina corresponde a partículas oxidadas. El grado de liberación de opacos es relativamente bajo. Los opacos se encuentran bajo forma intercrecida, liberada y en inclusiones totalmente encapsuladas o bien parcialmente liberadas.

El sexto nivel analizado (RM40), es de granulometría heterogénea con escasa presencia de opacos. Sin oxidación y morfología similar al nivel RM28 que va de lo anhedral a subanhedral, donde se observa una constante presencia de fases minerales aciculares típicas de metasomatismo. Los escasos opacos se encuentran totalmente liberados, intercrecidos o encapsulados con transparentes.

#### • Tipo epitermal

En este tipo de desecho minero se caracterizaron cuatro niveles (Figura 4):

El primero (RM12), presenta una granulometría heterogénea. Los granos presentan una morfología anhedral, mostrando tres tipos de asociación, granos transparentes y opacos libres e intercrecimiento de ambos a manera de inclusiones parcialmente libres por borde o fractura e inclusiones en total encapsulamiento. El detalle muestra a los granos transparentes con un constante encostramiento de óxidos de hierro; además se observa que los opacos totalmente encapsulados son diminutos. Por otra parte, existe una textura totalmente inversa donde los opacos presentan escaso intercrecimiento de fases minerales transparentes.

El segundo nivel (RM13) analizado, presenta las mismas características en lo que se refiere a granulometría y morfología de granos; denota una oxidación ligeramente más fuerte y con mayor presencia de opacos, además de un grado ligeramente mayor de liberación entre opacos y transparentes con respecto al nivel anterior. Las relaciones texturales son las mismas y se pueden distinguir fases minerales transparentes (oxidadas) en-capsuladas totalmente en otras también transparentes. Es importante en este caso definir la composición de estas inclusiones ya que si el material se usa como

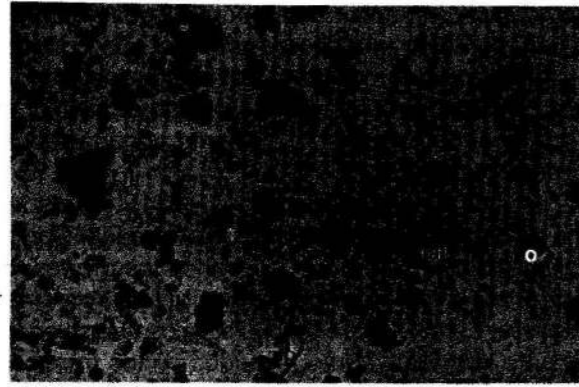


Figura 4. Fotomicrografía al MOP-LT, muestra granos opacos (op) y transparentes (tr) con un grado de liberación entre ambos, del jal de tipo epitermal. Objetivo 10x, nicoles paralelos, campo horizontal de la fotografía 0.98 mm.



FIGURA 5. Fotomicrografía al MOP-LR, muestra abundantes metálicos liberados; galena (Gl) en fracturas de pirita (Py), calcopirita (Cpy) y esfalerita (Sph), en el jal de tipo skarn. Objetivo 10x, nicoles paralelos, campo horizontal de la fotografía 0.98 mm.

materia prima industrial deberá tenerse el control de los elementos nocivos.

El tercer nivel analizado (RM14), tiene una morfología similar a las anteriores muestras estudiadas, pero con granulometría mayor. Se observa un alto grado de oxidación de tipo penetrativo en los granos transparentes con una alta proporción de opacos menos liberados. El detalle constata, por una parte la oxidación penetrativa, además de mostrar que la fracción más fina del nivel lo componen opacos, en su mayor parte.

El cuarto nivel analizado (RM15), posee características similares en granulometría y morfología que las muestras RM12 y RM13. La diferencia es una menor oxidación y un mayor grado de liberación de opacos. Posee también, las mismas relaciones texturales como son: transparentes y opacos totalmente liberados, opacos en inclusión parcial en fracturas y bordes, así como en inclusión total.

El quinto nivel analizado (RM16), es similar al nivel RM14. Conserva las mismas características morfológicas y granulométricas y muestra también su oxidación penetrativa, así como su fracción más fina que se compone principalmente de opacos.

