

Estudio mineralógico y cuantificación por análisis digital de imagen de las menas auríferas de Nariño (Colombia). Aplicación a la mejora del proceso mineralúrgico

E. Berrezueta⁽¹⁾, R. Castroviejo⁽¹⁾, F. Pantoja⁽²⁾ y R. Álvarez⁽¹⁾

(1) ETSI Minas (Univ. Politécnica de Madrid), C/ Ríos Rosas, 21. 28003 Madrid, España. Telf. +34.91.3366465 - Fax +34.91.3366977.
E-mails: mjer@mi.madridtel.es - ricardoc@minas.upm.es

(2) CorpoNariño. Pasto Colombia.
E-mail: fpant-ct@col2.telecom.com.co

RESUMEN

El beneficio de menas auríferas plantea uno de los más difíciles retos para el minero y el mineralurgista. Se trata de menas, típicamente, de baja ley, con finas granulometrías y, con frecuencia, de mineralogía y textura complejas. En estas condiciones, el estudio microscópico cuantitativo, que habitualmente proporciona un apoyo útil al mineralurgista, debe superar difíciles problemas de representatividad estadística, de resolución eficaz de partículas muy finas, de precisión en la medida de los parámetros geométricos de éstas, etc. La superación de estos problemas requiere con frecuencia el recurrir al microscopio electrónico. Sin embargo, el microscopio óptico exige una inversión mucho menor y en menas apropiadas puede dar resultados válidos, como lo prueba el estudio realizado sobre las menas auríferas de la Mina Nueva Esparta (Colombia), hoy explotada por mineros informales con métodos muy agresivos para el entorno y la salud (amalgamación incontrolada). Estas, por su mineralogía simple menas (oro nativo / electrum, esencialmente) y por su gran riqueza (hasta > 600 ppm Au) y gruesa granulometría, pueden ser correctamente caracterizados con microscopio óptico de reflexión, ofreciendo un buen material para ensayar la aplicabilidad del método, por comparación con resultados independientes (análisis químicos, mineralurgia). El trabajo se ha planteado, pues, con el doble objetivo de apoyar al mineralurgista (proporcionándole información cuantitativa de tipo mineralógico y geométrico, para su investigación de métodos alternativos a la amalgamación) y de contrastar críticamente el método de cuantificación mineralógica empleado. La aplicación de la técnica de Análisis Digital de Imagen como complemento del estudio mineralógico tradicional ha permitido determinar la distribución granulométrica de las partículas de oro presentes. Aunque son muy frecuentes los finos (1-7 μm), el análisis modal realizado sobre cada partícula muestra que la mayor parte del oro se encuentra en tamaños superiores a 105 μm (Veta Bruja) y 77 μm (Veta Gruesa). Ello debe hacer posible una elevada recuperación con métodos gravimétricos que evitan los graves riesgos de la amalgamación en la minería informal. Los ensayos mineralúrgicos confirman esta previsión. La utilización de esta técnica exige que el oro sea visible y las muestras, representativas. Ambas condiciones se han verificado.

Palabras clave: análisis digital de imagen, mineralogía, mineralurgia, Nariño (Colombia), oro

Mineralogical study and digital image analysis quantification of gold ores from Nariño (Colombia). Application to the improvement of the processing

ABSTRACT

Applying Digital Image Analysis (DIA) to produce quantitative mineralogical information for gold ore processing is usually a difficult task. Typical problems are the low grades of the common ores, their small grain size, a not always straightforward mineralogy, or the danger of mistakes in grade definition by nugget effect, among others. The Nueva Esparta (Nariño, Colombia) ores provide a good test for the methodology, allowing to overcome these problems, since they are very rich (up to ≈ 600 ppm), and most of the gold is visible, as native gold or electrum, with reflected light microscope; to avoid nugget effect, the whole surfaces of six polished sections have been measured. The study by DIA was carried out to support the research undertaken on the problems related to ore processing by informal miners in the Nueva Esparta Deposit (Pantoja, 1999). The aims of the DIA-study were: 1) to provide the necessary quantitative information on the geometry and mineralogy of the ores to improve the gold recovery, using alternative methods to amalgamation, which is being used in such a way, that it represents a serious threat to health and environment; 2) To test the DIA methodology, by comparing DIA- results with other independent results (chemical analysis, gravimetric tests, etc.) coming out from the research. Grainsize distribution shows that gold grains are frequently very small (<1-7 μm), but the modal analyses carried out on all the grains demonstrate that most of the gold is contained in coarser grains (over 50% >105 μm in the Bruja, > 77 μm in the Gruesa veins). A high recovery of gold should thus be possible by

gravimetric methods, which would allow to prevent the very serious environmental problems of present-day informal amalgamation. The tests carried out attain recoveries of up to $\approx 95\%$ of the total gold content of the ores. The results of ore processing test fit well with those obtained by DIA on these ores.

Key words: digital image analysis, gold, mineralogy, Nariño (Colombia), ore processing

Introducción

El presente trabajo, cuyo objeto es la caracterización mineralógica y geométrica cuantificada de las menas auríferas mediante análisis digital de imagen y microscopía óptica de reflexión, ha sido planteado como apoyo a la investigación sobre los procesos de beneficio del oro en la minería informal (Departamento de Nariño, SO de Colombia), a fin de minimizar el impacto ambiental y los elevados riesgos derivados de la actividad incontrolada en el sector (Pantoja, 1999). No se conoce ninguna investigación metalogenética del distrito. La única información geológica disponible es la citada.

El yacimiento (Mina Nueva Esparta) está ubicado en la vereda Los Guabos (municipio Los Andes), flanco oriental del Nudo de Los Pastos, a 85 Km de la capital departamental, Pasto. La morfología de la región se caracteriza por su topografía abrupta, con altitudes de 1115 a 2520 m s.n.m., y pendientes de moderadas a muy fuertes.

Se trata de un yacimiento poco documentado, hidrotermal de tipo filoniano, con vetas de cuarzo aurífero de potencias decimétricas (10-70 cm), con

una dirección NO-SE y un buzamiento entre 45° y 75° E, que encajan en las metavolcanitas y metasedimentos del Grupo Dagua (Cretácico Superior, facies prehnita-pumpellyita y esquistos verdes; Murcia, y Cepeda, 1991). Estas litologías son interpretadas por estos autores, en su origen, como una secuencia de talud continental, con volcanitas básicas y turbiditas. El conjunto ha sido afectado por la tectónica andina y sus límites E, SO y O están delimitados por fallas (Fig. 1).

Las mineralizaciones podrían estar relacionadas con episodios intrusivos (tonalíticos) paleocenos, observados en la región, aunque no se han documentado en las inmediaciones de la mina. Con la información disponible, podrían caracterizarse como epizonales, en el sentido de Gebre-Mariam *et al.*, (1995), aunque también se les ha definido como mesotermales, con baja relación Ag:Au (Shaw, 2000).