#### MICROSCOPIA ÓPTICA DE POLARIZACIÓN (LUZ REFLEJADA EN SECCIONES PULIDAS)

##### Tipo skarn

La mineralogía primaria reconocida en todos los niveles estudiados del desecho minero está compuesta por pirita, marcasita, pirrotita, calcopirita, galena, esfalerita, magnetita y minerales transparentes dentro de los que se pueden reconocer la diópsida (Figura 5).

**Pirita (Py):** Presenta una morfología de subhedral a anhedral, generalmente se encuentra liberada. En algunas ocasiones en contacto con magnetita y esfalerita o cuarzo. En otras se encuentra a manera de inclusión en silicatos o cuarzo. Se observa una anisotropía anómala lo que indica que contiene arsénico y que puede ser llamada pirita arsenical. La

pirita contiene pequeñas inclusiones de galena que generalmente se emplaza en un tren alineado sobre fracturamiento.

**Marcasita (Mc):** Se observa liberada, asociada a magnetita y en ocasiones presenta relictos de pirita. No se observan inclusiones de otros minerales.

**Pirrotita (Po):** Se detecta en bajas proporciones y se observa solamente liberada.

**Calcopirita (Cpy):** Mineral poco abundante, se observa escasamente liberado. Generalmente asociada a esfalerita sea en su contacto o en inclusiones. En otras ocasiones aprovecha el clivaje de los silicatos. No se observó su relación con pirita, magnetita, pirrotita ni marcasita.

**Galena (Gl):** Se encuentra generalmente en inclusiones dentro de la pirita o siguiendo su fracturamiento o bien en contacto con esta, no se observó liberada.

**Esfalerita (Sph):** Es abundante, aunque menos que la pirita. Se le observa asociada a pirita y calcopirita. Presenta inclusiones de calcopirita, sea desordenada o siguiendo un tren alineado sobre sus clivajes de crecimiento, es rara sin inclusiones. La esfalerita en ocasiones se emplaza en las fracturas de la pirita. La relación entre la esfalerita y galena no fue definida. A su vez la esfalerita aprovecha los clivajes de los silicatos para su reemplazamiento.

**Magnetita (Mgt):** Es uno de los minerales más abundantes. Se encuentra liberada o bien en las fracturas de la pirita. No se observa en inclusiones.

**Arsenopirita (Asp):** Es escasa, de forma euhedral incluida en cuarzo. Este mineral presenta anisotropía anormal, lo que permite suponer que no siempre se trata de una arsenopirita sino de una pirita arsenical.

Dentro de los minerales transparentes identificables se encuentran abundantes silicatos (posible diópsida o wollastonita) y escaso cuarzo, los cuales presentan en sus clivajes o fracturas a los minerales metálicos. El cuarzo aloja inclusiones euhedrales de pirita.

##### Tipo epitermal

La mineralogía de este tipo de desecho minero es muy sencilla, ya que solo se reconocieron pirita, mag-

netita, hematita, muy escasa esfalerita y titanita asociadas a cuarzo o calcita y silicatos (no clasificables del todo por esta técnica) (Figura 6).

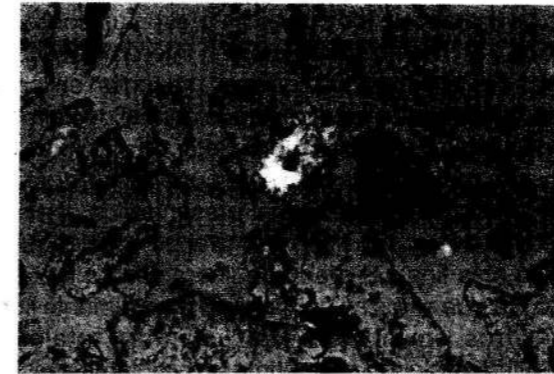


FIGURA 6. Fotomicrografía al MOP-LT, muestra escasos metálicos pequeños; pirita (Py) y esfalerita (Sph) incluidos en silicato (Sil), en el jal de tipo epitermal. Objetivo 10x, nicoles paralelos, campo horizontal de la fotografía 0.98 mm.

**Pirita (Py):** Presenta una morfología que va de subhedral a euhedral, que se encuentra en su mayor proporción liberada, sobre todo en su fracción más fina. En ocasiones se le observa como pequeñas inclusiones en el cuarzo, silicatos o calcita y finalmente cuando corresponde a granos más gruesos se observa asociada a magnetita y a pequeños cristales de minerales transparentes (cuarzo, carbonato o silicato). En forma general, no se observa oxidada.

**Magnetita (Mgt):** Se presenta generalmente liberada, asociada a la pirita, o bien en inclusiones en cuarzo, silicatos o carbonatos. Presenta una anomalía óptica, ya que de manera transicional pasa a tener características de hematita. En general, se sitúa a la magnetita-hematita-limonita como un grupo de óxidos de hierro.

**Esfalerita (Sph):** Es muy escasa y se observa asociada a pirita y, a su vez, ambas incluidas en silicatos, no presenta inclusiones de calcopirita.

**Titanita (Ti):** Es menos escasa que la esfalerita, se le observó liberada o bien en inclusión dentro de la pirita o cuarzo. Presenta una anomalía óptica, por lo que se agrupó con el rutilo.

Los minerales transparentes representan el volumen más grande de las muestras con relación a los opacos. Siendo reconocidos cuarzo, calcita y silicatos. Estos minerales contienen en general a las diminutas inclusiones de pirita y óxidos de Fe y Ti.

#### ANÁLISIS QUÍMICOS POR ACTIVACIÓN NEUTRÓNICA Y PLASMA DE INDUCCIÓN ACOPLADA

Los datos de los análisis por elementos mayores muestran resultados contrastantes entre los desechos mineros de cada tipo de yacimiento como se puede apreciar en la Tabla 1.

Se observa que el CaO, FeO, MgO y el P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, muestran composiciones bajas y homogéneas en los niveles

TABLA 1: ANÁLISIS QUÍMICOS POR ELEMENTOS MAYORES EN BASE A ÓXIDOS POR EL MÉTODO DE PLASMA DE INDUCCIÓN ACOPLADA (ICP).

Muestra	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	CaO%	FeO%	K <sub>2</sub> O%	MgO%	MnO%	Na <sub>2</sub> O%	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	SiO <sub>2</sub> %	TiO <sub>2</sub> %
<b>DESECHOS DERIVADOS DE YACIMIENTO DE TIPO SKARN</b>										
3	2.470	22.910	13.760	5.230	0.843	0.225	0.142	0.343	51.760	0.153
4	1.560	6.040	26.110	2.390	1.000	0.184	0.195	0.565	58.820	0.103
6	0.606	21.050	33.060	1.270	0.334	0.061	0.107	0.937	40.360	0.026
8	0.663	50.950	13.490	2.730	2.242	0.296	0.063	0.318	30.160	0.085
10	2.240	12.630	8.320	9.080	3.540	0.590	0.067	0.169	60.530	0.081
20	0.359	43.990	37.110	1.110	0.855	0.296	0.171	0.318	14.350	0.016
28	4.420	2.880	28.800	14.180	3.050	0.069	0.900	1.380	40.530	0.183
31	1.380	15.360	16.000	10.550	0.391	0.107	0.463	0.437	53.900	0.341
32	0.597	30.470	26.180	2.710	0.252	0.067	0.057	0.921	37.430	0.106
40	1.190	19.390	5.450	9.860	0.308	0.197	0.186	0.595	60.960	0.306
<b>DESECHOS DERIVADOS DE YACIMIENTO DE TIPO EPITERMAL</b>										
12	11.710	1.240	7.920	7.460	0.432	0.560	0.716	0.280	69.940	0.305
13	12.110	1.600	4.190	7.520	0.124	0.410	0.490	0.048	71.440	0.490
14	6.850	0.656	4.850	6.450	0.230	0.150	0.416	0.038	78.930	0.215
15	5.970	14.130	4.250	7.830	0.731	0.435	0.401	0.137	64.170	0.115
16	6.210	3.750	3.980	6.510	0.334	0.138	0.358	0.071	75.930	0.260
42	5.270	1.210	5.180	7.150	0.417	1.010	0.800	0.171	75.930	0.442
47	2.820	1.300	7.550	6.360	0.235	0.392	0.845	0.155	77.020	0.425
52	4.890	1.330	5.490	7.490	0.087	1.190	0.790	0.098	75.930	0.396

de los desechos mineros derivados del yacimiento de tipo epitermal, en relación a los niveles de los desechos mineros del yacimiento de tipo skarn donde su composición es más alta y variable.