Menas estudiadas. Mineralogía

Para hacer el estudio, se han seleccionado menas ricas en oro (hasta >600 ppm en algunos tramos), con

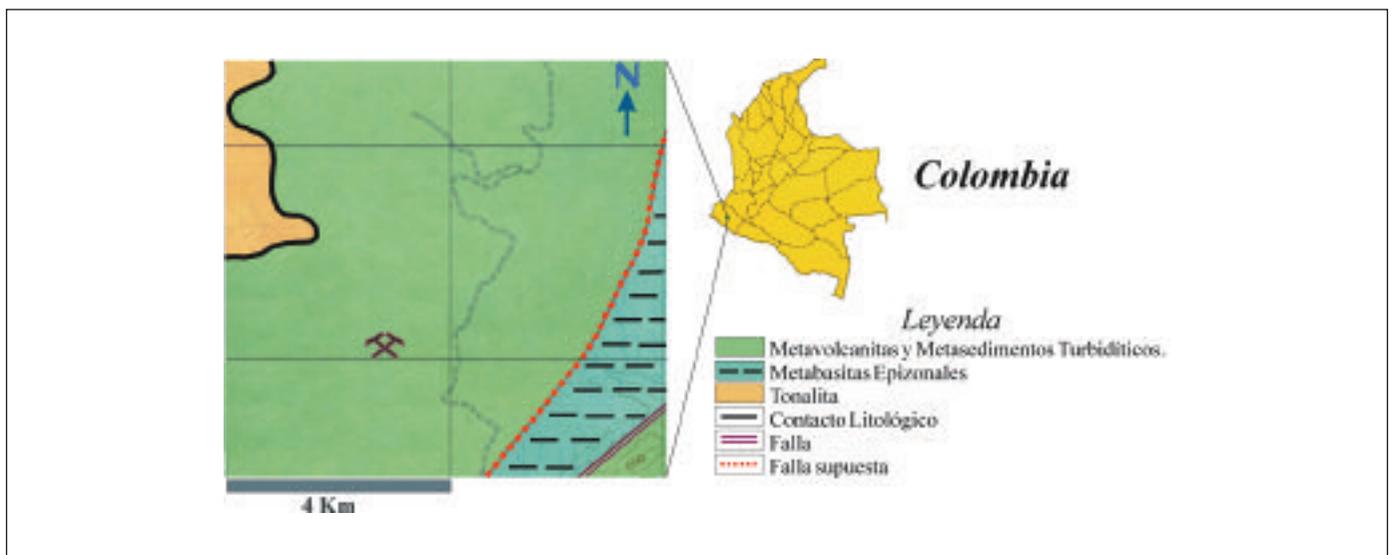


Fig. 1. Ubicación geológica de la mina Nueva Esparta (modificado de Murcia y Cepeda, 1991)

Fig. 1. Geological sketch map and location of Nueva Esparta mine (modified from Murcia and Cepeda, 1991)

la mayor parte del oro ligado a fases mineralógicas de fácil determinación (oro nativo esencialmente, con contenidos variables de plata) y granulometría suficiente para su observación directa con microscopio óptico. Proceden de las vetas Bruja y Gruesa, mina Nueva Esparta. El material recibido para la investigación comprende únicamente relleno filoniano.

El estudio microscópico previo muestra que se trata de menas de cuarzo y sulfo-arseniuros, con mineralización aurífera asociada a ambas fases y texturas de relleno filoniano, parcialmente brechificado. Los componentes principales (>5% vol.) son: cuarzo, carbonato, sericita/minerales arcillosos y arsenopirita. Como accesorios (<5% vol.) se han observado: tetraedrita/freibergita, esfalerita, galena, pirita, oro nativo/*electrum*, calcopirita y trazas de sulfosales/telururos. El mineral dominante es cuarzo, que forma agregados cristalinos de grano grueso, con hábitos frecuentemente prismáticos y texturas en cresta o empalizada, típicas de relleno hidrotermal; el carbonato (calcita) suele ocupar espacios intersticiales entre los cristales de cuarzo y, aunque es frecuente, es mucho menos abundante que éste. Los filosilicatos aparecen diseminados o cementando fisurillas. Las fases sulfuradas aparecen diseminadas o en agregados cristalinos, asociados al cuarzo. Los contenidos aparentes de oro visible, aunque irregulares, llegan a ser muy altos (>600 ppm) en algunas de las secciones; no obstante, según se ha constatado con microscopio electrónico (análisis cualitativos), no siempre se trata de oro nativo, ya que los contenidos en plata suelen ser elevados (*electrum*).

El oro se presenta incluido en cuarzo o asociado a fases sulfuradas (arsenopirita, galena, esfalerita, freibergita o sulfosales; el oro puede estar o no totalmente incluido, es decir, el grano de oro puede estar blindado por la fase sulfurada y ser inaccesible a reactivos o, por el contrario, puede asomar a la periferia de ésta y tener contacto con el cuarzo). Pueden distinguirse una generación aurífera de aspecto granular (en algún caso, como cemento de microbrechas), la más importante cuantitativamente, y otra tardía, que rellena microfisuras en cualquiera de las fases citadas. Los tamaños de grano dominantes son finos (<10 μm), sobre todo en Veta Bruja, pero los mayores contenidos de oro se concentran en granulometrías relativamente gruesas (>100 μm) (Fig. 2).

Estudio por análisis digital de la imagen

La metodología básica de este trabajo (puesta a punto del equipo, digitalización/captura de imagen, tratamiento, segmentación y proceso matemático) ha

sido desarrollada (Berrezueta, 2000) utilizando un microscopio óptico Leica DMRXP (trabajando en aire, con luz reflejada y objetivo 20x de óptica plana corregida) y analizador de imagen y *software* Leica Q500MC, instalados en el Laboratorio de Análisis de Imagen del Departamento de Ingeniería Geológica de la Escuela Superior de Ingenieros de Minas de la Universidad Politécnica de Madrid (Fig. 3).

Las menas elegidas son relativamente excepcionales por su riqueza y granulometría, pero son ideales para el ensayo propuesto, que exige que el oro sea visible (microscopio de reflexión). Los problemas de representatividad de las medidas a escala de muestra (probeta pulida) se pueden descartar, puesto que se ha estudiado siempre la superficie entera de cada sección. No obstante, a escala de yacimiento no se han hecho todavía campañas sistemáticas de evaluación -se trata únicamente de minería de rapiña, informal-, por lo que los resultados obtenidos pueden considerarse únicamente orientativos a dicha escala.