Con respecto al  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$  y  $MnO$ , estos son de composición más alta en los desechos mineros del yacimiento de tipo skarn, sin embargo, ambos tipos de desechos mineros presentan heterogeneidad en el contenido de dichos óxidos en sus diferentes niveles.

Por otra parte, el  $Na_2O$ , se comporta contrariamente al  $Al_2O_3$  en los dos tipos de desechos mineros (solo se detectó un valor anómalo en el desecho minero del yacimiento de tipo skarn).

El  $K_2O$ , en los niveles de los desechos mineros del yacimiento de tipo epitermal se comporta de forma homogénea, mientras que en los del tipo skarn es completamente heterogéneo (con valores altos y bajos).

Finalmente, el  $SiO_2$ , es más elevado en los desechos mineros del de tipo epitermal con tendencia homogénea, mientras que en los del tipo skarn presenta valores más bajos y tendencia heterogénea.

Los resultados de los análisis por elementos trazas demuestran el comportamiento de los elementos, como se muestra en la Tabla 2.

El Au y la Ag, se comportan de la misma forma en los desechos mineros de los dos tipos de yacimientos.

Respecto al Pb, Cd, Zn, Sb y Se, estos presentan un comportamiento similar en ambos desechos mineros de los dos tipos de yacimientos, caracterizados por sus bajos valores y homogeneidad en los desechos mineros del yacimiento de tipo epitermal.

El W y el Bi presentan un comportamiento similar, así como valores más bajos y homogéneos en los desechos mineros del yacimiento de tipo epitermal.

El As, presenta valores muy bajos y homogéneos en los niveles de los desechos mineros del yacimiento de tipo epitermal, mientras que en los del tipo skarn sus valores son muy altos y variables.

El Ba y el Cr, son heterogéneos en composición y variación en ambos desechos mineros de los dos tipos de yacimientos.

Finalmente el V, Cu y Ni, estos presentan valores bajos y homogéneos en los desechos mineros del yacimiento de tipo epitermal, contrario a los del tipo skarn.

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los desechos mineros derivados del yacimiento de tipo skarn se caracterizan por contener una mineralogía más abundante y compleja representada por una variedad de silicatos de metasomatismo, sulfuros y sulfosales, que presentan una variación de color gris claro a rojizo, debido a la oxidación de tipo hematítico, mientras que los derivados del tipo epitermal se caracterizan por una mineralogía más pobre representada por abundante cuarzo, pirita, menor limonita-hematita y escasa calcita y silicatos, presentando tonos que varían de co-

lor crema a amarillo originados por una oxidación de limonita principalmente y escasa hematita.

La microscopía óptica de granos mostró que los desechos mineros de tipo skarn contienen un mayor contenido de metálicos, los cuales se presentan sobre todo liberados y en menor proporción en intercrecimiento, en fracturas o clivajes, en ocasiones se presentan en los bordes, en inclusiones y encapsulados parcial o totalmente, pudiendo este último caso representar un problema en el tratamiento metalúrgico para su recuperación. Los desechos mineros de tipo epitermal presentan un contenido de metálicos muy bajo pero en granos muy pequeños (fracción más fina), el grado de liberación de metálicos es bajo, ya que estos se encuentran parcialmente liberados y otros en inclusiones diminutas totalmente encapsulados, siendo este último un problema a resolver en el caso de darle una utilidad como material industrial alterno.

La microscopía óptica en secciones pulidas muestra que los desechos mineros de tipo skarn presentan una cantidad considerable de esfalerita liberada, siendo importante desde el punto de vista económico, así mismo la galena se encuentra en forma de inclusiones o fracturas asociada a pirita (también económica) y la calcopirita, siendo estos minerales factibles de una recuperación, ya que los análisis químicos presentan valores de Zn desde 3 850 a 31 800 ppm, de Pb 1 480 a 16 154 ppm y de Cu 529 a 1 435 ppm. Para los desechos mineros de tipo epitermal se observa una gran abundancia de cuarzo, que sería la fase mineral más económica, comprobado por los valores obtenidos en el análisis químico de elementos mayores (69.94% a 78.93%), aunque se tienen valores de hierro del orden de 3.98% a 7.55%, lo que puede provocar problemas en el tratamiento metalúrgico para la recuperación del sílice. El hierro asociado al sílice en ocasiones se presenta en una textura penetrativa o en costras, lo que sería causa de un proceso experimental metalúrgico para la liberación de dicho óxido de hierro, sea por métodos mecánicos o de lavado.

La química de elementos traza, de ambos tipos de desechos mineros, es contrastante, donde se pueden apreciar los altos valores de arsénico (14 000 a 38 000 ppm) como característica relevante de los de tipo skarn; así mismo, estos desechos mineros presentan valores más altos de Zn, Pb, Sb y W (3 850 a 31 800 ppm Zn, 1 480 a 16 154 ppm Pb, 350 a 3 000 ppm Sb y 120 a 330 ppm W), mientras que los de tipo epitermal generalmente presentan valores más bajos que no alcanzan las centenas de ppm en la mayoría de los elementos analizados a excepción del Zn y Pb que en ocasiones rebasan el millar de ppm (solo en dos muestras).

Con respecto a la química de elementos mayores, se observa también un contraste, sobre todo en los contenidos de  $CaO$  y  $FeO$ , donde los desechos mineros de tipo skarn se caracterizan por altos valores en  $CaO$  (2.88% a 50.95%) y  $FeO$  (5.45% a 37.11%) que son el reflejo de la mineralogía calcosilicatada (wollastonita, andradita, calcita, piroxenos

TABLA 2: ANÁLISIS QUÍMICOS DE ELEMENTOS TRAZA POR LOS MÉTODOS DE ESPECTROMETRÍA DE ACTIVACIÓN NEUTRÓNICA (NAA) Y PLASMA DE INDUCCIÓN ACOPLADA (ICP).

ESPECTROMETRÍA POR ACTIVACIÓN NEUTRÓNICA											
DESECHOS DE YACIMIENTO TIPO SKARN Zn-Pb-Ag											
Muestra	Au (ppb)	Ag ppm	As ppm	Ba ppm	Co ppm	Cr ppm	Fe%	Sb ppm	Se ppm	W ppm	Zn ppm
1	231	30	18000	1300	56	65	5.4	430	42	330	8020
2	167	26	14000	1200	45	71	4.69	410	39	260	4940
3	271	37	27900	800	42	85	11.2	660	68	307	10600
4	396	54	35000	1200	47	56	23.2	350	55	160	7350
5	214	39	17000	1100	23	96	6.47	520	64	170	13100
6	860	160	38000	100	11	<10	21.8	3000	240	120	31800
7	386	69	32000	850	6	57	10.8	910	110	150	3850
8	261	58	31000	90	16	36	8.97	650	130	150	12800
9	<2	<5	73	390	10	65	2.63	6.9	<3		69
10	120	76	29000	95	12	69	6.8	940	140	190	21600
11	240	64	27	96	9	81	8.04	970	130	130	15800
DESECHOS DE YACIMIENTO DE TIPO EPITERMAL BAJO EN SULFUROS Ag-Au(Pb-Zn)											
12	87	20	44	790	10	75	3.17	24	<3	5	1030
13	142	32	51	580	11	51	3.18	15	<3	6	684
14	251	48	40	900	7	53	5.09	13	<3	9	533
15	178	36	36	740	5	26	1.91	16	<3		1410
16	330	65	29	950	1	27	2.46	21	<3	6	711
ESPECTROMETRÍA POR PLASMA DE INDUCCIÓN ACOPLADA											
DESECHOS DE YACIMIENTO TIPO SKARN Zn-Pb-Ag											
	Cu ppm	Pb ppm	Ni ppm	Cd ppm	Bi ppm	V ppm	Mn ppm				
1	1123	1575	35	40.1	158	99	1801				
2	934	1480	29	25.4	137	99	1756				
3	1191	2583	59	64.5	143	121	2242				
4	826	2662	60	48.4	95	78	1383				
5	1435	2542	53	70.2	100	127	2549				
6	1362	16154	14	261.2	10	97	435				
7	529	5143	13	24	88	88	571				
8	787	4247	35	70.7	54	107	2829				
9	19	19	23	<2	<5	66	429				
10	635	5832	47	122.5	38	129	3938				
11	1008	5141	43	96.5	38	135	3225				
DESECHOS DE YACIMIENTO TIPO EPITERMAL BAJO EN SULFUROS Ag-Au(Pb-Zn)											
12	64	419	19	4.5	57	72	5309				
13	92	338	19	4.3	<5	62	4455				
14	94	338	12	1.5	<5	44	1252				
15	127	701	12	17.6	<5	41	2942				
16	92	480	4	2.8	<5	34	1144				