Parámetros determinados

Los parámetros medidos utilizando el análisis digital de imagen (ADI) sobre las imágenes procedentes del

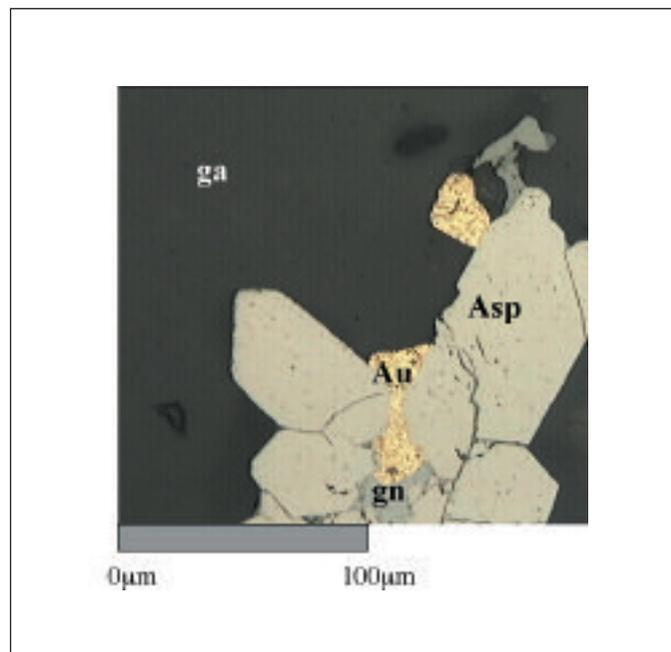


Fig. 2. Imagen capturada sobre el microscopio óptico y tratada mediante análisis digital de imagen. Ganga (ga), oro (Au), arsenopirita (asp) y galena (gn)

Fig. 2. Reflected light optical microscope image acquired and processed with digital image analyser. Scale and mineralogy indicated: Gangue (ga), gold (Au), arsenopyrite (asp), galena (gn)

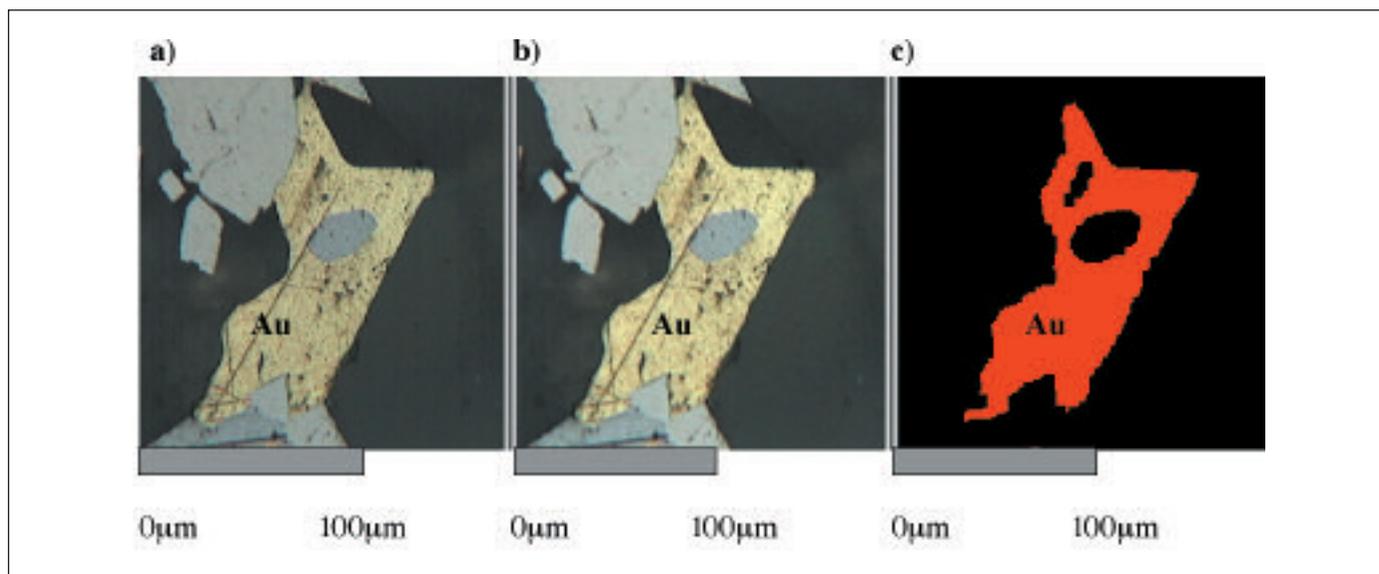


Fig. 3. Secuencia de tratamiento. a) imagen bruta. b) imagen tratada. c) imagen segmentada. Segmentación de Au. Escalas gráficas indicadas

Fig. 3. Processing sequence. a) original image. b) treated image. c) segmented image (Gold segmentation)

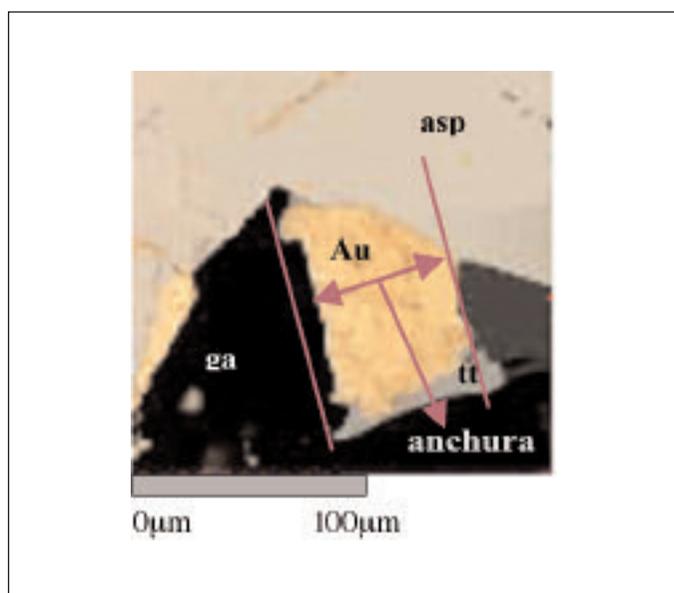


Fig. 4. Representación de la anchura de un grano de oro
Fig. 4. Breadth representation (anchura) for a gold grain

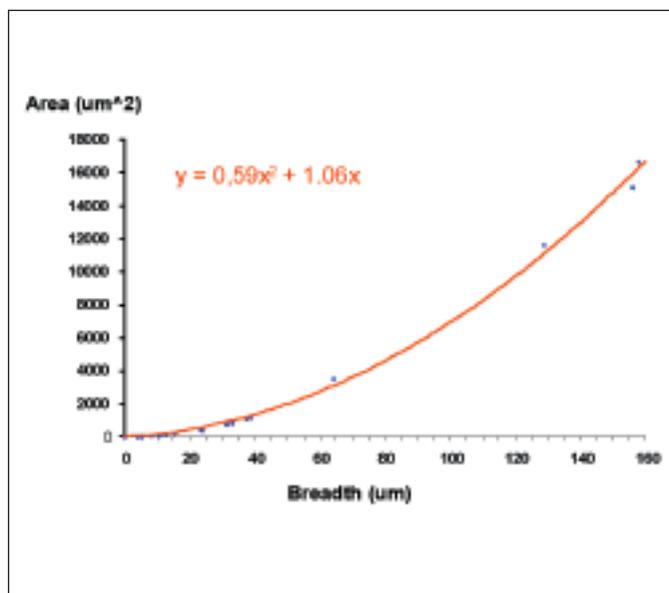


Fig. 5. Curva de relación entre área-anchura
Fig. 5. Area-breadth relation

microscopio óptico son: número de granos de oro, área individual de los granos de oro, áreas totales de fases de ganga y sulfuros, y los parámetros: anchura ("breadth", mínimo valor entre dos tangentes paralelas, figura 4) y longitud ("length", máximo valor entre dos tangentes paralelas) aplicados a la totalidad de los granos de oro visibles en la sección pulida. A partir de estos datos se generó una función de relación entre área-anchura (Fig. 5).