y anfíboles entre los no metálicos y pirita, pirrotita, arsenopirita, magnetita y hematita entre los metálicos), mientras que en los de tipo epitermal el  $CaO$  varía de 1.21% a 14.13% y el  $FeO$  de 4.19% a 7.55%,

en donde el contenido de  $SiO_2$  es el que caracteriza a este tipo por sus altos contenidos que varían de 64.17% a 78.93% (en el de tipo skarn van de 14.35% a 30.16%).

Teniendo en cuenta los parámetros definidos anteriormente, para los desechos mineros de tipo skarn se podría proponer la experimentación de un proceso de recuperación llamado "Tec-Kowa", el cual involucra una etapa de flotación tradicional para la recuperación de Pb, Cu, Zn, (Au, Ag), además de la pirometalurgia que comprende tostación, peletización y proceso final de recuperación por medio de cloruros gaseosos, de donde se obtiene el resto de Pb, Cu, Zn (Au, Ag). Considerando que el material ya ha tenido un tratamiento de flotación, también, se podría experimentar un proceso metalúrgico que involucre el fenómeno gravitacional aprovechando los pesos específicos de los minerales, separando por una parte el cuarzo, calcita y silicatos y por otra parte los metálicos (pirita, esfalerita, galena, arsenopirita, pirrotita, entre otros).

Para el caso de los desechos mineros de tipo epitermal donde se tiene el sílice como mineral económico, este podría ser utilizado en la industria del vidrio para obtener diferentes grados de este material en función a su composición química media (Berton y Le Berre, 1983), la cual es: SiO<sub>2</sub> 70-73%, MgO 0.4%, CaO 8-13%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.2-2%, Na<sub>2</sub>O 13-16% y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.2%. Aunque los valores obtenidos en los análisis químicos, presentan algunas variaciones en sus valores, estos se podrían enriquecer o empobrecer por procesos o métodos metalúrgicos antes mencionados. Se descarta su utilización en la industria del vidrio grado cristal y grado óptico ya que este restringe los valores de Fe de 0.1 a 0.01% y en ocasiones el de Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O y TiO<sub>2</sub>.

Otro uso sería en la industria del cemento, ya que para su elaboración se utiliza arcillas y cuarzo (sílice). Cuando el % de sílice es bajo, se le agrega otro material (areniscas, grauvacas, desecho minero sílico entre otros) para tener un porcentaje ideal. Los valores del sílice están en función del tipo de cemento a producir (ej.: ligero, alta resistencia, puzolana).

#### BIBLIOGRAFÍA

- BERTON, Y. y P., LE BERRE: "Guide de prospection des materiaux de carrière. Bureau de Recherches Géologiques et Minières", en *Manuels et méthodes*. No. 5, BRGM, 1983, pp. 127-134.
- DAMON, P. E., M., SHAFIQUILLAH, y K.F., CLARK: "Evolución de los arcos magmáticos en México y su relación con la Metalogénesis", *Rev. UNAM*, vol. 5, No. 2, 1981, pp. 223-238.
- JAMBOR, J. L.: Short course handbook on the environmental geochemistry of sulfide mine-wastes, en *Mineralogical Association of Canada*, vol. 22, Waterloo, 1994, pp. 59-102.
- SALINAS, P., J. C.: "Etude structurale du sud-ouest Mexicain (Guerrero)", Tesis doctoral, Université d'Orleans, France, 1994, p. 226.
- SÉDESOL: Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección al medio ambiente, Secretaría de Desarrollo Social e Instituto Nacional de Ecología, 1994, p. 2-9.
- YTA, M.: "Etude géodynamique et métallogénique d'un secteur de la Faja de Plata, Mexique: La zone de Zacatecas-Francisco I. Madero-Saucito". Tesis doctoral, Université d'Orleans, France, 1992, p. 266.