Resultados obtenidos

— Número de granos

El número de granos detectados con esta técnica (Figs. 6 y 7) depende de:

- los estrictamente intersectados por la superficie pulida de la probeta, únicos visibles.
- la resolución del microscopio, determinada a su

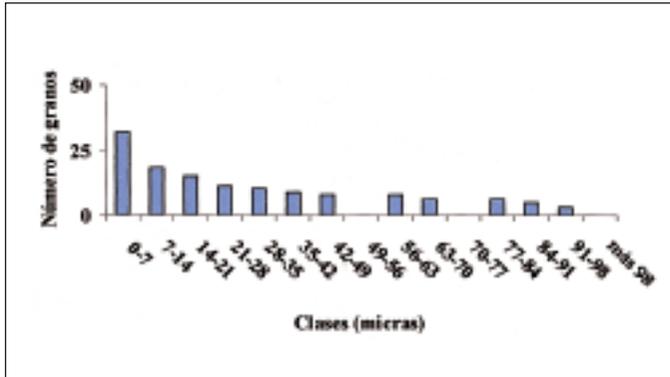


Fig. 6. Frecuencia de granos de oro clasificados por rangos de tamaños (Veta Gruesa)
 Fig. 6. Frequency distribution of detected gold grains for different size intervals (Gruesa Vein)

granos ultrafinos, por lo que el tramo granulométrico inferior (0-7µm) puede estar infrarrepresentado.

- la identidad de los portadores de oro: sólo se detecta oro visible (esencialmente oro nativo) y no el contenido químicamente en otras fases; las aleaciones (Au-Ag, *electrum*, amalgama, etc.) se computan, en principio, como oro.

— Áreas y contenidos

El área de los granos individuales de oro analizada (ADI) es el área observada estrictamente en una superficie, lo que supone una profundidad de detección nula. Sobre la hipótesis de que %A ≈ %V (Russ,

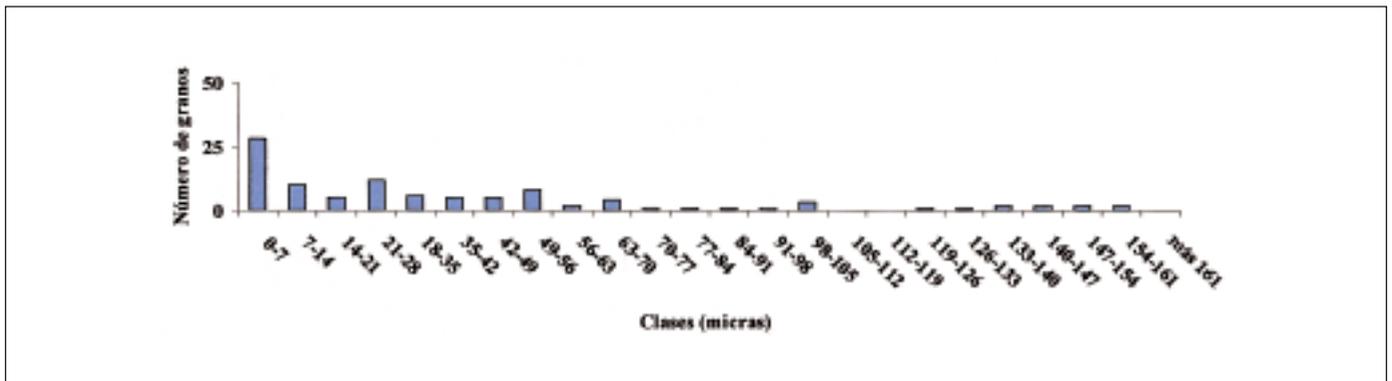


Fig. 7. Frecuencia de granos de oro clasificados por rangos de tamaños (Veta Bruja)
 Fig. 7. Frequency distribution of detected gold grains for different size intervals (Bruja Vein)

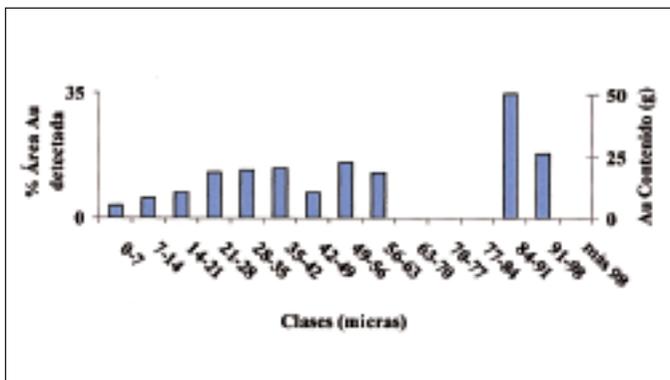


Fig. 8. Contribución del contenido de oro referido a 1 t de material, clasificado por rangos de tamaños (Veta Gruesa)
 Fig. 8. Weight distribution of gold in each size interval, expressed as total gold in 1 t of material (Gruesa Vein)

1990), se calculó la contribución teórica de cada granulométrica (anchura) al contenido en oro referido a 1 tonelada de material del filón en estudio. Esta contribución se expresa en fracciones granulométricas que se representan en los histogramas (Figs. 8 y 9), referidos también al % de área representado por cada fracción granulométrica de oro (eje de la izquierda).

Como complemento a estos datos, se presentan (Tabla 1 y Fig. 10) los resultados de molienda a 2 mm y un análisis granulométrico tradicional (con tamices), que serán comentados más adelante.

Como valoración crítica del método (Castroviejo, *et al.*, 1999 a y b), se comparan los valores de contenidos totales Au calculados por ADI a partir del microscopio óptico de reflexión (MOP), con los obtenidos por análisis químico (AQ) (Tabla 2). Las diferencias principales se deben al contenido de Ag en el oro nativo, que no es detectable ópticamente, pero sí ha sido cualitativamente confirmado por MEB (oro nativo/*electrum*).

vez por la configuración elegida: se ha utilizado un objetivo de 20 X, en aire, que ofrece óptimo rendimiento, pero no garantiza la detección de

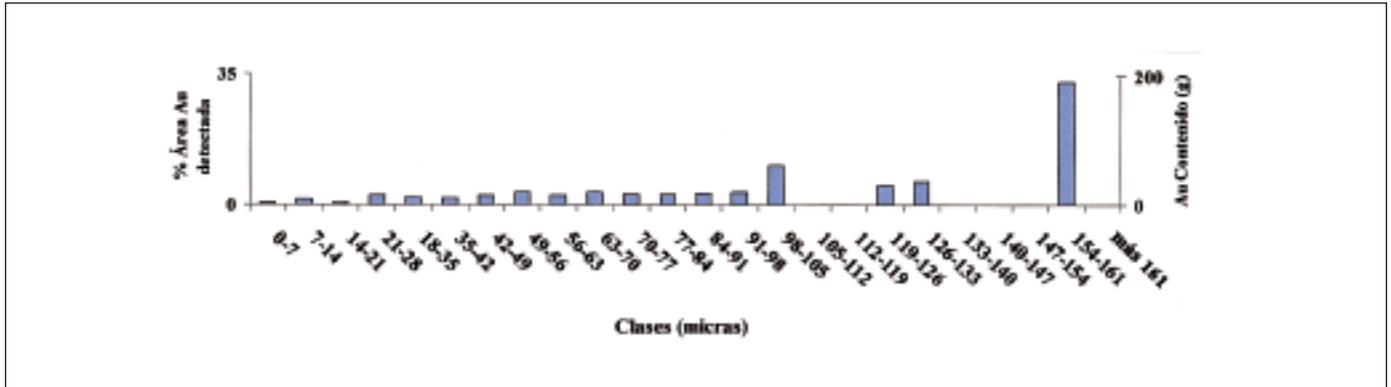


Fig. 9. Contribución del contenido de oro referido a 1 t de material, clasificado por rangos de tamaños (Veta Bruja)
 Fig. 9. Weight distribution of gold in each size interval, expressed as total gold in 1 t of material (Bruja Vein)

Fracción (mm)	Veta "La Bruja"		Veta "La Gruesa"	
	Peso (%)	Paso acumulado (%)	Peso (%)	Paso acumulado (%)
+1	37,31	62,69	37,82	62,18
+0,5	25,71	36,98	27,76	34,42
+0,25	14,60	22,38	15,08	19,34
+0,125	16,11	6,27	11,93	7,41
+0,062	3,57	2,70	3,77	3,64
-0,062	2,70	0,00		0,00
TOTAL	100,00		100,00	

Tabla 1. Granulometría de las muestras para estudio de contenidos de metales (Pantoja, 1999)
 Table 1. Sample grain size to study metals contents (Pantoja, 1999)

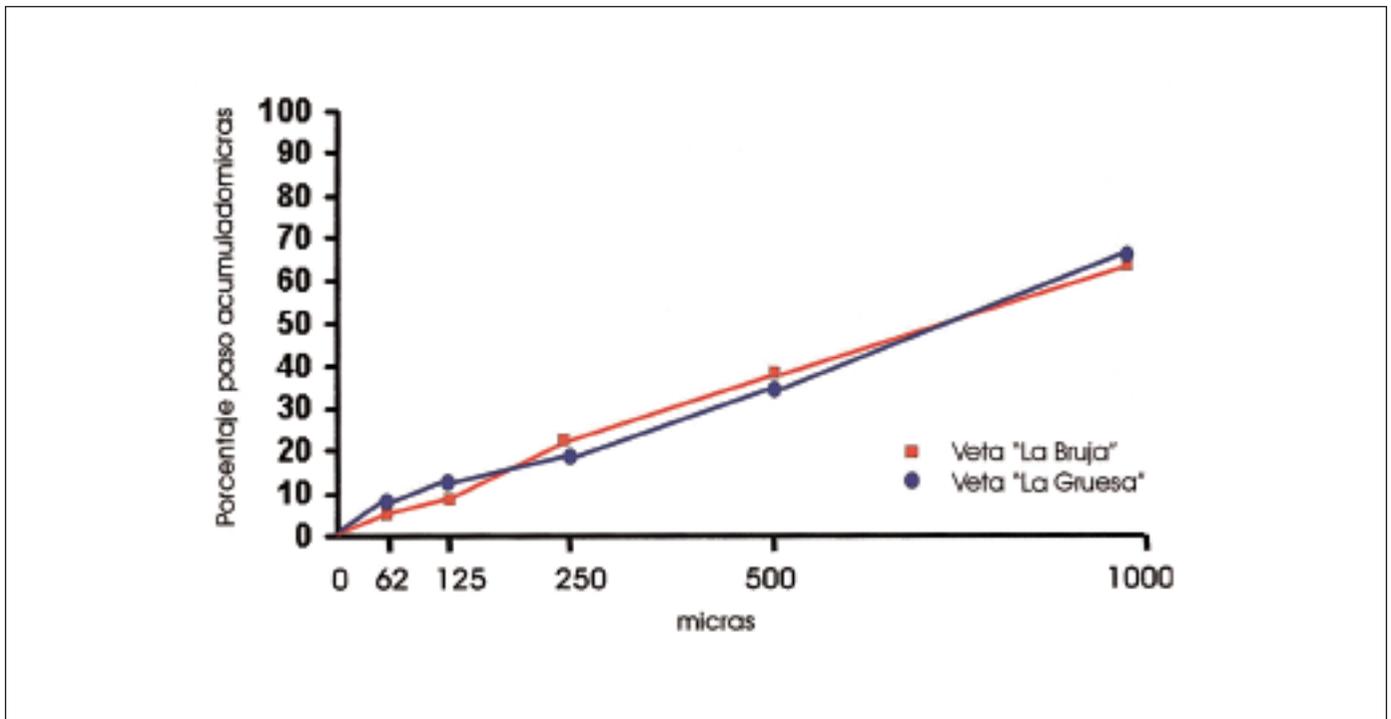


Fig. 10. Molienda 2 mm y curva granulométrica resultante (Pantoja, 1999) (Vetas Bruja y Gruesa)
 Fig. 10. Grain size distribution after 2 mm grinding. (Pantoja, 1999) (Bruja and Gruesa Veins)

Como el cálculo por análisis de imagen parte del supuesto de que la fase visible al microscopio como oro nativo segmentada como tal, se compone al 100 % de Au, el contenido de éste aparece sobrevalorado, incluso con respecto a la suma Au + Ag, debido a la mayor densidad del oro (19.32 g/cm³), frente a la plata (10.5 g/cm³). Pero si se corrige esta diferencia de densidades, pueden obtenerse aproximaciones razonables: así en el caso de Veta La Bruja, resultaría para el contenido AQ un valor de: $318 + 180 \times (19.32:10.5) = 649$ ppm, muy próximo al obtenido (en realidad, habría de descontarse de esta suma la Ag presente en otras fases minerales).

— *Morfología*

La coherencia de las medidas de parámetros morfológicos de los granos de Au ha sido evaluada por medio de la comparación de los parámetros anchura, longitud y diámetro equivalente de un número representativos de granos de oro de las dos vetas en conjunto. La buena correlación (por ejemplo: Fig. 11) prueba la validez del método.

Aplicación al proceso mineralúrgico

En todo proceso mineralúrgico es fundamental poder conocer los tamaños de grano del mineral a separar, su distribución y asociaciones para poder determinar el tamaño de molienda más adecuado para dicha mena, de forma que garantice un grado de liberación óptimo, que ni sea muy bajo, lo que llevaría a pérdidas del mineral a separar en los estériles, ni muy alto, que llevaría a un costo mayor de molienda y que probablemente también originaría ultrafinos que darían problemas de recuperación.