## Criterios para la proyección de las cámaras y pilares de Mina Merceditas

### Calculative Criteria for Chambers and Pillars Projection at Merceditas Mine

Roberto Blanco Torrens<sup>1</sup>  
Roberto L. Watson Quesada<sup>2</sup>  
Mario Feliú Rosado<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Especialista en Geomecánica y Construcción Subterránea. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa  
<sup>2</sup>Facultad de Geología y Minas. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa  
<sup>3</sup>Facultad de Metalurgia y Electromecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

**RESUMEN:** La determinación de las dimensiones de las cámaras y el cálculo de los parámetros adecuados que deben tener los pilares intercamales es un problema actual en Mina Merceditas que influye significativamente en la actividad productiva y sobre todo en las condiciones de seguridad de la mina.

En este trabajo se aborda sistemáticamente, toda una serie de aspectos que son necesarios investigar y conocer para poder con suficiente fundamentación científico-técnica valorar y definir las dimensiones del sistema cámara-pilar-macizo rocoso circundante. Para cumplir esta tarea es necesario partir de una evaluación estadística de las propiedades físico-mecánicas de las rocas y del análisis mecánico-estructural y tenso-deformacional del macizo. En el trabajo se determinan, por varias vías, magnitudes del ancho permisible de las cámaras y de las cargas actuantes para Mina Merceditas, aspectos estos que condicionan las dimensiones del pilar. También usando varios procedimientos se hace un pronóstico de dimensiones estables para las cámaras y pilares de esta mina. Como resultado, además se obtiene una metodología de análisis que permite enfrentar con éxito esta tarea en cualquier sistema en que se emplee el sistema de explotación con cámaras y pilares.

**Palabras claves:** Pilares, geomecánica, mecánica de rocas, Merceditas.

**ABSTRACT:** The determination of chamber dimensions and the calculation of suitable parameters of interchamber pillars are the most important problems to be solved at Mercedita Mine. This situation exerts a great influence upon production process and mainly upon safety mining conditions.

With a systematic approach, there is studied a group of aspects that should be investigated for evaluating and defining the dimensions of chamber-pillar-surrounding rocky massive system with scientific and technical arguments. For the fulfillment of this task, it is necessary an statistical evaluation of physical-mechanical properties of rocks as well as mechanical-structural and tensional-deformational analysis of the mass. There has been determined, by means of different procedures, the magnitudes of the tolerated wide of chambers as well as the acting loads at Merceditas Mine, these aspects conditioned pillars dimensions. It has also been made a prognosis of stable dimensions of chambers and pillars. As a result, there is shown a methodology that permits to carry out this task successfully in any mine using chambers and pillar systems of looking.

**Key word:** Pillars, geomechanic, rocks mechanic, Merceditas.

#### INTRODUCCIÓN

La determinación de las dimensiones permisibles de los techos denudados en las cámaras y el cálculo de los parámetros adecuados que deben tener los pilares en la actualidad es un problema de gran interés en la geomecánica.

Teniendo en cuenta que el espacio denudado y el pilar conforman un sistema espacial único con el macizo rocoso que lo rodea, sus parámetros más adecuados, en todos los casos, deben elegirse a partir de un análisis interrelacionado en el que se integren todos los factores. A la hora de determinar los parámetros del sistema "Pilar-Macizo" se debe tener en cuenta el sector de macizo rocoso que lo rodea y que influye directamente en el proceso tenso-deformacional durante los trabajos de arranque.

Es por ello que para fundamentar la adecuada determinación de los parámetros de un sistema de explotación por cámaras y pilares, en particular lo que se refiere a las dimensiones de los espacios denudados (cámaras) y los pilares, se exige analizar el campo tenso-deformacional de todo el conjunto que interviene en el proceso, o sea, "pilar-cámara-sector del macizo que los rodea".



Dirija sus artículos a:  
Ing. Bárbara Fuentes Herrera  
E-mail: bfuentes@ismm.edu.cu

Las solicitudes de suscripción, correspondencia y canje remítalas a:



Ing. Lic. Josefa Mestre Lamorú  
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO,  
Las Coloradas, Moa, Holguín, Cuba. CP 83329  
Tel.: (53) (24) 6 6234 / Fax: (53) (24) 6 2290  
E-mail: jmestre@ismm.edu.cu