En la concentración gravimétrica, en la que el parámetro fundamental es la densidad, se puede

apreciar muy bien la influencia del tamaño de grano y su distribución. Como se observa en la Fig. 8 de Veta Gruesa, el tamaño mayor de grano de oro o aleación aurífera es de 91 micrómetros y entre 77 y 91 μm hay aproximadamente un 29% del oro. El 55 % del oro restante está en tamaños inferiores a 70 micrómetros. En la mena de Veta La Bruja (Figura 9), el tamaño mayor de oro es de 161 μm y entre 154 y 161 se encuentra aproximadamente un 26% del oro, después hay un salto hasta 140 μm sin representación de oro y en su conjunto aproximadamente un 71% del oro se encuentra en tamaños superiores a 77 μm y sólo un 29 por debajo de esa dimensión.

Considerando la influencia que tiene en la densidad de un grano mixto de cuarzo-oro el tamaño de la inclusión de oro (densidad 19,3 g/cm³) para los tamaños mayores de oro posibles de encontrar que son los de 161 μm de la veta la Bruja, resultan los datos de la Tabla 3.

Si se considerara que realmente el oro es *electrum* (como sucede en muchos granos) la densidad media bajaría algo pero no mucho, ya que de los análisis realizados por microsonda electrónica se deduce que este mineral tiene aproximadamente un 20 % de plata como promedio, con lo que la densidad de éste sería de 16,5 g/cm³, y así por ejemplo para el caso de granos de 0,5 mm sería de 3,11 g/cm³ en vez de los 3,20 g/cm³ y para granos de 0,25 mm sería de 6,35 g/cm³ en vez de 7,09 g/cm³.

En la concentración gravimétrica y para el caso de las mesas de sacudidas hidráulicas, que son el artefacto más utilizado para estas separaciones a los tamaños considerados, rige el criterio de Taggart (1945) o "criterio de concentración" (Wills, 1988.) basado en la relación $(d_{\text{pesado}}-1)/(d_{\text{ligero}}-1)$, donde d_{pesado} es la densidad del grano pesado a separar y d_{ligero} la de los granos de la ganga. Esta relación debe ser superior a 1,25 para que la concentración sea posible a tamaños gruesos que son los más favorables (aprox. 2 mm), y teniendo en cuenta que para el caso ideal considerado el

Método de determinación	MOP		AQ	
	Oro nativo/electrum	Au	Ag	Au+Ag
Veta Bruja	685	318	180	498
Veta Gruesa	230	44	151	195

Tabla 2. Contenido total (ppm) de metales preciosos (Au/Ag) en las vetas Bruja y Gruesa, determinado mineralógica (MOP) y químicamente (AQ)

Table 2. Total precious metals contents (Au and Ag) in samples from Bruja and Gruesa veins, as determined by digital image analysis through the optical microscope (MOP) or by chemical assay (AQ). See text for explanation

Tamaño de grano (mm)	Tamaño inclusión oro (mm)	Densidad media del grano (g/cm ³)
2	0,161	2,66
1	0,161	2,72
0,5	0,161	3,20
0,25	0,161	7,09

Tabla 3. Densidad media de los granos mixtos de cuarzo-oro según el tamaño del grano para partículas de oro de 0,161 mm
Table 3. Average density of quartz-gold mixed grains according to grain size, for included gold particles of 0,161 mm

cuarzo es el material ligero con 2,65 de densidad, entonces la densidad mínima del grano pesado debe ser 3,06.

De ahí que, en el caso más favorable de Veta La Bruja, los granos mayores deben ser como mucho de 0,5 mm según puede verse en la Tabla 3. Pero este tamaño de grano es ya un tamaño fino muy alejado de 2 mm y entonces el criterio Taggart debe valer al menos 1,75 con lo que la densidad mínima debe ser alrededor de 3,88, lo que conduce a un tamaño de grano de 0,25 mm. Se debe pues moler a unos 0,25 mm.

Es interesante ver como varía para este tamaño de 0,25 la densidad media del grano con el tamaño de una única inclusión de oro, ya que existe una gran dispersión en los tamaños y además en Veta Gruesa los tamaños de oro son mucho más finos. Los datos se exponen en la Tabla 4.

Según se aprecia en dicha tabla, los únicos granos con ciertas posibilidades de ser concentrados son los mayores de aproximadamente 100 µm para este tamaño de grano.

La concentración se favorece más por dos hechos diferentes pero que concurren en estas menas: uno es que al moler a 0,25 mm una parte importante del material queda en granos menores de este tamaño tal y como se aprecia en la Fig. 12, que representa la curva granulométrica de esta molienda para Veta La Bruja, con lo que la densidad media de estos granos más pequeños aumenta para el mismo tamaño de inclusión aurífera; así en la molienda real llevada a cabo para los ensayos hay sólo un 4% aproximadamente de mena por encima de 0,25 mm y en cambio un 48% del peso está en granos menores de 0,125 mm. Por otro lado, el oro a veces está englobado en materiales sulfurados densos de mayor tamaño que contribuyen a aumentar la densidad media del grano, aunque al separarse conjuntamente disminuirá la ley en oro de dicho concentrado.

Por otra parte, en estas moliendas siempre se producen granos muy finos para los que el sistema de la mesa Wilfley es poco efectivo. Así en esta molienda hay un 18% de granos menores de 37 µm.

A la vista de este estudio se deduce que la molienda adecuada es de 0,25 mm y que la mena de Veta La Bruja, que es la que tiene mayores tamaños de grano del oro, ofrecerá mejores leyes de concentrado y menores pérdidas de oro, mientras que Veta Gruesa dará menores leyes en oro y mayores pérdidas en los estériles.

Las pruebas se han llevado a cabo utilizando una mesa de sacudidas tipo Wilfley y siguiendo un diagrama de flujo sencillo para poner más claramente de

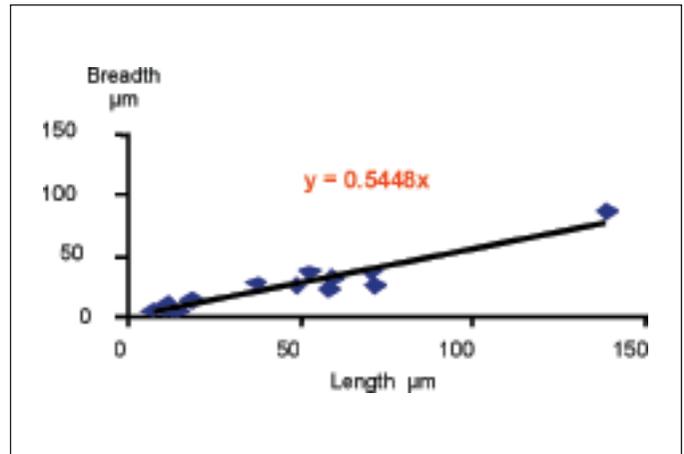


Fig. 11. Correlación entre anchura y diámetro para granos de Au en las Vetas Gruesa y Bruja

Fig. 11. Breadth - length correlation for gold grains from Bruja and Gruesa veins

Tamaño de grano (mm)	Tamaño de inclusión oro (mm)	Densidad media del grano (g/cm ³)
0,25	0,161	7,09
0,25	0,140	5,58
0,25	0,112	4,15
0,25	0,091	3,45
0,25	0,070	3,02
0,25	0,049	2,78
0,25	0,028	2,67
0,25	0,014	2,65

Tabla 4. Densidad media de los granos mixtos de cuarzo-oro según el tamaño de una única inclusión de oro, para granos de 0,25 mm
Table 4. Average density of quartz-gold mixed grains, according to the size of a unique gold inclusion, supposing a constant size of 0,25 mm for the mixed grains

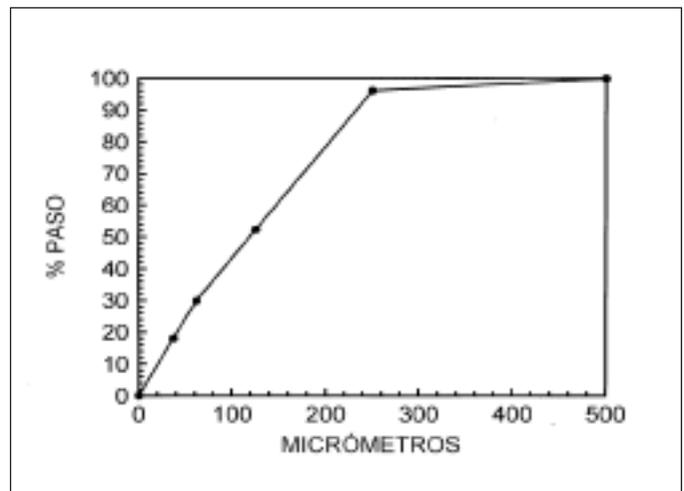


Fig. 12. Curva granulométrica a molienda 0,25 mm de la Veta Bruja
Fig. 12. Grain size distribution after 0,25 mm grinding, Bruja Vein

manifiesto el comportamiento de la mena. El diagrama de flujo está dado en la Fig. 13 y consiste en una operación de desbaste para obtener un primer concentrado basto y unos estériles definitivos y un posterior relavado o retratamiento del concentrado obtenido para obtener un concentrado final que denominaremos primer concentrado y unos mixtos, que denominaremos segundo concentrado, ya que por su ley en oro se pueden considerar como concentrados para operaciones posteriores, como por ejemplo de amalgamación. Los resultados se muestran en la Tabla 5 para la Veta La Bruja y en la Tabla 6 para la Veta Gruesa.

En las Tablas 5 y 6 se comprueban las predicciones. En la Veta La Bruja es posible obtener en el primer concentrado una ley en oro del 8,9 % con una recuperación del 23,22 %, que es aproximadamente la proporción de oro que en esta mena se encuentra en tamaños de alrededor de 0,161 mm, como se puede ver en la Fig. 9, lo que prueba su buena liberación y concentración a esta molienda inferior a 0,25 mm, así como que su presencia en un grano de ganga le hace destacar claramente en cuanto a densidad, como se ha expuesto en la Tabla 4.

Las pérdidas en el estéril son sólo del 4,8 % del oro total contenido, eliminándose el 71,7 % en peso de la mena, pero esto representa una ley en oro de 17,96 g/t, indicando que quedan granos mixtos de oro en el estéril con pequeña proporción de oro relativa dentro de dichos granos de forma que su densidad no es suficiente para separarlos del estéril. Esta proporción del 4,8 % concuerda con la proporción de oro que está en tamaños menores de unos 30 µm y que por lo

tanto no tienen influencia en la densidad promedio de la mayoría de los granos de ganga. El resto del oro que se encuentra en tamaños de grano intermedio influye lo suficiente en la densidad del grano portador como para no ir al estéril, pero no lo suficiente para destacarse claramente y quedan englobados en los mixtos, que hemos denominado segundo concentrado y donde va a parar el 71,98% del oro contenido y con una ley promedio de 683 g/t.

En el caso de la Veta Gruesa, por el menor tamaño de sus partículas de oro, es de esperar que la influencia de éstas sobre la densidad media de los granos de ganga sea menor y su resultado en la concentración

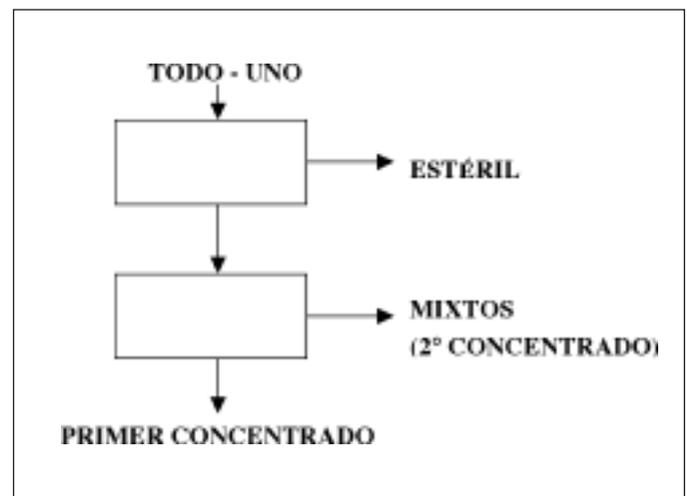


Fig. 13. Diagrama de flujo seguido en la concentración gravimétrica en mesa de sacudidas tipo Wilfley

Fig. 13. Flowchart for gravimetric concentration in a Wilfley table

Producto	% en peso	Ley en Au g/t	Ley en Ag g/t	% Recuper. Au	% Recuper. Ag
1º concentr.	0,07	88.885	25.877	23,22	9,71
2º concentr.	28,23	683,2	368	71,98	55,67
Estéril	71,70	17,96	90,12	4,80	34,62
TOTAL	100	267,96	186,6	100	100

Tabla 5. Concentración en mesa Wilfley de la mena de la veta la Bruja, molida a 0,25 mm

Table 5. Wilfley table concentración, Bruja vein ores, milled to 0,25 mm

Producto	% en peso	Ley en Au g/t	Ley en Ag g/t	% Recuper. Au	% Recuper. Ag
1º concentr.	0,04	22.595	8.256	20,75	2,55
2º concentr.	16,69	164	306	62,86	39,46
Estéril	83,27	8,57	90,12	16,39	57,99
TOTAL	100	43,55	129,42	100	100

Tabla 6. Concentración en mesa Wilfley de la mena de la veta Gruesa, molida a 0,25mm

Table 6. Wilfley table concentración, Gruesa vein ores, milled to 0,25 mm

también sea peor. Así sucede efectivamente y en el primer concentrado la recuperación del oro es del 20,75 %, pero su ley es sólo del 2,26 % en comparación con el 8,9 % de la Veta La Bruja. Y esto a pesar de su menor contenido en sulfuros, que en el caso de la Veta La Bruja se separan en el concentrado por su densidad cuando están liberados y tienden a diluir el oro. Esto es debido fundamentalmente a la falta de partículas de oro superiores a $91\mu\text{m}$ (Fig. 8).

Donde más se nota la influencia de los menores tamaños de las partículas de oro es en el estéril definitivo, a donde va a parar el 16,39 % del oro con una ley de 8,57 g/t. Este porcentaje de pérdidas coincide bastante bien con la cantidad de oro presente en tamaños de partícula menores a unas $30\mu\text{m}$, como se puede deducir de la Fig. 8. Como consecuencia de todo ello el segundo concentrado de esta mena también tiene una ley en oro inferior (164 g/t) y una menor recuperación (62,86 % en oro).

La observación microscópica del concentrado de la Veta La Bruja muestra que hay abundancia de granos de oro o mixtos de oro con sulfuros, siendo los minerales preponderantes los sulfuros y sólo una pequeña proporción de granos de cuarzo. La presencia masiva de los sulfuros es lo que hace descender la ley en oro al 8,9 %. En el concentrado de la Veta Gruesa se ve una menor abundancia de granos con oro de los cuales se ve mayor número de mixtos con sulfuros y algo más de cuarzo libre.

Conclusiones

La mina Nueva Esparta extrae menas auroargentíferas filonianas de alta ley y con granulometrías relativamente gruesas, particularmente en la Veta La Bruja.

La mena se compone de arsenopirita y freibergita, con esfalerita, galena, pirita, oro nativo/*electrum* y calcopirita subordinados y trazas de otras sulfosales y telururos, en ganga cuarzo-carbonatada de relleno hidrotermal, con sericita y minerales arcillosos subordinados.

El oro es en su mayor parte visible al microscopio óptico, ofreciendo así una posibilidad privilegiada de aplicación del método de análisis de imagen para la orientación del proceso mineralúrgico, con objeto de encontrar procesos alternativos para mejorar el rendimiento y controlar los graves problemas ambientales que produce el actual beneficio informal (artesanal) por amalgamación. No obstante, el microscopio óptico no permite determinar la composición del *electrum* (o de otras fases minerales de quimismo variable, como cobres grises), para lo que debe recu-

rrirse a microscopio o microsonda electrónicos. Una investigación en curso con CANMET (Ottawa, Canadá), permitirá una valoración crítica adicional de ambas técnicas (MEB y MOP), por comparación de los resultados respectivos.

Desde el punto de vista metodológico, la validez queda avalada tanto por los controles previos (pulido, derivas, luminosidad de la fuente, etc.) como por los resultados: funciones matemáticas de correlación de los parámetros (que permiten la predicción de un dato a partir de otros medidos en las menas) y control externo mediante comparación con datos químicos de los que resultan valores razonables (por ejemplo: para la Veta La Bruja 685 ppm frente a 649 ppm/Au equivalente por análisis químico).

Una ventaja adicional de la metodología (ADI) ensayada es que la digitalización de los datos permite una gran versatilidad para ofrecer resultados cuantitativos a cualquiera de las demandas posibles de información por parte del mineralurgista (área, perímetro, tamaños de grano, superficies específicas, etc.), una vez que se ha demostrado la posibilidad de deducción mediante funciones matemáticas verificadas experimentalmente. No obstante, sigue siendo necesario el examen previo (cualitativo) por parte de un experto microscopista para sentar los criterios de aplicación del método: por ejemplo, si las granulometrías del oro fueran muy finas, no sería fiable o representativo el estudio por microscopio óptico y habría que recurrir al microscopio electrónico.

Desde el punto de vista mineralúrgico los resultados obtenidos coinciden con los esperados a partir del ADI, obteniéndose en mesa Wilfley una recuperación del 95 % del oro contenido en muestra de Veta La Bruja y del 84 % en Veta Gruesa, con molienda a 0.25 mm, con pérdida únicamente del 4 % y 16 %, respectivamente. De esta forma, se pone de manifiesto la posibilidad de obtener concentrados viables por gravimetría, disminuyendo el peligroso impacto ambiental de la amalgamación o cianuración al tener que tratar una cantidad muchísimo menor que la inicial.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Corpo Nariño-Colombia la aportación de las muestras estudiadas y al profesor F. Elorza, su asesoramiento en el tratamiento matemático de los datos. Asimismo, al Dr Pablo Gumiel (IGME) y a un censor anónimo sus revisiones críticas del manuscrito y sugerencias. El trabajo realizado en la UPM ha sido posible mediante la cofinanciación de los Proyectos GR92-0135, UE95-0007 y UE98-0027 del

Ministerio de Educación y Cultura (MEC), España y el apoyo de los programas ALFA/UE (C.T. ALR/B73011/94.04-6.0025.9) y CYTED (Subprograma XIII-Tecnología Mineral, Red XIII-B: Metales Preciosos).

Referencias

- Berrezueta, E. 2000. *Aplicación del Análisis Digital de Imagen a la investigación tecnológica de menas auríferas. Nariño. Colombia*. Tesis de Master. E.T.S.I. de Minas. Universidad Politécnica de Madrid, 100 pp. (no publicada).
- Castroviejo, R., Chacón, E., Múzquiz, C., Tarquini S. 1999 (a). A preliminary Image Analysis characterization of massive sulphide ores from the SW Iberian Pyrite Belt (Spain). *Geovision 99, Int. Symp. on Imaging Appl. in Geology*, Univ. Liège, Belgium, 37-40.
- Castroviejo, R., López, A., Múzquiz, C., Pirard, E. 1999 (b). Modal Image Analysis of metallic sulphide ores from the SW Iberian Pyrite Belt (Spain). *Geovision 99, Int. Symp. on Imaging Appl. in Geology*, Univ. Liège, Belgium, 41-44.
- Gebre-Mariam, M., Hagemann, S. G. y Groves, D. I. 1995. A classification scheme for epigenetic Archaean lode-gold deposits. *Mineral. Deposit*, 30, 408-410.
- Murcia, L. y Cepeda, H. 1991. *Mapa Geológico de Colombia: Memoria, Plancha 410* - La Unión (Departamento de Nariño), Escala. 1:100.000. INGEOMINAS, Bogotá.
- Pantoja, F. 1999. *Optimización del proceso de amalgamación en la pequeña minería del oro: mejora de la recuperación y disminución de las pérdidas de mercurio*. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Autónoma de Madrid, (no publicada).
- Russ, J. C. 1990. *Computer-Assisted Microscopy. The measurement and analysis of images*. Plenum Press, New York, 450 pp.
- Shaw, R. 2000. Gold in Colombia. *Comm. 4th. Internat. Gold Symposium*, Lima, Perú.
- Taggart, A. F. 1945. *Handbook of Mineral Dressing*. Willey, New York.
- Wills, B. A. 1988. *Mineral Processing Technology*. Pergamon Press, Oxford.

Recibido: Julio 2001

Aceptado: Septiembre 2002